



**PENJAMINAN &
INFRASTRUKTUR**
Guarantee & Infrastructure



UNIVERSITAS GADJAH MADA
PUSAT STUDI TRANSPORTASI DAN LOGISTIK

KAJIAN KRITIS PEMBANGUNAN JALAN TOL DI INDONESIA

Pengelolaan Aspek Teknis dalam Perancangan dan Pembangunan Jalan Tol

Editor

Wimpy Santosa

Danang Parikesit

Yuki M.A. Wardhana

Dewanti

Amelia Makmur

Saftilah

Dwi Ardianta Kurniawan



SERI BUKU
KAJIAN KRITIS PEMBANGUNAN
JALAN TOL DI INDONESIA

Pengelolaan Aspek Teknis dalam Perancangan dan Pembangunan Jalan Tol

Editor:

**Wimpy Santosa
Danang Parikesit
Yuki M.A Wardhana
Dewanti
Amelia Makmur
Safrihah
Dwi Ardianta Kurniawan**



**PENJAMINAN &
INFRASTRUKTUR**
Guarantee & Infrastructure

SERI BUKU
KAJIAN KRITIS PEMBANGUNAN
JALAN TOL DI INDONESIA

Pengelolaan Aspek Teknis dalam Perancangan dan Pembangunan Jalan Tol

Pertama kali diterbitkan dalam bahasa Indonesia oleh:

PT Penjaminan Infrastruktur Indonesia (Persero)
Capital Place, 7-8 Floor Jl. Gatot Subroto No. Kav 18, RT. 6/RW. 1, Kuningan Barat, Kec. Mampang Prapatan,
Kota Jakarta Selatan, Telp./Fax: +62 21 5795 0550/ +62 21 5795 0040
www.ptpii.co.id | info@iigf.co.id

bekerjasama dengan

Pusat Studi Transportasi dan Logistik (Pustral), Universitas Gadjah Mada
Jl. Kemuning Blok M-3, Sekip, Mlati, Sleman, D.I Yogyakarta 55284
Telp./Fax: +62-274-556928/ +62-274-552229
www.pustral.ugm.ac.id | pustral@ugm.ac.id

Perancang Sampul : **Muhammad Fadri Syarif**
Sumber Foto : **Humas Badan Pengatur Jalan Tol, Kementerian PUPR**

Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang. Dilarang mengutip dan memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit.

Ukuran : **15,5 × 23 cm; x + 288 hlm**
ISBN : **978-623-92614-4-3**
Cetakan pertama : **Juni 2023**
Hak Penerbitan : **PT Penjaminan Infrastruktur Indonesia (Persero) dan Pusat Studi Transportasi Logistik (Pustral) UGM**

Sanksi Pelanggaran Pasal 113 Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

- (1) Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
- (2) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- (3) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/ atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- (4) Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

Sambutan



M. Basuki Hadimuljono Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR)

Kementerian PUPR melaksanakan pembangunan jalan tol yang bertujuan untuk meningkatkan konektivitas multimoda bagi pelayanan sistem logistik nasional yang lebih efisien untuk mendukung pertumbuhan ekonomi dan meningkatkan daya saing. Untuk itu pembangunan jalan tol dikaitkan dengan pengembangan kawasan-kawasan produktif, seperti kawasan industri, pariwisata, bandara, pelabuhan untuk meningkatkan kelancaran logistik.

Hingga tahun 2014 sepanjang 790 km jalan tol telah beroperasi. Pada periode 2015-2019 telah berhasil diselesaikan sepanjang 1.298 km termasuk tersambunginya Tol Trans Jawa dan dimulainya pembangunan Jalan Tol Trans Sumatera sebagai tulang punggung perekonomian nasional. Selanjutnya, pada periode 2020-2024, ditargetkan penambahan jalan tol beroperasi sepanjang 1.567 km, hingga Mei 2023, telah selesai sepanjang 535,5 km.

Capaian tersebut menunjukkan tingginya minat investor baik dari dalam maupun luar negeri seiring dengan membaiknya iklim investasi di Indonesia. Selain upaya untuk menarik investor menanamkan modalnya dalam pembangunan infrastruktur jalan tol, Kementerian PUPR terus memberikan perhatian pada peningkatan kualitas jalan serta pelayanan di tempat istirahat dan pelayanan. Saya juga telah meminta Badan Usaha Jalan Tol (BUJT) untuk meningkatkan estetika desain dan mengadopsi prinsip keberlanjutan lingkungan.

Implementasi teknologi digital untuk sistem transaksi dan sistem operasi jalan tol telah kita mulai dengan suksesnya migrasi dari transaksi tunai menjadi non-tunai di tahun 2017 dan akan dilanjutkan dengan penerapan *Multi Lane Free Flow* (MLFF) atau transaksi nirsentuh yang akan dimulai pada akhir 2023. Kami menyambut baik inisiatif dari PT Penjaminan Infrastruktur Indonesia dan Universitas Gadjah Mada dalam menyusun dan melakukan sintesis atas berbagai pengalaman pembangunan jalan tol yang terangkum dalam buku "Kajian Kritis Pembangunan Jalan Tol di Indonesia" ini. Saya sangat menghargai upaya para pakar berbagai perguruan tinggi Indonesia yang terlibat dalam penulisan buku ini. Untuk itu, saya menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya untuk pemrakarsa, penulis, dan editor buku ini.

Saya meyakini buku ini akan dapat menambah khazanah pengetahuan tentang pembangunan jalan tol di Indonesia. Besar harapan saya, semoga buku ini menjadi sumber inspirasi dan menambah literatur bagi para *engineer*, akademisi, dan masyarakat umum dalam pembangunan infrastruktur jalan tol saat ini dan di masa yang akan datang.

Selamat membaca.

Dr. Ir. M. Basuki Hadimuljono, M.Sc
Menteri
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR)

Sambutan



M. Wahid Sutopo
Direktur Utama
PT Penjaminan Infrastruktur
Indonesia (Persero)

PT Penjaminan Infrastruktur Indonesia (Persero)/ PT PII senantiasa berkomitmen mendukung pembangunan infrastruktur berkelanjutan dengan skema pembiayaan inovatif, salah satunya melalui skema kerja sama Pemerintah dengan Badan Usaha (KPBU). Sebagai salah satu *Special Mission Vehicle* (SMV) Kementerian Keuangan RI, PT PII memiliki mandat dukungan terhadap pengembangan proyek KPBU melalui Penjaminan Pemerintah. Dukungan ini terus kami upayakan untuk memberikan kepastian serta kenyamanan bagi pihak swasta dalam berinvestasi pada sektor proyek KPBU termasuk proyek Jalan Tol.

Sampai dengan Mei 2023, PT PII telah memberikan penjaminan pada 15 proyek Jalan Tol dengan nilai investasi sebesar Rp197,3 triliun. Adapun 15 proyek Jalan Tol tersebut adalah Jalan Tol Batang – Semarang, Balikpapan – Samarinda, Pandaan – Malang, Manado – Bitung, Jalan tol layang MBZ Sheikh Mohamed Bin Zayed, Krian – Legundi – Bunder – Manyar, Cileunyi – Sumedang – Dawuan, Serang – Panimbang, Probolinggo – Banyuwangi, Jakarta – Cikampek II Sisi Selatan, Semarang – Demak, Solo – Yogyakarta – NYIA Kulon Progo, Yogyakarta – Bawen, Gilimanuk – Mengwi dan Jalan Tol Akses Patimban.

Buku Kajian Kritis Pembangunan Jalan Tol di Indonesia ini disusun dengan harapan dapat menjadi referensi yang tepat dalam membahas isu-isu pengelolaan risiko pada tarif secara komprehensif serta tata kelola yang baik. Bagi PT PII, buku ini merupakan langkah nyata manajemen pengetahuan yang kami lakukan, dan merupakan bentuk kontribusi dalam berbagi pengalaman praktis. Buku ini diharapkan dapat memperluas wawasan para pemangku kepentingan, serta menjadi referensi penting dalam pengambilan keputusan, khususnya yang terkait penyediaan infrastruktur jalan tol di Indonesia.

Kami berterima kasih kepada berbagai pihak yang telah berkolaborasi dalam penyusunan buku ini, yaitu Pusat Studi Transportasi dan Logistik (Pustral) UGM sebagai institusi mitra, para penulis, tim *review* dan editor, serta BPJT yang telah menyediakan data-data riset dan informasi pendukung dalam penulisan buku ini. Kami harapkan kerjasama seluruh pihak dalam penyusunan buku ini terus berkesinambungan, sebagai bentuk kolaborasi produktif antara dunia akademis maupun praktis.

M. Wahid Sutopo
Direktur Utama
PT Penjaminan Infrastruktur Indonesia (Persero)

Sambutan



Ova Emilia
Rektor
Universitas Gadjah Mada

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Sejak diperkenalkan pertama kali di Indonesia, jalan tol atau jalan bebas hambatan dirancang untuk mendukung cita-cita pembangunan, pertumbuhan ekonomi, serta perluasan pemerataan pembangunan di berbagai wilayah. Keberadaan jalan tol juga berpotensi untuk membuka dan memperluas perputaran roda ekonomi agar semakin terdesentralisasi secara lebih cepat. Hal ini tentu selaras dengan kepentingan untuk menjawab peningkatan pertumbuhan ekonomi dan perluasan pasar termasuk pemerataan serta keadilan pembangunan. Semakin luas keterhubungan antar daerah dengan penyediaan jalur akses daerah yang memadai, maka percepatan pembangunan daerah yang selama ini tertutup akan semakin terbuka.

Data menunjukkan bahwa pada periode 2014–2022 jalan tol di Indonesia mengalami peningkatan yang signifikan, dengan pertumbuhan rata-rata 13,44% per tahun atau hampir dua kali lipat dibandingkan dengan periode sebelumnya. Setiap pembangunan jalan tol ini selalu mempertimbangkan pola tata ruang terutama rencana jalan yang tidak terlepas dari aspek ekonomi, sosial budaya, maupun lingkungan sebagai satu kesatuan proses berkelanjutan. Pengembangan jalan tol juga terkait dengan berbagai isu yang cukup kompleks, seperti mekanisme pendanaan, penjaminan risiko, regulasi, pengembangan teknologi, hingga keanekaragaman hayati. Melihat kompleksitas permasalahannya, maka berbagai isu pengembangan infrastruktur jalan tol ini bisa menjadi sebuah topik menarik untuk dikaji dan didokumentasikan sebagai bagian dari upaya pengembangan pengetahuan.

Universitas Gadjah Mada selalu mendorong segenap *civitas academica* untuk menghasilkan karya yang bermanfaat bagi masyarakat luas. Oleh karenanya, Saya atas nama Universitas Gadjah Mada sangat mengapresiasi penerbitan buku “Kajian Kritis Pembangunan Jalan Tol di Indonesia” yang berhasil meramu narasi para penulis dari dari berbagai Perguruan Tinggi maupun instansi terkait mengenai tematik jalan tol dalam rentang tahun 1978-2022 dari berbagai perspektif keilmuan.

Buku yang diinisiasi oleh Prof. Dr. Techn. Ir. Danang Parikesit, M.Sc., IPU., ASEAN.Eng., dosen Fakultas Teknik UGM ini merupakan buku pertama yang membahas jalan tol secara komprehensif. Kerja keras dan dedikasi dari para penulis maupun semua pihak yang mendukung penyusunan buku ini layak untuk diapresiasi. Melalui buku kajian kritis yang tersaji secara komprehensif dalam 3 volume ini, para penulis telah berupaya untuk menarasikan tentang kebijakan pembangunan jalan tol: dulu, kini, dan masa yang akan datang, pengelolaan aspek teknis dalam perancangan dan pembangunan, serta pelaksanaan operasi dan pemeliharaan jalan tol.

Saya mengucapkan selamat dan memberikan penghargaan setinggi-tingginya kepada Pusat Studi Transportasi dan Logistik (Pustral) UGM dan PT Penjaminan Infrastruktur Indonesia (PT PII) yang telah berkolaborasi mengawal proses penulisan buku ini sejak inisiasi gagasan hingga diterbitkan. Semoga buku ini bermanfaat dan mampu menjadi bahan bacaan serta rujukan ilmiah dalam pengembangan infrastruktur, khususnya pembangunan jalan tol di Indonesia.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Prof. dr. Ova Emilia, M.Med., Ed., Sp. OG(K), Ph.D.
Rektor
Universitas Gadjah Mada

Kata Pengantar

Buku kedua dari buku seri Kajian Kritis Pembangunan Jalan Tol di Indonesia ini banyak membahas mengenai kajian *engineering* dari suatu jalan tol. Kajian didasarkan pada pengalaman para pakar dalam mengatasi permasalahan-permasalahan yang dijumpai dalam pembangunan dan pengoperasian jalan tol.

Buku kedua ini diawali oleh peran jalan tol dengan pengembangan kawasan ekonomi wilayah. Selain mengacu kepada teori *transport modelling*, khusus untuk jalan tol juga harus dibahas aspek ekonomi-finansial apakah pembangunan jalan tol akan memberikan dampak positif bagi wilayah di sekitarnya atau tidak. Aspek ekonomi sangat dipengaruhi apakah *generated traffic* dapat muncul akibat jalan tol, dan perlu waktu berapa lama? Karena setiap ruas jalan tol yang dibangun akan mempunyai karakteristik masing-masing, tergantung kepada lingkungan dimana jalan tol tersebut dibangun. Yang jelas, kondisi di Pulau Jawa akan berbeda kondisi luar Jawa, terutama ditinjau dari jumlah dan kepadatan penduduknya. Ditambah dengan distribusi dan persentase tingkat penghasilan atau *income* dari para pengguna jalan tol tersebut. Selain itu juga apakah jalan tol akan berinteraksi dengan fasilitas infrastruktur lainnya seperti bandara dan pelabuhan. Hal ini akan menjadi tambahan pemicu tingkat pertumbuhan lalu lintas yang akan menggunakan jalan tol tersebut.

Pada bagian kedua, dibahas apakah hasil perancangan dan desain jalan tol dapat sepenuhnya diterapkan di lapangan? Apakah desain jalan tol bisa disamakan dengan jalan arteri/kota? Setelah aspek desain normatif dibahas secara singkat, baru dilanjutkan dengan berbagai aspek teknis yang dijumpai dalam studi kasus desain geometri jalan tol, yaitu Simpang Susun Waru di Surabaya. Salah satu aspek teknis yang bisa dibahas adalah bentuk simpang susun yang dipilih, apakah dapat disesuaikan dengan kondisi topografis dan juga luas wilayah yang berhasil dibebaskan.

Pada bagian ketiga dibahas mengenai Teknologi BIM (*Building Information Modelling*), yang merupakan konsep pengembangan jalan tol di masa depan. Bisa diterapkan pada bagian awal, yaitu pada tahap perencanaan dan perancangan, atau juga diterapkan pada tahap operasionalisasi jalan tol.

Bagian keempat merupakan suatu case study yang sering dijumpai dalam pembangunan jalan secara umum dan jalan tol secara khusus, yang pada saat ini sudah bisa diatasi dan ditangani oleh para pakar dalam bidang geoteknik, yaitu pembangunan jalan tol di atas tanah lunak atau *soft soils*.

Bagian kelima membahas mengenai perencanaan dan pembangunan jembatan pada jalan tol yang tidak berbeda jauh dengan jembatan pada jalan non-tol. Yang penting dari aspek *safety* dan kenyamanan yang perlu ditingkatkan, khusus untuk kendaraan bermotor dengan kecepatan tinggi. Demikian pula dengan perencanaan simpang susun, dimana bentuknya harus disiapkan dengan baik, untuk mengakomodir lalu lintas dengan kecepatan yang tentunya sedikit lebih tinggi dari simpang susun jalan non-tol.

Bagian keenam membahas penerapan teknologi terbaru dalam pemantauan muka tanah timbunan untuk jalan tol, khusus dalam selama periode konstruksi. Karena dampak settlement pada permukaan tanah akan berdampak pada penurunan permukaan jalan tol, yang akan berbahaya bagi pengemudi kendaraan dengan kecepatan tinggi.

Bagian ketujuh membahas mengenai konsep *sustainability* dari jalan tol, khusus yang berskala besar yang bersifat mengintegrasikan konsep ekonomi dan prinsip konservasi lingkungan yang ada disekitarnya, secara khusus, yaitu dalam mempertahankan keanekaragaman hayati di wilayah proyek jalan tol, dan lebih khusus lagi pada lokasi jalan tol dengan nilai konservasi yang tinggi, seperti contohnya pada wilayah Banyuwangi.

Bagian kedelapan membahas mengenai aspek lanskap pada jalan tol, terutama pada jalan tol yang akan dan sudah beroperasi. Selain aspek-aspek teknis pada jalan tol, aspek non-teknis juga perlu direncanakan secara lebih baik, sehingga pengguna jalan tol merasa lebih aman dan nyaman dalam menggunakannya, terutama yang berkaitan dengan aspek biaya yang harus dibayar oleh pengguna jalan tol tersebut.

Bagian kesembilan membahas tentang peranan Tempat Istirahat dan Pelayanan atau rest area pada jalan tol yang tidak dapat dihindarkan, terutama pada jalan tol yang sangat panjang, misalnya Jalan Tol Trans Jawa. Lokasi yang tepat dan desain yang baik dan nyaman, bisa menjadi daya tarik bagi para pengguna jalan tol tersebut untuk beristirahat dan melepaskan lelah.

Demikian secara singkat pengantar dan tanggapan dari berbagai kajian teknis dalam buku kedua buku seri Kajian Kritis Pembangunan Jalan Tol di Indonesia ini. Semoga dapat bermanfaat bagi para pembaca. Lebih dan kurangnya harap dimaklumi.

Wassalam,

Prof. Dr. Ir. Bambang Sugeng Subagio, D.E.A.
**Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung**

Ucapan Terima Kasih

Assalamualaikum, Wr, Wb.

Menyusun buku merupakan kerja yang memerlukan konsentrasi serta pemikiran yang mendalam. Oleh karena itu, terbitnya sebuah buku harus selalu diapresiasi, apalagi ketika buku tersebut melibatkan begitu banyak pihak dalam proses produksinya. Buku Kajian Kritis Pembangunan Jalan Tol di Indonesia ini patut diapresiasi lebih, karena merupakan hasil kolaborasi dari berbagai pihak, yaitu perguruan tinggi, BUMN, serta instansi pemerintah. Saya selaku Kepala Pusat Studi Transportasi dan Logistik (Pustral) UGM yang diberi amanah untuk mengoordinasikan penerbitan buku ini patut menyampaikan terima kasih kepada berbagai pihak atas peran penting yang diberikan.

Ucapan terima kasih pertama-tama saya sampaikan kepada PT Penjaminan Infrastruktur Indonesia (PII) yang telah mendukung penuh penerbitan buku ini dari awal hingga akhir. Terima kasih disampaikan kepada Bapak M. Wahid Sutopo selaku Dirut PT PI, Bapak Andre Permana selaku Direktur Bisnis dan Ibu Ratna Widianingrum selaku Kepala Divisi IIGF Institute. Terima kasih juga disampaikan kepada tim pendukung yaitu Ibu Ayum Andar, Saudara Roihans Muhammad Iqbal dan seluruh staf atas segala dukungannya.

Terima kasih dan selamat tentu saya sampaikan kepada para penulis yang telah mencurahkan pengetahuan, pengalaman, dan pemikirannya untuk dituliskan dalam buku ini. Dalam catatan saya, terdapat lebih dari 75 penulis dalam buku yang terdiri dari 3 volume ini. Para penulis bukan hanya berasal dari perguruan tinggi, namun juga kalangan birokrat dan pelaku usaha. Kolaborasi ini tentu sangat membesarkan hati, yang diharapkan akan terus berlanjut di masa mendatang.

Secara khusus, terima kasih saya sampaikan kepada Prof Danang Parikesit selaku inisiator dan koordinator penulisan, sehingga mampu mengangkat beragam tema dengan beragam perspektif dari beragam pakar di bidangnya. Hal ini tentu tidak terlepas dari pengalaman panjang Beliau selama menjabat Kepala Badan Pengatur Jalan Tol (BPTJ) Kementerian PUPR. Terima kasih sudah melibatkan Pustral UGM dalam penyusunan buku yang berharga ini.

Karya yang baik tentu tidak terlepas dari adanya *review* yang mumpuni. Oleh karena itu, saya menyampaikan terima kasih kepada Tim Mitra Bestari, baik dari kalangan internal maupun eksternal. Tim Mitra Bestari internal terdiri atas Prof Suyono Dikun, Prof Bambang Sugeng Subagio, dan Prof Yudi Aziz yang berasal dari kalangan akademisi. Adapun Tim Mitra Bestari eksternal berasal dari birokrat di Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), Kementerian Keuangan, dan Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas) serta akademisi. Beliau-beliau adalah Bapak Herry Trisaputra Zuna, Bapak Eka Pria Anas, Bapak Koentjahjo Pambudi, Bapak Brahmantio Isdijoso, Prof. Priyo Suprobo, Bapak Sri Bagus Guritno, Bapak Farid Arif Wibowo, Ibu Reni Ahiantini, dan Bapak Sudiro Roi Santoso.

Finalisasi tulisan tentu memerlukan ketelitian dan ketelatenan untuk memeriksa kualitas tulisan, serta kesesuaian format penulisan. Oleh karena itu, terima kasih juga disampaikan kepada Tim Editor yang berasal dari berbagai perguruan tinggi, diketuai oleh Prof Wimpy Santosa, yang telah memfinalisasi naskah tulisan sehingga siap untuk diterbitkan.

Terakhir, saya menyampaikan terima kasih kepada manajemen dan staf di Pustral UGM yang telah menjalankan tugas dengan baik untuk mendukung penerbitan buku ini. Terima kasih disampaikan kepada Ibu Dewanti selaku Sekretaris Pustral, Bapak Dwi Ardianta Kurniawan selaku penanggungjawab, serta para pendukung, yaitu Bapak Sadudin, Bapak Hafid Lastito, Ibu Tri Listiati, Saudari Nafianty Fitria Mayasari dan Saudari Triana Pungkasari.

Saya berharap buku ini menjadi referensi yang bermanfaat untuk pengembangan jalan tol di masa mendatang. Terima kasih.
Wassalamualaikum Wr, Wb.

Ir. Ikaputra, M.Eng., Ph.D.
**Kepala Pusat Studi Transportasi dan Logistik (Pustral),
Universitas Gadjah Mada**

Daftar Isi

SERI BUKU KAJIAN KRITIS PEMBANGUNAN
JALAN TOL DI INDONESIA

PENGELOLAAN ASPEK TEKNIS DALAM PERANCANGAN DAN PEMBANGUNAN JALAN TOL

III

Sambutan

Menteri
Kementerian Pekerjaan Umum
dan Perumahan Rakyat

IV

Sambutan

Direktur Utama
PT Penjaminan Infrastruktur Indonesia

V

Sambutan

Rektor
Universitas Gadjah Mada

VI

Kata Pengantar

Bambang Sugeng Subagyo
Institut Teknologi Bandung

VIII

Ucapan Terima Kasih

Kepala Pusat Studi Transportasi dan Logistik
Universitas Gadjah Mada

1

Pemodelan Lalulintas Jalan Tol Manado - Bitung dan Rencana Pengembangan Kawasan Ekonomi Khusus Bitung
Semuel Yacob Recky Rompis

19

Evaluasi Perancangan Geometri Jalan Tol pada Simpang Susun Waru Surabaya
Ludfi Djakfar dan Hendi Bowoputro

53

Teknologi *Building Information Modelling* dalam Manajemen Konstruksi Jalan Tol di Indonesia
Biemo W. Soemardi dan Reini D. Wirahadikusumah

85

***Trial Embankment* sebagai Langkah Awal Verifikasi dan Evaluasi Performa *Vacuum Preloading* pada Pekerjaan Perbaikan Tanah di Jalan Tol Palembang-Indralaya**
Herwan Dermawan, Masyhur Irsyam, Arie Setiadi Moerwanto, Rizal Soetjipto, Idwan Suhendra, dan Marcello Djunaedi

127

Strategi Mitigasi Penurunan Jalan Pendekat Jembatan
Hary Christady Hardiyatmo

Daftar Isi

SERI BUKU KAJIAN KRITIS PEMBANGUNAN
JALAN TOL DI INDONESIA

PENGELOLAAN ASPEK TEKNIS DALAM PERANCANGAN DAN PEMBANGUNAN JALAN TOL

163

Implementasi Teknologi *Global Navigation Satellite Systems*
dalam Pemantauan Tanah Timbunan Jalan Tol
Semarang-Demak
Yudo Prasetyo

185

Kajian Pergerakan Satwa Dilindungi pada Proyek Jalan Tol
Probolinggo – Banyuwangi
Satyawan Pudyatmoko, Andriana Kumalasari, dan Arief Budiman

227

Aspek Lanskap pada Pertemuan Dua Ruas Jalan Tol
Herfa Memori, Nizar Nasrullah, dan Akhmad Arifin Hadi

257

Desain Tempat Istirahat dan Pelayanan Banjaratma KM 260
dan Salatiga KM 456A-B sebagai Unsur Nilai Tambah
dalam Pelayanan Jalan Tol
Ikaputra dan Dyah Titisari Widyastuti



KAJIAN KRITIS PENGEMBANGAN JALAN TOL DI INDONESIA

Pengelolaan Aspek Teknis dalam Perancangan dan Pembangunan Jalan Tol

PEMODELAN LALULINTAS JALAN TOL MANADO-BITUNG DAN RENCANA PENGEMBANGAN KAWASAN EKONOMI KHUSUS BITUNG

Semuel Y. R. Rompis

Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi

PENDAHULUAN

Manado yang merupakan ibukota Provinsi Sulawesi Utara memiliki luas total wilayah sebesar 159,02 km² dan jumlah penduduk 453.179 jiwa (BPS Kota Manado, 2023), menjadikannya kota kedua terbesar di Sulawesi setelah Makassar. Di arah timur Kota Manado terdapat Kota Bitung yang berjarak sekitar 45 km. Kota Bitung merupakan kota industri perikanan yang memiliki perkembangan cepat karena adanya pelabuhan laut.

Karena potensi yang dimiliki oleh kedua kota di Sulawesi Utara ini, maka Pemerintah Republik Indonesia memutuskan untuk membentuk kawasan Manado-Bitung sebagai sebuah kawasan andalan menjadi pusat pertumbuhan ekonomi di Kawasan Timur Indonesia. Hal ini dilakukan berdasarkan Keputusan Presiden Nomor 89 Tahun 1996 yang kemudian disempurnakan dengan Keputusan Presiden Nomor 9 Tahun 1998 tentang Pembentukan Kawasan Pengembangan Ekonomi Terpadu (KAPET). Dengan berkembangnya otonomi daerah, Keputusan Presiden tersebut disempurnakan lagi dengan Keppres Nomor 150 Tahun 2000.

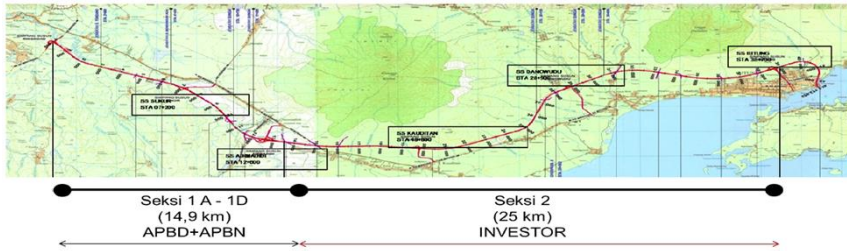
Wilayah KAPET Manado-Bitung meliputi Kota Manado (Ibukota Provinsi Sulawesi Utara), Kota Bitung, serta sebagian Kabupaten Minahasa, dengan cakupan wilayah seluas 251.138 ha. Kawasan ini memiliki kawasan berikat seluas 350 ha. Pembentukan KAPET Manado-Bitung bertujuan mendorong dan mengembangkan potensi wilayah untuk percepatan pertumbuhan ekonomi, meminimasi disparitas antarwilayah, mengakomodasi, dan menjalin kerjasama regional antarnegara ASEAN. Kerjasama bilateral antarnegara tersebut meliputi Brunei Darussalam-Indonesia-Malaysia-Philippina yang merupakan East ASEAN Growth Area (BIMP-EAGA), terdiri atas negara-negara ASEAN di wilayah bagian timur. KAPET Manado-Bitung dapat dicapai melalui Bandara Internasional Sam Ratulangi di Manado, yang juga merupakan pintu gerbang masuk ke Indonesia dari bagian utara.

Salah satu isu strategis KAPET Manado-Bitung adalah percepatan pembangunan Pelabuhan Bitung untuk mendukung pelayaran ekspor Bitung dan Singapura, serta penyediaan lahan kawasan industri. Pelabuhan Bitung direncanakan menjadi *International Hub Port* (IHP) dan telah disetujui untuk masuk dalam *Masterplan Percepatan Perluasan Pengembangan Ekonomi Indonesia* (MP3EI). Dalam perkembangannya, berdasarkan Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 32 Tahun 2014 dibentuklah Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Bitung untuk mengembangkan kegiatan perekonomian pada wilayah Bitung yang dianggap bersifat strategis bagi pengembangan ekonomi nasional. KEK Bitung ini memiliki luas 534 ha, terletak di Kecamatan Matuari, Kota Bitung, Provinsi Sulawesi Utara, terdiri atas zona industri, zona logistik dan zona pengolahan ekspor. Berdasarkan kondisi tersebut di atas, maka pemerintah menganggap perlu untuk membangun infrastruktur transportasi, yaitu Jalan Tol

Manado-Bitung untuk mendukung percepatan pertumbuhan ekonomi di kawasan Manado-Bitung dan di kabupaten/kota yang ada di sekitar kawasan ini.

Sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 26 Tahun 2008 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Nasional Lampiran II, Pusat Kegiatan Nasional (PKN) yang berada di wilayah Provinsi Sulawesi Utara meliputi Kawasan Perkotaan Manado-Bitung. Oleh karena itu, jalan tol pertama di provinsi ini dibangun pada kawasan Manado-Bitung, tepatnya pada koridor Kota Manado, Kabupaten Minahasa Utara, dan Kota Bitung.

Ruas Jalan Tol Manado-Bitung merupakan jalan alternatif dari jalan nasional Manado-Bitung. Dari titik nol (titik awal) yang berada di Ring Road I Manado hingga titik 14,9 km dari titik nol yang berada di wilayah Airmadidi, trase jalan tol berada di sebelah selatan Jalan Nasional Manado-Bitung. Sementara itu dari titik 14,9 km hingga titik akhir trase berada di sebelah utara Jalan Nasional Manado-Bitung. Trase diawali dari Manado Ring Road I, kemudian bergerak ke arah tenggara menuju wilayah Kauditan, melewati wilayah Sukur, Airmadidi, Kauditan, Danowudu dan berakhir di sekitar Pelabuhan Bitung. Jalan tol ini terdiri atas dua bagian yaitu seksi 1 dan seksi 2. Seksi 1 dibangun dengan pembiayaan APBD dan APBN sedangkan seksi 2 dibangun dengan skema Kerjasama Pemerintah dengan Badan Usaha (KPBU). Gambar 1 menunjukkan peta situasi rencana Jalan Tol Manado-Bitung.



Sumber: Lengkey (2016)

Gambar 1 Layout Rencana Jalan Tol Manado Bitung

Data teknis Jalan Tol Manado-Bitung dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Data Teknis Jalan Tol Manado-Bitung

No.	Data	Nilai
1	Panjang	39,90 km
2	Volume Lalu Lintas Gol.1 (2019)	12.999 (kend/hari)
3	Tarif Tol Awal Gol 1 (2019)	Rp900/km
4	Biaya Konstruksi	Rp3,27 triliun
5	Biaya Investasi	Rp5,12 triliun
6	Masa Konsesi	40 tahun
7	IRR <i>on Project</i>	12,56%
8	Pengembalian Investasi Pemerintah	Rp356,8 M (nilai tahun 2015)
9	Nilai Dana Talangan Tanah	Rp816 miliar

Sumber: Lengkey (2016)

Jalan Soekarno sebagai Jalan Pesaing Jalan Tol Manado-Bitung

Pada tahun 2004 telah dilaksanakan kegiatan *Pre-Feasibility Study* Jalan Tol Manado-Bitung yang dibiayai oleh dana APBN pada Bagian Proyek Pembinaan Jalan dan Jembatan Tol, Direktorat Jenderal Prasarana Wilayah, Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. Studi ini mengusulkan 2 alternatif koridor jalan Tol.

Alternatif yang pertama, koridor jalan tol melewati sisi utara Gunung Klabat dan yang kedua melewati bagian selatan Gunung Klabat. Pada kedua alternatif ini, koridor jalan tol berada pada sisi utara jalan nasional Manado-Bitung. Tahun 2006, juga dengan dana pemerintah diadakan *Feasibility Study* dan Amdal Jalan Tol Manado-Bitung. Usulan rute jalan tol pada tahap ini merupakan pendalaman geometris dari usulan koridor jalan pada tahap *pre-feasibility study*.

Sekitar tahun 2010, Pemerintah Kabupaten Minahasa Utara meminta trase jalan di sebelah utara jalan nasional Manado-Bitung dari Manado Ring Road II sampai Airmadidi yang awalnya direncanakan sebagai trase Jalan Tol Manado-Bitung segmen I, menjadi jalan nasional di daerah Minahasa Utara yang membentang dari arah timur ke barat. Permintaan ini dikabulkan sehingga berdasarkan Keputusan Gubernur Sulawesi Utara Nomor 82 Tahun 2012 tentang penetapan lokasi pembangunan Jalan Tol Manado-Bitung, trase Jalan Tol Manado Bitung seksi I yang awalnya berada di sebelah utara jalan nasional Manado-Bitung dipindahkan ke sebelah selatan jalan. Jalan baru tersebut, yang kemudian diberi nama Jalan Soekarno, dibangun menggunakan APBN dan APBD Kabupaten Minahasa Utara. Pada tahap awal pembangunan, Jalan Soekarno dimulai dari kantor Bupati Minahasa Utara dan berakhir di Jalan *By Pass* Worang Minahasa Utara adalah bagian jalan nasional Manado-Bitung. Saat ini, Jalan Soekarno telah selesai dibangun dengan panjang 10,4 km, berawal dari Manado *By Pass* dan berakhir di Jalan *By Pass* Worang Minahasa Utara.

Kelayakan Pembangunan Jalan Tol Manado-Bitung

Sebagai infrastruktur yang membutuhkan investasi besar, tentu perlu

diperhitungkan kelayakan pembangunan Jalan Tol Manado-Bitung. Kelayakan tersebut mencakup kelayakan ekonomi dan kelayakan finansial. Kelayakan ekonomi adalah kelayakan suatu proyek, dalam hal ini proyek investasi infrastruktur dari sudut pandang pemerintah, dengan *benefit* yang digunakan dalam perhitungan kelayakan adalah manfaat proyek terhadap masyarakat. Di sisi lain, kelayakan finansial adalah kelayakan suatu proyek dari pengembalian finansial proyek tersebut terhadap investasi yang ditanamkan. Karena jalan tol memberikan pengembalian finansial, maka untuk kelayakannya dapat ditinjau berdasarkan kelayakan ekonomi maupun kelayakan finansial.

Kelayakan ekonomi adalah kelayakan yang ditinjau dari sudut pandang pemerintah, pembangunan jalan tol ini diharapkan dapat menghemat biaya operasi kendaraan dan waktu tempuh pengguna jalan tol tersebut. Sehingga semakin banyak pengguna jalan tol, jalan tersebut semakin layak secara ekonomi. Sementara kelayakan finansial adalah kelayakan yang ditinjau dari sudut pandang investor, diharapkan infrastruktur ini bisa memberikan pengembalian investasi yang sudah ditanamkan oleh investor. Seperti sudah disebutkan sebelumnya, pembangunan Jalan Tol Manado-Bitung ini menggunakan skema KPBU yang pembayaran pengembaliannya berdasarkan *tol revenue*.

Melihat jumlah pengguna Jalan Tol Manado-Bitung yang sangat kurang, dapat ditarik kesimpulan awal bahwa berdasarkan kondisi saat ini, baik kelayakan ekonomi maupun kelayakan finansial akan sulit tercapai pada masa yang sudah ditentukan. Namun demikian, berdasarkan perencanaan strategis pemerintah seperti yang sudah disebutkan pada latar belakang, Jalan Tol Manado-Bitung tetap

layak untuk dibangun dengan alasan: 1) Jalan Tol Manado-Bitung adalah bagian dari cita-cita Presiden Joko Widodo untuk meningkatkan konektivitas antar wilayah dengan membangun jalan bebas hambatan di seluruh wilayah di Indonesia, termasuk yang menghubungkan Pulau Sulawesi dari selatan ke utara yaitu dari Kota Makassar di Sulawesi Selatan sampai Kota Bitung di Sulawesi Utara. Jika jalan bebas hambatan di seluruh Pulau Sulawesi ini selesai dibangun, maka akan meningkatkan jumlah pengguna Jalan Tol Manado-Bitung; dan 2) alasan lain pembangunan Jalan Tol Manado-Bitung adalah untuk meningkatkan konektivitas antarwilayah khususnya di Pulau Sulawesi dengan adanya *international hub port* dan KEK di Kota Bitung.

Sebagaimana disebutkan di atas, salah satu penyebab kurangnya pengguna jalan tol ini adalah karena adanya jalan pesaing. Karena itu, dalam tulisan ini akan dibahas mengenai pengaruh adanya jalan pesaing ini terhadap pengurangan pengguna jalan tol.

TINJAUAN PUSTAKA

Pemodelan Transportasi Empat Tahap

Pemodelan transportasi yang paling sering digunakan dikenal dengan nama Pemodelan Transportasi Empat Tahap, dengan tahapan pemodelannya adalah (1) bangkitan perjalanan (*trip generation*), (2) sebaran perjalanan (*trip distribution*), (3) pemilihan moda (*mode choice*), (4) pemilihan rute/pembebanan lalulintas (*trip assignment*).

Metode analisis yang digunakan adalah metode pemilihan rute.

Untuk dapat melakukan pemilihan rute maka beberapa hal yang harus dipersiapkan sebagai masukan adalah jaringan jalan (*network*), matriks asal tujuan (*origin destination matrix*), serta fungsi hubungan volume dengan tundaan (*volume delay function*).

Kalibrasi Parameter *Volume Delay Function*

Fungsi volume tundaan (*volume delay function*) menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Bureau Public Roads (BPR):

$$t_a(x_a) = t_a^0 \left(1 + \alpha \left(\frac{x_a}{c_a} \right)^\beta \right) \dots\dots\dots (1)$$

dengan:

- t_a^0 = waktu tempuh arus bebas
- x_a = volume lalu lintas
- c_a = kapasitas
- $t_a(x_a)$ = waktu tempuh rata-rata
- α, β = parameter ($\alpha = 0.15$ dan $\beta = 4$)

Pembebanan Lalu Lintas

Pembebanan lalu lintas dilakukan dengan menggunakan prinsip *deterministic user equilibrium* yang berdasarkan pada Prinsip Keseimbangan I Wardrobe (1952). Sedangkan untuk fungsi volume–tundaan (*volume delay function*) digunakan sebuah fungsi yang dikembangkan oleh The Bureau of Public Roads (BPR) atau yang dikenal dengan BPR *volume-delay function*. Fungsi ini dirumuskan sebagai berikut:

$$t_a(x_a) = t_a^0 \left(1 + \alpha \left(\frac{x_a}{c_a} \right)^\beta \right) \dots\dots\dots (2)$$

dengan:

- t_a^0 = waktu tempuh arus bebas
- x_a = volume lalu lintas
- c_a = kapasitas
- $t_a(x_a)$ = waktu tempuh rata-rata
- α, β = parameter ($\alpha = 0.15$ dan $\beta = 4$)

Berdasarkan jenis dan lebar jalan, maka diadakan penyesuaian–penyesuaian untuk nilai parameter α dan β . Data untuk fungsi kinerja ruas jalan disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 2 Data untuk Fungsi Kinerja Ruas Jalan

Link	t_a^0	c_a	α	β
1	15	16.800	0,15	2
2	30	16.800	0,15	2
3	43,8	43.200	0,4	4
4	106,8	43.200	0,4	4
5	15	19.200	0,2	3

Matriks asal tujuan dalam studi ini diturunkan dari estimasi volume lalu lintas untuk tahun 2019 (tahun rencana pembukaan jalan tol) yang dihasilkan dalam kegiatan studi kelayakan (*feasibility study*) Jalan Tol Manado-Bitung. Matriks asal tujuan ditampilkan dalam tabel berikut:

Tabel 3 O-D Matriks

	A	B	C
A	0	5.000	21.000
B	5.000	0	2.000
C	21.000	2.000	0

Untuk memformulasikan prinsip *Deterministic User Equilibrium* digunakan rumus sebagai berikut:

$$\min z(x) = \sum a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \dots\dots\dots (3)$$

dengan:

- a = ruas “a”
- $t_a(\omega) d\omega$ = fungsi volume-tundaan
- ω = volume lalulintas

Sedangkan untuk menyelesaikan masalah optimasi digunakan bantuan paket *solver* yang merupakan salah satu fitur tambahan pada perangkat lunak Microsoft Excel.

PEMBAHASAN

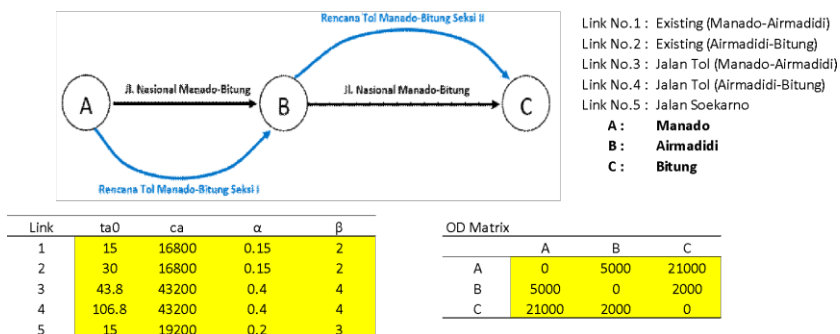
Estimasi Volume Kendaraan Sebelum dan Sesudah Pembangunan Jalan Soekarno

Pembangunan Jalan Soekarno yang merupakan jalan alternatif tambahan rute Manado-Bitung menjadikan jalan ini sebagai kompetitor utama Jalan Tol Manado-Bitung. Akibat pembangunan jalan ini, maka lalu-lintas akan terbagi, sehingga bangkitan volume lalu lintas untuk Jalan Tol Manado-Bitung tidak akan tercapai sesuai dengan waktu yang direncanakan. Untuk memahami dampak pembangunan Jalan Soekarno terhadap bangkitan lalu lintas Jalan Tol Manado-Bitung, dilakukan perhitungan pembebanan lalu lintas (*traffic assignment*) pada kondisi tanpa Jalan Soekarno dan kondisi dengan Jalan Soekarno.

Hasil pembebanan lalu-lintas menunjukkan bahwa rute alternatif Jalan Soekarno sangat mempengaruhi volume lalu-lintas pada Jalan Tol Manado-Bitung Seksi I (Manado-Airmadidi). Sedangkan volume lalu-lintas pada Jalan Tol Manado-Bitung Seksi II (Airmadidi-Bitung) hampir tidak mendapatkan pengaruh akibat pembangunan Jalan Soekarno. Dengan adanya jalan alternatif tersebut, sebagian besar beban lalu-lintas yang pada awalnya diramalkan akan melewati Jalan Tol Manado-Bitung Seksi I akan berpindah melewati rute alternatif tersebut.

Pembebanan Lalu Lintas di Jalan Tol Manado-Bitung

Matriks asal tujuan/MAT (*OD Matrix*) menggunakan hasil dari *pre-feasibility study* pembangunan Jalan Tol Manado-Bitung. Untuk mendapatkan parameter-parameter pada *volume delay function* dilakukan kalibrasi nilai α dan β setelah melakukan survai lapangan. Nilai kalibrasi parameter untuk masing-masing ruas jalan, matriks asal tujuan, dan jaringan jalan yang disederhanakan untuk *traffic assignment* ini ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Data untuk *Traffic Assignment*

Untuk mendapatkan pengaruh tarif tol terhadap volume, maka tarif

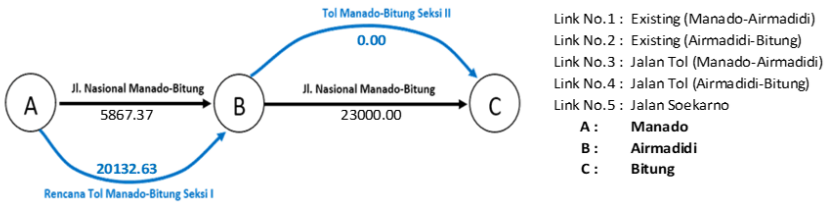
tol per kendaraan dikonversi menjadi penalti dalam satuan waktu. Penalti ini didefinisikan sebagai waktu tambahan pada waktu tempuh arus bebas yang sebenarnya sebagai akibat adanya pembayaran tol.

Berdasarkan Keputusan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) No. 1494/KPTS/M/2020 tanggal 14 Oktober 2020 tentang Penetapan Golongan Jenis Kendaraan Bermotor dan Besaran Tarif Tol pada Jalan Tol Manado-Bitung Segmen Manado-Simpang Susun Danowudu, Tarif Tol Manado-Airmadidi adalah Rp12.000, sedangkan tarif Tol Manado-Bitung adalah Rp44.000, sehingga untuk ruas Airmadidi-Bitung tarif tol adalah Rp32.000.

Dari data Badan Pusat Statistik (BPS) diketahui bahwa jumlah penduduk usia produktif adalah 1.353.617 jiwa dan Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) Provinsi Sulawesi Utara Triwulan II tahun 2016 adalah Rp18.241.589.410.000. PDRB tersebut untuk triwulan maka diasumsikan bahwa PDRB untuk 1 bulan adalah Rp6.080.529.803.333. Diasumsikan juga bahwa jam kerja per hari adalah 9 jam dari pukul 8:00-17:00 selama 5 hari dalam seminggu atau 20 hari kerja dalam 1 bulan, maka didapat 180 jam kerja/bulan. PDRB per orang untuk 1 bulan dan untuk 1 jam adalah Rp4.492.061/bulan dan Rp25.000/jam, maka didapatkan *penalty* untuk jalan tol segmen Manado-Airmadidi adalah 0,48 jam atau 28,8 menit yang ditambahkan pada waktu tempuh Jalan Tol segmen I dalam perhitungan pembebanan lalu lintas. Sedangkan *penalty* untuk jalan tol segmen Airmadidi-Bitung sebesar 1,28 jam atau 76,8 menit.

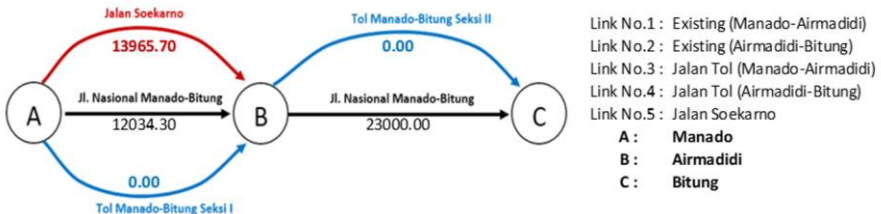
Kondisi Lalulintas "Tanpa" dan "Dengan" Jalan Soekarno

Hasil *traffic assignment* kondisi lalu lintas tanpa keberadaan Jalan Soekarno ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Hasil *Traffic Assignment* Tanpa Jalan Soekarno

Hasil *traffic assignment* kondisi lalu lintas dengan adanya Jalan Soekarno ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Hasil *Traffic Assignment* dengan Jalan Soekarno

Berdasarkan hasil analisis pembebanan volume lalu lintas didapatkan arus lalu lintas untuk rute Manado-Airmadidi awalnya memiliki 20.133 kendaraan yang akan melalui jalan tol setelah dipengaruhi oleh Jalan Soekarno berdasarkan pertimbangan ekonomis tidak ada lagi kendaraan yang melewati Jalan Tol Manado-Bitung pada segmen Manado-Airmadidi. Perkiraan *defisit revenue* tol akibat adanya jalan pesaing Jalan Soekarno adalah

Rp241.596.000 per hari untuk satu arah. Jika diasumsikan bahwa arus pergi sama dengan arus balik per hari maka *defisit revenue* tol menjadi dua kali lipat.

Rencana Pengembangan Kawasan Jalan Tol Manado Bitung dan Pengembangan Kawasan Ekonomi Khusus Bitung

Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Bitung ditetapkan dengan Peraturan Pemerintah Nomor 32 Tahun 2014. Luas total KEK Bitung adalah 534 ha. Kegiatan utama pada kawasan ini adalah industri pengolahan perikanan, industri farmasi dan industri kelapa. KEK Bitung diharapkan dapat berkontribusi signifikan untuk memajukan perekonomian di Provinsi Sulawesi Utara karena letaknya yang berdekatan dengan Internasional Hub Port Bitung. Baik KEK Bitung maupun Internasional Hub Port Bitung menjadi faktor pendorong yang signifikan dibangunnya Jalan Tol Manado-Bitung. Sehingga keberhasilan operasional Hub Port Bitung serta keberhasilan Kawasan Ekonomi Khusus menjadi faktor penentu pengembangan Jalan Tol Manado-Bitung. Selain International Hub Port Bitung yang menjadi pintu gerbang logistik di Indonesia Timur serta Pengembangan Kawasan Ekonomi Khusus Bitung, terdapat juga dan Pengembangan Kawasan Ekonomi Khusus Likupang yang bisa menjadi faktor pendorong pengembangan Jalan Tol Manado-Bitung.

Namun hal-hal di atas belumlah cukup. Perlu juga dilakukan langkah-langkah pendukung tambahan untuk mengembangkan Kawasan Jalan Tol Manado-Bitung, antara lain: 1) Peningkatan tata guna lahan di sekitar Jalan Soekarno. Dengan meningkatnya tata guna lahan di jalan tersebut kinerja jalan akan menurun sehingga

waktu tempuh menjadi tinggi. Hal ini akan meningkatkan ketertarikan pengguna jalan untuk memilih jalan tol, sehingga fungsi jalan tol dapat maksimal; 2) Peraturan Pemerintah Daerah yang mengharuskan kendaraan-kendaraan berat untuk melewati jalan tol. Pada dasarnya, jalan tol didesain untuk mampu dilewati kendaraan-kendaraan berat, berbeda dengan jalan lain yang mudah rusak ketika dilewati oleh kendaraan berat. Hal ini bisa menjadi pertimbangan Pemerintah Daerah untuk membuat peraturan tersebut. Peraturan tersebut akan meningkatkan penggunaan Jalan Tol Manado-Bitung; 3) Peningkatan Bandar Udara Sam Ratulangi sebagai pintu masuk udara ke Sulawesi Utara. Hal ini bisa dilakukan dengan membuka beberapa penerbangan langsung internasional, sehingga dapat berkontribusi meningkatkan penggunaan jalan tol; 4) Melanjutkan pembangunan jalan tol sampai ke pusat Kota Manado sehingga penghematan waktu dari pengguna menjadi maksimal, dan 5) Melanjutkan pembangunan jalan tol ke daerah lain di Pulau Sulawesi, sehingga volume lalu lintas menjadi optimal.

KESIMPULAN

Jalan Tol Manado-Bitung adalah sebuah mega proyek di Sulawesi Utara yang dibangun dengan skema KPBU. Sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 15 Tahun 2005, pihak swasta (*investor*) dapat membantu pemerintah membiayai dahulu pembangunan jalan tol, kemudian mendapatkan hak penarikan tol selama masa konsesi sebagai cara investor tersebut mendapatkan pengembalian biaya investasi beserta keuntungannya. Sebagai daya tarik bagi pihak swasta agar mau menanamkan modalnya pada proyek pembangunan jalan tol, maka rencana pembangunan tol harus dipastikan atau

minimal memiliki kelayakan finansial yang memadai.

Pembangunan Jalan Soekarno yang melayani rute yang sama dengan Jalan Tol Manado-Bitung akan menyebabkan lalulintas menjadi terbagi sehingga bangkitan lalulintas untuk jalan tol tersebut tidak akan tercapai sesuai dengan waktu yang diharapkan. Karena Jalan Tol Manado-Bitung merupakan kasus dimana pembangunan tol tidak layak secara finansial tetapi dibutuhkan untuk menunjang pengembangan wilayah, maka konsep pendanaan dikombinasikan dengan APBN/D.

Dari sudut pandang *investor*, tingkat risiko pada tahap perencanaan dapat dikategorikan rendah. Pada tahap berikutnya yaitu pembebasan lahan dan konstruksi, tingkat risiko investasi naik drastis mencapai puncaknya dan dikategorikan tinggi. Tahap selanjutnya yaitu pada saat operasi dan pemeliharaan, tingkat risiko berkurang tapi masih tetap lebih tinggi daripada tahap perencanaan. Tingkat risiko mencapai titik minimum bagi investor pada saat investasi mencapai tahap penyerahan kembali. Pada kasus pembangunan Jalan Tol Manado-Bitung, tingkat risiko yang diharapkan berkurang pada saat operasi dan pemeliharaannya berpotensi tidak terjadi dengan dibangunnya jalan alternatif.

Solusi menaikkan harga tol belum bisa memecahkan masalah karena tingkat defisit keuntungan yang masih tinggi. Perlu diperhatikan bahwa alasan utama *user* memilih menggunakan jalan tol adalah karena penghematan Biaya Operasi Kendaraan (BOK) dan penghematan waktu. Menaikkan tarif tol berarti menurunkan penghematan-penghematan tersebut. Bisa disimpulkan bahwa menaikkan tarif tol akan membuat pemilihan jalan tol menjadi

kurang menarik dibanding dengan jalan alternatif. Solusi terbaik untuk meminimalkan risiko karena adanya jalan alternatif adalah dengan melakukan langkah-langkah strategis maupun langkah-langkah pendukung seperti yang sudah disebutkan di atas.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Manado. 2023. <https://manadokota.bps.go.id/linkTabelStatis/view/id/3>. Diakses 24 Januari 2023
- Lengkey, J.W.T. 2016. *Bahan Presentasi dalam acara Indonesia Infrastructure Roundtable XV*. Universitas Sam Ratulangi, Manado
- Natsir, M. 2011. *Pengelolaan Sumberdaya Investasi Bagi Penyelenggaraan Infrastruktur*. Kementerian Pekerjaan Umum. Jakarta.
- Politon, N. C., Rompis, S. Y. R., Longdong, J. 2017. *Pengaruh Pembangunan Jalan Soekarno Terhadap Pembebanan Lalu Lintas di Jalan Tol Manado-Bitung*. Jurnal Sipil Statik, 5 (9): 639-647.
- Sheffi, Y. 1985. *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Sumanti, P.Y., Wibowo M.A., Tamin, R.Z. 2011. *Studi Kasus: Proses Pre-Project Planning Pembangunan Jalan Tol Manado-Bitung*. Prosiding Konferensi Nasional Pasca-sarjana Teknik Sipil (KNPTS) 2011: M19-M30.



KAJIAN KRITIS PENGEMBANGAN JALAN TOL DI INDONESIA

Pengelolaan Aspek Teknis dalam Perancangan dan Pembangunan Jalan Tol

EVALUASI PERANCANGAN GEOMETRI JALAN TOL PADA SIMPANG SUSUN WARU SURABAYA

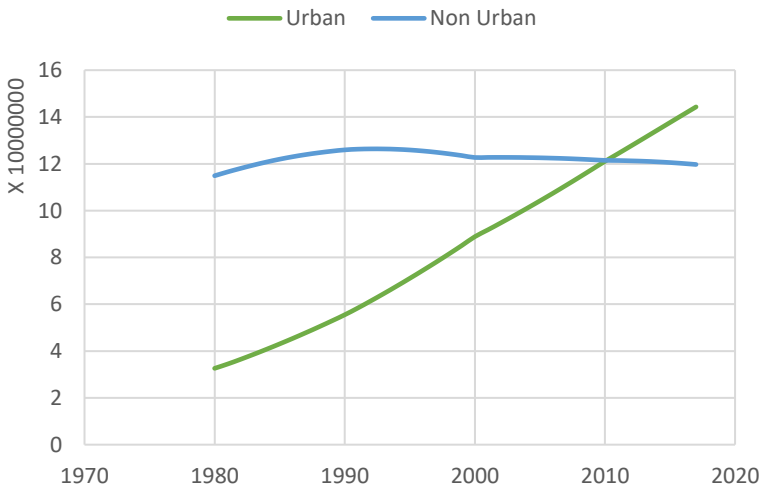
Ludfi Djakfar, Hendi Bowoputro
Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir ini, terjadi perubahan pola kehidupan masyarakat. Jumlah penduduk perkotaan terus mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Bertambahnya penduduk serta bertambahnya aktivitas ekonomi telah menyebabkan perubahan-perubahan dalam kehidupan manusia, termasuk perubahan dalam pola masyarakat dalam melakukan perjalanan. Beberapa kawasan yang sebelumnya adalah areal persawahan kemudian terkonversi menjadi areal permukiman maupun pusat bisnis. Kawasan yang sebelumnya terasa jauh dari lokasi permukiman, kini menjadi terasa dekat. Demikian juga dengan kondisi suatu perkotaan, yang sebelumnya hanya dihuni oleh masyarakat yang sudah lama bermukim di sana, kemudian karena adanya aktivitas industri atau perdagangan menjadi tujuan bagi mereka yang mencari kerja. Pertambahan penduduk pada suatu kawasan akhirnya tidak terhindarkan.

Selama 20 tahun terakhir ini, terjadi pertumbuhan penduduk perkotaan yang tinggi. Tren ini tidak hanya terjadi di Indonesia, namun juga menjadi tren di seluruh dunia. Lebih dari 75% penduduk

dunia tinggal di kawasan perkotaan. Dan pertumbuhan perpindahan penduduk dari kawasan nonperkotaan ke perkotaan juga tumbuh dengan cepat. Pada kasus di Indonesia, pertumbuhan tersebut sangat tinggi, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Jika pada tahun 1980-an penduduk nonperkotaan masih mendominasi, setelah itu terjadi migrasi ke perkotaan yang cukup besar. Setelah tahun 2010, jumlah penduduk yang tinggal perkotaan menjadi lebih besar. Banyak faktor yang menyebabkan pesatnya perpindahan masyarakat dari kawasan nonperkotaan ke perkotaan, seperti bertambahnya masyarakat terdidik yang kemudian menetap di kota, perkembangan industri yang cenderung berada di perkotaan dan faktor-faktor lainnya.

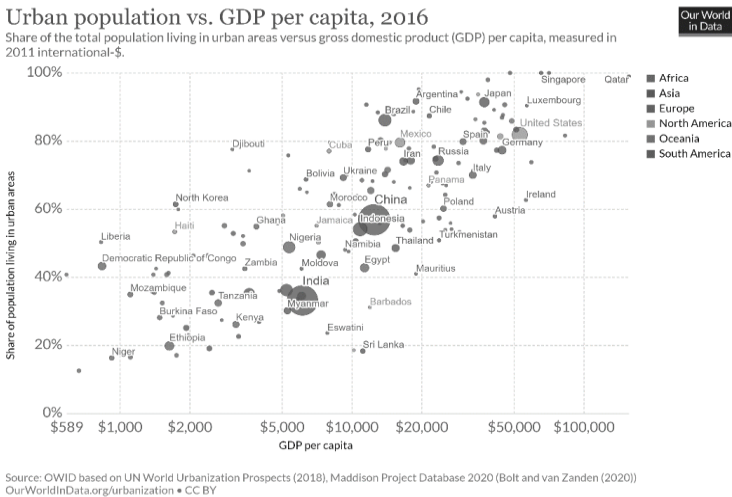


Sumber: United Nations (2018)

Gambar 1 Tren Penduduk Perkotaan dan Non-Perkotaan di Indonesia: Perubahan Pola Bermukim Masyarakat di Indonesia

Seperti halnya pertumbuhan penduduk, pertumbuhan perekonomian mempunyai kecenderungan yang sama dengan penduduk. Kawasan perkotaan mempunyai kecenderungan pertumbuhan perekonomian yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kawasan nonperkotaan.

Negara dengan sebagian besar penduduknya bermukim di kawasan perkotaan umumnya mempunyai tingkat perekonomian yang lebih tinggi, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Karena pertumbuhan perekonomian pada kawasan perkotaan lebih tinggi, maka hal ini menarik penduduk untuk mencari pekerjaan di kota, yang akhirnya membutuhkan prasarana dan sarana transportasi yang lebih besar.



Sumber: United Nations (2018)

Gambar 2 Hubungan antara Tingkat Urbanisasi dan PDRB di Beberapa Negara di Dunia

Untuk mengantisipasi dan mengakomodasi pertumbuhan penduduk dan ekonomi, pemerintah telah mempersiapkan infrastruktur transportasi dalam berbagai bentuk. Pada periode 1980 hingga 2000-an, pembangunan jalan menjadi prioritas dalam penyediaan infrastruktur transportasi. Selanjutnya pada 5 tahun terakhir pembangunan jalan tol menjadi salah satu prioritas pemerintah. Sampai dengan tahun 2022 pemerintah telah membangun sepanjang 2500 km jalan tol. Jalan tol dirasakan manfaatnya dalam

memberikan solusi terhadap permasalahan lalu lintas khususnya di perkotaan, seperti di Jakarta dan Surabaya.

Pembangunan infrastruktur jalan tol di perkotaan memerlukan perhatian khusus, terkait dengan penyediaan lahan. Semakin tinggi kepadatan suatu kawasan perkotaan, semakin tinggi pula tantangan dalam penyediaan infrastruktur jalan. Di satu sisi kebutuhan terhadap panjang dan lebar jalan menjadi lebih tinggi, di sisi lainnya ketersediaan lahan menjadi semakin sedikit atau menjadi mahal.

Dalam rangka mengefisienkan pergerakan, maka pada beberapa simpang tidak lagi digunakan Alat Pemberi Isyarat Lalulintas (APILL), tetapi dilakukan dengan membangun persimpangan tidak sebidang. Khusus jalan tol, dipersyaratkan tidak boleh ada hambatan dalam simpang, sehingga setiap persimpangan dengan jalan tol dibuat simpang tak sebidang.

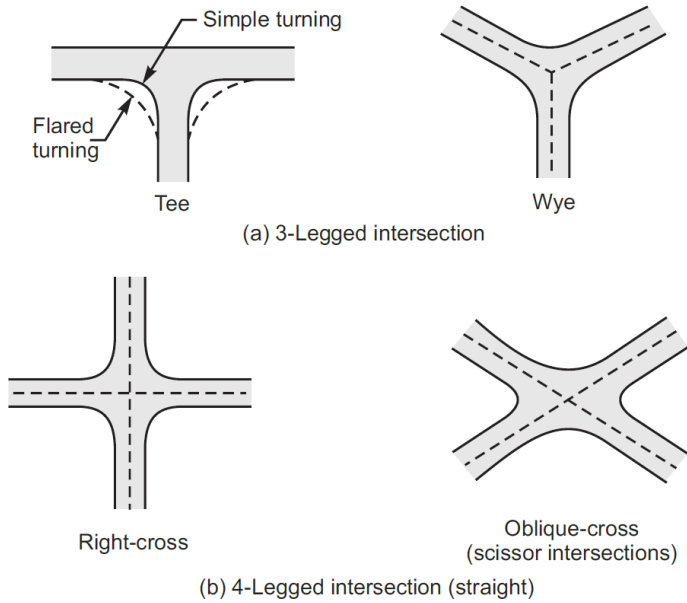
Pada kawasan perkotaan, sering muncul permasalahan yang disebabkan oleh banyaknya jaringan jalan yang harus dilayani oleh suatu simpang, baik simpang sebidang maupun tak sebidang. Salah satu contoh dari kondisi ini adalah pada kawasan Simpang Susun Waru (SS Waru), yang terletak pada perbatasan antara Kota Surabaya dan Kabupaten Sidoarjo. Dengan kawasan yang dilayani pada semua arah adalah kawasan strategis, maka jumlah pergerakan pada semua arah menjadi besar, yang membawa konsekuensi pada jumlah jaringan jalan yang dilayani pada kawasan simpang susun tersebut menjadi cukup banyak. Terdapat 16 ruas jalan yang dihubungkan dengan SS Waru. Dengan jumlah ruas yang cukup banyak tersebut, maka tentu saja ada konsekuensi pada desain geometri dari SS Waru.

Tulisan ini bertujuan melakukan *review* terhadap SS Waru ditinjau dari aspek geometri simpang susun dalam mengakomodasi pergerakan. *Review* didahului dengan peninjauan pustaka terkait dengan konsep pengaturan pergerakan lalu lintas pada simpang. Selanjutnya dilakukan peninjauan mengenai aspek kewilayahan serta diikuti dengan tinjauan teknis. Pada akhir tulisan akan disusun kesimpulan dari hasil *review* dan apa yang dapat dijadikan pelajaran dari SS Waru.

KAJIAN PUSTAKA

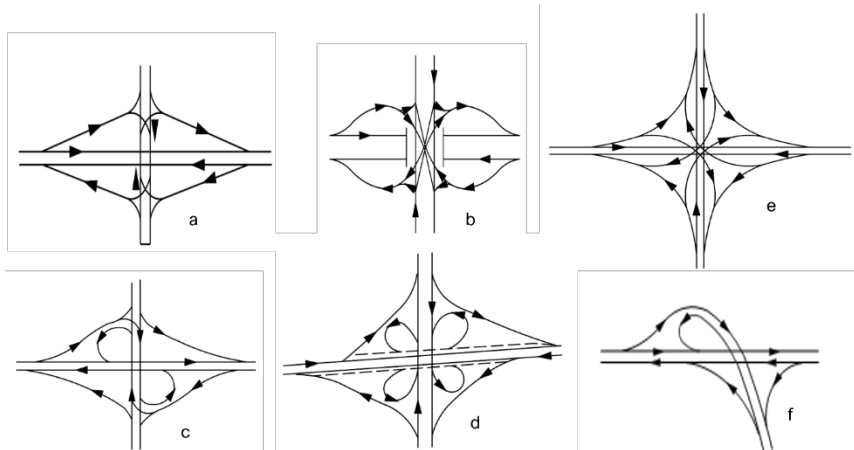
Jenis Simpang

Untuk mengefisienkan pola guna lahan dan pergerakan, maka kota tidak dapat bertumbuh secara linier, namun harus dalam bentuk *grid*. Bentuk *grid* menjadikan pergerakan untuk menuju kawasan di kota menjadi lebih efisien. Bentuk pertumbuhan kota *grid* memerlukan sistem jaringan jalan yang terdiri dari *links* (ruas jalan) dan *nodes* (simpang). Adanya *nodes* memerlukan adanya pengaturan pada *nodes* tersebut, yang dapat berupa simpang sebidang sederhana tak bersinyal maupun simpang bersinyal seperti ditampilkan pada Gambar 3, maupun simpang tidak sebidang pada Gambar 4. Simpang sebidang umumnya digunakan pada kasus lalu lintas rendah dan sedang, sedangkan simpang tidak sebidang, lebih banyak dikenal dengan simpang susun, digunakan pada kasus lalu lintas tinggi atau fungsi jalan yang mensyaratkan tidak adanya hambatan, seperti pada kasus jalan tol.



Sumber: Chandra (2020)

Gambar 3 Contoh Simpang Sebidang yang Umum Digunakan



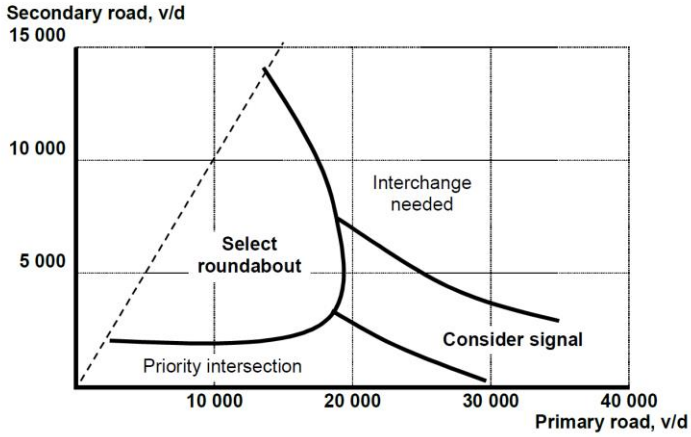
Sumber: AASHTO (2018)

Gambar 4 Jenis Simpang Susun (a) *diamond*, (b) *single point diamond interchange*, (c) *partial cloverleaf*, (d) *full cloverleaf*, (e) *all directional four leg*, dan (f) *trumpet*

Simpang susun dapat memiliki bentuk yang unik, karena fungsinya untuk menghubungkan beberapa jalan dengan *ramp* yang tidak diizinkan membentuk sudut tegak lurus pada pertemuan dengan jalan tersebut, sehingga diusahakan pertemuan tersebut membentuk sudut yang sekecil-kecilnya. Tipe dan bentuk simpang susun standar adalah sebagai berikut 1) T (atau *Trumpet*) atau Y, untuk simpang susun 3 kaki/lengan; 2) *Diamond*, untuk simpang susun 4 kaki/lengan dan arus mayor dan minor; 3) *Cloverleaf*, terdiri dari *partial cloverleaf* dan *full cloverleaf*; 4) *Directional* atau langsung; dan 5) Kombinasi, merupakan penggabungan dari bentuk-bentuk dasar di atas.

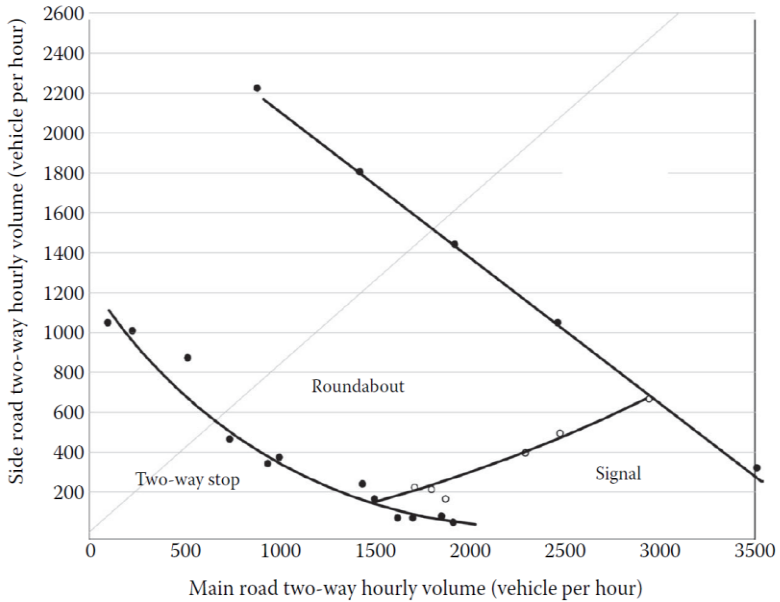
Tipe dan bentuk simpang yang dipilih untuk digunakan dan diterapkan harus mempertimbangkan ketersediaan, kondisi, dan lingkungan lahan yang akan digunakan, yang juga merupakan Ruang Milik Jalan (Rumija) jalan tol.

Pemilihan jenis simpang yang akan digunakan pada suatu *node* tergantung pada banyak faktor, termasuk volume lalu lintas yang akan dilayani, fungsi jalan, ketersediaan anggaran, dan aspek tata guna lahan (Garber & Fontain, 1999). Gambar 5 dan Gambar 6 dapat digunakan sebagai pedoman untuk menentukan jenis simpang berdasarkan volume kendaraan yang akan dilayani. Pada jaringan jalan tol, hanya simpang tidak sebidang yang diijinkan untuk digunakan. Oleh karena itu, pada pembahasan selanjutnya akan fokus pada jenis simpang tidak sebidang atau simpang susun.



Sumber: Swedish Road (2000)

Gambar 5 Kriteria Awal Penentuan Jenis Simpang



Sumber: Gauteng (2007)

Gambar 6 Kriteria Pemilihan Jenis Simpang

Simpang Susun

Pada jalan bebas hambatan, khususnya jalan tol, minimnya hambatan dalam melakukan perjalanan bagi pengguna jalan merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi. Pengguna jalan semestinya dapat melakukan perjalanan sesuai dengan kecepatan yang direncanakan pada saat jalan tol tersebut dibangun. Oleh karena itu, adanya simpang sebidang menjadi hal yang dihindari. Pengguna jalan tidak perlu mengalami hambatan pada saat mendekati atau memasuki suatu simpang. Pada kasus ini, simpang hendaknya dirancang tidak sebidang sehingga simpang susun menjadi alternatif. Simpang susun adalah pertemuan atau persilangan dua jalan atau lebih yang tidak sebidang, di mana perpindahan kendaraan dari satu jalan ke jalan yang lain dapat dilakukan tanpa harus berhenti (Direktorat Jenderal Bina Marga/DJBM, 2005). Gambar 7 menampilkan contoh dari struktur simpang susun.



Gambar 7 Salah Satu Bagian dari Struktur Simpang Susun Waru, Surabaya

Peran simpang susun menjadi lebih jelas pada jaringan jalan tol yang terdapat pada kawasan perkotaan, seperti pada kasus Simpang Susun

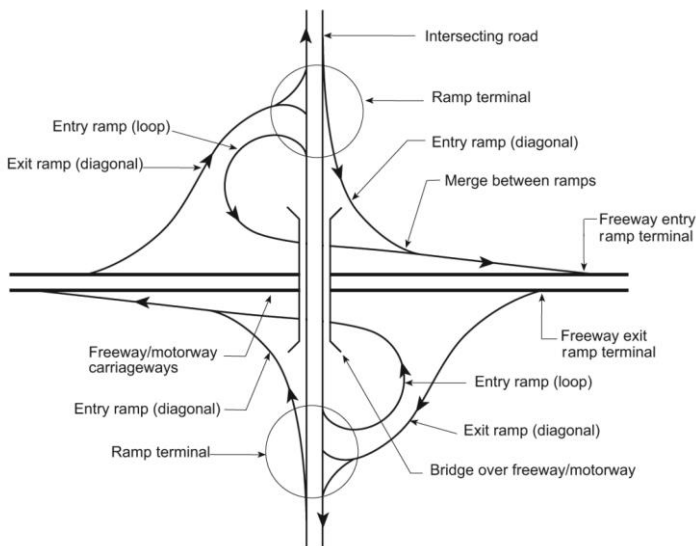
Waru. Untuk mengakomodasi pergerakan di perkotaan yang umumnya berasal dari hampir seluruh arah, maka sering dijumpai pada suatu simpang terdapat lebih dari 4 ruas jalan yang bertemu pada titik simpang tersebut. Pergerakan akan terganggu jika tidak diakomodasi dengan struktur simpang susun.

Simpang susun biasa digunakan pada persilangan atau percabangan pada jalan bebas hambatan, yaitu jalan tol dan jalan arteri primer. Simpang susun sistem adalah simpang susun yang menghubungkan dua atau lebih jalan bebas hambatan atau jalan tol. Sedangkan simpang susun pelayanan adalah simpang susun yang menghubungkan antara jalan bebas hambatan atau jalan tol dengan jalan bukan tol, baik jalan arteri atau kolektor dalam sistem jaringan jalan primer. Penggunaan simpang susun disebabkan pergerakan kendaraan pada jalan-jalan tersebut tentu saja tidak boleh terhambat terutama pada jalan bebas hambatan dan jalan tol. Sedangkan pada jalan arteri primer, penerapan simpang susun adalah pada kondisi kedua jalan yang bersilangan atau bercabang tersebut memiliki kondisi volume tinggi sampai dengan sangat tinggi, sehingga bila diatur dengan APILL pada simpang sebidang, akan menimbulkan tundaan yang tinggi, bahkan sangat tinggi.

Struktur simpang susun secara umum terdiri dari komponen sebagai berikut: 1) jalan masuk ke struktur utama simpang susun, 2) struktur utama simpang susun (umumnya berupa jembatan), dan 3) jalan keluar dari struktur simpang susun, yang umum disebut *ramp*. *Ramp* atau jalan penghubung terdiri dari *on-ramp*, yang merupakan segmen atau bagian jalan untuk keluar dari suatu jalan atau jalan utama dan *off-ramp*, merupakan segmen atau bagian jalan untuk masuk ke suatu jalan atau jalan utama, tergantung hirarki jalan yang

terhubung. *Ramp* berfungsi menghubungkan antar jalan yang bertemu atau bersilangan tersebut tanpa adanya arus lalu lintas terlawan dari jalan yang terhubung.

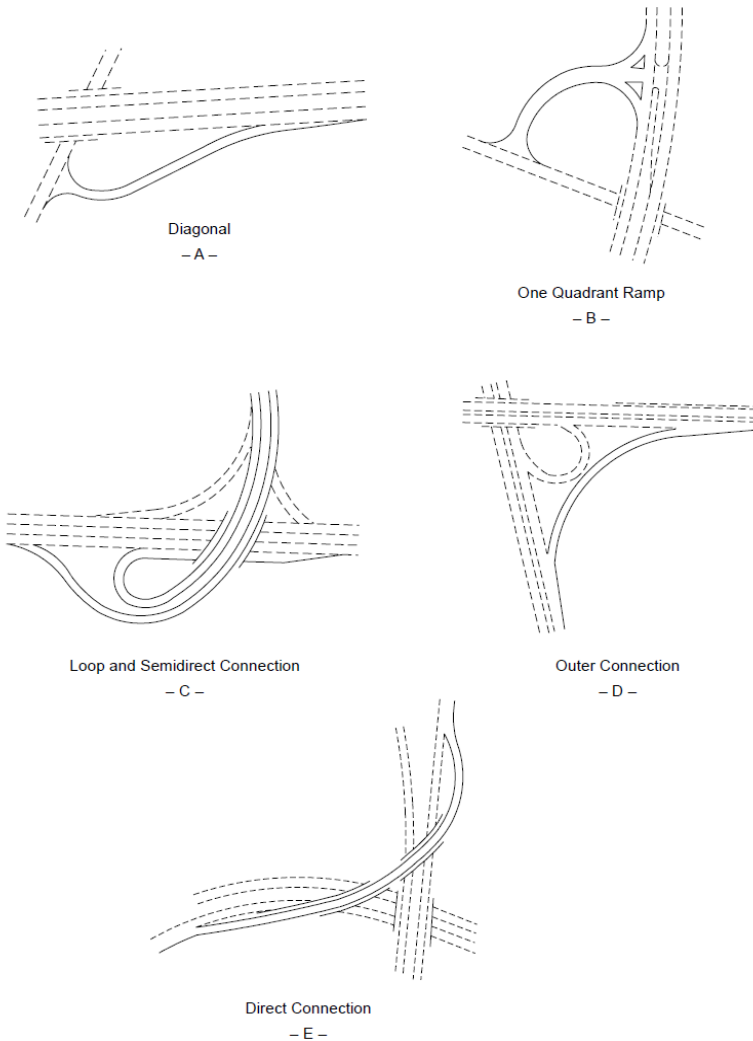
Struktur simpang susun umumnya terdiri dari elemen-elemen sebagai berikut (Aumann et al., 2015): 1) ruas jalan mayor, 2) ruas jalan minor, 3) *ramp*, 4) kawasan *diverging* dan *merging*, serta 1 *terminal ramp* pada ruas jalan minor. Gambar 8 mengilustrasikan elemen-elemen struktur pada suatu simpang susun. Pergerakan arus lalu lintas yang terjadi sebelum *on-ramp* merupakan pergerakan *diverging*. Sedangkan pergerakan arus lalu lintas setelah *off-ramp* merupakan pergerakan *converging*. Pada kondisi lokasi *on-ramp* yang berdekatan dan berposisi setelah *off-ramp*, maka pergerakan arus lalu lintas yang terjadi di antara kedua *ramp* tersebut adalah pergerakan arus lalu lintas menjalin atau *weaving*.



Sumber: Aumann et al. (2015)

Gambar 8 Contoh Elemen-Elemen dari Suatu Simpang Susun

Perancangan *ramp* meliputi penentuan tipe *ramp*, penampang melintang dan radius tikungannya, serta penyediaan lajur percepatan dan lajur perlambatan untuk kendaraan mengakses ke luar dan masuk ramp. Gambar 9 menampilkan jenis *ramp* yang umum digunakan (AASHTO, 2018).



Sumber: AASHTO (2018)

Gambar 9 Jenis *Ramp*

Hubungan langsung (*direct*), yaitu *ramp* menghubungkan jalan yang satu dengan jalan yang lain sebelum titik pusat persilangan. Hubungan setengah langsung (*semi direct*), yaitu *ramp* menghubungkan jalan yang satu dengan jalan yang lain dengan melalui atau mengelilingi titik pusat persilangannya terlebih dahulu dan memotong salah satu jalan tersebut secara tegak lurus. Hubungan tidak langsung (*indirect*), yaitu *ramp* menghubungkan jalan yang satu dengan jalan yang lain dengan bentuk *ramp* yang berbelok ke arah berlawanan terlebih dahulu, lalu memutar sekitar 270° baru terhubung dengan jalan yang lain.

Pedoman Perencanaan Simpang Susun

Agar suatu simpang susun dapat berfungsi sesuai dengan yang diinginkan, diperlukan adanya pedoman terkait dengan perencanaan simpang susun. Beberapa isu yang berkaitan dengan perencanaan simpang susun dijabarkan di bawah ini.

Jarak Simpang Susun

Jarak simpang susun adalah jarak antar simpang susun yang berdekatan. Jarak tersebut diberi ketentuan sebagai berikut (DJBM, 2005):

1. Pada jalan tol antar kota, jarak antar simpang susun minimal adalah 5 (lima) km diukur dari as ke as atau dengan jarak *nose ramp* jalan masuk dan *nose ramp* jalan keluar untuk jurusan yang sama pada dua simpang susun minimal adalah 5 (lima) km,
2. Pada jalan tol perkotaan, jarak antar simpang susun minimal adalah 2 (dua) km diukur dari as ke as atau dengan jarak antar *nose ramp* jalan masuk (*on ramp*) dan jarak antar *nose ramp* jalan keluar (*off ramp*) untuk jurusan yang sama pada dua

- simpang susun minimal adalah 2 (dua) km,
3. Simpang susun pelayanan harus direncanakan menghubungkan jalan tol dan jalan bukan tol yang berfungsi sebagai jalan arteri atau minimal kolektor dalam sistem jaringan jalan primer,
 4. Jarak *nose ramp* jalan masuk simpang susun dengan *nose ramp* jalan keluar tempat istirahat atau jarak *nose ramp* jalan keluar simpang susun dengan *nose ramp* jalan masuk tempat istirahat pada arah yang sama minimal 5 (lima) km,
 5. Jarak terowongan/pintu gerbang bandar udara internasional/pintu gerbang pelabuhan laut internasional yang dihubungkan dengan jalan tol harus berjarak dengan jarak *nose ramp* jalan keluar/masuk simpang susun minimal 2 (dua) km,
 6. Penyediaan simpang susun pada jalan tol sebagai akses harus mempertimbangkan jumlah penduduk pada wilayah yang bersangkutan untuk dilayani, dengan ketentuan sebanyak-banyaknya 1 (satu) simpang susun untuk 1 (satu) wilayah dengan penduduk minimal 100.000 jiwa.

Kecepatan Rencana pada Simpang Susun

Kecepatan rencana (VR) pada simpang susun terbagi menjadi dua bagian, yaitu kecepatan rencana pada simpang susun sistem, yaitu simpang susun yang menghubungkan antara jalan tol dengan jalan tol dan simpang susun pelayanan, yaitu simpang susun yang menghubungkan antara jalan tol dengan jalan bukan tol. Tabel 1 dan Tabel 2 menampilkan persyaratan kecepatan pada suatu simpang susun.

Tabel 1 Kecepatan Rencana pada Simpang Susun

VR jalan tol I (km/jam)	VR jalan tol II (km/jam)			
	120	100	80	60
120	60 – 80			
100	60 – 80	60 – 80		
80	40 – 80	40 – 60	40 – 60	
60	40 – 60	40 – 60	40 – 60	40 – 60

Sumber: DJBM (2009)

Tabel 2 Kecepatan Rencana pada Simpang Susun Pelayanan

VR jalan Tol (km/jam)	VR jalan bukan tol (km/jam)		
	100	80	60
120	60 – 80		
100	60 – 80		
80	40 – 60	40 – 60	
60	40 – 60	40 – 60	40 – 60

Sumber: DJBM (2009)

Persyaratan Penampang Melintang Ramp

Perancangan geometrik pada *ramp* pada simpang susun tentu saja tidak terlepas dari ketentuan yang harus dipenuhi terhadap penampang melintangnya, yaitu sebagai berikut (DJBM, 2009):

1. *Ramp* simpang susun untuk 2 arah lalu lintas harus dilengkapi dengan median,
2. Lebar jalur lalu lintas *ramp* dengan 1 lajur lalu lintas untuk 1 arah minimal 4,5 meter dengan tanpa mempertimbangkan kebutuhan pelebaran lajur lalu lintas pada tikungan,
3. Lebar lajur lalu lintas *ramp* dengan 1 lajur lalu lintas untuk 1 arah atau dengan 2 lajur lalu lintas untuk 1 arah, dibuat sama dengan lebar lajur lalu lintas pada jalur utamanya dengan mempertimbangkan kebutuhan pelebaran pada tikungan,
4. Besarnya kebutuhan pelebaran pada *ramp* mengikuti perhitungan pelebaran pada tikungan,

5. Pada *ramp* simpang susun pelayanan dengan 2 lajur lalu lintas untuk 1 arah, lebar bahu luar dapat dibuat sama dengan lebar bahu dalam,
6. Lebar bahu luar dan bahu dalam *ramp* harus memenuhi ketentuan, seperti pada Tabel 3.

Tabel 3 Kebutuhan Lebar Bahu pada *Ramp* Simpang Susun

Kecepatan Rencana Jalan Utama (km/jam)	Lebar Bahu Luar (m)		Lebar Bahu Dalam (m)	
	Antarkota	Perkotaan	Antarkota	Perkotaan
120	3,00	-	1,00	-
100	3,00	2,00	1,00	1,00
80	3,00	2,00	1,00	0,50
60	-	2,00	-	0,50

Sumber: DJBM (2009)

Sebagai struktur penghubung dengan bentuk alinyemen horizontal yang membentuk lengkungan, *ramp* harus memenuhi ketentuan radius tertentu berdasarkan kecepatan rencana *ramp* yang telah ditentukan sebelumnya. Jika digunakan lengkung majemuk pada suatu *ramp*, maka perbandingan antara radius lengkung pertama dengan lengkung kedua adalah 2:1 atau minimal 1,5:1, dengan panjang masing-masing lengkung ditentukan sebagaimana pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4 Radius Lengkung Minimum pada *Ramp*

VR (km/jam)	Radius Tikungan Minimum (m)		
	$e_{max} = 6\%$	$e_{max} = 8\%$	$e_{max} = 10\%$
80	250	230	210
60	135	125	115
40	55	50	45

Sumber: DJBM (2009)

Tabel 5 Panjang Minimum Lengkung Lingkaran di *Ramp*

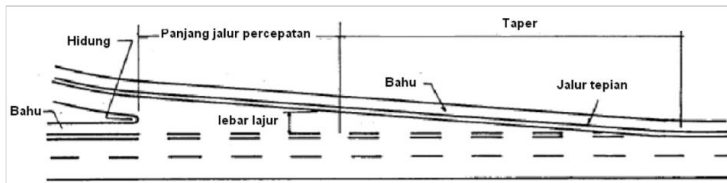
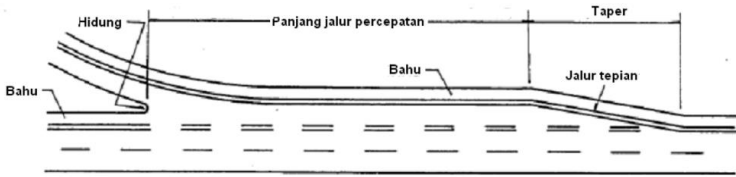
R (m)	Panjang Minimum Lengkung Lingkaran (m)	
	Minimal	Ideal
>150	45	60
125	35	55
100	30	45
75	25	35
60	20	30
50	15	20

Sumber: DJBM (2009)

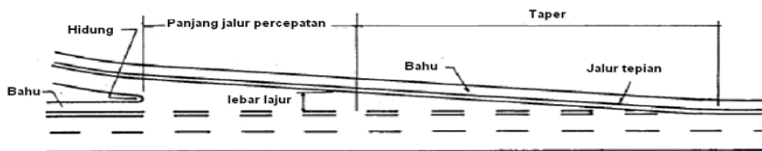
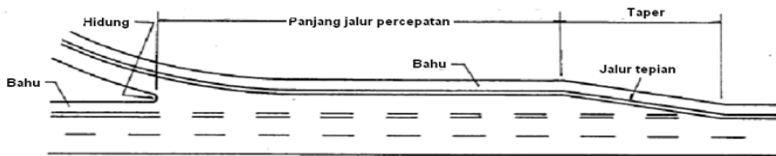
Lajur Percepatan dan Perlambatan

Sebagai struktur yang berfungsi sebagai jalan penghubung antar jalan tol atau jalan tol dengan jalan arteri atau kolektor, pada simpang susun ada peluang perbedaan kecepatan kendaraan disebabkan oleh beda fungsi jalan. Oleh karena itu, untuk memfasilitasi pergerakan transisi tersebut pada struktur *ramp* diperlukan adanya lajur percepatan dan perlambatan. Lajur percepatan diperlukan pengguna yang mau keluar dari simpang susun dan bergabung dengan struktur utama, sedangkan lajur perlambatan diperlukan bagi pengemudi yang mau masuk ke simpang susun.

Terdapat dua jenis lajur perlambatan/percepatan yang umum digunakan, yaitu: (a) tipe paralel dan (b) tipe *taper*. Gambar 10 menampilkan contoh dari lajur perlambatan dan lajur percepatan. Ketentuan lajur percepatan dan perlambatan dideskripsikan pada Tabel 6 dan 7. Sedangkan *taper*, yaitu bentuk alinemen horizontal miring (bersudut) yang berfungsi sebagai pengarah penggabungan atau pemisahan arus lalu lintas di jalur utama.



(a) Contoh Lajur Perlambatan dengan Tipe Paralel dan Taper



(a) Contoh Lajur Percepatan dengan Tipe Paralel dan Taper

Sumber: DJBM (2009)

Gambar 10 Contoh Lajur Perlambatan dan Percepatan

Tabel 6 Panjang Lajur Percepatan Minimum

V_R jalan tol (km/jam)	Panjang lajur percepatan minimum (m)		
	V_R ramp (km/jam)		
	80	60	40
120	245	410	490
100	40	205	285
80	-	65	145
60	-	-	45

Sumber: DJBM (2009)

Tabel 7 Panjang Lajur Perlambatan Minimum

V_R jalan tol (km/jam)	Panjang lajur perlambatan minimum (m)		
	V_R ramp (km/jam)		
	80	60	40
120	120	155	175
100	85	120	145
80	-	80	100
60	-	-	65

Sumber: DJBM (2009)

Tabel 8 Panjang *Taper* pada Lajur Percepatan/Perlambatan

Kecepatan rencana (km/jam)	Panjang <i>taper</i> minimum (m)	
	Memisah	Menggabung
120	135	270
100	113	225
80	90	180
60	42	84

Sumber: DJBM (2009)

TINJAUAN TEKNIS SIMPANG SUSUN WARU

Gambaran Wilayah SS Waru

Simpang Susun (SS) Waru terletak pada wilayah Kabupaten Sidoarjo, namun lebih dikenal sebagai kawasan yang terletak di Surabaya, seperti halnya Bandar Udara Juanda. SS Waru terletak pada 4 kawasan utama, yaitu Surabaya Kota pada arah utara, Bandar Udara Juanda pada arah timur, Sidoarjo pada arah selatan, dan Mojokerto pada arah barat. Mempertimbangkan lokasi strategis ini, maka pantaslah kalau volume kendaraan pada jaringan jalan di wilayah tersebut tinggi. Arah utara dari SS Waru adalah Kota Surabaya, yang berfungsi sebagai ibukota Provinsi Jawa Timur.

Selain fungsinya sebagai ibukota provinsi, Surabaya juga dikenal sebagai kota terbesar ke-2 di Indonesia dengan penduduk sebesar 4 juta orang serta dikenal sebagai kota pendidikan dan industri.

Pada arah timur dari SS Waru terdapat Bandar Udara Juanda, yang merupakan bandar udara tersibuk kedua setelah Bandar Udara Soekarno-Hatta, Cengkareng. Pada arah Selatan adalah Kota Sidoarjo, Kota Malang dan kawasan utama lainnya. Sedangkan ke arah Barat adalah jaringan jalan yang menuju ke kawasan barat Jawa Timur dan juga ke kawasan barat lainnya di Pulau Jawa. Pada semua arah, SS Waru melayani jaringan jalan yang menuju kawasan Pusat Kegiatan Nasional (PKN), yang merupakan orde paling tinggi dari struktur kawasan. Dari semua arah tersebut, arah utara-selatan merupakan arah mayor. Fungsi Kota Sidoarjo sebagai kota penyangga Surabaya menyebabkan besarnya pola pergerakan antara Surabaya-Sidoarjo. Selain itu, pergerakan yang dari kawasan Malang yang menuju ke kawasan Surabaya juga cukup besar. Semua jaringan jalan yang melayani kawasan tersebut hampir semuanya melalui atau berada pada kawasan SS Waru. Hal ini menjadi indikasi peran penting dari SS Waru ini.

Kawasan sekitar SS Waru terdiri dari kawasan perkantoran, permukiman dan industri. Sebelah timur dari SS Waru adalah Kawasan Industri Rungkut, yang mempunyai akses dari jalan tol Surabaya-Juanda. Sebelah utara dari SS Waru adalah kawasan perkantoran (Dinas Teknis) dari Provinsi Jawa Timur, dan perkantoran lainnya. Sebelah selatan arah Sidoarjo juga terdapat kawasan industri. Dengan peruntukan lahan seperti itu, maka kebutuhan terhadap tersedianya sistem jaringan transportasi yang efektif dan efisien menjadi esensial. Tantangan yang ada adalah

keterbatasan lahan untuk menyediakan infrastruktur transportasi tersebut. Infrastruktur transportasi yang perlu disediakan harus dapat mengakomodasi kebutuhan pergerakan industri, permukiman, pergerakan jarak jauh. Selain itu, ketersediaan lahan dan kebutuhan untuk mengoptimalkan penggunaan lahan pada kawasan tersebut menjadikan posisi SS Waru menjadi strategis. Pergerakan arah utara-selatan dan arah timur-barat, serta arah pergerakan utara-timur, utara-selatan, selatan-utara, selatan-timur, menjadi strategis karena membantu melayani pergerakan-pergerakan tersebut.

Konsep Pengembangan Bertahap Simpang Susun Waru

Simpang Susun Waru dibangun dalam beberapa tahap, seiring dengan kebutuhan dan pertumbuhan lalu lintas pada kawasan tersebut. SS Waru mulai beroperasi tahun 1986 seiring dengan beroperasinya jalan tol tengah kota. Pada periode ini, bentuk dari simpang susun masih relatif sederhana, karena hanya berfungsi sebagai akses masuk dan keluar dari jalan tol. Dengan demikian, jenis simpang susun terompet menjadi pilihan jenis struktur, karena simpang susun hanya terdiri dari 3 lengan.

Sejalan dengan pertumbuhan lalu lintas khususnya pada ruas Waru-Gempol, kebutuhan terhadap infrastruktur jalan meningkat. Pembangunan jalan tol kemudian dilanjutkan pada ruas Surabaya-Gempol. Mempertimbangkan aspek konektivitas antar jaringan jalan tol, maka SS Waru menjadi pilihan sebagai lokasi masuk dan keluarnya lalu lintas dari dan menuju jalan tol Surabaya-Gempol. Penambahan kapasitas ini membawa konsekuensi pada penambahan dan pengembangan pada SS Waru. Pengelola jalan tol tidak membangun jalan akses dan masuk jalan tol dengan jenis terompet

pada kawasan yang dekat dengan simpang susun eksisting. Dengan demikian, pada periode ini SS Waru terdiri dari simpang susun jenis terompet kembar.

Perkembangan selanjutnya pada kawasan tersebut adalah pembangunan Jalan Tol Surabaya-Juanda. Jalan tol ini dibangun seiring dengan pembangunan Terminal 1 Bandar Udara Juanda. Selain layanan bandara, jalan tol ini juga melayani kawasan industri Rungkut (SIER) dan beberapa permukiman baru yang tumbuh pada kawasan. Dengan demikian, sekali lagi SS Waru mengalami pengembangan. Gambar 11 menampilkan secara lengkap perkembangan dari SS Waru.



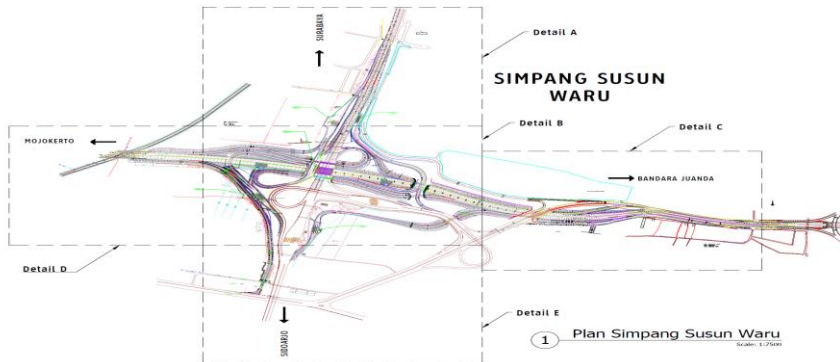
Gambar 11 Tahapan Pembangunan SS Waru sampai dengan Tahun 2022

Pembangunan Jalan Tol Surabaya-Juanda membawa perubahan yang cukup signifikan pada SS Waru, seperti ditampilkan pada Gambar 11. Hal ini disebabkan oleh kondisi kawasan. Sekitar 2 km ke sebelah timur dari SS Waru terdapat jalan nasional yang menghubungkan Sidoarjo-Surabaya. Jalan nasional ini mempunyai

peran penting pada kawasan, sehingga mempunyai volume tinggi karena melayani pengguna jalan dari beberapa kawasan, seperti dari Sidoarjo dan Malang, serta Mojokerto dan arah barat lainnya. Dengan demikian, persimpangan tidak sebidang (*overpass*) menjadi opsi untuk jalan tol Surabaya-Juanda. Selain itu, karena jalan tol harus menyediakan ramp keluar bagi pengguna jalan yang ingin menuju ke kawasan sekitar Wonocolo, maka *exit ramp* dibangun di sekitar *overpass* ini. Artinya, sistem SS Waru mulai dikembangkan lebih besar lagi ke arah timur.

Pengembangan jaringan jalan tol di kawasan dilanjutkan dengan pembangunan Jalan Tol Surabaya-Mojokerto. Memperimbangkan aspek konektivitas, Jalan Tol Surabaya-Mojokerto dibangun dan dikoneksikan dengan Jalan Tol Surabaya-Juanda. Struktur simpang tidak sebidang diperlukan antara Jalan Tol Mojokerto-Surabaya-Juanda dan Jalan Tol Surabaya-Gempol. Mempertimbangkan jarak dengan simpang lainnya di sebelah timur, maka struktur tidak sebidang ini membentang cukup panjang, seperti terlihat pada Gambar 11.

Pembangunan jaringan jalan tol pada kawasan ini yang dilakukan secara bertahap, sebagaimana telah didiskusikan sebelumnya, membawa konsekuensi pada aspek geometri dari simpang susun yang melayani jaringan tol ini (SS Waru). Geometri simpang susun harus mampu melayani pengguna jalan pada kawasan ini. Paling tidak terdapat 10 pembangunan bertahap elemen SS Waru yang diperlukan untuk melayani jaringan jalan di kawasan, seperti ditampilkan pada Gambar 12. Gambar tersebut menampilkan gambar kerja simpang susun sampai dengan tahap terakhir.



Gambar 12 Tampak Atas Simpang Susun Waru

Arah Lalu Lintas yang Dilayani

Tabel 9 menampilkan secara skematik ruas jalan/lengan dari SS Waru. Terdapat 16 ruas jalan (asal tujuan) yang membutuhkan layanan dari SS Waru ini. SS Waru tidak hanya menghubungkan antar ruas jalan tol, namun juga menghubungkan antara jalan tol dan jalan nasional di bawahnya. Sebagai contoh, bagi pengguna jalan yang berasal dari Kota Surabaya menggunakan jalan nasional, jika pengguna jalan tersebut bermaksud pergi ke Sidoarjo, maka dia perlu menggunakan SS Waru sebagai konektor untuk maksud tersebut. Dengan jumlah ruas yang dihubungkan, maka tingkat kompleksitas dari SS Waru menjadi cukup tinggi, seperti ditampilkan pada Tabel 9.

Tabel 9 Ruas Jalan yang Terhubung dengan SS Waru

No	Arah	Keterangan
1	Sidoarjo/Malang – Surabaya	Dari tol ke tol
2	Sidoarjo/Malang – Surabaya	Dari tol ke jalan nasional
3	Sidoarjo/Malang – Juanda	Dari tol ke tol
4	Sidoarjo/Malang – Juanda	
5	Sidoarjo/Malang – Mojokerto	Dari jalan nasional ke jalan tol

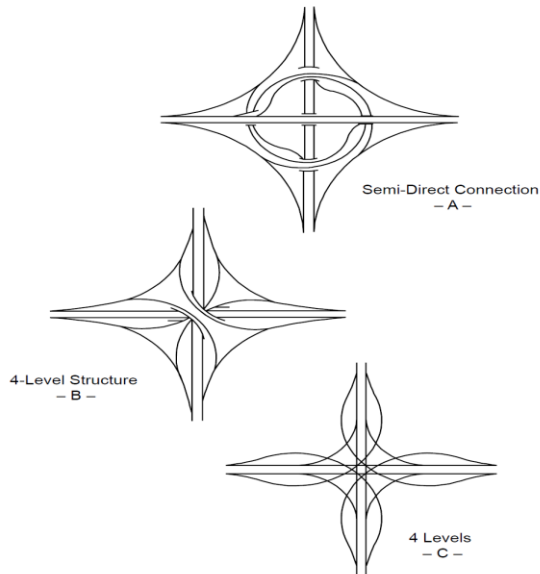
Tabel 9 Ruas Jalan yang Terhubung dengan SS Waru (lanjutan)

No	Arah	Keterangan
6	Sidoarjo/Malang– Mojokerto	Dari jalan nasional ke jalan tol
7	Juanda – Sidoarjo/Malang	Dari tol ke tol
8	Juanda – Surabaya/Gresik	Dari tol ke tol
9	Juanda – Surabaya lewat bawah	Dari tol ke jalan nasional
10	Surabaya – Juanda	Dari jalan nasional ke jalan tol
11	Surabaya – Mojokerto	Dari jalan nasional ke jalan tol
12	Surabaya – Sidoarjo/Malang	Dari jalan nasional ke jalan tol
13	Mojokerto – Surabaya	Dari tol ke tol
14	Mojokerto – Surabaya	Dari tol ke jalan nasional
15	Mojokerto – Sidoarjo/Malang	Dari tol ke tol
16	Mojokerto – Juanda	Dari tol ke tol

Tinjauan Aspek Geometri Simpang Susun Waru

Sebagai infrastruktur yang menghubungkan empat kawasan utama di Jawa Timur dengan 16 ruas jalan utama dan terletak pada kawasan dengan luasan yang terbatas, dibutuhkan disain geometri yang kompleks. Untuk menjelaskan bagaimana sistematika dari SS Waru dalam melayani ruas jalan tersebut, maka pada paragraf berikut ini akan dijelaskan disain geometri dari SS Waru.

Dengan jumlah ruas jalan yang perlu dilayani cukup banyak dengan volume lalu lintas yang tinggi, maka struktur simpang susun yang paling sesuai dengan kondisi seperti ini adalah *Directional Interchanges with Multilevel Structures* (AASHTO, 2018) seperti ditampilkan pada Gambar 13. Simpang susun jenis ini akan memberikan keuntungan terkait dengan lahan dan sistem pergerakan. Kondisi utama dari simpang susun ini adalah, struktur harus dibangun dalam waktu yang bersamaan.



Sumber: AASHTO (2018)

Gambar 13 Struktur Simping Susun *Directional Interchanges with Multilevel Structures*

Pada kasus SS Waru, kondisi ini tidak terpenuhi. Pembangunan jalan tol di kawasan dilakukan secara bertahap dan bahkan dalam kurun waktu yang cukup lama antar pembangunannya. Pembangunan setiap ruas jalan tol dilakukan sesuai dengan kebutuhan dan pertumbuhan lalu lintas. Pembangunan jaringan jalan tidak didasarkan *grand design* yang disiapkan jauh sebelum pembangunan kawasan dilakukan. Akibatnya, pembangunan jalan tol dilakukan sesuai dengan kebutuhan layanan pada saat itu. Demikian juga dengan bangunan pelengkap dari jalan tol tersebut, seperti simpang susun.

Sebagai ilustrasi, mari kita lihat bagaimana struktur SS Waru pada periode tahun 2006, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 14.

Pada periode tersebut, terdapat dua struktur simpang susun dengan tipe terompot yang terhubung keduanya dengan ruas yang ditengahnya terdapat pintu jalan tol. Jenis simpang susun ini digunakan karena pada saat itu struktur simpang susun didesain untuk mengakomodasi simpang dengan tiga lengan. Simpang sebelah kiri digunakan untuk mengakomodasi pergerakan jalan tol dari arah utara (Surabaya dan Gresik) yang mempunyai tujuan ke Juanda dan sebaliknya. Simpang susun yang sebelah kiri juga didisain untuk mengakomodasi pergerakan dari Selatan (Sidoarjo/Malang) yang bertujuan ke Bandara Juanda.



Gambar 14 Simpang Susun Waru Periode Tahun 2006

Sejalan dengan bertambahnya volume lalu lintas dan turunnya kinerja pada ruas jalan nasional Surabaya-Krian, kebutuhan terhadap adanya Jalan Tol Surabaya-Mojokerto mulai dapat dirasakan. Sejalan dengan pembangunan Jalan Tol Surabaya-Mojokerto, maka dibutuhkan koneksi dengan jaringan jalan yang lain. Jaringan jalan tersebut tidak hanya antara jalan tol ke jalan tol, namun juga koneksi antara jalan tol dengan jalan nasional yang terdapat pada kawasan tersebut.

Untuk mengkoneksikan simpang susun yang sudah ada dengan rencana koneksi dengan rencana Jalan Tol Surabaya-Mojokerto, pengelola jalan tol membangun simpang susun baru sebagaimana ditampilkan pada Gambar 15. Simpang susun yang baru ini dibangun di sebelah utara dari simpang susun eksisting dengan jalur utamanya menghubungkan Jalan Tol Surabaya-Juanda dan Surabaya-Mojokerto. Dalam rangka mengakomodasi jaringan lainnya pada kawasan, maka dibangunlah beberapa *ramp*, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 15 tersebut. Sebagai contoh, *ramp* baru dibangun untuk mengakomodasi pergerakan dari Surabaya Utara yang menuju ke Juanda, demikian juga beberapa *ramp* untuk menghubungkan jaringan jalan nasional di bawah ke jalan tol.



Gambar 15 Simpang Susun Waru Periode Tahun 2012

Untuk mengakomodasi pergerakan dari ruas jalan yang cukup banyak (16 ruas jalan), maka dibutuhkan tersedianya akses masuk dan keluar yang memudahkan bagi pengguna jalan. Untuk itu di kawasan SS Waru ditambahkan beberapa *ramp* dengan bentuk terompet, sebagaimana disajikan pada Gambar 16. Struktur tersebut yang sampai saat ini terbangun di SS Waru.



Gambar 16 Simpang Susun Waru Periode Tahun 2014

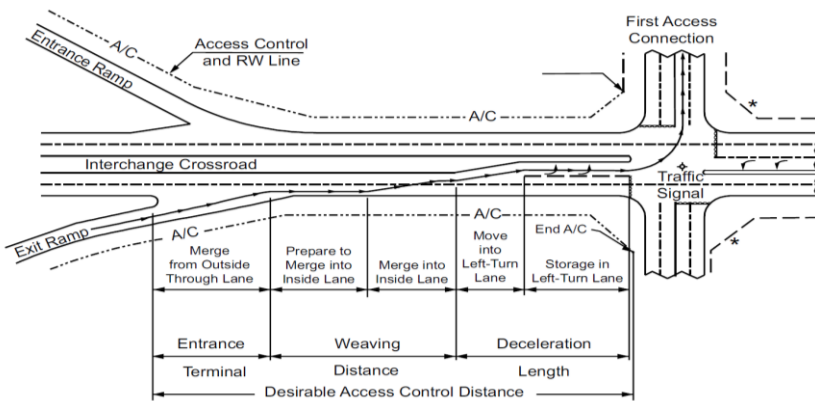


Gambar 17 Simpang Susun Waru Periode setelah Tahun 2020

Simpang susun adalah struktur yang mahal untuk dibangun dan pada kondisi tertentu susah untuk dikembangkan. Oleh karena itu, dari awal perencanaan simpang susun dilakukan dengan baik dan mencerminkan kebutuhan di masa yang akan datang (AASHTO, 2018). Oleh karena itu, dalam perencanaan elemen simpang susun seperti *ramp* dan kontrol akses perlu mendapat perhatian. Dengan kata lain, ketersediaan lahan yang cukup untuk mengakomodasi kebutuhan di masa yang akan datang menjadi salah satu pertimbangan utama dalam membangun suatu simpang susun.

Gambar 20 menampilkan ilustrasi dari elemen-elemen dari suatu

simpang susun. Setiap kendaraan yang masuk pada suatu simpang susun akan melakukan tindakan sebagai berikut: 1) melakukan persiapan untuk masuk ke simpang susun, 2) Persiapan untuk merging, 3) melakukan *merging*, 4) pindah ke lajur. Dengan demikian, panjang *ramp* simpang susun dan panjang simpang susun itu sendiri perlu mempertimbangkan hal-hal tersebut.



Sumber: AASHTO (2018)

Gambar 18 Elemen-elemen Simpang Susun yang Dipertimbangkan untuk Menentukan Panjang Simpang Susun

Gambar 19 memberikan ilustrasi dan contoh terkait dengan konsep di atas. Bagi pengendara yang akan memasuki SS Waru dari arah selatan (Sidoarjo) dengan tujuan ke Mojokerto, maka pengendara tersebut perlu menggunakan *ramp diverging lane* (Gambar a). Berdasarkan pengukuran, Panjang *taper lane* yang disediakan adalah 228 m. Setelah melewati *diverging lane*, pengendara tersebut perlu mempersiapkan untuk memasuki *off-ramp Gate Waru 5* (Gambar b), yang berdasarkan pengukuran mempunyai panjang 425 m. Setelah itu bersiap memasuki *on-ramp* menuju arah Mojokerto yang mempunyai panjang 330 m (Gambar c). Keluar dari *on-ramp* tersebut telah disediakan *taper* untuk *merging* yang mempunyai

panjang 190 m (Gambar d). Dengan demikian, kebutuhan panjang kawasan paling tidak sekitar 1.200 m.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 21 Contoh Kebutuhan Panjang *Ramp* pada Sekitar Pintu Waru 5

KESIMPULAN

Simpang Susun Waru menjadi salah satu contoh kasus bagaimana upaya efisiensi pergerakan pada suatu kawasan perkotaan dapat dilakukan. Enam belas ruas jalan baik ruas jalan nasional maupun jalan tol bertemu atau menjadi bagian dari SS Waru ini. Sekalipun begitu, beberapa catatan perlu diberikan terkait dengan SS Waru, di antaranya sebagai berikut: 1) pengembangan jaringan jalan yang tidak direncanakan dari awal akan berakibat pada kerumitan dan tantangan dalam menyediakan simpang susun untuk maksud konektivitas dari jaringan jalan, 2) demikian halnya dengan kebutuhan lahan yang perlu disediakan menjadi besar, karena struktur simpang susun yang diperlukan untuk pengembangan simpang susun harus disesuaikan dengan lahan yang tersedia, yang berakibat pada bentuk simpang susun kadang tidak seperti standar, 3) konsekuensi lain dari pengembangan yang kurang terencana dengan baik adalah struktur simpang susun dan bagian-bagiannya seperti *ramp* menjadi kurang efisien karena struktur harus menyesuaikan dengan kondisi lahan yang sudah digunakan oleh struktur lain dari simpang susun sehingga pergerakanpun menjadi tidak seefisien jika direncanakan dari awal, 4) sistem informasi jalan seperti perambuan dan informasi arah menjadi sangat *urgent* untuk memastikan bahwa pengguna jalan tidak mengalami kesalahan dalam mengambil salah satu *ramp* untuk menuju ke suatu tujuan yang telah direncanakan.

DAFTAR PUSTAKA

American Association of State Highway and Transportation

- Officials (AASHTO). 2018. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. 2018* (7th ed.). Washington, DC.
- AustRoads. 2015. *Guide to Road Design. Part 4C: Interchanges*. Sydney.
- Chandra, A. M. 2020. *Highway Engineering*. New Age International Limited. London.
- Direktorat Jenderal Bina Marga (DJBMM). 2005. *Perencanaan Persimpangan Jalan Tidak Sebidang. No BM/05/2005*. Jakarta.
- Direktorat Jenderal Bina Marga (DJBMM). 2009. *Geometri Jalan Bebas Hambatan Untuk Jalan Tol. No 007/BM/2009*. Jakarta.
- Garber, N. J., dan Fontaine, M. D. 1999. *Guidelines for Preliminary Selection of the Optimum Interchange Type for a Specific Location*. Virginia Transportation Research Council. Charlottesville, VA.
- Gauteng Provincial Government. 2007. *Road Design Manual: Volume 1: Geometrics*. Johannesburg Gauteng.
- Swedish Road (SweRoad). 2000. *Principles for Selection of Intersection Type*. Traffic Safety Strategy Highway Design. Stockholm.
- United Nations. 2018. *Revision of World Urbanization Prospects*. New York, NY.



KAJIAN KRITIS PENGEMBANGAN JALAN TOL DI INDONESIA

Pengelolaan Aspek Teknis dalam Perancangan dan Pembangunan Jalan Tol

TEKNOLOGI *BUILDING INFORMATION* *MODELLING* DALAM MANAJEMEN KONSTRUKSI JALAN TOL DI INDONESIA

Biemo W. Soemardi dan Reini D. Wirahadikusumah
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

PENDAHULUAN

Seiring dengan maraknya perkembangan dan pemanfaatan teknologi elektronik digital di era revolusi industri 4.0, penggunaan teknologi *Building Information Modelling* atau BIM mulai banyak diterapkan di berbagai proyek pembangunan infrastruktur, termasuk infrastruktur jalan di Indonesia. Berbagai proyek pembangunan jalan di Indonesia saat ini telah memanfaatkan teknologi BIM pada berbagai tahapan perencanaan, perancangan dan pelaksanaan konstruksi jalan, jembatan dan terowongan.

Meskipun teknologi BIM ini relatif baru di Indonesia, tetapi dasar teknologinya sendiri sebenarnya telah sejak lama diterapkan di berbagai proyek gedung dan infrastruktur di Indonesia, dalam bentuk visualisasi digital rancangan bangunan (Soemardi, 2010). Dengan semakin kondusifnya ekosistem usaha berbasis teknologi digital dan internet, di masa mendatang teknologi BIM diperkirakan akan menjadi salah satu teknologi standar pengelolaan konstruksi infrastruktur di Indonesia.

Teknologi Visualisasi Digital pada Proyek Konstruksi

Teknologi BIM merupakan salah satu wujud teknologi yang baru berkembang (*emerging technology*) yang akhir-akhir ini - seiring dengan meningkatkan pengaruh revolusi industri 4.0 - menjadi semakin populer di kalangan industri, termasuk di industri konstruksi di Indonesia. Teknologi BIM adalah perwujudan dari konsep proses holistik dalam menciptakan dan mengelola informasi tentang suatu objek atau aset terbangun (Autodesk, 2022, NBS, 2022). Pada tataran konseptual, BIM dimanifestasikan sebagai suatu objek visual yang mengandung beragam karakteristik atau *property*. Data tentang keragaman karakteristik objek inilah yang dimanfaatkan untuk menciptakan informasi yang dikelola sebagai basis dalam berbagai pengambilan keputusan. Konsep BIM tercermin dalam tiga prinsip utama, yaitu digitalisasi, kolaborasi, dan desentralisasi.

Pada tataran praktis, BIM secara sederhana dapat dimaknai sebagai suatu pendekatan kolaboratif antara berbagai pelaku pada berbagai tahapan konstruksi untuk menciptakan, mengelola, dan memanfaatkan informasi melalui penggunaan teknologi visual secara digital (*digital visualization*). Teknologi visualisasi digital dimanfaatkan sebagai media kolaborasi antara pelaku yang secara terdesentralisasi dapat mengembangkan dan mengelola informasi digital secara mandiri sesuai kebutuhan masing-masing.

Sebagaimana disampaikan di atas, BIM sebenarnya merupakan wujud evolusi teknologi visualisasi yang telah banyak digunakan di industri konstruksi. Penggunaan komputer sebagai alat bantu penciptaan citra objek dalam bentuk model 3 dimensi telah dimulai

sejak awal tahun 1980-an di lingkungan industri arsitektur, permesinan, manufaktur, dan industri produksi lainnya. Peningkatan kemampuan *rendering* membantu visualisasi grafis menjadi lebih baik dan lebih realistis. Berbagai perangkat lunak *rendering* 3D dikembangkan berdasarkan teknik *rendering* dan visualisasi yang dipelopori oleh Shaterland, Catmull dan Newell (Easy Render, 2022). Di tahun 1990-an penggunaan komputer untuk visualisasi grafis 3D semakin populer, yang tercermin dalam bentuk berbagai *software* yang banyak membantu para arsitektur dan perancang objek. Saat itu, dengan bantuan *software Computer-Aided Design and Drafting (CADD)*, informasi yang disajikan masih terbatas pada geometri, dimensi, dan penampakan warna serta tekstur. Meskipun demikian, tambahan karakteristik pada objek ini sudah sangat membantu para arsitek dan perancang objek untuk bereksperimen terhadap citra model tiga dimensi suatu objek dari berbagai sudut pandang.

Perkembangan lebih lanjut dari model visualisasi 3 dimensi orthogonal suatu objek ini memungkinkan arsitek dan perancang untuk mempelajari interaksi antara keberadaan dan posisi model dari dua atau lebih objek dalam ruang, termasuk kemungkinan adanya perbenturan. Fasilitas *clash detector* memungkinkan arsitektur dan perancang mendeteksi lebih dini potensi munculnya konflik keberadaan dua atau lebih objek dalam satu lokasi dan mengeksplorasi solusinya. Dengan berpedoman pada prinsip objek sebagai entitas yang mempunyai *property*, sebuah objek fisik dapat dimodelkan secara visual dengan menambahkan *property* lain dari objek sebagai dimensi tambahan objek tersebut. Sebelum istilah BIM populer, model dengan beragam *properties* dikenal dengan istilah pemodelan *nD*.

Teknologi visualisasi objek 3D kemudian berkembang dengan kemampuan mengintegrasikan unsur gerak. Teknologi tersebut biasa dikenal dengan teknologi *3D animation*. Teknologi animasi 3D mengintegrasikan dimensi panjang, lebar, dan tinggi dengan dimensi waktu, sehingga visualisasi perubahan bentuk objek 3D tersebut mencerminkan unsur gerak. Teknologi animasi 3D adalah teknologi awal yang mampu mengintegrasikan unsur waktu ke dalam teknologi visualisasi 3D, dengan memberikan perubahan koordinat dan perubahan sudut dari setiap objek untuk setiap waktu. Dengan adanya teknologi animasi 3D tersebut, para perencana proyek dapat memvisualisasikan proses konstruksi yang akan dilaksanakan dengan lebih baik.

Identifikasi potensi perbenturan pada visualisasi 3D tidak terbatas pada posisi akhir dari objek yang berbenturan tetapi juga dapat memberikan gambaran gerak (animasi) selama proses konstruksi. Dalam teknologi BIM, visualisasi objek 3D dapat dimanfaatkan untuk menilai kelayakan proses konstruksi (*constructability*) yang terkait dengan informasi pergerakan objek pada berbagai tahap proses konstruksi, sehingga dapat menjadi pertimbangan pelaksanaan proses konstruksi yang aman, efektif, dan efisien. Animasi dalam teknologi BIM bahkan dapat ditingkatkan kualitasnya dengan teknologi *Virtual Reality* dan *Augmented Reality* (VR-AR) sehingga pengguna BIM dapat memperoleh sensasi yang lebih riil tentang kondisi di lapangan dibandingkan dengan melihat dari layar monitor komputer.

Sistem perencanaan 4D pada dasarnya adalah penggabungan antara visualisasi grafis 3D dengan aspek waktu sebagai dimensi keempat, atau dengan kata lain aspek ruang serta aspek waktu digabungkan

menjadi satu sebagaimana terjadi pada proses konstruksi yang sesungguhnya. Selanjutnya, informasi tentang unsur biaya dapat difasilitasi sebagai dimensi kelima (5D) dan *property* lainnya. Fitur-fitur visualisasi ini sangat membantu dalam pengelolaan proyek-proyek konstruksi, mulai dari tahap perencanaan, perancangan, pengadaan, hingga konstruksi dan serah terima. Fitur visualisasi BIM kini bahkan telah dimanfaatkan pada tahap pengoperasian.

Perkembangan dan Penerapan Teknologi BIM pada Manajemen Konstruksi

Evolusi teknologi BIM telah mencapai tingkat kematangan yang cukup sehingga dapat dimanfaatkan tidak saja pada tahap perencanaan, perancangan, dan konstruksi, tetapi hingga tahap pengoperasian dan pemeliharaan objek infrastruktur. Manfaat utama dari teknologi BIM adalah kolaborasi antar pemangku kepentingan proyek. BIM juga berfungsi sebagai media komunikasi dan koordinasi antar semua pemangku kepentingan proyek: pemilik, perancang, dan pelaksana konstruksi, serta semua pabrikan dan pemasok yang terlibat dalam suatu proyek konstruksi. Dengan memadukan dengan berbagai teknologi maju lainnya, informasi yang terhimpun dalam BIM akan semakin meningkat cakupan dan kualitasnya, sementara proses kolaborasi dan koordinasinya juga menjadi lebih efektif.

Penerapan paling awal dari teknologi BIM adalah sebagai instrumen visualisasi desain, yang memberikan informasi tentang perkiraan rupa dan wujud suatu objek sebelum terwujud secara fisik. Rupa dan wujud maya (*virtual*) di layar komputer membantu perancang menyajikan hasil rancangannya kepada pemberi tugas. Informasi

wujud visual (dimensi dan geometri) tiga dimensi ini juga memungkinkan perancang dan/atau calon pelaksana untuk mempelajari berbagai kemungkinan timbulnya konflik dan masalah. Contoh paling jelas adalah fasilitas *clash detector* yang mampu mengidentifikasi potensi perbenturan dua atau lebih objek pada ruang/tempat yang sama. Fasilitas ini sudah menjadi fitur utama yang digunakan oleh perancang sistem arsitektur, struktur, dan *Mechanical Electrical Plumbing* (MEP).

Pada tahap perencanaan dan perancangan, teknologi BIM dapat dipadukan dengan teknologi pengumpulan data dan pengolahan citra untuk menggambarkan karakteristik lokasi (lahan) dimana objek infrastruktur akan dibangun. Data topografi suatu lokasi atau wilayah dapat disajikan dalam bentuk visual digital untuk dipadukan dengan objek infrastruktur yang dirancang untuk dibangun di atasnya. Sama dengan pemodelan objek 3 dimensi, *digital terrain modeling* atau DTM adalah representasi visual koordinat 3 dimensi dari kondisi permukaan lahan, sehingga dengan mudah dapat dipadukan dengan data digital BIM 3D. Data untuk DTM dapat diperoleh dari hasil pengukuran manual dengan bantuan alat ukur pemetaan konvensional atau juga dengan bantuan teknologi yang lebih maju, seperti *Light Distance and Ranging* (LiDAR) dan pemetaan dengan teknologi drone atau *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV).

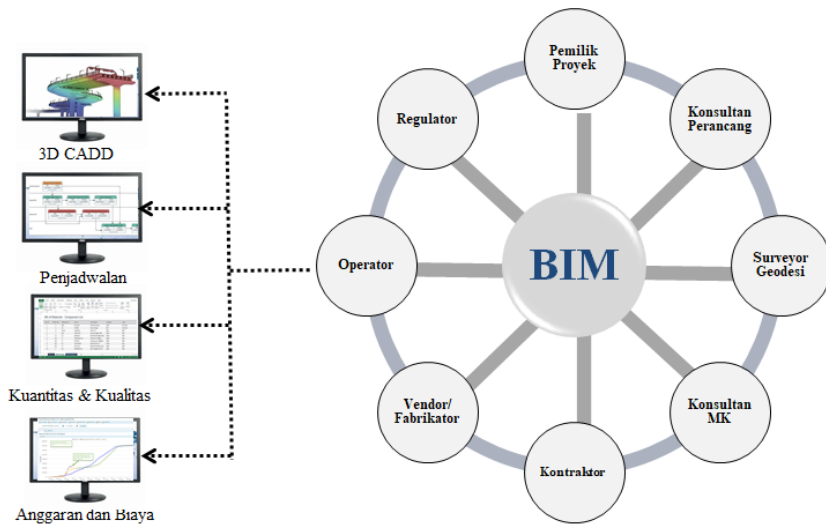
Teknologi BIM merupakan teknologi maju yang relatif paling cepat penyerapan dan pemanfaatannya pada industri konstruksi di Indonesia. Terutama bagi kontraktor besar, investasi pada teknologi berbasis teknologi informasi dinilai lebih layak dibandingkan dengan investasi pada peralatan dan permesinan yang membutuhkan

anggaran tidak sedikit dan penguasaan teknologi (*technology mastery*) yang relatif lebih sulit. Selain itu, infrastruktur teknologi informasi (perangkat keras, perangkat lunak, dan jaringan internet) di Indonesia saat ini sudah lebih mudah diakses. Kecenderungan saat ini memungkinkan bagi perusahaan konstruksi untuk tidak perlu lagi membeli, memasang, dan memelihara sendiri perangkat aplikasi BIM tetapi dapat memanfaatkan atau menyewa jasa layanan yang disediakan para vendor. Hal ini lebih mempermudah bagi pelaku industri konstruksi Indonesia untuk mendapatkan akses dan memanfaatkan teknologi BIM bagi pengelolaan proyek-proyek pembangunan infrastruktur.

Pengelolaan proyek konstruksi akan dapat lebih memanfaatkan potensi penggunaan teknologi BIM jika dimensi (*property*) yang terkandung di dalamnya juga semakin lengkap. BIM 3D dapat dipadukan dengan aplikasi penjadwalan untuk menggambarkan status terbentuknya objek fisik pada setiap proses konstruksi. Seperti yang tampak pada skema pada Gambar 1, BIM memungkinkan para pemangku kepentingan dalam suatu proyek konstruksi untuk berinteraksi kolaboratif secara virtual dalam membahas berbagai aspek proyek, seperti anggaran dan biaya, penjadwalan dan berbagai aspek penting manajemen proyek lainnya.

Pada tahap awal proyek, melalui BIM, pemilik dapat berinteraksi dalam mengevaluasi usulan konsep rencana dan rancangan yang diajukan oleh konsultan perencana/perancang. Berbagai alternatif rancangan disajikan dalam bentuk simulasi visualisasi 3D untuk ditelaah dan mendapatkan tanggapan/masukan dari pemilik proyek. Dalam proses pengembangan perencanaan dan perancangan, konsultan juga dapat memanfaatkan data topografi lahan yang

disiapkan oleh surveyor geodesi untuk menyesuaikan rancangan objek terhadap karakteristik lahan yang ada. Hasil rancangan objek selanjutnya dapat dianalisis kelayakan strukturnya dengan menggunakan beragam perangkat lunak analisis struktur dan geoteknik. Pada tahap perancangan ini, dengan menggunakan fasilitas *quantity take-off* dan *cost estimating*, identifikasi elemen objek dan kuantitasnya sudah dapat dibangkitkan secara otomatis oleh BIM untuk mendapatkan daftar material dan harganya.



Gambar 1 BIM dalam Manajemen Proyek

BIM juga memfasilitasi interaksi antara konsultan perencana/perancang dengan kontraktor pelaksana, dimana rancangan dalam bentuk digital beserta elemen-elemen objek yang menyusunnya digunakan oleh kontraktor untuk menganalisis berbagai kemungkinan metode pelaksanaannya. Selain terhadap proses dan jadwal pelaksanaan, BIM juga memungkinkan kontraktor melakukan analisis terhadap kelayakan bangun (*constructability analysis*) dan keselamatan kerja (Hossain, et al., 2018), untuk

memperoleh proses konstruksi yang paling aman efektif dan efisien. Data digital elemen objek juga dapat dimanfaatkan oleh kontraktor untuk berkoordinasi dengan para vendor, pemasok, dan fabrikator mitranya untuk menentukan strategi pemasokan dan logistik yang optimal.

Dalam konteks pengelolaan proyek, selama proses perancangan dan konstruksi, konsultan manajemen proyek memanfaatkan BIM untuk memantau dan mengendalikan kinerja proyek, baik dalam aspek biaya mutu dan waktu. Konsultan MK juga dapat menggunakan BIM dalam mencari alternatif solusi terhadap kemungkinan perubahan dan hambatan pelaksanaan proyek dengan tetap mengacu pada pemenuhan persyaratan keselamatan kerja dan ketentuan-ketentuan konstruksi lain yang diatur oleh regulator. Akhirnya, teknologi BIM dapat dimanfaatkan pula pada tahap pasca pembangunan, sehingga informasi yang terkandung dalam objek *virtual* dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan pengoperasian, pemeliharaan, dan bahkan hingga tahap pembongkaran.

KARAKTERISTIK TEKNOLOGI *BUILDING INFORMATION MODELLING*

Dalam kurun waktu lima tahun terakhir ini, BIM telah menjadi salah satu teknologi yang paling banyak dibicarakan di lingkungan konstruksi di Indonesia. Berbagai seminar, pelatihan dan pameran pertunjukan telah diselenggarakan pada berbagai kegiatan penting berskala nasional. Namun, sejauh mana industri konstruksi Indonesia telah memahami dan mampu memanfaatkan kemampuan teknologi BIM secara menyeluruh masih belum dapat dijawab

dengan akurat. Untuk itu perlu dipelajari dan dipahami sejarah perkembangan dan karakteristik BIM itu sendiri.

Sejarah Perkembangan Teknologi BIM

Teknologi BIM pada dasarnya adalah suatu konsep kolaborasi antar berbagai pihak dalam melaksanakan suatu proyek. Perkembangan teknologi ini diawali dengan pemanfaatan citra dua dimensi dari suatu objek secara digital di layar komputer, yang lambat laun berevolusi hingga mampu menampilkan citra 3 dimensi orthogonal dan karakteristik objek lainnya. Meskipun istilah BIM pertama kali baru dimunculkan secara resmi dalam sebuah artikel ilmiah karya Nederveen dan Tolman (1992), BIM sebenarnya berasal dari konsep *Building Description System/BDS* yang dicetuskan oleh Charles Eastman dkk., (1974), hampir dua dekade sebelumnya. Pada waktu itu, apa yang dilakukan oleh Eastman dan kawan-kawan merupakan terobosan terhadap bagaimana arsitek dan perancang memandang model visual sebagai dasar melakukan perancangan. Dengan mendekomposisikan sebuah objek virtual menjadi elemen-elemen penyusun dengan karakteristik berbeda memungkinkan penerapan konsep basis data ke dalam objek tersebut. BDS diklaim dapat mengurangi redundansi gambar pada berbagai skala sehingga gambar-gambar konstruksi dapat disajikan dengan lebih efisien. Penggunaan komputer sebagai basis penggambaran menggantikan kertas juga diyakini akan meningkatkan efisiensi proses penggambaran dan perancangan. Sejak saat itu berbagai aplikasi visualisasi berbasis komputer terus berkembang pada sektor industri, baik di lingkungan manufaktur maupun konstruksi.

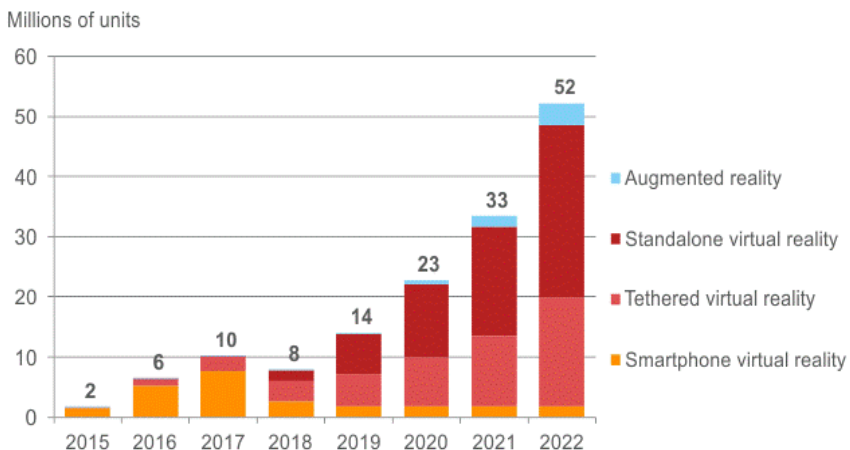
Kini, tiga puluh tahun kemudian, BIM telah menjadi salah satu

instrumen standar penting pada industri untuk penerapan konsep perancangan dan konstruksi secara visual pada pengelolaan proyek-proyek konstruksi. BIM telah ditetapkan oleh berbagai organisasi internasional sebagai standar industri untuk pemanfaatan representasi digital bersama dari suatu aset terbangun guna memfasilitasi proses desain, konstruksi, dan pengoperasian untuk membentuk dasar pengambilan keputusan yang andal (BSI, 2019). Standarisasi ini memungkinkan interaksi berbagai pihak pada berbagai tahap konstruksi terjadi, yang pada gilirannya mengubah paradigma perancangan dari yang awalnya terpisah-pisah secara mandiri menjadi kolaboratif.

Sebagai instrumen alat bantu perancangan, BIM tidak lagi berfungsi sebagai alat bantu gambar (CADD) tetapi sudah menjelma menjadi media komunikasi kolaborasi berbagai pihak yang mempunyai kepentingan dalam perancangan dan konstruksi. Peningkatan kemampuan layanan internet dan mekanisme kolaborasi ini juga mengubah paradigma proses perancangan yang awalnya bersifat sekuensial menjadi paralel terintegrasi. Jika sebelumnya pertukaran *file* informasi dilakukan secara manual antar perangkat keras, teknologi internet memungkinkan interaksi secara digital dapat dilakukan secara lebih efektif dan efisien, bahkan secara bersamaan dan dalam waktu yang hampir bersamaan. Teknologi *cloud computing* bahkan membawa manfaat lebih jauh lagi. Penyimpanan data dan informasi terkait dengan perancangan dan konstruksi dalam *cloud* memungkinkan pengguna untuk mendapat akses terhadap data dan informasi tersebut tanpa harus disibukkan dengan birokrasi proses yang panjang dan rumit serta ketersediaan media penyimpanan dan pemeliharaan sendiri (Chuang, dkk, 2011).

Selain digunakan sebagai media untuk meningkatkan kolaborasi pada tahap perancangan dan konstruksi, BIM juga dimanfaatkan sebagai media simulasi konstruksi untuk meningkatkan efektivitas, efisiensi, dan keselamatan proses konstruksi. Pengguna dapat memanfaatkan BIM sebagai media pelatihan atau eksperimen yang dapat membantu meningkatkan kepedulian terhadap kondisi lingkungan lapangan konstruksi (Soemardi & Erwin, 2017). Di lingkungan industri konstruksi, saat ini teknologi BIM telah banyak dipadukan dengan teknologi lain seperti *Virtual* dan *Augment Reality* (VR/AR), yang memungkinkan pengguna untuk meningkatkan sensasi sebagaimana kondisi nyata di lapangan.

Sebuah survei yang dilakukan oleh CCS Insight menunjukkan perkembangan penggunaan teknologi VR dan AR di dunia yang relevan dengan perkembangan kemampuan BIM (OpenBIM, 2022) sebagaimana disajikan dalam Gambar 2.



Sumber: OpenBIM (2022)

Gambar 2 Pertumbuhan Teknologi VR dan AR

Dari grafik di atas terlihat bahwa pada dua tahun terakhir, pemanfaatan VR telah semakin meningkat mengiringi peningkatan penggunaan teknologi VR. Dengan memadukan kemampuan teknologi AR ke dalam BIM, para perancang dan pelaksana konstruksi dapat dengan lebih cepat dan akurat melakukan modifikasi terhadap objek fisik riil yang sudah terbangun/terpasang. Kemampuan ini tentunya akan sangat bermanfaat bagi proses perancangan dan konstruksi pada proyek-proyek pembangunan infrastruktur seperti jalan tol yang banyak mengandung ketidakpastian dan perubahan. Kemampuan yang sama juga dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan inspeksi infrastruktur terbangun (Bolouriana dan Hammad, 2020). Gambar visual suatu objek yang besar yang sulit dilakukan dapat diatasi dengan pencitraan LiDAR yang dipasang pada pesawat tanpa awak (UAV), yang kemudian dapat dimodelkan ke dalam BIM untuk analisis lebih lanjut.

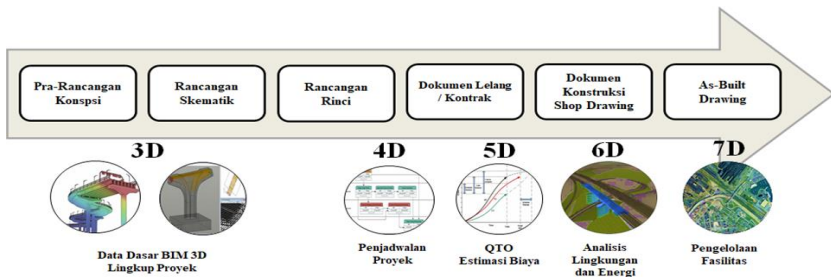
Tingkat Kematangan dan Kompleksitas Teknologi BIM

Sebagaimana telah disinggung dalam sejarah perkembangannya, aplikasi teknologi BIM mempunyai berbagai tingkatan sesuai dengan tahapan dan kompleksitas penerapannya. Tingkat kematangan dan kompleksitas BIM bervariasi mulai dari sekedar representasi visual objek 3 dimensi hingga menjadi informasi visual tentang berbagai aspek terkait proses penciptaan/produksi dan penggunaan objek tersebut. Berikut uraian singkat tentang karakteristik kematangan BIM dan dimana diterapkannya.

Dimensi BIM

Sebagai instrumen representasi objek secara visual BIM dikategorikan menjadi beberapa level. Menurut Eastman dkk (2011)

karakteristik BIM dicerminkan dari objek parametrik yang berbeda dengan objek 3D tradisional. Objek parametrik pada BIM tidak saja mengandung definisi parameter geometrik tetapi juga data dan aturan yang terkait dengannya. Objek parametrik pada BIM dapat dinyatakan dalam berbagai tingkatan agregasi berdasarkan suatu ketentuan hirarkis tertentu. Karakteristik ini memungkinkan suatu objek untuk dikaitkan dengan objek lainnya untuk menghasilkan derajat informasi objek dengan makna yang lebih besar, luas, dan lebih rinci. Konvensi umum tingkatan dimensi BIM berturut-turut adalah BIM 3D (geometri), BIM 4D (penjadwalan), BIM 5D (estimasi biaya), BIM 6D (analisis lingkungan dan energi), dan BIM 7D (pengelolaan fasilitas dan keberlanjutan) sebagaimana disajikan dalam Gambar 3.



Gambar 3 Dimensi BIM dan Penggunaannya dalam Proses Perancangan - Konstruksi

Derajat informasi yang terkandung dari suatu objek atau data model BIM dinyatakan sebagai dimensi BIM. Kesepakatan umum yang berlaku di industri membagi dimensi BIM menjadi nD. BIM 3D merupakan bentuk paling umum yang banyak digunakan untuk menyajikan informasi geometri suatu objek. Informasi yang terkandung dalam BIM 3D, pada suatu landasan umum (*common platform*) digunakan secara bersama oleh berbagai pengguna/

pemangku kepentingan. Pada proses perancangan jalan atau jembatan misalnya, BIM 3D menyajikan informasi geometri dan dimensi jalan/jembatan yang dapat disesuaikan peletakkannya dengan data/informasi topografi lahan dan bangunan-bangunan di sekitarnya, atau dengan data dari GIS lainnya. Informasi pada data model BIM 3D juga dapat dikirim ke perancang struktur untuk analisis struktural lebih lanjut dengan menggunakan perangkat lunak analisis struktur. Di sini mulai tampak mekanisme kolaborasi antar berbagai disiplin kerja.

Tingkatan selanjutnya adalah BIM 4D, di mana parameter waktu ditambahkan sehingga memberikan gambaran visual tentang suatu objek yang berubah wujud seiring dengan perubahan waktu. Informasi yang terkandung dalam BIM 4D memungkinkan pengguna atau pemangku kepentingan untuk mengevaluasi urutan proses konstruksi yang terkait dengan perubahan bentuk suatu objek sehingga perancangan menjadi lebih baik dan efektif. Selanjutnya ketika kuantitas elemen dan estimasi biaya ditambahkan pada objek 3D maka model tersebut berubah menjadi BIM 5D. Informasi tentang geometri, jumlah dan jenis elemen, jadwal dan urutan pekerjaan serta estimasi biaya dari setiap elemen membantu perancang untuk menghasilkan estimasi biaya proyek. BIM 5D yang dipadukan dengan perangkat lunak estimasi biaya memberikan informasi tentang jumlah dan biaya bahan, upah, peralatan, perakitan, dan komponen biaya-biaya lainnya.

Untuk pembangunan sebuah jembatan pada suatu proyek jalan tol, BIM 4D dan 5D membantu manajemen proyek untuk menyusun estimasi dan penganggaran biaya sesuai dengan skenario tahapan pelaksanaan pekerjaan. Informasi BIM 4D dan 5D dapat dibagikan kepada kontraktor dan para pemasok material atau fabrikasi elemen

girder beton pracetak. Jika terjadi revisi terhadap rancangan model 3D *girder* pada saat fabrikasi di *casting yard*, maka informasi tersebut dapat didiseminasikan kepada manajer proyek dan bagian estimasi biaya untuk penyesuaian biaya dan jadwal/waktu pelaksanaan, serta metode kerja di lapangan.

Dimensi data model BIM selanjutnya dapat ditingkatkan menjadi BIM 6D dan BIM 7D. Data model BIM juga dapat digunakan sebagai media untuk memantau dan menganalisis kemampuan keberlanjutan suatu fasilitas terbangun. Data tentang kinerja suatu objek yang ditangkap melalui sensor-sensor yang diletakkan/dibenamkan ke dalam objek, dapat dihubungkan dengan BIM 6D, sehingga membantu pengelola fasilitas untuk memahami lebih baik perilaku, kinerja kebutuhan energi agar fasilitas tersebut dapat berfungsi secara mandiri dan hemat energi (*self-sustainable and energy efficient*).

BIM 7D, juga sering disebut *integrated BIM*, adalah data model BIM yang menyediakan informasi tambahan yang dapat digunakan dalam pengelolaan dan pengoperasian fasilitas di masa mendatang (*facility management*). Penggunaan BIM 7D mengubah paradigma estimasi biaya yang semula hanya fokus pada estimasi biaya konstruksi menjadi analisis lengkap *life cycle costing*. Data yang terkandung dalam BIM 7D antara lain mencakup karakteristik alat atau instrumentasi yang terpasang, identitas pabrikan/pemasok elemen, tanggal instalasi, dan garansi. Informasi dalam BIM 7D dapat membantu pengelola untuk melakukan perencanaan yang lebih baik dalam pengoperasian, pemeliharaan, dan perbaikan elemen fasilitas.

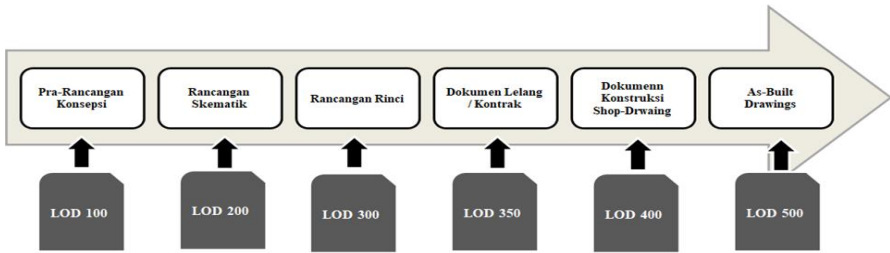
Informasi dari data model BIM 6D dan 7D dapat dimanfaatkan oleh

pengelola jalan tol dalam menerapkan konsep *green infrastructure* untuk melakukan analisis rancangan pembangunan dan pengoperasian suatu ruas jalan terhadap efisiensi penggunaan energi dan dampak lingkungan, mulai dari pembangunan hingga peningkatan dan pembongkaran nantinya.

Selain dimensi di atas, saat ini di kalangan industri juga mulai diperkenalkan terminologi model BIM 8D yang fokus pada informasi tentang aspek keselamatan dan kesehatan kerja (*occupational safety and health*) pada suatu fasilitas terbangun. Fasilitas pada model BIM 8D ini membantu pengelola fasilitas untuk menyusun rencana tanggap darurat dan mencegah timbulnya potensi masalah atau ancaman terhadap keselamatan dan kesehatan. Sama seperti pemodelan BIM 6D dan 7D, BIM 8D akan sangat membantu pengelola jalan tol dalam merumuskan strategi perencanaan, perancangan dan pengoperasian sebuah ruas jalan.

Tingkat Kerincian BIM

Tingkat kerincian atau *Level of Detail/LOD* adalah serangkaian ketentuan tentang penggunaan BIM yang diperkenalkan oleh American Institute of Architecture (AIA, 2008). LOD mendefinisikan lima tingkatan kerincian gambaran informasi dari suatu model BIM. Industri mengadopsi enam tingkatan kerincian sebagai standar praktek BIM bagi kalangan industri arsitektur, rekayasa dan konstruksi (*Architecture, Engineering and Construction/AEC*) untuk mendokumentasikan, mengartikulasikan dan menjelaskan isi dari sebuah model BIM secara jelas dan efektif (United BIM, 2022) seperti disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Tingkat Kerincian BIM dan Penggunaannya dalam Proses Perancangan-Konstruksi

LOD 100, digunakan dalam bentuk konsep rancangan (*conceptual design*) berupa model yang terdiri simbol-simbol visual 2D yang menggambarkan keberadaan suatu elemen pada bidang planar. Pada LOD 200, elemen-elemen penyusun suatu objek ditentukan sebagian dengan menguraikan perkiraan jumlah, dimensi, geometri, dan posisinya. Sama seperti LOD 100, LOD 200 dalam bentuk rancangan skematik (*schematic design*) digunakan pada tahap awal studi kelayakan dan rancangan dasar (*basic design*). Tingkat pengembangan berikutnya adalah rancangan rinci (*detailed engineering design*) pada LOD 300, dimana elemen-elemen objek telah dikembangkan untuk menentukan dimensi yang tepat dan posisi relatifnya yang lebih presisi. Selanjutnya LOD 350 digunakan sebagai dokumentasi untuk menjelaskan informasi tentang suatu elemen secara tepat dan menguraikan keterkaitan dan hubungan antar satu elemen dengan elemen-elemen lainnya. Pada proses perancangan ruas jalan misalnya, LOD 100 hingga LOD 300 dilakukan secara berurutan pada tahap studi kelayakan dan rancangan awal untuk menilai kelayakan penetapan lokasi jalan dan jembatan pada suatu lokasi. Keterkaitan antara elemen, seperti posisi dan trase jalan dan jembatan diuraikan pada LOD 350, demikian pula dengan keterkaitan posisi peletakan *girder* pada struktur jembatan.

Informasi dasar tentang bagaimana elemen-elemen tersebut dibuat atau dibangun terkandung dalam LOD 400. BIM pada LOD 400 menjelaskan proses bagaimana suatu objek tersusun dari beberapa elemen dan bagaimana elemen-elemen tersebut akan dibuat. Sebagai contoh, dalam konstruksi sebuah jembatan, informasi BIM LOD 400 akan digunakan oleh kontraktor pelaksana sebagai dasar pembuatan *shop drawings* atau fabrikator pembuat girder pracetak sebagai dasar pengembangan *fabrication drawings*. Terakhir, BIM dengan LOD 500 digunakan untuk memberikan informasi lengkap tentang elemen pada objek riil yang terbangun, yang umumnya dikenal sebagai *as-built drawings*. Bagi pengelolaan suatu fasilitas infrastruktur seperti jalan tol, dokumentasi gambar tentang aset yang terbangun merupakan informasi yang sangat berharga bagi pengelolaan di tahap pengoperasian, pemeliharaan, dan pembongkaran.

Dengan adanya keterkaitan yang berkesinambungan antara model BIM LOD 100 hingga BIM LOD 500 serta catatan historis tentang bagaimana suatu objek dirancang untuk dibangun sejak tahap konsepsi, maka hasilnya menjadikan informasi yang terkandung dalam model BIM sebagai hal yang sangat berharga untuk keperluan pengambilan keputusan terkait dengan strategi dan rencana pengelolaan maupun untuk keperluan audit.

Tingkat Kematangan BIM

Karakteristik penting lain dari BIM adalah tingkat kematangan atau *BIM Maturity Level* (ML). *BIM Maturity Level* digunakan untuk menilai sejauh mana tingkat kolaborasi diterapkan dalam BIM. BIM mengusung konsep sistem kolaborasi antar pelaku profesional sektor industri dalam proses merancang, melaksanakan, dan memelihara

sebuah aset infrastruktur sepanjang siklus hidupnya. Sistem kolaborasi dalam BIM memberikan fasilitas bagi para pengguna/pemangku kepentingan untuk berbagi pengetahuan tentang sebuah objek mulai dari tahap awal konsepsi hingga tahap pengoperasian dan pembongkaran.

BIM dengan ML-00 adalah tingkat paling mendasar dari penerapan BIM dengan menggunakan gambar 2D untuk merepresentasikan denah, tampak, dan potongan sebagai dokumentasi konsep dasar dan visualisasi 3D untuk memperoleh gambaran orthogonal dari suatu objek. Pada tingkat ini data model BIM hanya dibuat dan digunakan sepihak dengan hampir tidak ada kolaborasi dengan pihak lainnya. Jika ada, pertukaran data/informasi dilakukan secara manual dalam bentuk cetakan.

Pada tingkat ML-01 data model BIM sudah digunakan sebagai *platform* kolaborasi antar disiplin atau bidang, misalnya arsitektur dan struktur atau desain interior, dalam satu organisasi perencana/perancang. Di sini masing-masing pihak bekerja secara mandiri dengan model CAD 3D yang sama, sementara pertukaran data/informasi dilakukan simultan secara elektronik melalui file dengan format umum yang digunakan secara bersama dalam satu organisasi.

Implementasi BIM ML-02 dikenal dengan istilah *managed 3D environment* yang maknanya adalah terciptanya lingkungan pengelolaan data model 3D untuk kolaborasi antar pihak dari organisasi-organisasi yang berbeda. Pada tingkat kematangan ini, data model BIM sudah mulai digunakan secara ekstensif untuk memfasilitasi kolaborasi antar pemangku kepentingan dari

organisasi yang berbeda. Pada tahap ini dilakukan implementasi BIM 4D dan 5D untuk menjawab berbagai hal terkait dengan permasalahan penjadwalan dan biaya.

Akhirnya, pada BIM ML-03, dikenal dengan istilah *Open BIM*, memungkinkan kolaborasi dilakukan lebih luas dan mendalam. Data BIM yang disimpan dalam sebuah *server* fisik atau *cloud server* dan dapat digunakan bersama sehingga mengurangi potensi konflik yang dapat terjadi. Operasi pertukaran data/informasi, selain yang terkait dengan waktu penjadwalan dan biaya, dapat difasilitasi secara terbuka dalam data model BIM ML-03, di mana lebih banyak pihak dari organisasi yang berbeda dapat terlibat dan saling bertukar data/informasi melalui platform bersama dengan berbagai format yang kompatibel dan interoperabilitas yang lebih baik. Karena BIM ML-03 akan dimanfaatkan bersama oleh organisasi yang beragam dengan perangkat lunak yang berbeda pula, maka keberhasilannya akan tergantung pada sejauh mana kemampuan BIM untuk menjawab tantangan *interoperability* (Giro & Goncalves, 2020).

PENERAPAN TEKNOLOGI BIM SEBAGAI ALAT BANTU PENGELOLAAN PEMBANGUNAN JALAN TOL DI INDONESIA

Dengan kemampuan hingga BIM 7D serta tingkat kematangan hingga ML-03, penggunaan BIM sebagai alat bantu dalam pengelolaan proyek-proyek infrastruktur sudah bukan lagi hal yang baru. Di beberapa negara teknologi BIM telah dianggap sebagai bagian tak terpisahkan dari praktek standar pada metode penyelenggaraan terintegrasi (*Integrated Project Delivery/IPD*). Hal

serupa juga dapat diterapkan dalam pengelolaan proyek-proyek jalan dan jembatan di Indonesia.

Meskipun pada awalnya hingga saat ini masih paling banyak digunakan dalam pengelolaan proyek-proyek konstruksi bangunan gedung, teknologi BIM mulai populer dan mulai banyak digunakan dalam perencanaan, perancangan, dan pembangunan infrastruktur lainnya. Di Indonesia, penggunaan BIM dimulai pada proyek-proyek perancangan pembangunan gedung sektor swasta di awal tahun 2000-an. Di sektor publik, pemerintah melalui Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) mulai menerapkan teknologi BIM melalui Peraturan Menteri PUPR tentang Bangunan Gedung (PUPR, 2018), yang mewajibkan penggunaan BIM pada Bangunan Gedung Negara tidak sederhana dengan kriteria luas di atas 2.000 m² dan di atas 2 (dua) lantai. Selanjutnya, Direktorat Jenderal Bina Marga (2021) menerbitkan surat edaran tentang kewajiban penggunaan BIM di lingkungan Ditjen Bina Marga, yang isinya antara lain mewajibkan penggunaan metode BIM di setiap kegiatan pembangunan yang memenuhi kriteria sebagai berikut: jalan yang bersifat kompleks, jalan bebas hambatan, jalan tol, terowongan jalan, dan jembatan khusus. Pada surat edaran tersebut juga dinyatakan kewajiban penggunaan BIM 3D, 4D dan 5D sementara BIM 6D, 7D dan 8D bersifat pilihan sesuai dengan kebutuhan (Ditjen Bina Marga, 2021). Untuk memfasilitasi koordinasi, kolaborasi, dan dokumentasi/publikasi, informasi digital yang dihasilkan dari BIM harus dipindahkan ke *platform* kolaborasi proyek (*Common Data Environment* - CDE Bina Marga). Dengan landasan hukum yang ada saat ini, seharusnya implementasi teknologi BIM pada pembangunan infrastruktur jalan sudah menjadi instrumen baku bagi pengelolaan proyek-proyek pembangunan jalan

dan jembatan, termasuk jalan tol di Indonesia.

Dibandingkan dengan teknologi konstruksi lainnya, adopsi teknologi BIM di Indonesia dapat dikatakan berlangsung dengan lebih cepat dan lebih baik. Biaya investasi teknologi BIM dinilai relatif lebih murah dibanding dengan investasi pengadaan peralatan dan permesinan, yang merupakan ciri dari industrialisasi konstruksi. Selain itu, semakin membaiknya ketersediaan infrastruktur teknologi informasi dan internet, serta semakin kondusifnya usaha teknologi dan layanan teknologi informasi, juga semakin mendorong pemanfaatan berbagai media digital termasuk BIM di lingkungan industri konstruksi. Bahkan selama pandemi Covid-19 dua tahun terakhir ini, peran teknologi informasi dalam berbagai usaha dan sektor industri konstruksi semakin terbukti.

Dipelopori badan usaha milik pemerintah (BUMN) di bidang konstruksi, penerapan teknologi BIM di bidang konstruksi dan infrastruktur mulai marak. Beberapa BUMN jasa konstruksi seperti PT Pembangunan Perumahan Tbk, PT Waskita Karya Tbk, PT Adhi Karya Tbk, PT Hutama Karya, dan lainnya mulai mengembangkan dan menerapkan teknologi BIM pada proyek-proyek konstruksi mereka. Hal ini menunjukkan bahwa badan usaha mulai melihat peluang peningkatan daya saing usaha dari kemampuan berinovasi melalui teknologi. Badan-badan usaha tersebut bahkan mulai berinisiatif membentuk dan mengembangkan divisi riset dan inovasinya sendiri, yang umumnya saat ini fokus pada pengembangan dan pemanfaatan teknologi digital dan BIM.

Sebagai ilustrasi, kemampuan pengembangan dan penggunaan teknologi BIM di proyek jalan tol tercermin antara lain dalam

proyek-proyek pembangunan infrastruktur jalan dan jembatan berikut:

Tabel 1 Daftar Proyek Jalan Tol yang Menggunakan Teknologi BIM tahun 2021

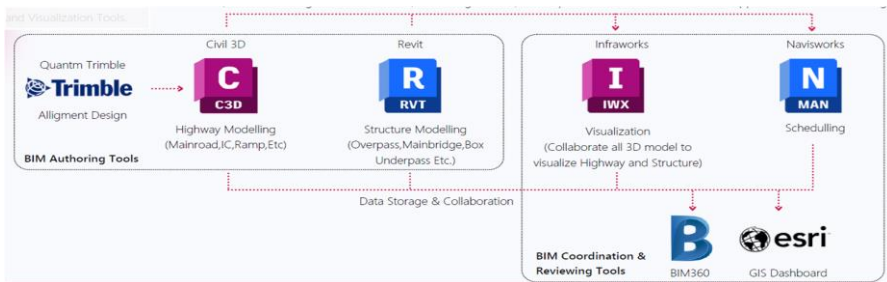
No	BUJT	Ruas Jalan Tol	Dimensi BIM
1	PT Cibitung Tanjung Priok Port Tollways	Cibitung - Cilincing	3D
2	PT Trans Jabar Tol	Ciawi - Sukabumi	3D
3	PT Jogjasolo Marga Makmur	Solo - Yogyakarta - NYIA Kulonprogo	3D
4	PT Jasamarga Japek Selatan	Jakarta - Cikampek II Sisi Selatan	3D
5	PT Citra Karya Jabar Tol	Cileunyi - Sumedang - Dawuan seksi 4-5-6	3D
6	PT PP Semarang Demak	Semarang - Demak	4D
7	PT Lintas Marga Sedaya	Modifikasi SS Kertajati	4D
8	PT Utama Karya (Persero)	Padang - Pekanbaru (Bangkinang - Pangkalan)	4D
9	PT Utama Karya (Persero)	Padang - Pekanbaru (Padang - Sicincin)	5D
10	PT Utama Karya (Persero)	Padang - Pekanbaru (Pekanbaru - Bangkinang)	5D
11	PT Utama Karya (Persero)	Rengat - Pekanbaru	5D
12	PT Utama Karya (Persero)	Simpang Indralaya - Prabumulih	5D
13	PT Utama Karya (Persero)	Prabumulih - Muara Enim	5D
14	PT Utama Karya (Persero)	Lubuk Linggau - Curup - Bengkulu	5D
15	PT Utama Karya (Persero)	Sigli - Banda Aceh	5D
16	PT Utama Karya (Persero)	Binjai - Langsa	5D
17	PT Utama Karya (Persero)	Indrapura - Kisaran	5D

Sumber: BPJT (2022)

Dari daftar di atas terlihat bahwa umumnya teknologi BIM digunakan sebagai bagian dari pengelolaan proyek dengan fokus pada pengendalian waktu dan biaya. Kolaborasi yang terjadi juga relatif masih terbatas dalam lingkungan organisasi Badan Usaha

Jalan Tol (BUJT), dengan keterlibatan terbatas dari Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT) dan Ditjen Bina Marga. Pada beberapa proyek seperti proyek Jalan Tol Rengat-Pekanbaru, teknologi BIM juga dipadukan dengan teknologi LiDAR fotogrametri dan UAV.

Proyek Jalan Tol Rengat-Pekanbaru sepanjang 207 km memiliki 7 *interchanges* dan 1 *junction*, termasuk 70 buah *overpasses*, 29 buah *underpasses*, serta 18 buah jembatan penyeberangan sungai. Jalan tol ini akan menghubungkan Jalan Tol Pekanbaru-Padang dan Pekanbaru-Dumai (PT Utama Karya, 2022). Dalam perencanaan dan konstruksinya proyek menggunakan teknologi BIM yang merupakan gabungan dari beragam perangkat lunak aplikasi. Pada tahap awal, untuk keperluan *basic design* dan *detailed engineering design* digunakan BIM LOD 200 dan 350 sebagaimana disajikan dalam Gambar 5.

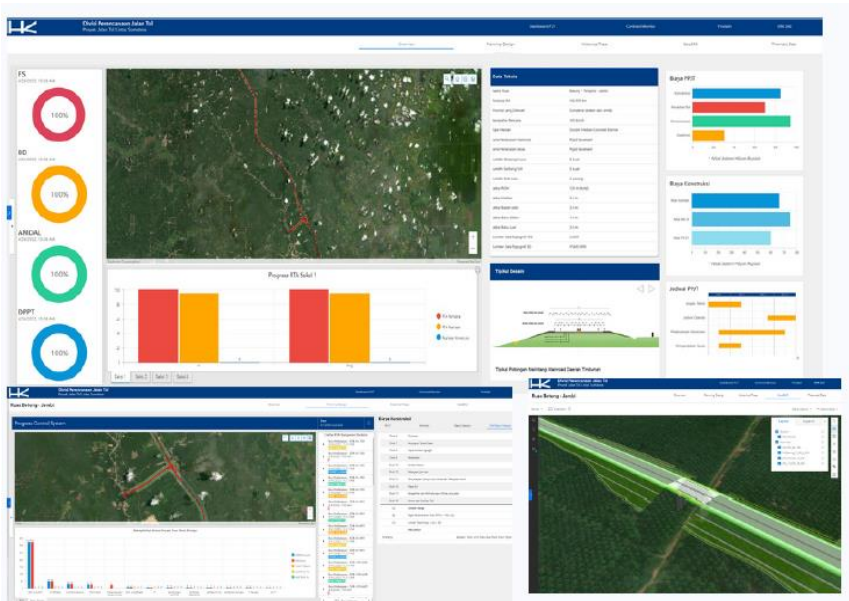


Sumber: PT Utama Karya (2022)

Gambar 5 Kombinasi Aplikasi BIM Proyek Jalan Tol Rengat-Pekanbaru

Penerapan BIM dan *Common Data Environment* yang diinisiasi oleh PT Utama Karya menyediakan fasilitas kolaborasi antar pemangku kepentingan yang terdiri dari kelompok pemilik proyek (PT Utama Karya RTJ dan *independent checker consultant/IPC*), kelompok konsultan *detail engineering design/DED*, dan kelompok regulator

(BPJT dan Ditjen Bina Marga). Selanjutnya pemantauan dan pengendalian proyek dilakukan melalui *dashboard Project Monitoring Information System/PMIS* yang dihubungkan dengan aplikasi GIS sebagaimana disajikan pada Gambar 6.



Sumber: PT Utama Karya (2022)

Gambar 6 Dashboard PMIS Proyek Jalan Tol Rengat-Pekanbaru

Dengan memanfaatkan teknologi BIM, badan usaha telah dengan perlahan mengubah paradigmanya. Dengan memanfaatkan teknologi BIM sebagai platformnya, badan usaha jasa konstruksi telah terbantu untuk mewujudkan konsep *digital twin* di industri konstruksi (Sekuritas Sinarmas, 2020).

KESIMPULAN

BIM kini tidak lagi dilihat sebagai teknologi atau bahkan sekedar perangkat lunak aplikasi grafis tetapi cara berpikir dan bertindak dalam era digital. Tentu saja, BIM sebagai teknologi tidak akan berhasil tanpa adanya dukungan sumber daya manusia yang kompeten dan profesional. Secara umum dapat disimpulkan bahwa kemampuan penguasaan dan pengembangan teknologi BIM di lingkungan badan usaha konstruksi tidak saja terjadi karena adanya regulasi yang bersifat memaksa tetapi juga didukung oleh keinginan badan usaha dan kelompok praktisi profesional untuk menjadikan BIM sebagai salah satu teknologi unggulan dalam pengelolaan proyek konstruksi dan infrastruktur. Berbagai program pelatihan, pameran promosi, lomba, dan pengembangan kapasitas dilakukan oleh asosiasi profesi seperti Institut BIM Indonesia, bekerjasama dengan badan usaha, pemerintah, dan perguruan tinggi dan dengan dukungan para *vendor*. Berbagai upaya program ini mendorong teknologi BIM sebagai platform pengelolaan konstruksi di Indonesia di masa mendatang.

Perkembangan upaya sektor konstruksi nasional dalam memanfaatkan teknologi BIM seperti yang telah diuraikan, tidak terlepas dari konteks kondisi perekonomian bangsa sebagai negara berkembang. Sahil (2016) mengkaji penerapan teknologi BIM di negara berkembang dengan membandingkannya dengan di negara maju. Para pelaku BIM di negara maju sangat menyadari bahwa kunci suksesnya penerapan di sektor konstruksi (yang dipahami sebagai sektor yang sangat *fragmented*) adalah kesiapan untuk bekerja sama untuk kepentingan bersama, yaitu tujuan akhir kebermanfaatannya suatu proyek konstruksi sampai daur hidupnya.

Sedangkan dari cara pandang para pelaku di negara berkembang, penerapan teknologi BIM lebih semata untuk tujuan efisiensi waktu dan biaya proyek. Komunitas dan ekosistem sektor konstruksi nasional harus mampu meningkatkan rasa saling percaya (*trust*) di antara badan-badan usaha dan pengguna jasa.

Kajian Sahil (2016) dapat membantu arah pengembangan BIM di Indonesia, yang dibagi menjadi empat ranah yaitu: 1) prasyarat pendidikan, yaitu kemampuan di bidang konstruksi yang memadai di samping pelatihan terkait teknologi BIM; 2) prasyarat infrastruktur dasar, termasuk *software* dan kapasitas internet; 3) praktek-praktek yang tepat, dimulai dengan proyek-proyek pilihan kemudian memperluas penerapan pada proyek-proyek yang lebih kompleks secara bertahap; 4) menyusun model kerja sama dengan mitra kerja yang tidak memiliki pengalaman menerapkan teknologi BIM, tentunya hal ini sangat tidak mudah namun disarankan untuk memulai dengan membantu para subkontraktor menggunakan jasa pihak ketiga.

Pendidikan dan pelatihan BIM saat ini terutamanya masih lebih banyak pada tahap pengenalan teknologi BIM itu sendiri, pengembangan kapasitas sumber daya manusia di bidang pengembang jalan tol harus bergerak lebih dari sekedar pendidikan dan pelatihan sebagai BIM *operator* atau BIM *modeler*, tetapi harus juga mencetak BIM *engineer* dan BIM *manager* yang unggul dan profesional, khususnya untuk proyek-proyek jalan dan jembatan. Untuk keperluan tersebut perguruan tinggi dapat bekerja sama dengan asosiasi profesi dan praktisi profesional untuk menyelenggarakan pendidikan pelatihan. Kerjasama ini harus didukung oleh pihak penyedia (*vendor*) yang wajib menerapkan

konsep *interoperability*, sehingga pelatihan-pelatihan yang dilakukan tidak lagi semata bersifat pelatihan penggunaan perangkat lunak tertentu, tetapi lebih ditekankan pada penanaman paradigma dan konsep BIM itu sendiri.

Kebijakan pemerintah yang mewajibkan penggunaan BIM tentunya berkonsekuensi pada beban biaya yang harus ditanggung pihak penyedia jasa. Dalam hal ini tentunya pemerintah juga wajib mempertimbangkan ada kebijakan kompensasi dan/atau subsidi bagi dunia usaha untuk mulai berinvestasi pada teknologi BIM. Bagi sektor penyelenggaraan jalan tol, hal ini perlu mendapat perhatian khusus dari Ditjen Bina Marga dan BPJT, sehingga BIM benar-benar dapat diterapkan sebagai landasan/*platform* pengelolaan aset negara yang lengkap, terukur, transparan, dan akuntabel.

Bagi pengelola jalan tol, teknologi BIM akan memberikan manfaat utama jika diterapkan tidak terbatas pada suatu proyek pembangunan ruas jalan tol, tetapi pada jaringan atau gabungan beberapa ruas jalan tol sekaligus. Integrasi ini akan memberikan peluang pengelolaan pembangunan dan pengoperasian jaringan jalan tol yang lebih efektif dan efisien melalui mekanisme berbagi informasi *visual*. Di masa mendatang, BIM dapat dikembangkan untuk memfasilitasi data lahan kepemilikan BUJT. Selain menyajikan data teknis, melalui BIM secara lengkap dapat dihimpun informasi historis mengenai aspek-aspek legal, ekonomikal, lingkungan, dan sosial serta aspek lainnya sebagai bagian dari sistem informasi pengelolaan aset BUJT.

DAFTAR PUSTAKA

- American Institute of Architects. 2008. *Document E202: Building Information Modelling Protocol Exhibit*. Washington, DC.
- Autodesk. 2022. *What is BIM*. (Online), <https://www.autodesk.com/industry/aec/bim>. Diakses 27 Oktober 2022.
- Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT). 2022. *Data Internal*. Jakarta.
- Bolourian, N and Hammad, A. 2020. *LiDAR-Equipped UAV Path Planning Considering Potential Locations of Defects for Bridge Inspection*. *Automation in Construction*, 117: 103250.
- British Standards Institution (BSI). 2019. *BS EN ISO 19650: Organisation and Digitisation of Information about Buildings and Civil Engineering Works, Including Building Information Modelling–Information Management Using Building Information Modelling*. London.
- Chuang, T H; Lee, Bo-Ching; and Wu, I-Chen. 2011. *Applying Cloud Computing Technology to BIM Visualization and Manipulation*, Proceedings of the 28th ISARC: 144-149.
- Direktorat Jenderal Bina Marga (DJBMM). 2021. *Surat Edaran Nomor: 11/SE/Db/2021 tentang Penerapan Building Information Modelling pada Perencanaan Teknis dan Pemeliharaan Jalan dan Jembatan di Direktorat Jenderal Bina Marga*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Jakarta.
- Eastman, C., Fisher, D., Lafue, G., Lividini, J., Stoker, D., & Yessios, C. (1974). *An Outline of the Building Description System*. Institute of Physical Planning, Carnegie-Mellon University. Pittsburgh, PA.
- Eastman, C; Teicholz, P; Sack, R; and Listen, K. 2011. *BIM*

- Handbook: A Guide to Building Information Modelling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors, 2nd Edition*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Easy Render. 2002. *A Brief History of 3d Visualizations: The Ins And Outs*. <https://www.easyrender.com/a/a-brief-history-of-3d-visualizations-the-ins-and-outs>. Diakses 4 November 2022.
- Giro, A and Goncalves, R. J. 2020. *Value Proposition on Interoperability of BIM and Collaborative Working Environments*. *Automation in Construction*, 19 (5): 522-530.
- Hossaina, A., Abbott, E. L., Chua, D. K., Qui, N. T. and Goh, Y. M. 2018. *Design-for-Safety Knowledge Library for BIM-Integrated Safety Risk Reviews*. *Automation in Construction*, 94: 290-302.
- Hutama Karya, PT. 2022. *BIM Portfolio Rengat-Pekanbaru Toll Road-Trans Sumatera*. Jakarta.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2018. *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia No 11/PRT/M/2018 Tentang Pembangunan Bangunan Gedung Negara*. Jakarta.
- NBS. 2022. *What is BIM*. <https://www.thenbs.com/knowledge/what-is-building-information-modelling-bim>. Diakses 27 Oktober 2022.
- OpenBIM. 2022. *AR & VR in Construction*. <https://opendatabim.io/index.php/ar-vr-in-construction-with-revit-and-ifc/>. Diakses 4 November 2022.
- Sahil, A. Q. 2016. *Adoption of Building Information Modeling in Developing Countries: A Phenomenological Perspective*. Master's thesis. Colorado State University. Fort Collins, CO.

https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/173492/Sahil_colostate_0053N_13498.pdf. Diakses 1 Desember 2022.

Sekuritas Sinarmas. 2020. *Waskita Luncurkan Digital Twins Terintegrasi GIS-GEOBIM*. <https://www.sinarmassekuritas.co.id/waskita-luncurkan-digital-twin-terintegrasi-gis-geobim>. Diakses 28 November 2022.

Soemardi, B. W and Erwin, R. G, 2017. *Using BIM as a Tool to Teach Construction Safety*". MATEC Web of Conferences, 138 (4):05007.

Soemardi, B. 2010. *Building Information Modeling: Teknologi Grafis untuk Pengelolaan Pembangunan Gedung*. Konstruksi Indonesia 2010, Gagasan, Teknologi dan Produk Konstruksi Bernilai Tambah Tinggi Karya Anak Bangsa. Kementerian Pekerjaan Umum. Jakarta.

United BIM. 2022. *BIM Level of Development | LOD 100, 200, 300, 350, 400, 500*. <https://www.united-bim.com/bim-level-of-development-lod-100-200-300-350-400-500>. Diakses 17 Oktober 2022.

Van Nederveen, G.A., Tolman, F.P. 1992. *Modelling Multiple Views on Buildings*. Automation in Construction, 1 (3): 215–224.

TRIAL EMBANKMENT
SEBAGAI LANGKAH AWAL
VERIFIKASI DAN EVALUASI
PERFORMA *VACUUM PRELOADING*
PADA PEKERJAAN PERBAIKAN TANAH
DI JALAN TOL PALEMBANG-INDRALAYA

Herwan Dermawan

Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan, Universitas Pendidikan Indonesia

Masyhur Irsyam

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Arie Setiadi Moerwanto

Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR

Rizal Soetjipto, Idwan Suhendra

PT Utama Karya

Marcello Djunaedi

PT Geotekindo

PENDAHULUAN

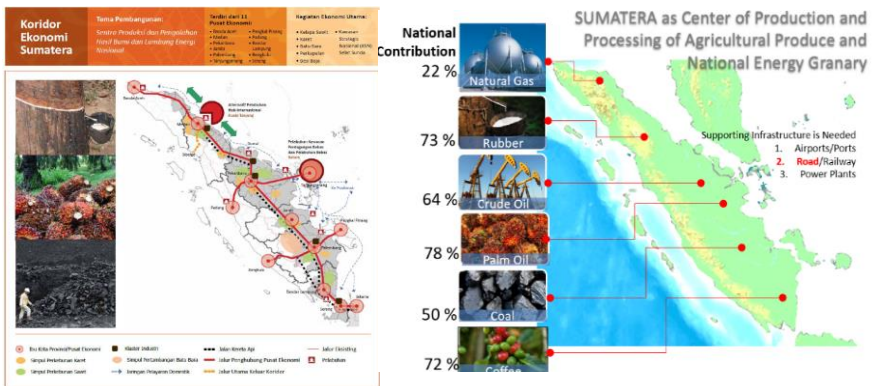
Jalan Tol Palembang-Indralaya (Palindra) merupakan salah satu ruas Jalan Tol Trans Sumatera (JTTS) yang menghubungkan kota Palembang dengan daerah Indralaya. Panjang ruas jalan tol ini adalah sekitar 22 km, dengan sekitar lebih dari 90% panjang akan dibangun di atas area rawa yang merupakan tanah lunak. Permasalahan utama dari pembangunan di atas area rawa adalah

daya dukung dan penurunan tanah. Dalam perencanaan timbunan untuk jalan tol, terdapat kriteria penerimaan yang harus dipenuhi, terutama masalah penurunan dan *rate* penurunan dari timbunan tersebut pada masa pelayanan jalan tol. Untuk memenuhi kriteria tersebut maka tanah lunak tersebut harus diperbaiki terlebih dahulu karakteristiknya sebelum digunakan.

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) Perancangan Geoteknik, terdapat beberapa alternatif metode perbaikan tanah yang bisa digunakan untuk kondisi seperti ini, di antaranya adalah penyuntikan dengan *grouting*, *deep mixing*, teknik prakompresi dengan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*, dan metode hampa udara (*vacuum preloading*). Oleh karena itu perlu dibahas tentang alternatif yang bisa digunakan untuk memperbaiki atau memperkuat tanah lunak di bawah rencana timbunan sesuai dengan kondisi tanah dan beban di lokasi studi, termasuk kelebihan dan kekurangan metode-metode tersebut beserta penyajian matriks penanganan timbunan di atas tanah lunak hingga diperoleh solusi yang terbaik yang bisa diaplikasikan. Metode *vacuum preloading* sebagai metode yang terpilih pada lokasi studi akan dibahas secara mendalam, mulai dari konsep, analisis, dan pelaksanaan *trial embankment* di lapangan sebagai tahap awal untuk memastikan apakah metode *vacuum preloading* dapat memenuhi semua kriteria, termasuk juga akan disampaikan mengenai metode pelaksanaan dan instrumentasinya, kriteria penghentian pekerjaan *vacuum* beserta evaluasinya. Dalam studi ini juga akan disampaikan rekomendasi kritis terkait dengan upaya meningkatkan ketercapaian kegiatan perbaikan tanah dengan metode *vacuum preloading* terhadap kriteria penerimaan penurunan jalan tol.

JALAN TOL TRANS SUMATERA (JTTS) RUAS PALEMBANG-SIMPANG INDRALAYA (PALINDRA)

Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 48 Tahun 2014 tentang Masterplan Percepatan dan Perluasan Pembangunan Ekonomi Indonesia 2011-2025, maka Indonesia terdiri dari beberapa Koridor Ekonomi (KE), di antaranya adalah KE Sumatera, KE Jawa, KE Kalimantan, KE Sulawesi, KE Bali-Nusa Tenggara, dan KE Papua-Kepulauan Maluku. Khusus untuk KE Sumatera, maka tema pembangunan yang diusung adalah sebagai “Sentra Produksi dan Pengolahan Hasil Bumi dan Lumbung Energi Nasional”. Koridor Ekonomi Sumatera terdiri atas 11 pusat ekonomi yang sangat memerlukan infrastruktur pendukung seperti bandara/pelabuhan, jalan kereta api, dan jalan tol, sehingga dalam hal ini JTTS dibangun untuk menjamin konektivitas, menjadi koridor kawasan industri, dan sekaligus menjadi motor penggerak perekonomian Sumatera (lihat Gambar 1).

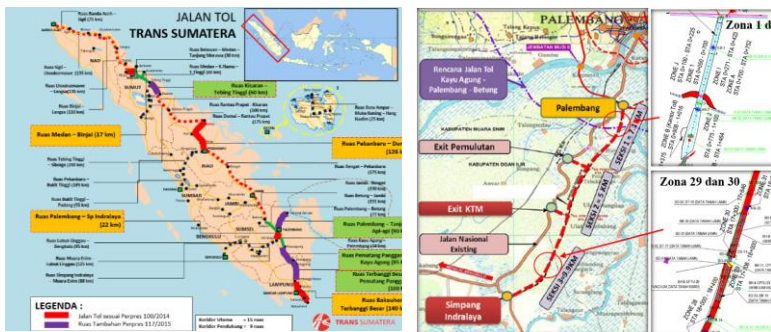


Sumber: Pemerintah Republik Indonesia (2014)

Gambar 1 Koridor Ekonomi Sumatera

JTTS terdiri atas 15 ruas koridor utama dan 9 ruas koridor

pendukung. Salah satu ruas pendukung tersebut adalah Jalan Tol Palindra sepanjang kurang lebih 22 km. Jalan Tol Palindra ini menghubungkan Kota Palembang dan Simpang Indralaya yang merupakan bagian dari koridor Jalan Tol Palembang-Lubuk Linggau-Bengkulu. Jalan Tol Palindra dibagi menjadi 3 seksi sebagai berikut: (1) Seksi 1 yang menghubungkan Palembang-Pemulutan sepanjang 7 km), (2) Seksi 2 yang menghubungkan Pemulutan-Kota Terpadu Mandiri (KTM) Rambutan sepanjang 5 km, dan (3) Seksi 3 yang menghubungkan KTM Rambutan-Indralaya sepanjang 10 km (lihat Gambar 2). Pekerjaan fisik jalan tol dimulai pada tahun 2015 dan mulai beroperasi secara penuh setelah diresmikan pada tahun 2017.



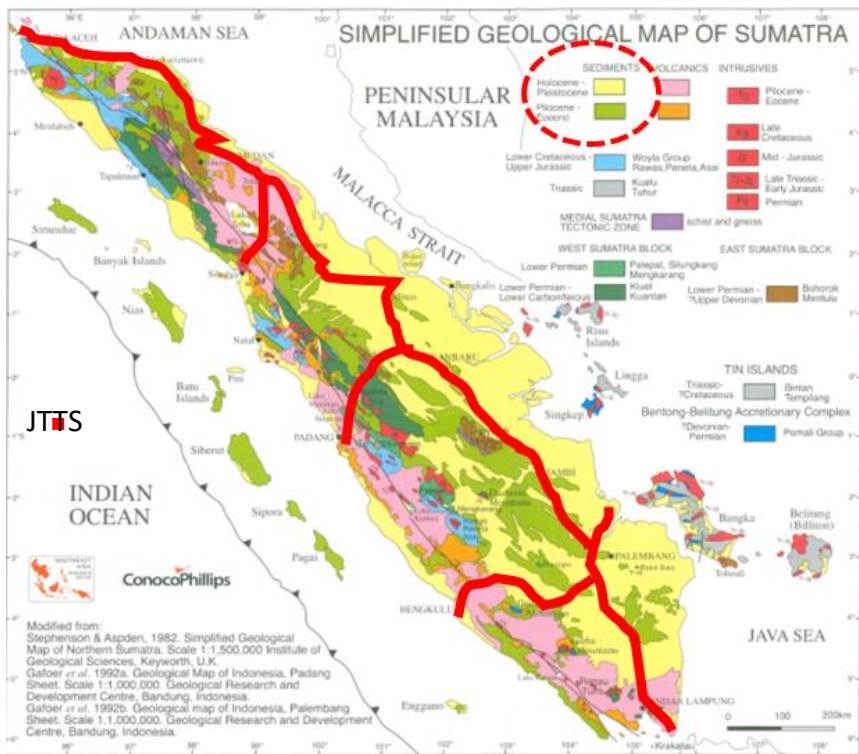
Sumber: Sutjipto (2016)

Gambar 2 Rencana Jalan Tol Trans Sumatera-Ruas Palindra

KONDISI UMUM GEOLOGI DAN KONDISI TANAH AREA STUDI

Berdasarkan peta geologi dari Crow, M.J., & Barber J., diketahui bahwa JTTS mulai dari Lampung hingga Aceh, umumnya akan dibangun di atas tanah sedimen (berumur *Holocene-Pleistocene*

hingga *Pliocene-Eocene*). Hal ini dikonfirmasi dengan data penyelidikan tanah pada ruas jalan tol yang menunjukkan bahwa tanah sedimen ini juga terdapat tanah-tanah “sulit”, di antaranya adalah tanah sangat lunak, tanah organik/gambut, dan tanah pasir dengan konsistensi lepas. Peta geologi Pulau Sumatera disajikan pada Gambar 3.

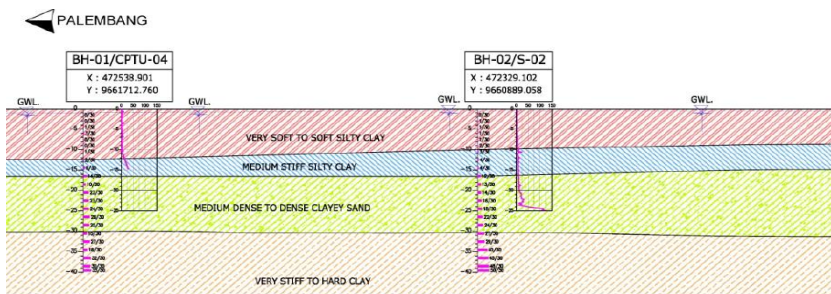


Sumber: Crow dan Barber (2005)

Gambar 3 Peta Geologi Pulau Sumatera

Khusus untuk lokasi studi di Jalan Tol Palindra, setelah dilakukan penyelidikan tanah berupa pemboran teknik, uji CPTu, *Vane Shear*, dan juga pengujian laboratorium, diketahui bahwa kondisi tanah di sepanjang ruas jalan tol didominasi oleh tanah lempung lunak

dengan ketebalan antara 7 m hingga 14 m, di bawahnya terdapat tanah serupa namun dengan konsistensi sedang dengan ketebalan 4 m hingga 10 m, lalu selanjutnya adalah tanah pasir lempungan dengan kepadatan sedang hingga padat, lapisan terakhir adalah tanah lempung yang sangat kaku. Gambaran stratifikasi tanah di lokasi studi dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Kondisi Tanah dan Stratigrafi Area Studi

Pada kondisi tanah seperti inilah akan dibangun timbunan dengan ketinggian rata-rata sekitar 5 m, bahkan mencapai hingga 9 m untuk area *oprit* jembatan. Sehingga masalah daya dukung dan terutama masalah penurunan tentu saja akan menjadi hal yang kritis.

KRITERIA PENERIMAAN JALAN TOL

Referensi yang digunakan sehubungan dengan kriteria penerimaan jalan tol terutama untuk permasalahan penurunan adalah: 1) SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik pada subbab. 6.10.5 (c) tentang derajat konsolidasi minimum yang harus dicapai, 2) Spesifikasi Khusus Skh-1.4.15 Pekerjaan Percepatan Konsolidasi Tanah dengan Metode Penyalir Vertikal dengan Vakum dan PVD pada subbab Skh-1.4.15.2 yang juga tentang derajat konsolidasi

minimum yang harus dicapai, dan 3) Panduan Geoteknik 4 pada subbab 5.5.3 Kriteria Deformasi yang mensyaratkan nilai minimum derajat konsolidasi yang harus dicapai dan nilai maksimum kecepatan penurunan yang diijinkan.

Tabel 1 Kriteria Derajat Konsolidasi dan Kecepatan Penurunan Tiap Kelas Jalan

Kelas Jalan	Penurunan yang Disyaratkan Selama Masa Konstruksi	Kecepatan Penurunan setelah Konsolidasi
	s/stot	mm/tahun
I	>90%	<20
II	>85%	<25
III	>80%	<30
IV	>75%	<30

Sumber: Pusat Litbang Prasarana Transportasi (2001)

Berdasarkan referensi tersebut maka kriteria penerimaan jalan tol untuk masalah penurunan sangat ketat dengan ketentuan sebagai berikut: 1) Besar derajat konsolidasi harus diselesaikan minimum 90% pada masa konstruksi, dengan demikian maka hanya tinggal 10% lagi sisa penurunan yang akan terjadi pada masa layan jalan tol, artinya jika beban pada masa konstruksi lebih besar dari 1,2 hingga 1,3 kali dari beban layan, maka seharusnya penurunan pada masa layan jalan tol akan sangat kecil, 2) Penurunan jalan tol masa layan adalah maksimum 10 cm, dan 3) Kecepatan penurunan yang diijinkan pada masa layan jalan tol tersebut adalah maksimum 2 cm/tahun. Dengan demikian maka penanganan tanah lunak harus mampu memenuhi persyaratan dan kriteria tersebut

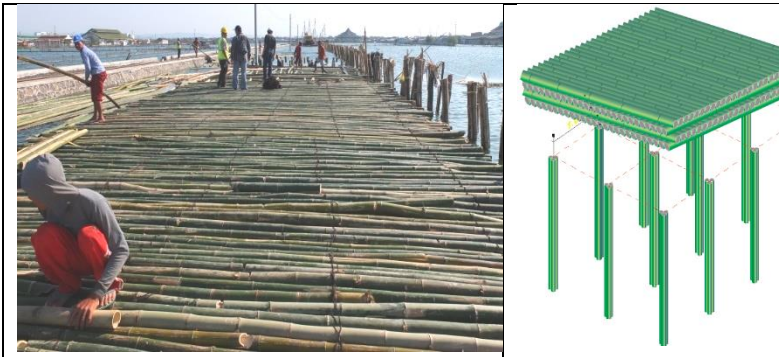
ALTERNATIF SOLUSI PENANGANAN TANAH LUNAK UNTUK JALAN TOL

Untuk mengatasi masalah daya dukung dan penurunan tanah, terdapat beberapa metode perbaikan tanah yang tersedia. Leroueil et al (1990) memberikan gambaran metode perbaikan tanah yang dikaitkan dengan masalah stabilitas, masalah penurunan, ataupun alternatif yang tersedia jika yang dihadapi adalah kedua masalah tersebut secara bersamaan.

Dalam SNI Persyaratan Perancangan Geoteknik (SNI 8460:2017) disebutkan mengenai garis besar jenis perbaikan tanah untuk bangunan atau infrastruktur yang disesuaikan dengan jenis dan ukuran butir tanahnya. Metode mana yang akan digunakan tentu saja harus disesuaikan dengan pertimbangan geometri dan kondisi tanah, biaya, waktu, dan kriteria penerimaan yang harus dicapai. Untuk tanah lempung, jika material timbunan tersedia dalam jumlah yang cukup dan kondisi lapangan memungkinkan, maka metode yang paling mudah dan paling murah adalah teknik *preloading* dan *vertical drain*, namun demikian metode ini masih memiliki kendala pada hal-hal berikut: 1) volume material timbunan yang dibutuhkan, 2) tahapan konstruksi, mengingat masalah daya dukung dan stabilitas untuk mencapai elevasi rencana perlu dilakukan dengan cermat, dan 3) waktu konstruksi yang dibutuhkan. Metode lain dengan konsep serupa namun dengan kendala yang lebih minimal adalah teknik *Vacuum Preloading*, dimana pada metode ini sebanyak 4 m hingga 5 m tinggi timbunan dapat digantikan oleh tekanan *vacuum*, sehingga volume timbunan yang dibutuhkan akan secara drastis berkurang, minim masalah stabilitas, dan dapat mempercepat waktu konstruksi.

Cerucuk Matras Bambu

Cerucuk Matras Bambu merupakan solusi alternatif penguatan tanah lunak. Sistem ini mengombinasikan lapisan matras bambu dan ikatan beberapa batang bambu dalam memikul beban timbunan di atasnya. Dalam sistem ini cerucuk bambu berfungsi sebagai tiang friksi. Beban timbunan akan didistribusikan secara merata oleh sistem matras bambu untuk menghindari terjadinya perbedaan penurunan, menghilangkan masalah stabilitas, sekaligus memberikan efek *buoyancy* sehingga beban dapat tereduksi (lihat juga Gambar 5).



Sumber: Irsyam et al (2008)

Gambar 5 Penanganan Tanah Lunak dengan Cerucuk Matras Bambu

Metode penguatan tanah lunak dengan menggunakan sistem cerucuk matras bambu sudah diaplikasikan pada beberapa proyek, seperti tanggul laut, rel kereta api, bahkan proyek reklamasi (lihat Gambar 6). Cerucuk dari bahan bambu dipilih karena daya tahannya terhadap pembusukan (selama pada kondisi stabil terendam), memiliki daya apung yang bisa mengurangi efek beban, lebih murah dan mudah didapat, serta lebih cepat untuk dikonstruksi. Bambu yang digunakan memiliki panjang 8 m hingga 10 m, berdiameter 7 cm hingga 10 cm,

memiliki kuat tarik bahan sekitar 250 kg/cm^2 . Pada sistem ini beberapa batang cerucuk bambu diikat menjadi satu hingga menjadi seperti pondasi tiang. Untuk matras, beberapa bambu disusun rapat secara *horizontal* sehingga menjadi seperti tikar (berlapis). Umumnya digunakan beberapa lapis matras agar lebih kaku serta mampu menerima dan menyalurkan beban.



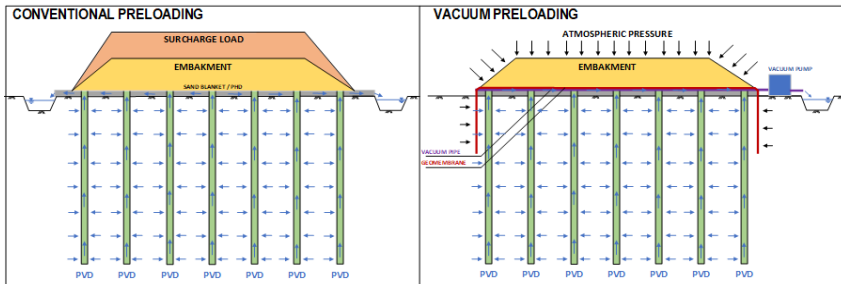
Sumber: Irsyam, et al (2008)

Gambar 6 Konstruksi Matras Cerucuk Bambu

Permasalahan pada sistem cerucuk matras bambu adalah pada sifat *floating*-nya sehingga ada potensi penurunan yang terjadi dan tidak dapat memenuhi kriteria penurunan yang disyaratkan. Hal ini disebabkan cerucuk bambu dirancang sebagai *friction pile* sehingga penurunan masih mungkin terjadi.

Preloading dengan PVD (Conventional Preloading)

Pada prinsipnya *preloading* merupakan upaya pemberian prabeban *surchage* sementara berupa timbunan tanah ke tanah dasar, sehingga terjadi penurunan dengan target derajat penurunan tertentu pada masa konstruksi, akibatnya pada masa pelayanan jalan yang terjadi hanyalah penurunan sisa. Untuk mempercepat target penurunan pada masa konstruksi biasanya metode ini dikombinasikan dengan penggunaan PVD (*Prefabricated Vertical Drain*) sebagaimana disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7 Metode *Preloading* dengan PVD

Umumnya secara teknis metode ini dapat memenuhi kriteria penurunan yang disyaratkan untuk jalan tol, permasalahannya adalah waktu konstruksi yang cukup panjang dan sering bertentangan dengan target waktu penyelesaian proyek. Hal ini disebabkan penimbunan tanah yang dilakukan harus dilakukan secara bertahap, dan tiap tahap umumnya memiliki waktu tunggu agar tanah dasar dapat mencapai derajat konsolidasi tertentu dan memiliki tambahan daya dukung yang cukup (*gain strength*) sehingga tahapan berikutnya bisa dilanjutkan dengan aman. Permasalahan lain adalah volume timbunan yang dibutuhkan cukup besar sehingga dibutuhkan batas lahan yang lebih besar karena sistem ini membutuhkan kemiringan lereng yang cukup landai.

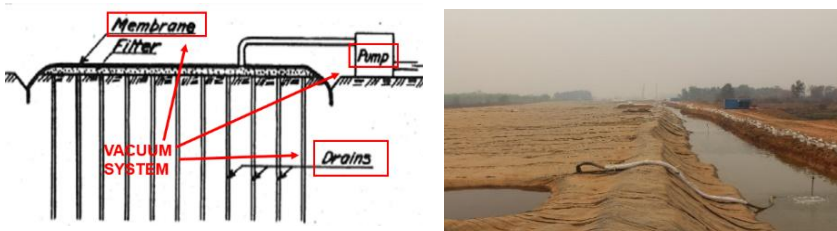
Vacuum Preloading

Vacuum Preloading atau pada beberapa literatur disebut *Vacuum Consolidation Method*, merupakan suatu teknik perbaikan tanah dengan cara memanfaatkan tekanan atmosfer sebagai beban *surcharge* sementara. Teknik ini awalnya diusulkan oleh Kjellman (1952) sebagai teknik perbaikan tanah untuk tanah berbutir halus. Metode ini pada dasarnya adalah memberikan tekanan *vacuum* berupa tekanan negatif (*suction*) ke dalam area *vacuum* yang diisolasi untuk menurunkan tekanan atmosfer di dalamnya, sehingga dengan menurunkan tekanan air pori maka tegangan efektif akan naik dengan nilai tegangan total yang tetap.

Vacuum preloading terdiri atas 3 sistem utama, yaitu sistem drainase, sistem isolasi tekanan udara, dan sistem pompa. Secara sederhana sistem drainase terdiri atas PVD, lapis tanah pasir sebagai *sand blanket*, dan sistem pipa (*main and secondary pipe*) ke pompa *vacuum*, sistem isolasi tekanan udara berupa membran kedap air/udara yang dipasang menutupi seluruh area *vacuum* serta pada bagian tepi ditanam ke dalam tanah (hingga kedalaman 3-5 m). Sistem pompa yang digunakan adalah pompa *vacuum* yang mampu menghasilkan tekanan negatif *vacuum* secara efektif minimum 80 kPa di seluruh area *vacuum* (lihat Gambar 8).

Keunggulan utama dari metode *vacuum preloading* adalah untuk memberikan beban ke tanah dasar dengan tekanan atmosfer sebesar 80 kPa atau setara dengan 4 m sampai 5 m tanah timbunan, artinya volume timbunan yang dibutuhkan akan jauh lebih kecil, minim masalah stabilitas, tidak ada tahapan penimbunan seperti halnya *preloading* konvensional, sehingga pada akhirnya akan

mempercepat waktu konstruksi jalan tol. Dengan metode ini kriteria penurunan yang disyaratkan pada pekerjaan jalan tol akan dapat terpenuhi.



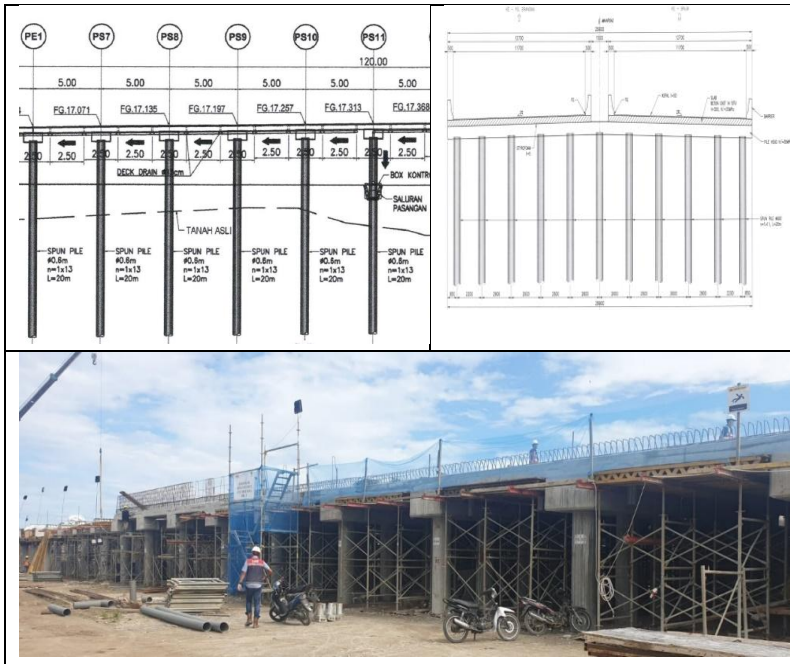
Sumber: Kjelman (1952)

Gambar 8 Metode *Vacuum Preloading*

Pile Slab/Struktur Jembatan

Solusi lain atau bahkan solusi terakhir jika permasalahan timbunan di atas tanah lunak pada pekerjaan jalan tol tidak dapat memenuhi kriteria yang disyaratkan adalah dengan menggunakan alternatif struktural, yaitu *pile-slab*. *Pile slab* merupakan struktur *elevated* yang menggabungkan antara *slab* beton dengan tiang pondasi, umumnya menggunakan *spun pile*. Pondasi pada *pile slab* dibuat segmental, dengan jarak antara segmen antara 5 m hingga 7 m, dimana tiap segmen terdiri atas 7 hingga 11 titik pondasi *spun pile* (lihat Gambar 9).

Pondasi *pile slab* dipancang hingga *end bearing* tercapai, sehingga sangat aman dari masalah penurunan. Karena bersifat struktural, maka permasalahan utama dari alternatif dengan *pile slab* adalah biaya konstruksi yang cukup mahal, sehingga menjadi alternatif terakhir jika metode perbaikan atau penguatan tanah yang tersedia tidak dapat memenuhi kriteria penerimaan jalan tol.



Gambar 9 Pile Slab/Slab on Pile

PEMILIHAN METODE PENANGANAN TIMBUNAN DI ATAS TANAH LUNAK

Dalam setiap penanganan permasalahan tanah lunak akan selalu muncul alternatif-alternatif penanganan yang bisa dilakukan, namun pada akhirnya harus dipilih alternatif yang terbaik yang tetap harus memenuhi kriteria penerimaan. Alternatif yang muncul akan dibandingkan dengan menilai dari beberapa kriteria, yaitu biaya, pemenuhan terhadap kriteria penerimaan jalan tol, waktu konstruksi, kemudahan konstruksi, kebutuhan terhadap volume material timbunan, masalah sosial atau lingkungan, dan ketersediaan lahan. Tabel 2 menyajikan matriks perbandingan yang dibuat khusus untuk pekerjaan jalan tol Palindra. Empat alternatif yang dibandingkan

adalah: 1) Cerucuk Matras Bambu, 2) Struktur *Pile Slab*, 3) PVD-*Preloading* konvensional, dan 4) *Vacuum Preloading*.

Tabel 2 Matriks Perbandingan Metode Perbaikan

Criteria	Bamboo Pile- Mastress System	Pile Slab	Soil Improvement	
			Preloading with PVD	Vacuum Preloading
Construction Cost: 1 Low 2 Moderate 3 High	1	3	1	2
Stability Criteria				
- $SF > 1,1$ Construction stage	Achievable	Achievable	Achievable	Achievable
- $SF > 1,3$ Service	Achievable	Achievable	Achievable	Achievable
Settlement Criteria				
- $DOC > 90\%$ Construction stage	No	Achievable	Achievable	Achievable
- $Rate < 2\text{ cm/year}$ Construction stage	No	Achievable	Achievable	Achievable
- $Settlement < 10\text{ cm}$ Service	No	Achievable	Achievable Note: - Large amount of fill material is needed - Environmental issues	Achievable Note: - Material from river normaliza- tion and maintenance can be used
Estimated Construction Time 1 Soonest 2 Fast 3 Long 4 Longest	1	2	3	2
- Constructibility	Simple, need supervision	Simple and common	Simple and common	Special contractors needed
Fill Material Needed 1 Least 2 Few 3 Much 4 At most	3	1	4	3
Social/Environmental Issues	No issues	Social issues, near villages	Flooding, need drainage design	Flooding, need drainage design
Right of Way	No issues with ROW	No issues with ROW	Need more area to counterweight/berm	No issues with ROW

Dari matriks di atas terlihat bahwa alternatif cerucuk matras bambu tidak dapat memenuhi kriteria penurunan saat itu. Alternatif *pile slab*

mempunyai biaya konstruksi yang tinggi selain adanya permasalahan sosial yang timbul pada beberapa lokasi. Alternatif PVD-*Preloading* konvensional membutuhkan volume timbunan yang besar, padahal kondisi lapangan sangat jauh dari *quarry*, serta pada metode ini berpotensi muncul masalah stabilitas. Setelah membandingkan semua metode yang ada, dipilih alternatif perbaikan tanah dengan *Vacuum Preloading*.

PERBAIKAN TANAH DENGAN METODE *VACUUM PRELOADING*

Konsep Dasar *Vacuum Preloading*

Vacuum Preloading sebenarnya merupakan pengembangan dari metode konvensional yang menggunakan beban timbunan sebagai beban sementara. Dalam metode *Vacuum Preloading*, tekanan atmosfer dimanfaatkan untuk memberikan beban ke tanah yang akan diperbaiki. Memahami prinsip *vacuum* tidak bisa dilepaskan dari pemahaman tentang adanya tekanan atmosfer. Hubungan antara tegangan total (σ), tegangan efektif (σ'), dan tekanan air pori (u) dapat dilihat pada formula berikut ini:

$$\sigma = \sigma' + u \dots\dots\dots (1)$$

Untuk tegangan efektif, maka formula tersebut menjadi:

$$\sigma' = \sigma - u \dots\dots\dots (2)$$

Pada pekerjaan *preloading* konvensional, maka akibat beban

timbunan akan bertambah tegangan vertikal sebesar $\Delta\sigma$, dan tekanan air pori juga akan naik sebesar beban yang diberikan, sehingga tegangan total akan bertambah, tekanan air pori juga meningkat, tegangan efektif akan tetap pada saat $t = 0$. Tegangan efektif akan meningkat seiring dengan menurunnya nilai tekanan air pori.

Pada *Vacuum Preloading*, maka formula hubungan antara tegangan total, tegangan efektif, dan tekanan air pori, dengan memasukkan efek tekanan atmosfer menjadi:

$$\sigma' + P_a = \sigma - u + P_a \dots\dots\dots (3)$$

Dengan *Vacuum Preloading*, tekanan atmosfer dalam area membran yang terisolasi dihilangkan dengan cara dihisap (*suction*), sehingga bagian sebelah kiri akan berkurang sebesar P_a , sedangkan bagian kanan akan bertambah sebesar P_a , atau dengan kata lain tegangan efektif tanah akan naik sebesar P_a .

Analisis *Vacuum Preloading*

Berdasarkan pengamatan saat pengumpulan data lapangan, perencanaan *vacuum* saat itu umumnya masih menggunakan metode konsolidasi 1D, dimana beban *vacuum* dianggap sama persis dengan beban timbunan, artinya pada saat itu analisis metode *preloading* konvensional dan *vacuum preloading* dianggap sama. Tekanan negatif *vacuum* diasumsikan sebagai beban merata sebesar 80 kPa, sesuai rencana tekanan *vacuum* yang akan diberikan nanti, ditambah dengan beban timbunan jika dibutuhkan *load ratio* yang lebih besar. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa besaran penurunan yang diperoleh berdasarkan metode tersebut memberikan hasil yang lebih

besar dari hasil pencatatan *settlement plate*. Terdapat beberapa penyebab mengapa ada perbedaan antara analisis berdasarkan metode ini dan hasil pemantauan lapangan, beberapa di antaranya adalah: 1) tegangan air pori yang terjadi tidak berbentuk *rectangular* (bernilai sama terhadap kedalaman) seperti yang diasumsikan metode Terzaghi tersebut, 2) kondisi batas yang seringkali tidak dapat diasumsikan sebagai *free draining*, 3) aplikasi beban umumnya berdasarkan skema dan waktu tertentu, tidak terjadi secara instan, 4) kondisi tanah yang tidak homogen dan berlapis, dan 5) asumsi nilai permeabilitas dan angka pori yang dianggap konstan selama proses konsolidasi terjadi.

Berdasarkan hal-hal di atas, perlu pendalaman bagaimana metode analisis dan simulasi perbaikan tanah dengan *vacuum preloading* yang akan memberikan gambaran hasil perbaikan tanah yang lebih sesuai dengan kondisi aktual lapangan.

PELAKSANAAN *TRIAL EMBANKMENT* DAN MONITORING PEKERJAAN *VACUUM PRELOADING*

Setelah dilakukan perencanaan perbaikan tanah dengan metode *vacuum preloading*, maka selanjutnya adalah melakukan tahapan awal konstruksi lapangan berupa *trial embankment*. Tahapan ini diperlukan untuk memastikan bahwa performa perbaikan tanah yang dipilih memang akan memberikan hasil yang memenuhi kriteria penerimaan jalan tol.

Trial embankment dilakukan pada STA awal sisi Palembang, yaitu pada Zona 1 dan Zona 2, pada rentang waktu bulan Juli 2015 hingga

bulan Maret 2016, termasuk pekerjaan *clearing*, pemasangan sistem *vacuum* dan instrumentasinya, pelaksanaan *vacuum*, penimbunan di atas membran *vacuum*, hingga pengujian tanah setelah *vacuum* selesai. Tahapan awal, setelah *clearing* dan penimbunan matras kerja hingga di atas elevasi banjir, adalah pemasangan PVD dan PHD. PVD dipasang dengan pola segi empat dengan jarak 1 m x 1 m, dengan panjang PVD hingga 22 m. Material untuk matras kerja yang digunakan adalah pasir lokal. Gambar kegiatan tersebut disajikan pada Gambar 10.



Gambar 10 Pemasangan PVD dan PHD pada Pekerjaan *Vacuum*

Tahapan selanjutnya adalah penimbunan pasir di atas PVD dan PHD yang dilanjutkan dengan pemasangan geomembran. Lapisan *geomembran* dipasang menutupi seluruh area *improvement* hingga bagian tepi. Karena *vacuum preloading* adalah sistem tertutup maka tidak boleh ada kebocoran, sehingga pada bagian tepi area perbaikan, geomembran ditanam hingga 5 m dari permukaan tanah (lihat Gambar 11).

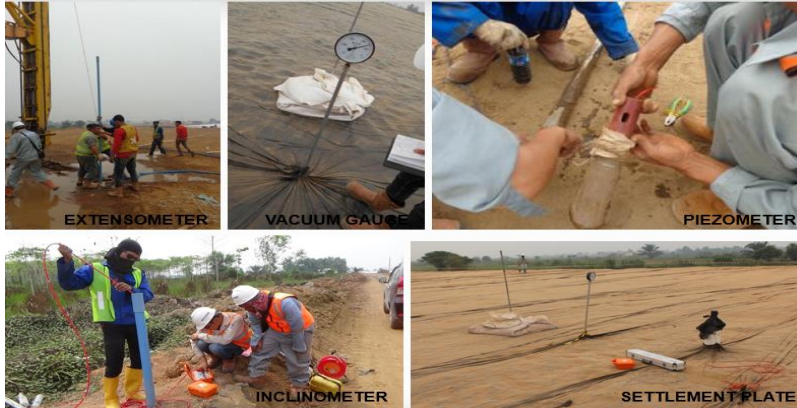


Gambar 11 Proses Pemasangan *Geomembran*

Perlu juga diketahui bahwa jika ada lapisan pasir (*lensa*) bawah area *improvement*, maka lapisan pasir tersebut berpotensi akan membuat sistem *vacuum* menjadi bocor dan tekanan *vacuum* akan turun (*lose of pressure*), sehingga jika ada lapisan pasir seperti itu maka *sealing wall* dibutuhkan. Tahapan selanjutnya adalah pemasangan instrumentasi untuk pemantauan sekaligus sebagai alat bantu untuk *quality control*. Instrumentasi yang dipasang meliputi penggunaan *Settlement Plate*, *Piezometer (Vibrating Wire)*, *Inclinometer*, dan juga *Pressure Transducer* (lihat Gambar 12).

Setelah semua sistem terpasang, termasuk sistem instrumentasi, maka pompa *vacuum* mulai dinyalakan. Umumnya butuh waktu sekitar 14 hari agar tekanan *vacuum* dapat mencapai -80 kPa. Keunggulan lain dari metode *vacuum* adalah bahwa setelah tekanan 80 kPa tercapai, maka penimbunan tahap selanjutnya tetap dapat terus berjalan (walau tetap harus dilakukan secara hati-hati) sambil melakukan pekerjaan *vacuum*. *Vacuum* dihentikan jika derajat

konsolidasi telah mencapai minimum 90% berdasarkan pembacaan data instrumentasi.



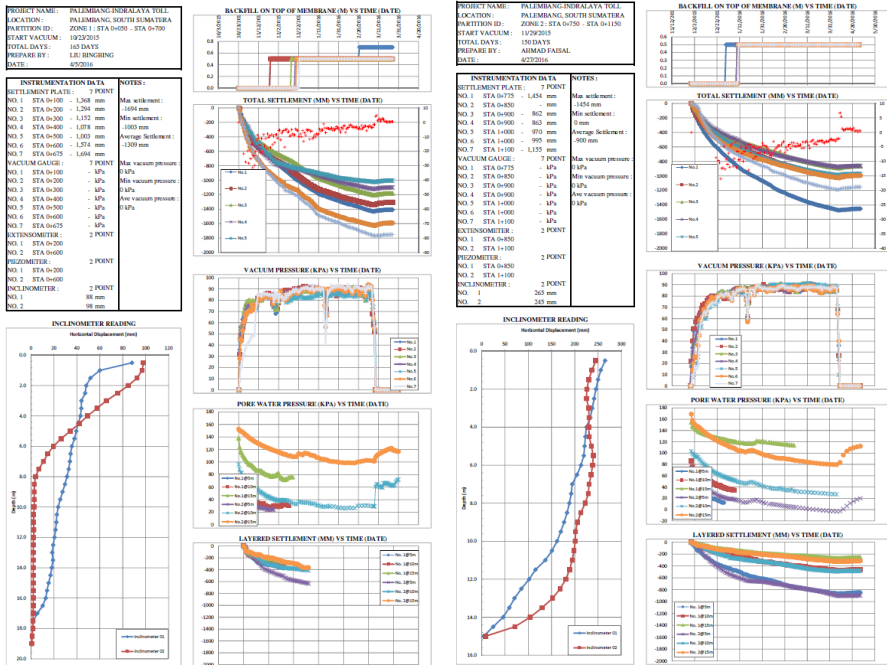
Gambar 12 Instrumentasi pada Pekerjaan *Vacuum*

Derajat Konsolidasi dan Penghentian Pekerjaan *Vacuum Preloading*

Mengingat sistem vacuum adalah sistem tekanan, maka pemantauan terhadap instrumentasi yang dipasang harus dilakukan secara terus menerus selama pekerjaan *vacuum*. Pekerjaan pemantauan dilakukan setiap hari, pada waktu pagi dan sore hari. Data hasil pemantauan diplot ke dalam grafik dan di-*update* setiap hari. Gambar 13 merupakan hasil pemantauan pada *zona trial*.

Sesuai dengan kriteria penerimaan dan spesifikasi teknik untuk pekerjaan *vacuum*, maka *vacuum* dihentikan saat derajat konsolidasi telah mencapai minimum 90% berdasarkan data *settlement plate* dengan menggunakan metode Asaoka. Dengan metode ini derajat konsolidasi ditentukan berdasarkan hasil pembacaan saat ini yang dibandingkan dengan pembacaan sebelumnya, jika nilai penurunan

saat ini tidak berbeda dengan nilai penurunan sebelumnya maka derajat konsolidasi akan mencapai nilai minimum yang ditargetkan.



Sumber: PT Geotekindo (2016)

Gambar 13 Data Monitoring Pekerjaan Vacuum

Tabel 3 merupakan resume nilai derajat konsolidasi untuk setiap lokasi instrumen settlement plate.

Tabel 3 Nilai Derajat Konsolidasi Area *Vacuum* dengan Metode Asaoka

Zona 1: ASOKA METHOD						
ID	Location	Degree of consolidation at t = 1			Remark	
		S ₁₅₀ (mm)	S _{final} (mm)	U (%)		
1	STA 0+100	1410	1550	90,97	OK	
2	STA 0+200	1309	1450	90,28	OK	
3	STA 0+300	1183	1300	91,00	OK	
4	STA 0+400	1102	1220	90,33	OK	
5	STA 0+500	1006	1110	90,63	OK	
6	STA 0+600	1594	1700	93,76	OK	
7	STA 0+675	1755	1800	97,50	OK	

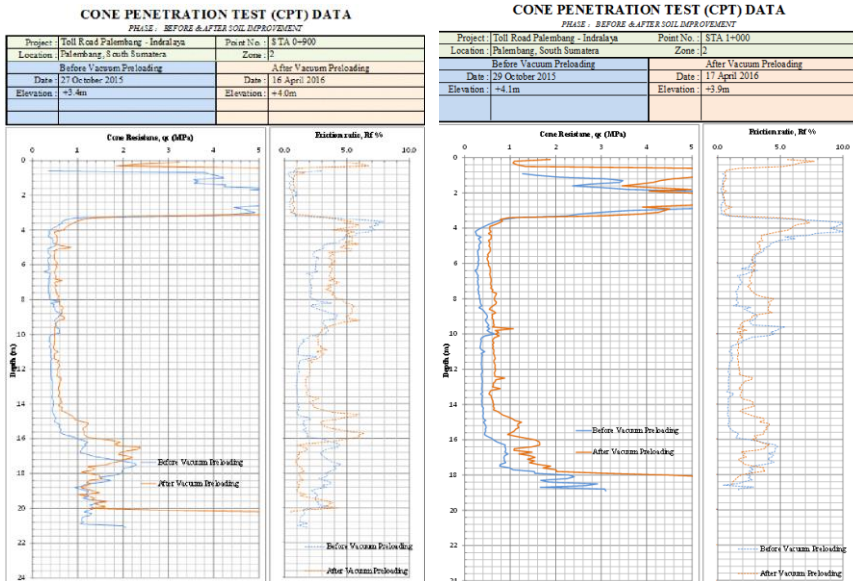
Zona 2: ASOKA METHOD						
ID	Location	Degree of consolidation at t = 130 days			Remark	
		S ₁₅₀ (mm)	S _{final} (mm)	U (%)		
1	STA 0+100	1469	1600	91,81	OK	
2	STA 0+200	1020	1130	90,27	OK	
3	STA 0+300	887	970	91,44	OK	
4	STA 0+400	874	970	90,10	OK	
5	STA 0+500	989	1080	91,57	OK	
6	STA 0+600	1024	1130	90,62	OK	
7	STA 0+675	1188	1300	91,38	OK	

Berdasarkan data tersebut, diketahui bahwa derajat konsolidasi rata-rata telah mencapai lebih dari 90%, sehingga pekerjaan *vacuum* dapat dihentikan.

Pengujian Tanah Sebelum dan Setelah Pekerjaan *Vacuum Preloading*

Salah satu tujuan perbaikan tanah dengan *vacuum preloading* adalah meningkatnya kuat geser tanah dasar. Untuk itu perlu dilakukan upaya pengujian untuk mengetahui bagaimana kondisi tanah sebelum perbaikan dan setelah perbaikan, sehingga dapat secara jelas diketahui apakah ada kenaikan kuat geser (*gain strength* atau tidak). Pengujian pada area *trial* dilakukan dengan menggunakan uji sondir listrik. Pengujian dilakukan pada beberapa titik yang dapat

mewakili secara keseluruhan zona *trial*. Gambar 14 merupakan hasil pengujian sondir listrik yang dibandingkan antara sebelum dan setelah perbaikan.



Sumber: PT Geotekindo (2016)

Gambar 14 Perbandingan Hasil Pengujian Tanah: Sebelum dan Setelah *Vacuum*

Dari hasil pengujian tersebut diketahui bahwa nilai tahanan ujung naik bervariasi mulai dari 1,6 kali hingga 5 kali nilai tahanan ujung awal, ini menunjukkan bahwa terjadi kenaikan kuat geser tanah dengan adanya perbaikan tanah.

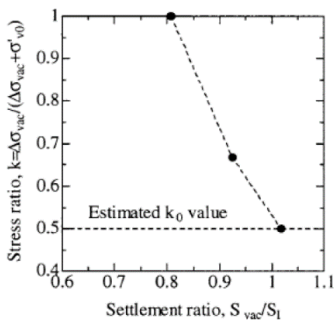
REKOMENDASI KRITIS PENANGANAN TANAH LUNAK DENGAN *VACUUM PRELOADING*

Serangkaian pengujian, penyelidikan tanah, simulasi numeris dan juga pelaksanaan pekerjaan *vacuum*, telah dilakukan dan

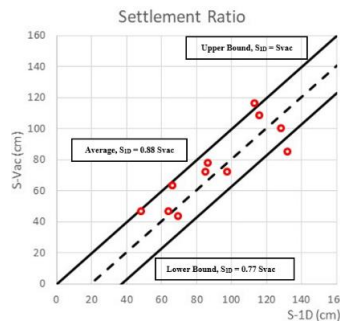
dilaksanakan di lokasi studi pada tahapan *Trial Embankment*. Selanjutnya terdapat beberapa rekomendasi kritis yang diharapkan mampu meningkatkan performa metode perbaikan tanah ini yang perlu diterapkan pada segmen penanganan tanah selanjutnya.

Rekomendasi Metode Analisis untuk *Vacuum Preloading*

Terdapat beberapa metode analisis yang dapat digunakan untuk menentukan besaran dan rate penurunan metode *vacuum preloading*. Metode yang umum digunakan adalah dengan menggunakan konsep penurunan 1D dari Terzaghi. Metode ini cenderung memberikan nilai penurunan yang lebih besar dari yang seharusnya, sehingga apabila akan digunakan maka perlu dilakukan koreksi terhadap besar penurunan yang diperoleh agar lebih mendekati nilai penurunan lapangan. Stapelfeldt (2006) memberikan gambaran nilai koreksi tersebut besarnya antara 0,8 hingga 1.



Sumber: Stapelfeldt (2006)



Sumber: Dermawan, et al (2018)

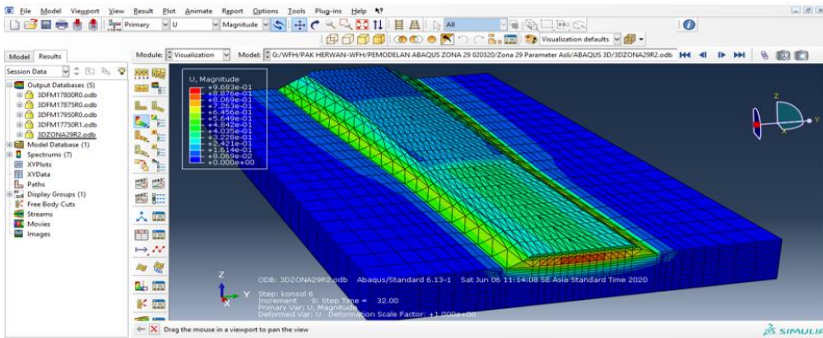
Gambar 15 Rentang Nilai *Settlement Ratio*

Sedangkan Dermawan et al (2018) memberikan angka koreksi berupa nilai *settlement ratio* berkisar antara 0,77 hingga 1,03 dengan rata-rata sebesar 0,88. Dengan demikian, maka penggunaan nilai koreksi penurunan sebesar 0,8 dapat dilakukan. Metode analisis lain

yang sangat direkomendasikan adalah dengan menggunakan elemen hingga yang bisa memodelkan PVD dan tekanan negatif *vacuum* serta mampu memodelkan metode konstruksinya, akan lebih baik lagi jika simulasi numerik tersebut dilakukan dengan 3D mengingat simulasi ini dapat lebih menggambarkan perilaku deformasi tanah secara keseluruhan. Umumnya metode elemen hingga yang tersedia saat ini sudah menggunakan konsep *coupled* (Biot, 1941) pada analisis penurunan dan tekanan air porinya.

Rekomendasi Model *Vacuum* dalam Simulasi Numerik

Terdapat beberapa cara untuk mensimulasikan nilai tekanan *vacuum*, yaitu: (1) memodelkan nilai tekanan *vacuum* sama seperti beban luar, (2) menurunkan nilai tinggi air (*head*) secara tiba-tiba hingga seolah-olah nilai tekanan air pori menjadi negatif, dan (3) menggunakan kondisi batas (*boundary condition*) pada elevasi di mana tekanan *vacuum* bekerja. Metode (1) konsepnya sama dengan analisis manual 1D, sehingga untuk penurunan maka perlu ada koreksi besarannya. Permasalahannya adalah pada perilaku nilai tekanan air pori, di mana nilai tekanan air pori harusnya bernilai negatif malah menjadi positif sebagai dampak dari asumsi beban *vacuum* sebagai beban luar. Metode ini dapat saja memberikan gambaran penurunan yang serupa (setelah dikoreksi) namun memberikan perilaku yang berbeda pada respon tekanan air pori. Metode (2) dan (3) berdasarkan beberapa literatur menghasilkan gambaran perilaku tanah yang lebih baik, sehingga kedua metode ini lebih direkomendasikan untuk digunakan. Simulasi numerik 3D *vacuum preloading* disajikan pada Gambar 16.



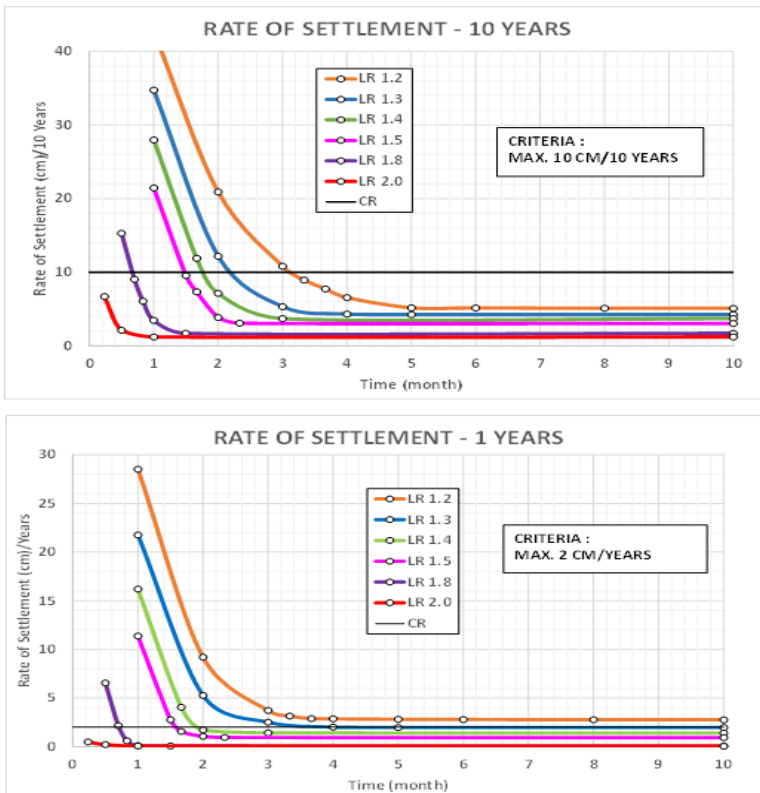
Gambar 16 Simulasi Numerik 3D *Vacuum Preloading*

Rekomendasi Nilai Beban *Vacuum* untuk Analisis

Besarnya tekanan *vacuum* menentukan besaran beban preloading sisa yang harus diberikan (jika kurang). Nilai tekanan *vacuum* minimum sesuai dengan spesifikasi khusus dan SNI adalah minimal sebesar -80 kPa, dan nilai ini harus tercapai di lapangan dan harus stabil nilai minimumnya, serta terbukti melalui pembacaan instrumentasi yang ada. Dalam perencanaan, umumnya nilai *vacuum* dianggap konstan sebesar -80 kPa, namun demikian penggunaan nilai ini harus disesuaikan dengan metode simulasi numerik yang digunakan. Jika *vacuum* disimulasikan sebagai kondisi batas maka nilai konstan *vacuum* dapat menggunakan -80 kPa karena kondisi batas tersebut diberikan pada *level* membran/pipa *vacuum*, sebarannya ke lapisan *filter* dan PVD dibiarkan secara otomatis atau alami seperti halnya di lapangan. Yang perlu diperhatikan adalah jika simulasi *vacuum* menggunakan konsep *sudden drawdown* dan sesuai konsep bahwa nilai tekanan *vacuum* berkurang terhadap kedalaman, maka rekomendasinya adalah nilai tekanan *vacuum* harus dianggap tidak sama sepanjang kedalaman PVD, boleh menggunakan -80 kPa di permukaan namun sesuai referensi yaitu menggunakan sekitar 60-70%-nya di sekitar ujung PVD.

Rekomendasi Nilai *Load Ratio* dalam Perencanaan *Vacuum*

Load ratio adalah perbandingan antara beban saat *improvement* dengan beban pada saat *service*. SNI Geoteknik mensyaratkan nilainya antara 1,2 hingga 1,3. Berdasarkan penelitian yang dilakukan pada ruas tol di Sumatera, untuk memenuhi syarat penurunan residual yang telah ditetapkan yaitu sebesar 10 cm/10 tahun dengan *rate* maksimal 2 cm/tahun, maka direkomendasikan bahwa nilai *load ratio* 1,3 dapat saja digunakan dengan catatan bahwa masa pendiaman (masa pemberian tekanan *vacuum*) minimum 3,5 bulan.



Gambar 17 Rekomendasi Nilai *Load Ratio* dan Waktu Pendiaman

Rekomendasi Penguatan *Geomembran* untuk Timbunan Tinggi

Metode *preloading* konvensional maupun *vacuum preloading* biasanya digunakan untuk pekerjaan timbunan dengan tinggi timbunan rencana maksimal sekitar 5-6 m. Namun demikian, metode ini juga dapat diaplikasikan pada tinggi timbunan yang lebih tinggi. Pengalaman lapangan menunjukkan pengaplikasian hingga ketinggian sekitar 10 m. Namun yang harus dipahami bahwa analisis dan simulasi *vacuum* harus juga mencakup kondisi saat *vacuum* dan kondisi saat pelayanan, terutama masalah elevasi timbunan dan masalah deformasi yang terjadi selama masa *vacuum*.

Perbedaan deformasi yang besar pada satu zona *vacuum* akan berakibat terjadinya tension pada *geomembran* dan *geotextile* di bawah membran yang jika nilainya cukup besar maka akan menyebabkan sobekan besar pada sistem isolasi *vacuum*, dampaknya adalah turun dan hilangnya tekanan *vacuum*, hilangnya kekangan pada tanah dasar, dan pada akhirnya menyebabkan terjadinya *sliding*, selain tentu saja perbaikan tanah yang dilakukan menjadi tidak berhasil.

Untuk timbunan yang cukup tinggi yang potensi perbedaan deformasinya juga cukup besar, maka direkomendasikan untuk melakukan penguatan khusus pada *geomembran*, tidak cukup hanya dengan menggunakan *geotextile non-woven*, diperlukan *geotextile* dengan kuat tarik yang cukup besar, hal ini perlu dipertimbangkan dalam desain *vacuum* dan disimulasikan pada analisis *vacuum*.

Rekomendasi Penentuan Zona *Vacuum* terkait Masalah *Differential Settlement*

Tiap zona *vacuum* pada pekerjaan jalan tol umumnya memiliki lebar selebar jalan tol yaitu sekitar 28,5 m (hingga kaki lereng timbunan), dengan panjang sekitar 300 m. Segmen jalan tol umumnya memiliki ketinggian yang relatif sama, namun pada lokasi-lokasi tertentu, seperti *interchange* dan *oprit*, perbedaan tinggi timbunan dapat signifikan dalam jarak yang dekat (lihat Gambar 18). Hal ini dapat memicu terjadinya perbedaan penurunan yang tentu saja dapat berdampak terjadinya tarik ke membran jika dijadikan dalam satu zona *vacuum*.



Gambar 18 Area *Interchange* Jalan Tol

Untuk kasus seperti ini, maka direkomendasikan untuk membuat pembagian zona *vacuum* yang lebih banyak, dengan kondisi perbedaan ketinggian timbunan yang kecil, sehingga potensi kerusakan pada membran di bawah timbunan dapat dihindari.

Rekomendasi *Backup Plan* untuk Instrumentasi *Vacuum* dari Kerusakan

Instrumentasi yang digunakan pada pekerjaan *vacuum* diantaranya adalah *Inclinometer*, *Piezometer*, *Settlement Plate*, *Extensometer*, sesuai fungsi dan tujuannya masing-masing. Umumnya alat instrumentasi ini dipasang pada tahap persiapan pelaksanaan. *Vacuum Preloading* adalah teknik perbaikan tanah yang performa dan *quality control*-nya sangat tergantung pada instrumentasi yang dipasang. Kerusakan pada alat instrumentasi tersebut berarti kehilangan kemampuan untuk membaca kondisi pekerjaan *vacuum* saat ini, tentu saja hal ini dapat membahayakan keberlanjutan pekerjaan yang sedang dilakukan. Kerusakan instrumentasi seringkali terjadi saat tahap penimbunan tanah di atas membran *vacuum*, karena terdorong oleh material timbunan ataupun akibat tersengol/tertabrak alat berat walau area di sekitar alat instrumentasi tersebut sudah diberikan marka.

Rekomendasi sehubungan dengan hal ini adalah 1) menggunakan alat instrumentasi yang sifatnya *wireless* dan dapat dilakukan pembacaan secara *real-time*, 2) membuat spesifikasi yang memuat klausul bahwa jika ada kerusakan terhadap alat instrumentasi tersebut, *vendor* wajib untuk segera memasang penggantinya dan melanjutkan pembacaan agar risiko kehilangan data lebih banyak dapat dihindari, serta 3) meletakkan posisi-posisi instrumentasi di tempat yang lebih kecil risikonya namun data yang diperoleh tetap andal, mengingat pembacaan instrumentasi ini akan tetap dilakukan bahkan pada tahap pelayanan (operasional) jalan tol.

Rekomendasi Kualitas Timbunan *Preloading*

Standar dan spesifikasi sudah mensyaratkan adanya pengujian tanah sebelum dan setelah perbaikan tanah dengan *vacuum*, namun demikian tidak secara spesifik melarang penggunaan uji sondir mekanis untuk aplikasi tanah lunak, atau paling tidak mensyaratkan bahwa alat baca yang digunakan harus cukup sensitif mengingat yang dihadapi adalah tanah lunak. Berdasarkan pengalaman lapangan diketahui bahwa alat sondir mekanis yang tersedia umumnya digunakan untuk kondisi tanah yang medium hingga *stiff/hard* yang tidak membutuh tingkat sensitivitas alat baca (umumnya menggunakan manometer), pada beberapa kasus dijumpai bahkan setelah perbaikan tidak ada kenaikan kuat geser atau malah hasil pembacaan setelah perbaikan malah lebih rendah dibandingkan sebelum perbaikan, padahal instrumentasi menunjukkan adanya peningkatan kuat geser/daya dukung.

Untuk pekerjaan *vacuum*, maka direkomendasikan untuk membuat spesifikasi tentang penggunaan CPTu atau paling tidak CPT elektrik dengan *pressure transducer* sehingga memiliki sensitivitas yang tinggi. Selain itu kenaikan kuat geser tidak hanya dibaca melalui nilai q_c , namun juga melalui pengujian *strength* tanah di laboratorium, artinya dilakukan pemboran, pengujian SPT, dan pengambilan sampel tanah baik untuk kondisi sebelum dan setelah perbaikan, sehingga benar-benar teruji nilai kenaikan kuat gesernya.

Rekomendasi Konektivitas antar Zona *Vacuum*

Jalan tol yang cukup panjang dibagi menjadi beberapa zona *vacuum*. Dalam 1 zona *vacuum* umumnya penurunan relatif seragam, *load*

ratio yang diberikan juga relatif sama, sehingga seharusnya kenaikan kuat geser dan daya dukung juga sama. Perhatian perlu diberikan di sekitar pertemuan antar zona *vacuum*. Umumnya bagian tepi dari zona *vacuum* dibuat *sloping* sehubungan dengan masalah stabilitas, dampaknya adalah di area pertemuan ini *load ratio* aktual menjadi lebih kecil sehingga kenaikan kuat geser dan daya dukungnya juga berbeda yang kemudian berdampak ke nilai penurunan yang juga berbeda. Hal ini akan memberikan bentuk penurunan yang tidak seragam. Rekomendasi teknisnya adalah untuk lokasi pertemuan tersebut tidak dibuat *sloping*, melainkan dibuat tegak dan langsung dipertemukan antara kedua zona *vacuum*. Membran pada kedua zona tersebut dibuat menempel, sehingga tidak ada lagi zona antara, ini akan sangat mengurangi risiko perbedaan penurunan.

Rekomendasi Metode Penentuan Nilai Derajat Konsolidasi

Hal penting yang menjadi syarat dan harus dicapai tepat sebelum pekerjaan *vacuum* dihentikan adalah bahwa pekerjaan *vacuum* tersebut telah mencapai derajat konsolidasi minimum 90% dan mencapai nilai *load ratio* yang disyaratkan dalam SNI. Sehubungan dengan penentuan derajat konsolidasi, maka SNI dan spesifikasi khusus menyebutkan bahwa hal ini harus dilakukan dengan metode Asaoka. Untuk menentukan nilai derajat konsolidasi hingga saat ini diketahui terdapat 2 metode yang bisa digunakan untuk pekerjaan *vacuum*: berdasarkan data *settlement plate* (Asaoka) dan berdasarkan data pembacaan *pore water pressure* (*Pore Pressure Based*, Jian, C., et al 2015). Nilai derajat konsolidasi berdasarkan Asaoka membutuhkan ketelitian dan saat yang tepat untuk digunakan, serta berpotensi untuk memberikan nilai yang lebih besar

dari yang seharusnya, sebaliknya nilai derajat konsolidasi yang diambil berdasarkan nilai tekanan air pori umumnya lebih kecil.

Rekomendasi sehubungan dengan masalah derajat konsolidasi adalah bahwa sebaiknya penentuan derajat konsolidasi dilakukan dengan kedua metode tersebut. Jika tidak, maka sebaiknya digunakan metode PWP yang memberikan nilai derajat konsolidasi yang lebih kecil, sehingga lebih aman dan lebih konservatif. Pada metode ini *vacuum* dihentikan sedikit lebih lama untuk memastikan bahwa benar sudah mencapai derajat konsolidasi yang disyaratkan. Perlu diketahui bahwa setelah *vacuum* dimatikan sangat sulit untuk kembali melanjutkan proses *vacuum* bila ternyata setelah dimatikan derajat konsolidasi tidak tercapai, kuat geser tanah rendah, atau daya dukung tidak memenuhi syarat. Untuk *load ratio*, yang perlu diperhatikan adalah masalah perhitungan nilainya yang sangat tergantung dari tingkat akurasi pembacaan elevasi, pengukuran berat isi tanah aktual, ketebalan masing-masing lapis timbunan dan beban perkerasan. Semua hal tadi harus berdasarkan hasil pengukuran lapangan, bukan lagi menggunakan asumsi, hal ini harus muncul dalam spesifikasi teknis yang disusun.

Rekomendasi Pengujian Tanah (*Before and After Vacuum*)

Standar dan spesifikasi sudah mensyaratkan adanya pengujian tanah sebelum dan setelah perbaikan tanah dengan *vacuum*, namun demikian tidak secara spesifik melarang penggunaan uji sondir mekanis untuk aplikasi tanah lunak, atau paling tidak mensyaratkan bahwa alat baca yang digunakan harus cukup sensitif mengingat yang dihadapi adalah tanah lunak. Berdasarkan pengalaman lapangan diketahui bahwa alat sondir mekanis yang tersedia

umumnya digunakan untuk kondisi tanah yang medium hingga *stiff/hard* yang tidak membutuhkan tingkat sensitivitas alat baca (umumnya menggunakan *manometer*), pada beberapa kasus dijumpai bahkan setelah perbaikan tidak ada kenaikan kuat geser atau malah hasil pembacaan setelah perbaikan malah lebih rendah dibandingkan sebelum perbaikan, padahal instrumentasi menunjukkan adanya peningkatan kuat geser/daya dukung.

Untuk pekerjaan *vacuum*, maka direkomendasikan untuk menggunakan alat uji CPTu atau paling tidak CPT elektrik dengan *pressure transducer* sehingga memiliki sensitivitas yang tinggi. Selain itu kenaikan kuat geser tidak hanya dibaca melalui nilai qc, namun juga melalui pengujian *strength* tanah di laboratorium, artinya dilakukan pemboran, pengujian SPT, dan pengambilan sampel tanah baik untuk kondisi sebelum dan setelah perbaikan, sehingga benar-benar teruji nilai kenaikan kuat gesernya.

Rekomendasi Penanganan Area *Oprit* Struktur

Pada area struktur (jembatan, *pile slab*) yang berbatasan dengan area *vacuum*, umumnya diberi ruang sekitar 25-50m dengan tujuan untuk mencegah agar efek tarikan *vacuum* tidak mempengaruhi pondasi struktur jembatan/*pile slab* tersebut. Namun demikian, area ini seringkali menjadi area yang terlewatkan untuk ditangani. Dampaknya jika waktu yang tersedia sudah habis bahkan area ini tidak dilakukan *improvement* sama sekali, sehingga ditimbun tanpa penguatan, dengan timbunan yang lebih tinggi yang berpotensi mengalami masalah, baik stabilitas maupun penurunan. Bahkan jika ditangani masalah stabilitasnya, masalah penurunan jangka panjang akan menjadi isu yang serius.

Rekomendasi perencanaan yang diberikan adalah memasukkan area antara tersebut sebagai zona *improvement* dengan *vacuum*, namun pelaksanaan *improvement* dilaksanakan terlebih dulu, setelah selesai baru kemudian konstruksi jembatan dilaksanakan. Atau jika jembatan telah dibangun, maka perlu dipasang instrument pemantauan di lokasi jembatan (pondasi) misalnya *inclinometer* untuk memantau pergerakan pondasi jembatan selama proses *vacuum*. Tekanan *vacuum* dapat saja diturunkan hingga 70 kPa untuk mengurangi deformasi *lateral* yang terjadi, namun tetap menjaga nilai *load ratio target*, kekurangan tekanan *vacuum* dikonversi ke nilai tinggi timbunan *preloading*. Cara lain adalah pada lokasi ini dilakukan penguatan tanah yang dapat dilaksanakan dengan cepat, seperti *pile embankment*, *deep cement mixing*, *rigid inclusion*, dan lain sebagainya. Jika waktu menjadi pertimbangan sangat penting, maka penggunaan solusi struktural seperti *pile-slab* juga dapat digunakan. Secara keseluruhan, area antara ini harus jelas metode penanganannya dan harus ditangani dari tahap perencanaan, jangan sampai terlewatkan.

Rekomendasi terkait *Scope of Work* dari Kontraktor Utama dan *Vendor*

Teknik perbaikan dengan metode *vacuum preloading* tidak bisa dilepaskan dengan masalah nilai *load ratio* yang diberikan, artinya keberhasilannya erat kaitannya dengan masalah timbunan di atas membran (badan timbunan dan timbunan *preloading*). Seringkali terjadi bahwa *vendor* pekerjaan *vacuum* hanya terbatas mengerjakan sistem *vacuum* saja, sedangkan timbunan di atas *vacuum* dilakukan oleh kontraktor utama atau subkon lain. Hal ini seringkali membuat tingkat keberhasilan *vacuum preloading* menjadi turun, karena

vendor vacuum tidak dapat mengontrol kualitas timbunan dan nilai *load ratio* yang dihasilkan. Yang menjadi masalah adalah saat terjadi penurunan, maka akan terjadi konflik tentang bagian mana yang mengalami penurunan, apakah tanah yang diperbaiki atau timbunan di atasnya. Hal ini menyulitkan untuk menentukan siapa pihak yang bertanggungjawab.

Sangat direkomendasikan untuk membuat spesifikasi bahwa pekerjaan perbaikan tanah dengan *vacuum preloading* adalah sistem perbaikan, yang meliputi perbaikan tanah dasar dan timbunan di atas membran. *Scope* dari *vendor vacuum* harus mencakup tidak hanya masalah perbaikan tanah dasar, namun juga akses terhadap masalah penimbunan di atas membran, sehingga masalah kualitas timbunan dan pencapaian *load ratio* menjadi tanggung jawab *vendor vacuum*.

Rekomendasi terkait *Quality Control*

Pekerjaan perbaikan tanah dengan *vacuum preloading* tidak bisa dilepaskan dari proses *quality control* mulai dari awal hingga akhir, bahkan hingga tahap *service* jalan tol. *Quality control* dapat berupa pembacaan instrumentasi, pengujian performa pada masalah kuat geser dan daya dukung, kontrol nilai *load ratio*, penentuan derajat konsolidasi, dan lain sebagainya. Masalah yang muncul adalah pada pengujian performa yang dilaksanakan oleh *vendor* sendiri, sehingga validitasnya kurang karena tidak ada pihak lain yang melakukan koreksi pengujian tersebut.

Rekomendasi yang diberikan adalah bahwa diperlukan pihak ketiga (independen) yang kredibel untuk melakukan pengujian performa, atau bahkan jika memungkinkan hingga pemasangan dan

pembacaan instrumentasi, agar hasil yang diperoleh benar-benar dapat dianggap *valid* dan benar yang mencerminkan kondisi aktual lapangan.

Rekomendasi terkait Jalan Kerja dan *Counterweight*

Untuk pekerjaan pembangunan jalan tol, apalagi untuk konstruksi perbaikan tanah, maka jalan kerja sangat dibutuhkan. Pada beberapa kasus, area *improvement* yang sedang dalam proses perbaikan justru dijadikan jalan kerja, padahal kuat geser tanah belum cukup besar untuk menerima beban. Hal ini mengakibatkan beberapa lokasi tersebut mengalami longsor justru pada tahap perbaikan.

Rekomendasi yang diberikan adalah bahwa jalan akses atau jalan kerja dibuat di kaki terluar rencana jalan tol, sehingga selain tidak mengganggu proses perbaikan tanah, namun juga menjadi *counterweight* alami yang dapat memberikan dampak positif terhadap stabilitas. Bahkan pada beberapa kasus, *counterweight* bekas jalan akses ini yang membuat timbunan jalan tol menjadi lebih stabil.

Rekomendasi terkait Penanganan Lereng Timbunan pada Area Rawa

Umumnya pada area rencana kerja yang tergenang/rawa, maka digunakan matras berupa pasir/sirtu. Ketebalan matras biasanya dibuat hingga di atas elevasi banjir rencana sehingga pada beberapa lokasi timbunan matras ini cukup tebal. Permasalahan pada material granular adalah di bagian tepi yang mudah tergerus oleh pasang surut air, atau oleh aliran permukaan. Pada kasus seperti ini,

rekomendasinya adalah dengan menutup atau bila perlu membungkus sistem matras dengan menggunakan *geotextile*, yaitu dengan melipat *geotextile separator* hingga ke atas permukaan tepi matras.

Permasalahan lain adalah untuk lereng timbunan yang berada di area yang tergenang/rawa. Aliran air permukaan dan aliran air di luar timbunan, dapat mengakibatkan erosi, gerusan, pelunakan pada bagian lereng timbunan yang dapat mengakibatkan stabilitas lereng turun. Pada kondisi lereng seperti ini, maka pilihannya adalah dengan mencegah air masuk ke area lereng timbunan dengan cara menutup permukaan lereng timbunan tersebut dengan menggunakan lining (batu kali, *shotcrete*, *soil-cement*) hingga di atas elevasi banjir maksimum, tentu saja dengan pondasi *lining* yang cukup. Hal ini akan mempertahankan kestabilan lereng timbunan sekaligus mencegah terjadinya erosi/gerusan pada permukaan lereng timbunan.

KESIMPULAN

Dalam tulisan ini telah disampaikan hal-hal penting yang perlu diperhatikan sehubungan dengan kondisi tanah dan pemilihan metode perbaikan tanah dengan mempertimbangkan berbagai aspek, hingga sampai pada suatu keputusan pemilihan metode perbaikan yang akan diterapkan di lapangan. Dalam tulisan ini juga disampaikan tentang pentingnya pelaksanaan *Trial Embankment* pada suatu area yang akan diperbaiki tanahnya, yang akan dinilai performa dan ketercapaian terhadap kriteria penerimaan sebelum diterapkan secara massif di seluruh area perbaikan.

Beberapa rekomendasi teknis berdasarkan *Trial Embankment* juga telah dipaparkan, walaupun hal tersebut tersedia di SNI dan Spesifikasi Khusus sehubungan dengan pekerjaan *vacuum preloading*, seperti masalah penentuan metode interpretasi derajat konsolidasi dan penggunaan nilai *load ratio*, namun demikian pada beberapa hal dibutuhkan penegasan dan tambahan kelengkapan sehingga kriteria penerimaan untuk timbunan di atas jalan tol dapat dicapai. Pada akhirnya, metode *vacuum preloading* merupakan metode yang sebenarnya sangat dapat diandalkan untuk perbaikan tanah lunak dengan berbagai keuntungannya, namun perlu dilaksanakan secara cermat dan hati-hati agar target perbaikan dapat dicapai dan potensi masalah dapat diminimalisir.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional. 2017. *Standar Nasional Indonesia (SNI) 8460: Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta.
- Chai J. C., Carter J. P., and Hayashi, S. 2005. *Ground Deformation Induced by Vacuum Consolidation*. *Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering*, ASCE, 131 (12): 1552–1561.
- Choa, V. 1989. *Drains And Vacuum Preloading Pilot Test*. *Proceeding 12th ICSMFE*, 2: 1347–1350.
- Chu J., Yan S. W., and Yang, H. 2000. *Soil Improvement by the Vacuum Preloading Method for an Oil Storage Station*. *Geotechnique*, 50 (6): 625-632.
- Crow, M. J., Barber, A. J. 2005. *Simplified Geological Map of Sumatera*. <https://www.lyellcollection.org>. Diakses 15 Oktober 2022.

- Geotekindo, PT. 2016. *Factual Report on Testing Area, Vacuum Consolidation Method*, Palembang Indralaya Toll Road. Jakarta.
- Indraratna, B., Balasubramaniam, A. S., Rujiakiatkamjorn, C., Zhong R. 2014. *Recent Advances in Soft Ground Improvement – From Bumpy Rides to Rapid Transit*. Proceeding of Soift Soils 2014: AI-1 – AI-35.
- Irsyam, M., Krisnanto, S., Wardhani, S.P.R. 2008. *Instrumented Full Scale Test and Numerical Analysis to Investigate Performance of Bamboo Pile-Mattress System as Soil Reinforcement for Coastal Embankment on Soft Clay*. In: Liu, H., Deng, A., Chu, J. (eds) *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-79846-0_11.
- Kjellman, W. 1952. *Consolidation of Clay Soil by Means of Atmospheric Pressure*. Proceeding Conference on Soil Stabilization, : 258-263.
- Leroueil, S., Magnan, J. P., Tavenas, F. 1990. *Embankment on Soft Clays*. Hemel Hemstead Herts: Ellis Horwood Publisher.
- Masse, F., Spaulding, C. A., Wong I. C. and Varaksin, S. 2001. *Vacuum Consolidation a Review of 12 years of Successful Development*. Geo-Odyssey, ASCE Blacksburg, VA: Virginia Tech.
- Pemerintah Republik Indonesia (RI. 2014. *Peraturan Presiden Nomor 48 Tahun 2014 tentang Perubahan atas Peraturan Presiden Nomor 32 Tahun 2011 tentang Masterplan Percepatan dan Perluasan Pembangunan Ekonomi Indonesia 2011-2025*. Jakarta.
- Pusat Litbang Prasarana Transportasi. 2001. *Panduan Geoteknik 4:*

Desain dan Konstruksi, Timbunan Jalan pada Tanah Lunak. Jakarta.

Soilens, PT. 2016. *Plate Loading Test for Palindra Toll Road Project*, Palembang.

Stapelfeldt, T. 2006. *Preloading and vertical drains*, Helsinki: University of Technology.

Sutjipto, M. R. 2016. *Penggunaan Teknologi untuk Mendapatkan Biaya Investasi yang Optimum pada Jalan Tol Sumatera*, Seminar Nasional HMTS. Fakultas Teknik Universitas Andalas, Padang.

Yan, S. W., and Chu J. 2003. *Soil Improvement for a Road using the Vacuum Preloading Method, Ground Improvement*, 7 (4): 165-172.

STRATEGI MITIGASI PENURUNAN JALAN PENDEKAT JEMBATAN

Hary Christady Hardiyatmo

Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

PENDAHULUAN

Salah satu permasalahan yang sering timbul pada struktur jembatan adalah penurunan di pendekat jembatan (*bridge approach*). Pendekat jembatan adalah badan jalan di belakang abutmen. Penurunan tak seragam ini menimbulkan terbentuknya benjol (*bump*) di ujung jembatan.

Telah banyak penelitian dilakukan yang terkait dengan penurunan jalan pendekat jembatan dan usulan teknik mitigasi dari masalah ini. Sumber masalah umumnya dibagi menjadi empat kategori: 1) sifat-sifat material fondasi dan timbunan, 2) kriteria desain untuk fondasi jembatan, 3) metode konstruksi, dan kriteria pemeliharaan. Untuk teknik mitigasi beberapa metode telah digunakan guna mengatasi masalah penurunan pendekat jembatan dan benjol (*bump*). Terdapat lima cara kelompok teknik mitigasi yang telah dilakukan, yaitu; 1) perbaikan tanah fondasi di bawah timbunan, 2) perbaikan material tanah urug, 3) perancangan fondasi jembatan, 4) perancangan pelat pendekat, dan 5) perancangan drainase yang teliti dan disertai pemasangan pelindung erosi (Yenigalla, 2011).

Tulisan ini menjelaskan sebab-sebab penurunan pendekat jembatan, berbagai teknik mitigasinya dan juga menunjukkan cara pemeliharannya dari studi pustaka. Selanjutnya dilakukan analisis

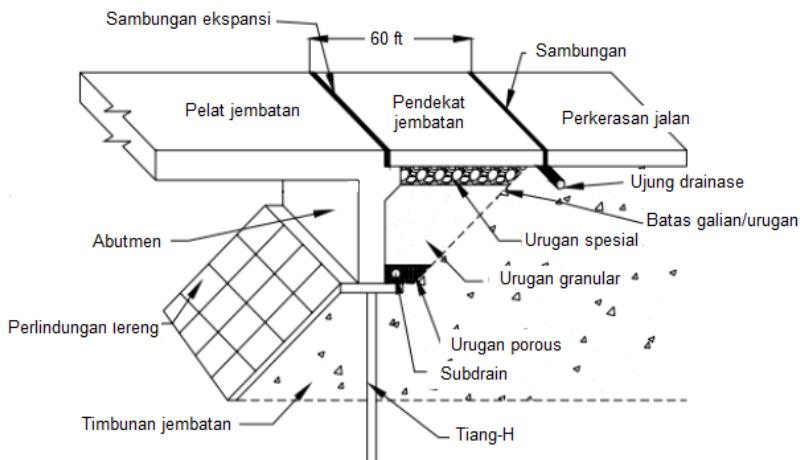
sebab-sebab penurunan jalan pendekat di *underpass* jalan Tol Solo-Ngawi KM 528 dan memberikan solusi kemungkinan cara penanganan yang cocok.

TINJAUAN PUSTAKA

Studi pustaka dilakukan untuk menentukan penyebab, metode mitigasi, dan cara pemeliharaan/perbaikan terjadinya penurunan pendekat jembatan dan benjol di ujung jembatan yang telah dilakukan pada penelitian-penelitian sebelumnya.

Penurunan Pendekat Jembatan dan Terjadinya Benjol

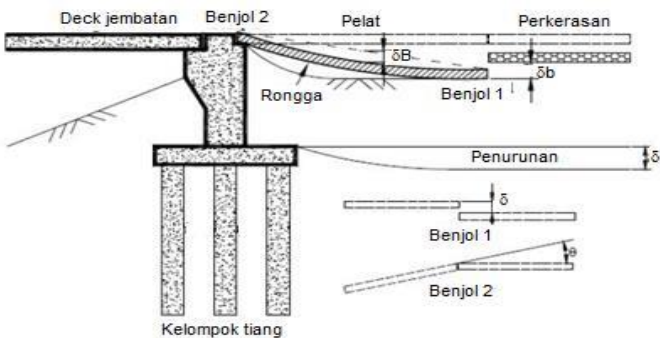
White et al. (2005) mendefinisikan pendekat jembatan (*bridge approach*) adalah area di sekitar jembatan sampai sejauh 20 m (60 ft) dari abutmen (Gambar 1).



Sumber: White et al. (2005)

Gambar 1 Ilustrasi Pendekat Jembatan dan Abutmen Jembatan

Dalam hal ini, jalan pendekat jembatan termasuk area urugan kembali (*backfill*) dan timbunan di luar pelat beton pendekat, karena area ini menjadi kontributor terjadinya penurunan tak seragam. Umumnya, perkerasan jalan di atas timbunan dibangun pada tanah yang dipadatkan. Dari waktu ke waktu, badan timbunan mengalami penurunan akibat dari pemampatan/deformasi timbunannya sendiri, maupun penurunan konsolidasi tanah di bawah timbunan. Sebaliknya, jembatan biasanya didukung oleh fondasi tiang atau sumuran yang bertumpu pada tanah keras atau batuan. Oleh karena itu penurunan abutmen atau pilar jembatan umumnya sangat kecil dibandingkan dengan penurunan permukaan jalan di dekatnya yang bertumpu pada tanah timbunan. Hal ini mengakibatkan penurunan tak seragam yang signifikan terjadi di daerah pertemuan antara jembatan. Penurunan tak seragam ini menimbulkan terbentuknya benjol (*bump*) di ujung jembatan. Benjol ini mengganggu pengemudi kendaraan, karena selain tidak nyaman juga membahayakan keselamatan. Dalam praktik, benjol bisa terjadi di dua tempat, yaitu di pertemuan antara perkerasan dan pelat pendekat, dan antara abutmen dan pelat pendekat sebagaimana ditunjukkan Gambar 2 (Abu-Farsakh dan Chen, 2014).



Sumber: Abu-Farsakh dan Chen (2014)

Gambar 2 Ilustrasi Benjol (*Bump*) di Jalan Pendekat

Untuk menghilangkan pengaruh buruk dari benjolan ini, maka di ujung jembatan perlu dipasang pelat (beton) pendekat yang memberikan transisi kerataan yang rata antara jembatan dan jalan raya. Fungsi lain dari pelat pendekat ini adalah untuk menjaga agar beda penurunan antara jembatan dan jalan raya masih dalam batas-batas yang ditoleransi (Hoppe, 1999). Dalam hal ini, penurunan didefinisikan sebagai beda penurunan atau kenaikan pelat pendekat terhadap abutmen jembatan. Briaud *et al.* (1997) menyimpulkan bahwa bila jalan pendekat jembatan di sekitar abutmen turun sehingga menimbulkan benjolan di tepi jembatan, maka beban lalu-lintas di tempat ini akan mengakibatkan beban kejut sekitar 4 sampai 5 kali dari beban statik yang digunakan dalam perancangan.

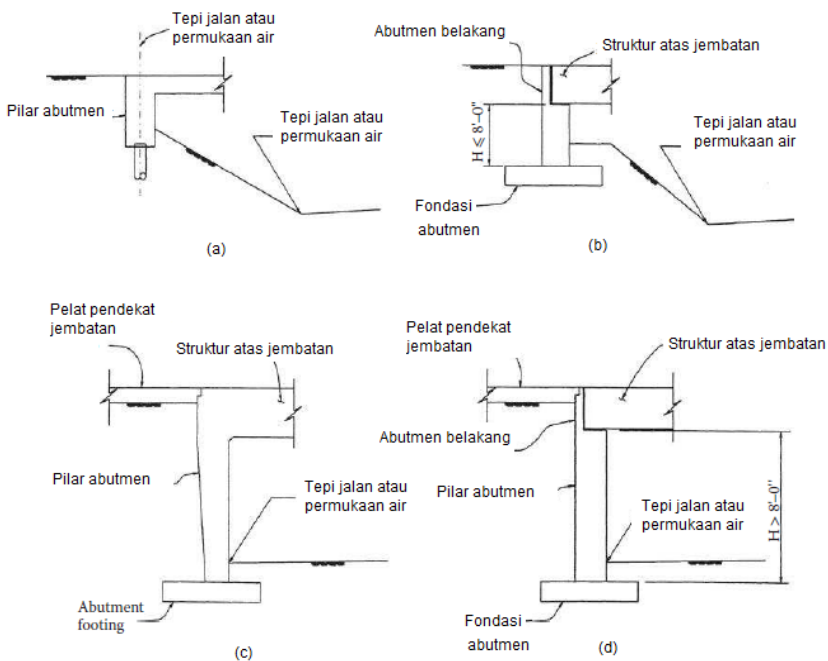
Tipe-tipe Abutmen

Tipe abutmen jembatan mempengaruhi timbulnya benjol dan penurunan di sekitar jalan pendekat (Hopkins, 1969; Stark et al., 1995; Briaud et al., 1997). Dari tinjauan hubungan antara abutmen dan jalan atau saluran (yaitu jembatan melintang di atasnya), abutmen jembatan dapat dibagi menjadi dua kategori: abutmen ujung terbuka (*open-end abutment*) dan abutmen ujung tertutup (*closed-end abutment*) (Chen dan Duan, 2014) seperti terlihat pada Gambar 3.

Pada abutmen ujung terbuka terdapat lereng di antara abutmen jembatan dan ujung jalan atau saluran (Gambar 3a dan 3b). Lereng ini memberikan ruang terbuka bagi lalu-lintas yang lewat atau saluran air yang berada di bawah jembatan. Abutmen ujung tertutup umumnya dibangun mendekati tepi jalan atau saluran (Gambar 3c dan 3d). Dalam hal ruang pembebasan tanah terbatas, abutmen yang

tinggi umumnya dibangun tanpa adanya lereng di depan abutmen guna memenuhi persyaratan ruang bebas vertikal lalu-lintas kendaraan atau aliran air.

Terkait dengan hubungan antara *deck* jembatan dengan abutmen, maka abutmen dapat dibagi menjadi abutmen integral dan non-integral, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4 dan 5 (Greimann et al., 1987).



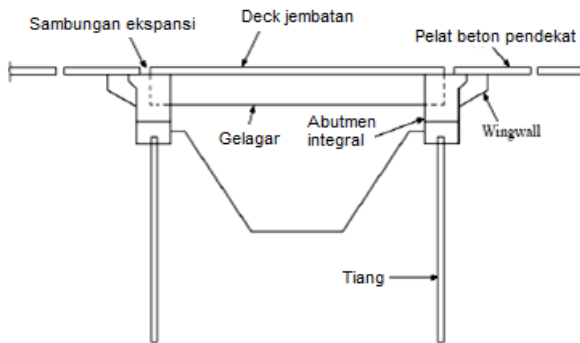
Sumber: Chen dan Duan (2014)

Gambar 3 Tipikal Tipe-Tipe Abutmen, (a) Tipe ujung terbuka, *monolit*, (b) Tipe ujung terbuka dengan pilar pendek, (c) Tipe ujung tertutup, *monolit*, (d) Tipe ujung tertutup, pilar pendek

Abutmen non-integral (Gambar 5) adalah abutmen yang terpisah (tidak *monolit*) oleh sambungan ekspansi antara *deck* jembatan,

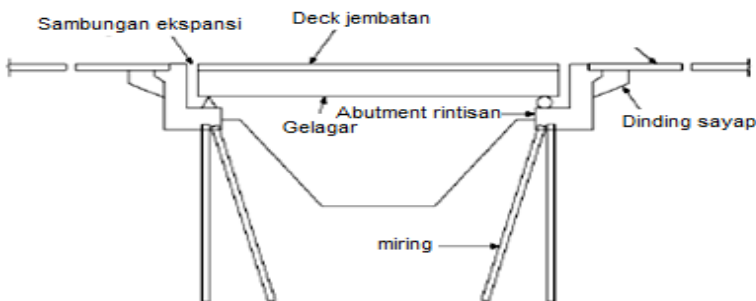
abutmen dan/atau pelat pendekat (bila ada). Sambungan ekspansi memungkinkan adanya gerakan lateral relatif antara *deck* jembatan terhadap abutmen oleh akibat perubahan suhu. Gerakan ke arah longitudinal *deck* jembatan terhadap abutmen dimungkinkan dengan pemasangan rol atau pelat pendukung.

Abutmen integral (Gambar 4) adalah kebalikan dari abutmen non-integral, karena tidak menyediakan sambungan ekspansi. *Deck* jembatan, abutmen dan/atau pelat pendekat (jika ada) menyatu secara *monolit* menjadi satu. Biaya pembangunan abutmen integral biasanya lebih rendah dari tipe non-integral.



Sumber: Greimann et al. (1987)

Gambar 4 Tampang Abutmen Integral dari Jembatan



Sumber: Greimann et al. (1987)

Gambar 5 Tampang Abutmen Non-Integral dari Jembatan

Terdapat pula tipe abutmen *semi-integral*, yaitu tipe abutmen di antara *non-integral* dan *integral* (Helwany et al., 2007). Dalam tipe ini, gelagar mungkin bertumpu pada balok dudukan dengan dilengkapi sambungan ekspansi, namun *deck* bertumpu langsung pada abutmen.

Tipe-tipe Fondasi Abutmen

Fondasi abutmen dapat berupa fondasi dangkal maupun fondasi dalam. Fondasi dangkal umumnya berupa pelat (beton atau pasangan batu kali) yang bertumpu pada tanah kuat atau batu. Dasar fondasi bisa pada tanah asli atau di dalam badan timbunan. Bila fondasi abutmen digunakan fondasi tiang, maka tiang dapat berupa tiang pancang maupun tiang bor. Fondasi tiang berfungsi untuk mentransfer beban-beban jembatan ke tanah keras. Penurunan fondasi tiang umumnya kecil, sehingga penurunan relatif antara jalan pendekat dan abutmen biasanya lebih besar dibandingkan dengan jika abutmen didukung fondasi dangkal.

Dua faktor penting dalam menentukan tipe fondasi jembatan adalah tipe jembatan dan kondisi lapisan tanah di tempat. Tipe jembatan seperti dimensi, tipe jembatan, dan bahan bangunan yang digunakan akan sangat berpengaruh pada besarnya beban yang harus didukung, perpindahan (*displacement*) izin dan kriteria kinerja lain untuk fondasi, dan karena itu menentukan tipe dan dimensi fondasi. Kondisi lapisan tanah juga faktor yang sangat mempengaruhi pemilihan tipe fondasi. Kondisi lapisan tanah, khususnya kedalaman tanah keras sangat diperlukan dalam menentukan tipe fondasi. Pemilihan final tipe fondasi umumnya bergantung pada biaya yang harus dikeluarkan yang mempertimbangkan kondisi pembangunan,

ruang gerak untuk pelaksanaan, kondisi lingkungan, waktu pelaksanaan yang tersedia dan lain-lain.

Fondasi jembatan dapat dibuat berdiri sendiri atau berkelompok. Fondasi jembatan individual antara lain dapat berupa fondasi telapak, tiang berdiameter besar, kaisan dan *rock socked*. Untuk jembatan kecil, fondasi skala kecil semacam kelompok kaisan, tiang pancang, tiang bor dan *rock socked*. Untuk jembatan besar, tiang pancang atau bor diameter besar, kaisan atau gabungan tipe fondasi dapat digunakan. Fondasi jembatan kadang-kadang dibangun dalam tanah-tanah sulit, seperti dalam area berpotensi longsor, tanah berpotensi likuifaksi, tanah mudah runtuh (*collapsible soil*), tanah lunak, tanah mudah mengembang dan lain- lain.

Faktor Penyebab Penurunan Jalan Pendekat Jembatan

Idealnya, jalan pendekat jembatan menyediakan transisi aman dan halus untuk kendaraan yang lewat dari perkerasan di atas timbunan ke struktur jembatan. Akan tetapi, penurunan tak seragam antara perkerasan jalan yang berada di atas urugan timbunan dan jembatan yang dibangun di atas fondasi yang lebih kuat, sering menciptakan benjolan (*bump*) di ujung jembatan.

Pada perkerasan beton, penurunan di jalan pendekat jembatan mengakibatkan timbulnya celah di antara pelat perkerasan dan material di bawahnya. Adanya celah ini mengurangi kekuatan jangka panjang dari perkerasan beton. Pada perkerasan lentur, penurunan jalan pendekat mengakibatkan adanya cekungan di area jalan pendekat. Bila penurunan perkerasan secara lokal ini terjadi secara berlebihan maka dapat mengganggu kenyamanan dan

keamanan kendaraan yang lewat.

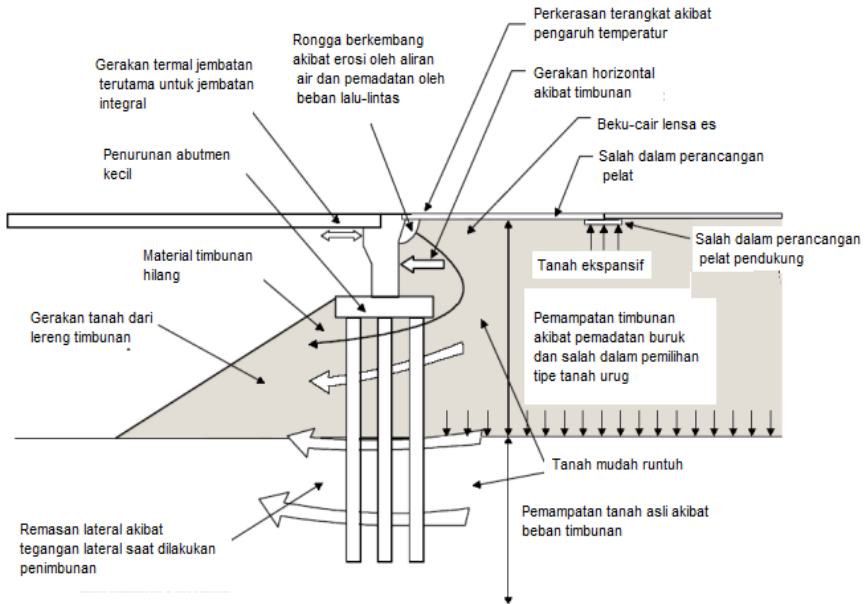
Sebab utama dari terbentuknya benjol di ujung jembatan adalah ketidaktepatan terkait masalah struktur dan material (Briaud et al., 1997). Penurunan yang terjadi dapat disebabkan oleh (1) penurunan konsolidasi tanah fondasi maupun pemampatan tanah timbunannya sendiri, (2) gangguan stabilitas lereng atau deformasi timbunan di area jalan pendekat. Benjol di ujung jembatan akibat penurunan permukaan tanah timbunan di dekat abutmen ini bila mencapai sekitar 5 sampai 7,5 menjadi sangat mengganggu kenyamanan berkendara (Stark et al., 1995). Cekungan di bagian jalan pendekat akibat beda penurunan antara abutmen dan tanah di dekatnya dengan kemiringan 1/200 biasanya sudah dianggap tidak memenuhi syarat kenyamanan. Karena itu, bila penurunan di lokasi jalan pendekat sudah dinilai tidak memenuhi syarat perlu dilakukan pemeliharaan atau pembangunan ulang (rekonstruksi). Dengan memperhatikan permasalahan tersebut, berikut ini akan dibahas beberapa alternatif strategi mitigasi untuk mengurangi timbulnya penurunan di jalan pendekat tersebut.

Penurunan jalan pendekat tidak hanya disebabkan oleh buruknya kualitas pemadatan tanah urug di belakang abutmen, namun juga dipengaruhi hal-hal lain terutama yang menyangkut masalah interaksi antara tanah dan struktur dengan banyak variabel (Helwany et al., 2007).

Menurut Hopkins (1969), faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya penurunan tak seragam di lokasi jalan pendekat jembatan adalah 1) Macam dan sifat pemampatan tanah fondasi dan material urugan yang digunakan untuk timbunan, 2) Tebal tanah yang mudah

mampat di bawah jalan pendekat, 3) Tinggi timbunan, dan 4) Tipe abutmen.

Briaud (1997) memberikan ilustrasi berbagai faktor penyebab terjadinya benjol dan penurunan di sekitar pelat pendekat (*approach slab*) seperti yang disajikan dalam **Gambar 6**. Gambar ini memperlihatkan lokasi pertemuan antara abutmen dan bagian-bagian dari perkerasan jalan raya. Tanda panah menunjukkan lokasi-lokasi yang sering menimbulkan masalah terkait penurunan jalan pendekat di jembatan.



Sumber: Briaud (1997)

Gambar 6 Berbagai Faktor yang Menjadi Penyebab Timbulnya Benjol dan Penurunan Jalan Pendekat Jembatan

Sebab-sebab terjadinya penurunan di jalan pendekat dapat dikelompokkan sebagai berikut (Stark et al., 1995, Briaud et al.,

1997): 1) Kinerja perkerasan di pendekat jembatan buruk, 2) Tipe abutmen dan dukungan fondasi, 3) Deformasi tanah timbunan, 4) Deformasi tanah fondasi di bawah timbunan, dan 5) Drainase buruk.

Kinerja perkerasan di pendekat jembatan buruk

Kualitas perkerasan yang buruk dapat disebabkan oleh perancangan campuran material perkerasan yang salah, faktor lingkungan, kualitas material pembentuk perkerasan ataupun cara pelaksanaan yang salah. Kualitas perkerasan bukan penyebab utama dari penurunan di lokasi pendekat jembatan, namun dapat menjadi kontributor dalam terjadinya penurunan di lokasi pendekat jembatan secara keseluruhan (Lagurous et al., 1990). Kinerja perkerasan yang buruk mengakibatkan kerusakan akibat deformasi pada perkerasan lentur (alur, retak dan lain-lain), dan kegagalan perkerasan beton (retak melintang, sambungan turun, pecah sudut dan lain-lain).

Deformasi tanah timbunan

Lokasi pertemuan antara jembatan dan struktur pendekat jembatan umumnya berada di atas timbunan. Tanah timbunan ini, dengan berjalannya waktu akan mengalami penurunan akibat beratnya sendiri maupun oleh beban lalu lintas di atasnya. Beda elevasi akibat terjadinya penurunan antara permukaan timbunan dan jembatan ini akan menyebabkan timbulnya benjol (*bump*) di ujung jembatan.

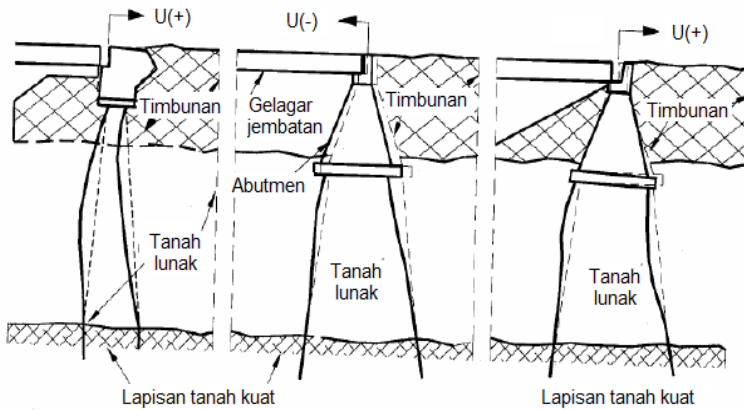
Beberapa faktor yang menyebabkan beda elevasi antara jembatan dan timbunan adalah 1) Tanah timbunan di belakang abutmen tidak dipadatkan dengan baik, tanah urugan mengandung banyak butiran lempung, sehingga sulit dipadatkan pada ruang pemadatan yang terbatas, tebal hamparan pemadatan terlalu tebal dan lain-lain, 2) Perubahan volume tanah urugan di belakang abutmen karena

tanahnya bersifat ekspansif, 3) Konsolidasi tanah badan timbunan setelah konstruksi selesai akibat berat timbunan, beban lalu-lintas dan penambahan lapisan perkerasan karena *overlay* aspal, dan 4) Kegagalan dukungan balok penyangga (*sleeper slab*) di bawah *slab* pendekat.

Deformasi tanah fondasi di bawah timbunan

Deformasi tanah fondasi akibat bertambahnya tegangan vertikal oleh beban timbunan menjadi penyokong utama penurunan pendekat jembatan. Penyebab timbulnya deformasi vertikal dan horizontal tanah adalah terjadinya perasan lateral (*lateral squeeze*), penurunan konsolidasi pasca konstruksi dan gangguan stabilitas lereng global. Perasan lateral tanah atau penggelinciran adalah gerakan horizontal tanah lunak bila dibebani secara berlebihan sehingga kuat gesernya terlampaui. Hannigan et al. (1998) menyampaikan bahwa perasan lateral dapat terjadi bila berat timbunan lebih besar 3 kali dari kuat geser *undrained* tanah fondasi (Gambar 7). Hal ini terjadi bila tanah lunak terletak di atas lapisan tanah keras yang tidak memungkinkan tanah lunak tersebut bergerak ke arah vertikal.

Bila tanah fondasi mengalami penggelinciran, kejadian ini tidak hanya menyebabkan turunnya timbunan di pendekat jembatan, namun juga menambah beban lateral fondasi tiang di bawahnya. Jika fondasi tiang tidak dirancang dengan memperhatikan gaya lateral yang timbul ini, maka tiang akan retak sehingga kapasitas dukungnya berkurang (Hannigan et al., 1998).



Sumber: Hannigan et al. (1998)

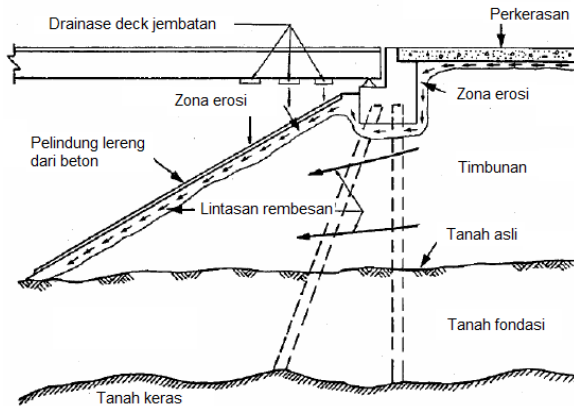
Gambar 7 Gerakan Abutmen Akibat Perasan Lateral (*Lateral Squeeze*) pada Tanah Fondasi yang Lunak

Drainase buruk

Drainase buruk atau kurangnya pemeliharaan drainase dapat menyebabkan terjadinya penurunan tak seragam di abutmen jembatan. Bila aliran air menjauh dari struktur abutmen maupun timbunan terhambat, air dapat berinfiltrasi lewat retakan atau celah di belakang abutmen. Kenaikan kadar air tanah ini menyebabkan pelunakan tanah di area sekitar abutmen sehingga kapasitas dukungnya berkurang.

Beberapa pengaruh merugikan oleh akibat drainase buruk, antara lain: 1) Air yang menggenang di belakang abutmen menambah tekanan hidrostatik yang mendorong abutmen ke depan, 2) Gangguan stabilitas lereng di sekitar jembatan bila terjadi kenaikan muka air sungai, 3) Drainase buruk mengakibatkan genangan air yang menyebabkan pelunakan *subgrade* dan *pumping* yang mengakibatkan turunnya perkerasan beton dan retak pada perkerasan lentur, dan 4) Erosi lereng di sekitar abutmen

menyebabkan gerakan lokal tanah timbunan di belakang dan di depan abutmen. Erosi lokal di depan lereng timbunan terjadi bila lereng yang tidak diberikan pelindung, dan air dibiarkan mengalir melalui permukaan lereng. Air dari atas jembatan, dari timbunan, dan dari tanggul harus dialihkan ke selokan drainase atau sistem saluran pembuangan yang terletak di bagian bawah lereng. Kecepatan air yang tinggi dari atas lereng dapat mengakibatkan erosi di permukaan atau di bawah lereng yang dilindungi. Gambar 8 mengilustrasikan erosi dan kejadian *piping* butiran halus tanah di sepanjang lereng.



Sumber: Stark et al. (1995)

Gambar 8 Erosi pada Lereng di Depan Abutmen

Pengaruh Tipe Abutmen dan Fondasi

Tipe abutmen jembatan, fondasi pendukung berpengaruh langsung dengan gerakan lateral abutmen dan jalan pendekat. Wahls (1990) menyampaikan bahwa kinerja jembatan secara struktural akan terpengaruh bila terdapat gerakan sekitar 5 cm ke arah lateral dan 10 cm ke arah vertikal. Wahls (1990) juga menyampaikan bahwa

perancangan pelat pendekat, tipe abutmen dan fondasi dapat mempengaruhi penurunan relatif antara pelat pendekat dan abutmen. Rayapan lateral tanah fondasi dan gerakan lateral abutmen juga berpotensi menimbulkan masalah ini.

Selanjutnya, Wahls (1990), Stark et al. (1995), Briaud et al. (1997) menunjukkan beberapa penyebab terjadinya penurunan di lokasi pendekat jembatan yang menyangkut tipe abutmen dan fondasi pendukungnya adalah 1) Tidak sempurnanya perancangan abutmen atau dinding sayap (*wingwall*), 2) Gerakan vertikal fondasi yang terkait dengan kekakuan timbunan, 3) Sambungan ekspansi tidak secara rutin dipelihara, sehingga kenaikan temperatur mengakibatkan tegangan dorong ke abutmen, dan 4) Gerakan bolak-balik pada abutmen tipe integral yang disebabkan oleh gerakan lateral abutmen dan kenaikan tekanan tanah lateral.

Seo (2003) melakukan penelitian terkait pelat pendekat jembatan yang dibebani dengan beban berulang, menyimpulkan bahwa: 1) Jumlah siklus pembebanan di atas pelat pendekat adalah proporsional dengan kenaikan pembentukan benjolan (*bump*), 2) Pelat pendekat yang lebih pendek menghasilkan perpindahan pelat yang lebih besar, 3) Kenaikan tingkat kepadatan tanah mengurangi defleksi pelat pendekat, 4) Kecepatan kendaraan memengaruhi kenaikan terbentuknya benjolan, dan 5) Beban kendaraan berbanding langsung dengan tingkat penurunan.

Selanjutnya, Puppalla et al. (2014) menyimpulkan beberapa faktor yang menyebabkan timbulnya benjolan adalah 1) Penurunan konsolidasi tanah di bawah timbunan, 2) Pemadatan buruk dan konsolidasi dari tanah timbunan, 3) Drainase buruk dan erosi tanah,

4) Tipe abutmen jembatan, 5) Volume lalu-lintas, 6) Umur dari pelat pendekat, 8) Perancangan pelat pendekat, 9) Kemiringan jembatan, dan 10) Variasi temperatur musiman.

Teknik Mitigasi

Tiga faktor penyebab utama dari penurunan jalan pendekat yang menimbulkan benjol adalah (Helwany et al., 2007): 1) Deformasi timbunan di belakang abutmen, 2) Deformasi tanah fondasi di bawah timbunan, dan 3) Drainase buruk. Berikut ini akan dibahas teknik mitigasi penurunan jalan pendekat jembatan.

Deformasi timbunan di belakang abutmen

Untuk mengurangi deformasi timbunan, maka dapat dipilih salah satu cara, sebagai berikut (Helwany et al., 2007): 1) Memperketat spesifikasi tanah timbunan dan metode pemadatan, 2) Timbunan diperkuat dengan geosintetik, 3) Timbunan ringan, 4) Pelat beton bertulang, dan 5) Urugan hidrolik.

Memperketat spesifikasi tanah timbunan dan metode pemadatan

Untuk mengurangi deformasi akibat pemampatan tanah timbunan, maka tipe tanah urug maupun cara pemadatan harus dispesifikasikan dengan jelas. Ha et al., (2002) melaporkan bahwa 80 persen penurunan di jalan pendekat terjadi dalam jarak sekitar 7 m dari tepi jembatan. Pada jarak tersebut tanah timbunan berupa tanah urugan kembali (*backfill*). Oleh karena itu, salah satu cara efektif untuk meniadakan penurunan jalan pendekat adalah dengan mengendalikan tipe tanah timbunan dan memberikan spesifikasi pemadatan yang ketat.

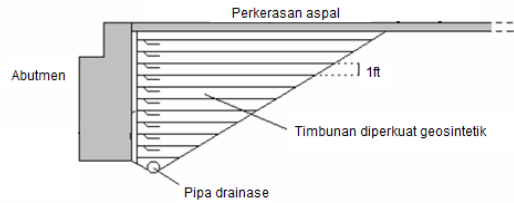
Spesifikasi pemadatan harus mencakup tingkat kepadatan di lapangan yang harus dicapai pada kadar air target yang biasanya berkisar antara $\pm 2\%$ dari kadar optimum. Tingkat kepadatan tanah minimum yang harus dicapai di lapangan adalah 95% kepadatan maksimum standar Proctor (AASHTO T-99). Penghamparan tanah urugan harus lapis demi lapis dengan tebal sekitar 20 cm. Di area dekat dengan dinding tepi abutmen harus digunakan mesin pemadat kecil yang disesuaikan dengan lebar area galian yang umumnya terbatas. Jumlah lintasan mesin pemadat harus cukup untuk mendapatkan tingkat kepadatan minimum yang disyaratkan dalam spesifikasi.

Kadar butiran halus tanah urug juga harus dispesifikasikan. Mereduksi kadar butiran halus akan mengurangi kemungkinan terjadinya penurunan konsolidasi yang terjadi pada tanah urug dan sekaligus melancarkan aliran air agar segera meninggalkan area urugan bila terjadi genangan air. Ha et al. (2002) mengamati bahwa tanah urug dari tanah berlempung akan menghasilkan penurunan lebih besar dibandingkan dengan tanah urug granular. Untuk mengatasi hal ini, maka direkomendasikan agar menggunakan tanah urug dengan 15 persen lolos saringan no. 200 disertai dengan spesifikasi pemadatan yang ketat untuk area sejauh 7 m dari tepi dinding abutmen.

Timbunan diperkuat geosintetik

Untuk mengatasi penurunan jalan pendekat akibat pemampatan badan timbunannya sendiri, maka tanah urug dapat diperkuat dengan geosintetik agar massa tanah urug menjadi lebih kaku dan lebih kuat menahan deformasi akibat beratnya sendiri maupun beban lalu-lintas. Gambar 9 mengilustrasikan tanah timbunan yang diperkuat

dengan tulangan geosintetik. Untuk penulangan tanah dapat digunakan *geogrid* atau geotekstil (Helwany et al., 2007).

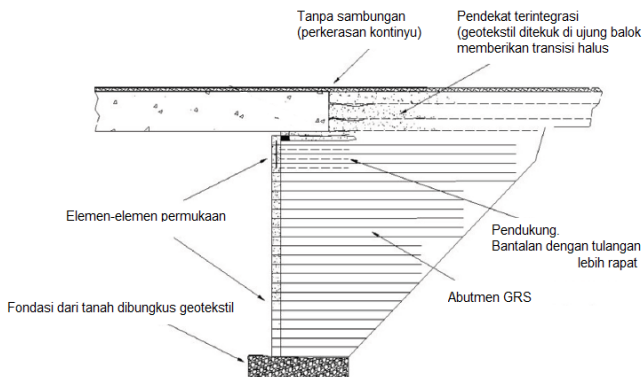


Sumber: Helwany et al. (2007)

Gambar 9 Tanah Diperkuat dengan Tulangan Geosintetik

Untuk mereduksi penurunan di area tanah urugan, CE (1999) menyarankan untuk menggunakan jarak vertikal tulangan yang lebih rapat dengan kuat tarik yang lebih kecil dibandingkan dengan jarak vertikal tulangan lebih besar namun dengan kuat tarik yang lebih besar.

Ilustrasi abutmen dari tanah diperkuat dengan geosintetik (*Geosynthetic Reinforced Soil, GRS*) untuk mengatasi penurunan jalan pendekat jembatan yang diusulkan oleh (Adam dan Nicks, 2018), ditunjukkan dalam Gambar 10.



Sumber: Adam dan Nicks (2018)

Gambar 10 Ilustrasi Abutmen dari Tanah Diperkuat dengan Geosintetik

Perkuatan tanah timbunan dengan menggunakan geosintetik untuk yang ditujukan mengatasi penurunan jalan pendekat hanya efektif diaplikasikan bila tanah asli di bawah timbunan (tanah fondasi) merupakan tanah yang kuat/padat, sehingga kontribusi penurunan hanya akibat pemampatan tanah urug dari badan timbunannya sendiri.

Timbunan ringan

Cara ini bertujuan untuk mengurangi penurunan di dalam timbunan tanah urug dan tanah di bawah timbunan (tanah pondasi) dengan menggunakan material timbunan ringan (Gambar 11). Dengan cara ini, kenaikan tegangan akibat beban timbunan tidak mengakibatkan pemampatan tanah di bawahnya secara berlebihan. Bahan yang sering digunakan adalah blok-blok EPS (*expanded polystyrene*) dan LD-CLSM (*lightweight concrete foam* atau *cellular concrete*). Blok EPS mempunyai berat satuan kecil yaitu hanya sekitar 0,16 – 0,5 kN/m³ (1-3 pcf). Keuntungan pemakaian EPS sebagai bahan timbunan, kecuali ringan juga pemasangannya relatif mudah, hanya biaya yang dikeluarkan lebih besar dari tipe-tipe urugan timbunan yang lain.



Sumber: Helwany et al. (2007)

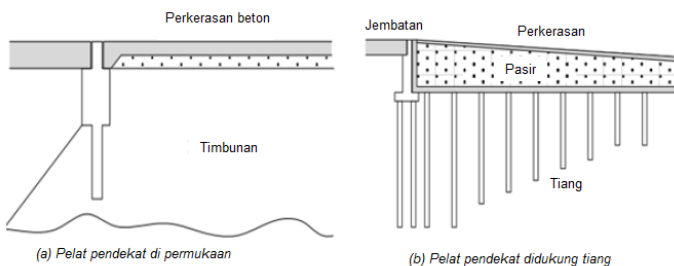
Gambar 11 Blok EPS untuk Timbunan Ringan

Pelat pendekat beton bertulang

Hal umum dilakukan untuk mitigasi benjol di jembatan adalah

dengan menempatkan pelat pendekat (*slab approach*) dari beton bertulang. Cara ini lebih banyak digunakan karena mudah perancangannya dan pembuatannya. Jalan pendekat dibuat dengan cara meletakkan pelat beton bertulang yang menghubungkan area timbunan dengan abutmen. Pelat beton ini berfungsi untuk menjembatani rongga di antara pelat beton dan material timbunan di bawahnya. Rongga ini timbul akibat tanah timbunan turun relatif terhadap perkerasan di atasnya. Dengan adanya pelat beton pendekat ini terdapat transisi perpindahan antara bagian tanah timbunan dan abutmen.

Pelat beton pendekat juga berfungsi untuk lapisan kedap air sehingga menghambat aliran air menuju ke tanah urug yang akan melunakkan tanah. Umumnya, pelat beton pendekat diikatkan ke abutmen pada satu ujungnya, sedang sisi yang lain diletakkan di atas balok yang dipasang melintang di atas timbunan. Seawsirikit et al. (2005) melakukan penelitian pada efektifitas pelat pendekat yang didukung tiang-tiang. Penelitian ini dilakukan pada dua jembatan di Bangkok, yaitu jembatan Klong Song dengan pelat pendekat di permukaan (Gambar 12a) dan jembatan Bang Ta Nai dengan pelat pendekat yang didukung tiang-tiang (Gambar 12b).



Sumber: Seawsirikul et al. (2015)

Gambar 12 Tipikal Penempatan Pelat Pendekat di Permukaan dan Pelat Pendekat Didukung oleh Tiang-tiang

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelat pendekat yang didukung tiang-tiang lebih efektif dalam mengurangi penurunan. Namun, penurunan tak seragam masih terjadi di antara tiang yang ujungnya bertumpu pada lapisan tanah lunak dan tanah kuat. Zhang (2016) dalam penelitian yang menyangkut efektifitas parameter-parameter yang lebih berpengaruh terhadap terbentuknya benjol, menyimpulkan bahwa pelat pendekat efektif dalam memperbaiki kinerja pendekat jembatan karena mereduksi penurunan yang menyebabkan timbulnya benjolan.

Urugan hidrolik

Urugan hidrolik adalah urugan yang merupakan campuran tanah granular dan air yang dihamparkan dalam kondisi basah. Tanah granular dan air dicampur dalam truk pencampur adukan beton lalu dituangkan ke dalam area terbatas berbentuk prisma. Setelah air dalam campuran terdrainase, tanah urug granular memadat sendiri secara gravitasi.

Cara lain, yaitu dengan menghamparkan urugan material granular lebih dulu, baru kemudian merendam/menyiram dengan air. Cara ini lebih mudah dan murah, namun memadatnya tanah menjadi tidak rata dan penurunan setelah pembangunan dapat terjadi bila air tidak terbuang dengan sempurna.

Deformasi Tanah di Bawah Timbunan

Perbaikan tanah di bawah timbunan dilakukan untuk mereduksi deformasi dan memperkuat tanah fondasi. Bergantung pada kekuatan tanah fondasi, mitigasi dengan cara ini mungkin tidak diperlukan. Pasir padat, lapis batuan atau lempung/lanau terkonsolidasi berlebihan (*overconsolidated*) umumnya tidak

diperlukan perbaikan tanah. Sebaliknya, lanau longgar, lempung lunak atau tanah organik, karena termasuk jenis tanah mudah mampat maka diperlukan perbaikan tanah. Perbaikan tanah yang dilakukan dapat berupa penggantian tanah lunak, perbaikan tanah dengan cara mekanik maupun kimia, prapembebanan dengan atau tanpa drainase vertikal atau pemasangan tiang-tiang atau kolom batuan di bawah timbunan. Menggali dan mengganti tanah lunak dengan tanah yang lebih bagus dilakukan dengan cara menggali tanah lunak dan menggantinya dengan tanah bagus. Umumnya, metode ini relatif lebih murah dibandingkan dengan cara mitigasi yang lain bila tebal tanah lunak sekitar 3-5 m dan kedudukannya berada di atas permukaan tanah.

Perbaikan tanah fondasi di bawah timbunan dapat dilakukan secara mekanik dan kimiawi. Bergantung pada jenis tanah, perbaikan tanah dengan cara ini umumnya hanya efektif bila tebal tanah lunak sampai 10 m. Perbaikan tanah secara mekanik contohnya kolom batuan (*stone columns*) dan pemasangan tiang- tiang. Perbaikan dengan cara timbunan didukung fondasi tiang juga dapat dilakukan bila letak tanah kuat relatif dalam. Fondasi tiang dapat berupa tiang pancang beton, kayu maupun baja atau tiang bor. Beban timbunan ditransfer ke fondasi tiang melalui pelat beton atau bantalan *geogrid*. Perbaikan tanah secara kimiawi dapat berupa pencampuran tanah dalam (*deep soil mixing*) atau injeksi (*grouting*) atau stabilisasi dengan kapur.

Drainase Buruk

Drainase buruk dapat mengganggu stabilitas lereng timbunan di lokasi jalan pendekat. Cara untuk memperbaiki drainase termasuk:

- 1) Membuat lereng lebih landai, yaitu dengan kemiringan minimum 2 horizontal dan 1 vertikal,
- 2) Menempatkan drainase di belakang

atau posisi terendah dari urugan kembali, 3) Menempatkan sistem drainase di dalam dasar perkerasan untuk memotong aliran air permukaan yang masuk dari tanah urugan kembali, 4) Menjaga agar sambungan tidak meresapkan air, 5) Pasang geotekstil di bawah struktur pelindung lereng, dan 6) Tempatkan geotekstil pada pertemuan antara material timbunan dan tanah urug di belakang abutmen, dan antara dasar perkerasan dan tanah urug agar butiran halus tanah tidak larut bersama aliran air.

Pemeliharaan

Problem utama dari penurunan jalan pendekat adalah: deformasi badan timbunan, deformasi tanah di bawah timbunan dan drainase buruk. Briaud et al (1997) menyampaikan bahwa sekitar 25 persen jembatan di USA mengalami fenomena benjol di ujung jembatan. Untuk keperluan tindakan perbaikan maupun mitigasi diperlukan petunjuk atau pedoman cara pemeliharaan atau kriteria rehabilitasi yang menyangkut benjol di ujung jembatan.

Metode pemeliharaan jalan pendekat yang dapat dilakukan untuk mengatasi adanya gangguan benjol di ujung jembatan adalah 1) Perataan (*leveling*) dengan beton aspal, 2) Pengangkatan pelat/injeksi lumpur (*mudjacking*), dan 3) Pembongkaran dan penggantian pelat pendekat. Penggabungan metode kadang-kadang digunakan untuk memperpanjang umur jembatan sebelum diperlukan pekerjaan rekonstruksi.

Pemeliharaan jalan pendekat yang sering digunakan adalah lapis tambahan (*overlay*) aspal, pengangkatan pelat (*slabjacking*) dan penggantian pelat pendekat. Pemilihan jenis pemeliharaan sering

didasarkan pada besar biaya yang harus dikeluarkan dengan mengingat sisa umur layan dari bangunannya. Lapis tambahan aspal dan pengangkatan pelat lebih cepat penanganannya dan lebih sedikit gangguan lalu-lintasnya dibandingkan dengan penggantian pelat pendekat.

Lapis tambahan (overlay) aspal

Pemeliharaan dengan memberikan lapis tambahan aspal (*overlay*) umumnya lebih murah. Beban lapis tambahan aspal akan menghasilkan penurunan tambahan pada jalan pendekat. Namun pemberian lapis tambahan yang tidak sangat tebal umumnya hanya akan mengakibatkan sedikit tambahan penurunan saja.

Pengangkatan pelat (mud/slab jacking)

Pemeliharaan dengan pengangkatan pelat (*slab jacking*) umumnya bisa dilakukan dengan relatif cepat dengan biaya lebih murah. Pada cara pemeliharaan dengan pengangkatan pelat, pelat beton pendekat diangkat sampai mencapai elevasi yang diinginkan dengan cara menginjeksikan material injeksi (*grouting*) semen atau campuran pasir halus-semen di bawah pelat. Injeksi dilakukan melalui lubang yang dibuat menembus pelat dengan jarak yang sama agar kenaikan pelat seragam. Pekerjaan pengangkatan harus dilakukan dengan hati-hati karena bila pelat terangkat secara berlebihan akan pecah, sehingga harus dilakukan penggantian.

Grouting

Adanya rongga di bawah pelat beton pendekat menimbulkan masalah ketidakstabilan pelat, retak, tenggelam dan genangan air bila terjadi hujan. Untuk mitigasi masalah ini, maka rongga di bawah pelat diisi dengan larutan injeksi bertekanan dengan tanpa

mengangkat pelat (Abu-Hejleh et al., 2006).

Penggantian pelat pendekat

Jika pelat beton pendekat sudah pecah, remuk atau turun secara berlebihan, maka pelat ini tidak bisa diperbaiki dengan cara diangkat. Oleh karena itu, pelat harus diganti. Pemeliharaan dengan cara ini umumnya biayanya lebih mahal dan operasi penggantian alat mengganggu kelancaran lalu-lintas.

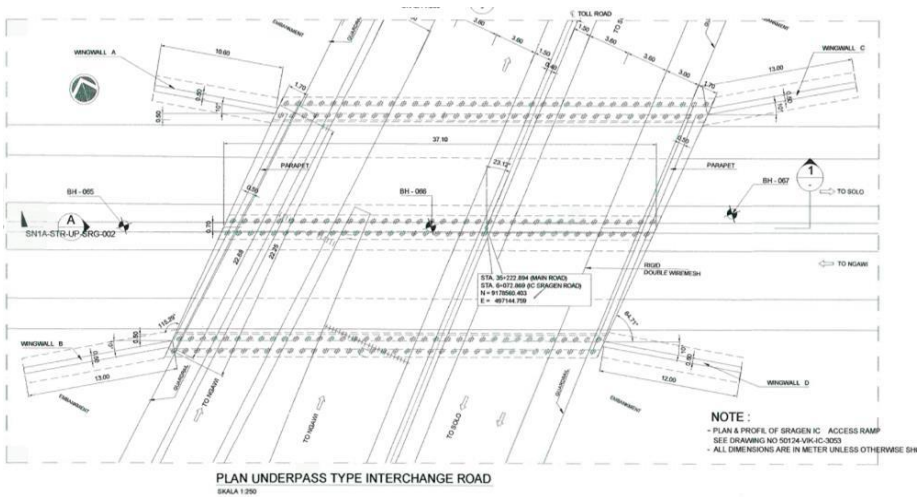
STUDI KASUS PENURUNAN JALAN PENDEKAT UNDERPASS KM 528 JALAN TOL SOLO-NGAWI

Penurunan jalan pendekat *underpass* di Jalan Tol Solo-Ngawi KM 528 telah diamati mengganggu kelancaran dan keamanan lalu- lintas yang lewat. Dari hasil pengukuran tampang topografi yang dilakukan, lokasi permukaan jalan di sekitar *underpass* mengalami perbedaan penurunan sekitar 4 cm pada permukaan perkerasan di permukaan atas *underpass* dan sekitar 10-12 cm pada sisi kanan-kiri *underpass*.

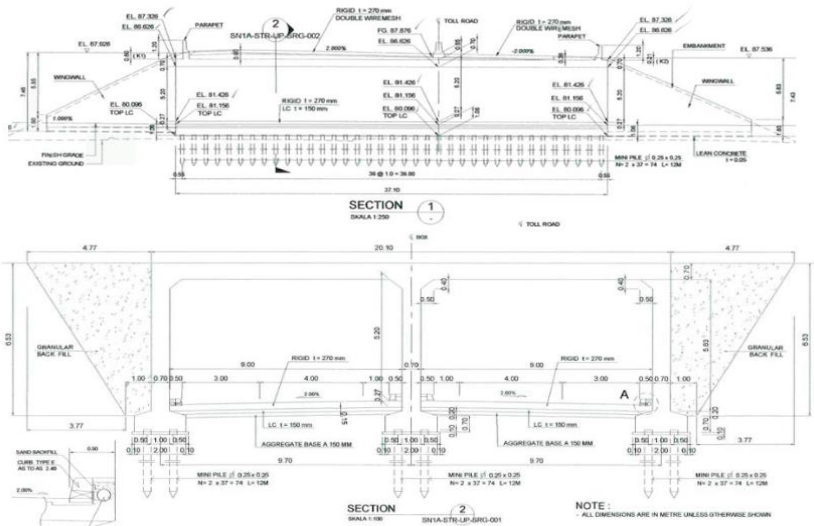
Untuk meneliti sebab-sebab terjadinya penurunan tersebut, maka telah dilakukan pengeboran baru sebanyak 2 titik dengan kedalaman 30 m yang disertai dengan uji SPT tiap 2 m dan uji laboratorium pada sampel *undisturbed* yang diambil dari pengeboran tersebut. Pengeboran dilakukan pada bulan Juni 2022. Data hasil penyelidikan tanah tersebut yang dikombinasikan dengan data bor terdahulu di sekitar lokasi *underpass* dilakukan analisis penurunan dan stabilitas lerengnya.

Struktur *Underpass*

Gambar denah dan potongan struktur *underpass* diperlihatkan dalam Gambar 13 dan Gambar 14. Struktur *underpass* berbentuk 2 lubang berbentuk boks dengan ukuran tampang bagian dalam lebar 9 m dan tinggi 5 m. Struktur dari beton bertulang yang didukung oleh tiang-tiang mini berbentuk persegi dengan lebar 25 cm dan panjang 12 m. Tiang-tiang dipasang pada bagian dinding vertikal dari boks dengan jarak antar as 1 m pada arah memanjang dan melintang. Di atas boks terletak perkerasan beton dengan tebal 27 cm yang bertulangan *wiremesh* dobel. Di samping kanan-kiri boks berupa urugan tanah timbunan dengan tinggi sekitar 5,50 m. Kemiringan lereng timbunan adalah 2H:1V.



Gambar 13 Denah Lokasi *Underpass* KM 528 Tol Solo-Ngawi



Gambar 14 Potongan dan Tampak Konstruksi *Underpass* KM 528 Tol Solo-Ngawi

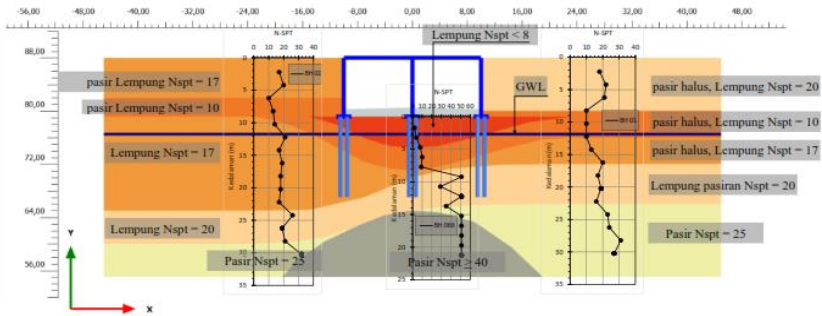
Kondisi Lapisan Tanah

Data baru beserta data bor lama digunakan untuk analisis penurunan. Dari pengeboran di sekitar *underpass*, secara umum tanah dari permukaan sampai kedalaman 10 m berupa pasir lempungan dengan nilai N sekitar 17 sampai 20. Setelah kedalaman tersebut sampai kedalaman sekitar 27 m tanah berupa lempung/lanau dengan nilai N sekitar 15 sampai 20. Pada kedalaman 27 sampai 30 m tanah berupa pasir dengan nilai N sekitar 27 sampai 32. Muka air tanah rata-rata terletak pada kedalaman 10 sampai 15 m dari permukaan timbunan.

Analisis Penurunan

Dari hasil uji tanah di lapangan dan laboratorium yang dilakukan

pada sampel-sampel tak terganggu, kemudian dilakukan analisis penurunan dengan menggunakan software Plaxis. Gambar 15 menunjukkan model profil lapisan tanah yang diplot bersama dengan struktur *underpass* yang digunakan dalam analisis.



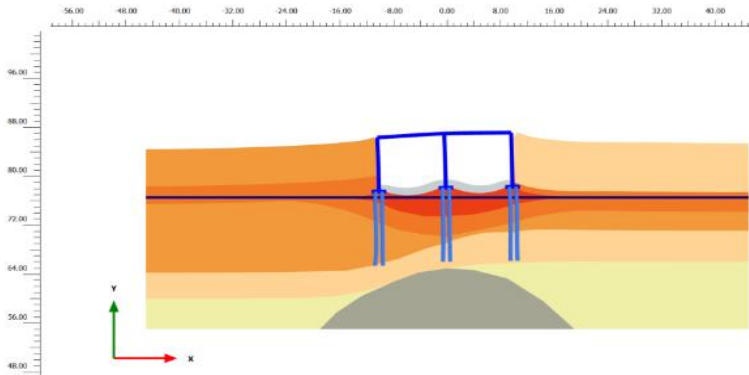
Gambar 15 Profil Lapisan Tanah di Sekitar *Underpass*

Analisis penurunan pada saat ini

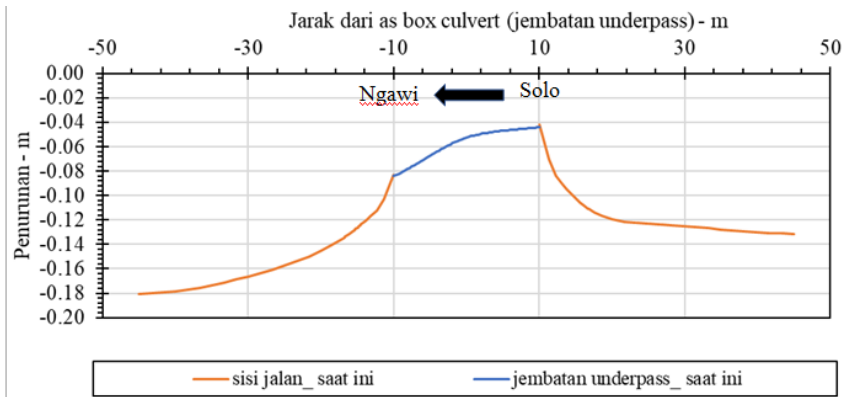
Analisis penurunan dilakukan dengan memperhatikan kondisi penurunan permukaan perkerasan yang telah terjadi pada saat ini, dimana beban akibat penimbunan sudah berlangsung selama 2 tahun 5 bulan. Langkah ini dimaksudkan untuk keperluan *back analysis* parameter-parameter yang hasilnya sesuai dengan penurunan di lapangan untuk kondisi saat ini. Analisis penurunan segera/elastis dan penurunan konsolidasi dilakukan dengan asumsi pekerjaan konstruksi diselesaikan pada tahun 2020. Dari hasil analisis tersebut diperoleh beda penurunan maksimum antara tepi Utara dan Selatan dari *underpass* 4 cm, dan sekitar 10 cm pada sisi sekitar 13 m dari kedua tepi *underpass* (Gambar 16 dan 17). Nilai ini mendekati penurunan yang terukur dari hasil pengukuran topografi yang juga dilakukan pada penelitian ini.

Dari hasil tersebut, dengan menggunakan parameter tanah yang sesuai dari hasil *back analysis*, kemudian dilakukan analisis

penurunan konsolidasi total atau konsolidasi jangka panjang.



Gambar 16 Profil Deformasi Tanah Timbunan dan *Underpass* Hasil Analisis Penurunan (Kondisi Pada Saat Ini)

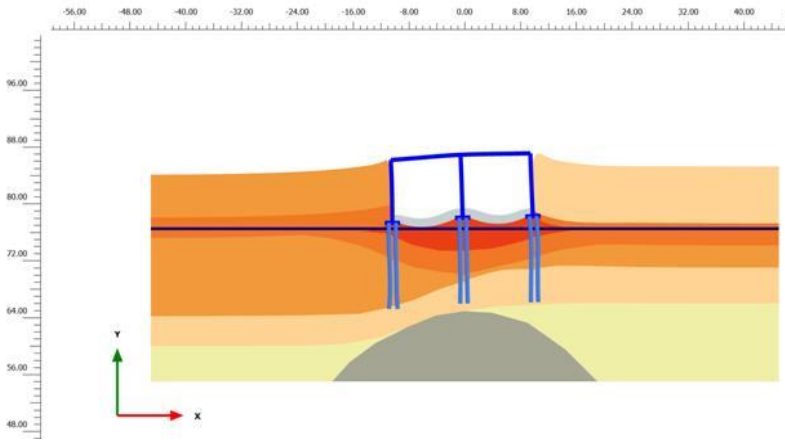


Gambar 17 Profil Penurunan Bagian *Underpass* dan Timbunan Jalan Tol Saat Ini

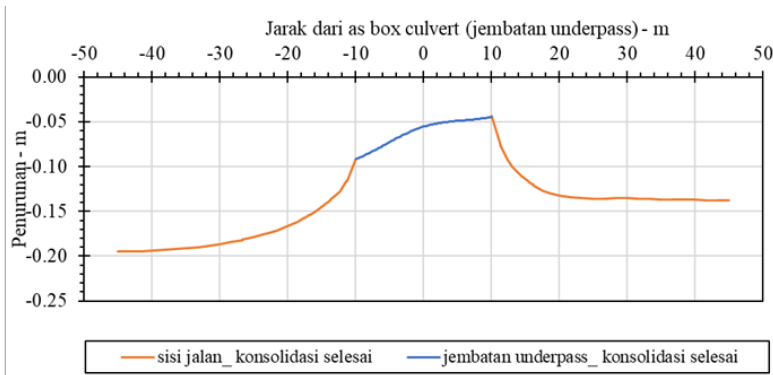
Analisis penurunan jangka panjang

Analisis penurunan dilakukan dengan memperhatikan kondisi penurunan permukaan perkerasan setelah konsolidasi selesai atau mendekati selesai. Profil deformasi total dari hasil analisis Plaxis ditunjukkan dalam Gambar 18. Profil penurunan arah memanjang jalan tol saat penurunan konsolidasi selesai atau konsolidasi jangka

panjang ditunjukkan dalam Gambar 19.



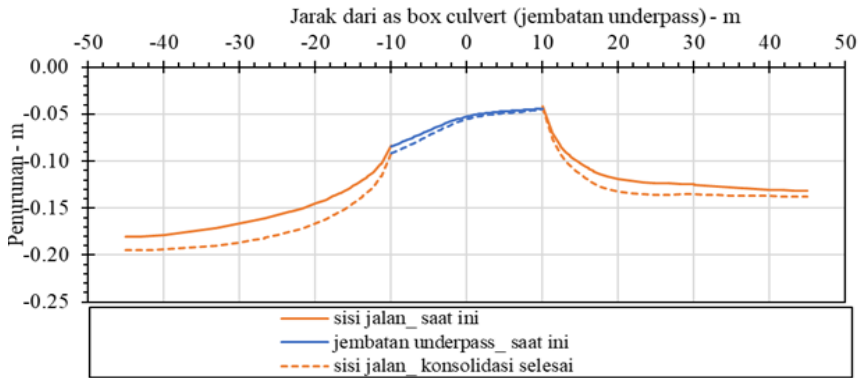
Gambar 18 Profil Deformasi Tanah Timbunan dan *Underpass* Saat Konsolidasi Selesai



Gambar 19 Profil Penurunan Setelah Konsolidasi Selesai

Dalam Gambar 20 ditunjukkan tambahan penurunan yang akan terjadi bila konsolidasi selesai. Hasil ini memperlihatkan bahwa pada saat konsolidasi selesai permukaan jalan tol di sekitar *underpass* hanya akan mengalami tambahan penurunan sekitar 2-3 cm lagi, sedang di bagian *underpass* hanya bertambah sekitar 1 cm

saja. Nilai penurunan ini relatif kecil sehingga adanya tambahan penurunan tersebut tidak mengakibatkan kerusakan, baik struktur *underpass* maupun permukaan jalan di sekitarnya.



Gambar 20 Profil Penurunan Pada Saat Ini dan Setelah Konsolidasi Selesai

Analisis stabilitas lereng timbunan

Hasil analisis stabilitas lereng tanah timbunan di lokasi bangunan *underpass* menghasilkan faktor aman cukup tinggi, yaitu $SF = 2,98$ dalam kondisi di atas tidak ada beban lalu-lintas dan faktor aman $SF = 2,68$ bila beban lalu lintas diperhitungkan. Hasil ini menunjukkan bahwa penurunan jalan pendekat *underpass* bukan karena ketidakstabilan lereng timbunan.

KESIMPULAN

Penurunan pendekat jembatan merupakan masalah kompleks yang melibatkan interaksi antara jembatan, tanah timbunan di belakangnya, perkerasan, tanah fondasi dan drainase. Studi pustaka menunjukkan bahwa deformasi tanah timbunan, fondasi abutmen, dan drainase buruk adalah kontributor utama dalam terjadinya

penurunan pendekat jembatan dan terjadinya benjol (*bump*). Penyebab gerakan terbesar umumnya akibat pemadatan buruk tanah timbunan di belakang abutmen, deformasi tanah timbunan (terutama tanah kohesif) dan drainase buruk terutama pada tanah urugan baru.

Metode mitigasi yang mengendalikan penurunan pendekat jembatan sangat bergantung pada kondisi lokasi/lingkungan jembatan. Untuk mitigasi penurunan pendekat jembatan dan terbentuknya benjol, maka dapat dilakukan dengan memberikan spesifikasi material timbunan dan syarat pemadatan yang ketat dan memberikan drainase yang baik.

Terkait dengan problem penurunan jalan pendekat di *underpass* Jalan Tol Solo-Ngawi KM 528, hasil analisis yang didasarkan pada kondisi permukaan perkerasan sekarang dan di masa datang menunjukkan bahwa tambahan penurunan yang akan terjadi pada kondisi jangka panjang adalah sekitar 2-3 cm di sisi timbunan, sedang di bagian *underpass* hanya bertambah sekitar 1 cm saja. Karena penurunan jangka panjang yang akan terjadi pada lokasi *underpass* maupun pada sisi timbunan di sekitarnya relatif kecil, maka pemeliharaan jalan di sekitar *underpass* dapat dilakukan dengan salah satu cara (1) *overlay* atau (2) melakukan pengangkatan pelat dengan injeksi semen (*mudjacking*) di bawah lapis perkerasan beton. Di lokasi timbunan, tebal material injeksi atau tebal material *overlay* adalah sekitar 10-12 cm, sedang untuk yang lokasi *underpass*, tebal *overlay* disesuaikan dengan elevasi permukaan perkerasan jalan tol di sekitarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Farsakh, M., and Chen, Q. 2014. *Field Demonstration of New Bridge Approach Slab Designs and Performance*. Final Report, Louisiana Transportation Research Center. Baton Rouge, LA.
- Abu-Hejleh, N., Hanneman, D., White, D. J. and Ksouri, I. 2006. *Flowfill and MSE Bridge Approaches: Performance, Cost and Recommendations for Improvements*. Report No. CDOT-DTD-R-2006-2. Colorado Department of Transportation. Denver.
- Adams, M., and J. Nicks. 2018. *Design and Construction Guidelines for Geosynthetic Reinforced Soil Abutments and Integrated Bridge Systems*, Report No. FHWA-HRT-17-080. Federal Highway Administration. Washington, DC.
- Briaud, J., Maher, S.F., and James, R.W. 1997. *Bump at the End of the Bridge*. Civil Engineering, ASCE, 67 (5): 68-69.
- Chen, W.F. and Duan, L. 2014. *Bridge Engineering Handbooks-Substructure Design*, 2nd edition. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor.
- Greimann, L. F., Abendroth, R.E., Johnson, D.E., and Ebner, P.B. 1987. *Pile Design and Tests for Integral Abutment Bridges*. Final Report. Iowa DOT Project HR 273. Ames, IA.
- Ha, H.S., Seo, J., and Briaud, J. 2002. *Investigation of Settlement at Bridge Approach Slab Expansion Joint: Survey and Site Investigations*. Texas Department of Transportation. Austin, TX.
- Hannigan, P.J., Goble, G.G., Thendean, G., Likins, G.E., and Rausche, F. 1998. *Design and Construction of Driven Pile Foundations—Volume I*. Report No. FHWA-HI-97-013,

- Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Helwany, S., Koutnik, T.E., and Al Ghorbanpoor. 2007. *Evaluation of Bridge Approach Settlement Mitigation Methods*. Department of Civil Engineering and Mechanics. University of Wisconsin-Milwaukee. Milwaukee, WI.
- Hoppe, E.J. 1999. *Guidelines for the Use, Design, and Construction of Bridge Approach Slabs*. Rep. No. VTRC 00- R4. Virginia Transportation Research Council. Charlottesville, VA.
- Laguros, J.G., Zaman, M., and Mahmood, I.U. 1990. *Evaluation of Causes of Excessive Settlements of Pavements Behind Bridge Abutments and Their Remedies—Phase II*. Report No. FHWA/OK89(07), Oklahoma Department of Transportation. Oklahoma City, OK.
- Puppala, A. J., B. C. S. Chittoori, and S. Saride. 2014. *Approach Slabs*. *Bridge Engineering Handbook: Superstructure Design*, Second Edition, W.F. Chen and L. Duan (eds.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Seawsirikul, S., Korchoke, C., and Barames, V. 2015. *Evaluation of Differential Settlement along Bridge Approach Structure on Soft Bangkok Clay*. *Geotechnical Safety and Risk*, V (1): 614–20.
- Stark, T.K., Olson, S.M., and Long, J.H. 1995. *Differential Movement at the Embankment/Structure Interface—Mitigation and Rehabilitation*. Report No. IAB=H1, FY93. Illinois Department of Transportation. Springfield, IL.
- Wahls, H.E. 1990. *NCHRP Synthesis of Highway Practice 159: Design and Construction of Bridge Approaches*. Transportation Research Board, National Research Council. Washington D.C.
- White, D., Sritharan, S., Suleiman, M., Mohamed M., and Sudhar,

- C. 2005. *Identification of the Best Practices for Design, Construction, and Repair of Bridge Approaches*. CTRE. Project 02-118, Iowa State University. Ames, IA.
- Yenigalla, R.V. 2011. *Overview of Mitigation Strategies for Settlements under Bridge Approach Slabs*. Master of Science Thesis. The University of Texas at Arlington. Arlington, TX.



KAJIAN KRITIS PENGEMBANGAN JALAN TOL DI INDONESIA

Pengelolaan Aspek Teknis dalam Perancangan dan Pembangunan Jalan Tol

IMPLEMENTASI TEKNOLOGI *GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS* DALAM PEMANTAUAN TANAH TIMBUNAN JALAN TOL SEMARANG-DEMAK

Yudo Prasetyo

Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

PENDAHULUAN

Pembangunan Jalan Tol Semarang-Demak

Pembangunan infrastruktur merupakan fokus penting yang sedang dilakukan di Indonesia. Salah satu pembangunan yang dilakukan adalah pembangunan jalan tol dari Semarang ke Demak. Pembangunan Jalan Tol Semarang-Demak terbagi dalam dua seksi yaitu seksi Semarang-Sayung dan Sayung-Demak. Proyek yang sedang berlangsung merupakan proyek seksi 2 yaitu ruas Sayung-Demak yang dikerjakan oleh perusahaan konsorsium yang tergabung dalam PT Pembangunan Perumahan Semarang Demak (PPSD).

Implementasi Teknologi *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) dalam Pemantauan Penurunan Muka Tanah

Proses pemantauan dilakukan berdasarkan fenomena penurunan muka tanah di Sayung, Demak yang diakibatkan oleh adanya

pengambilan air berlebih, pembebanan bangunan, dan beberapa faktor lain yang memengaruhinya. Tahapan dalam pemantauan penurunan tanah dimulai dari survei lapangan, pemasangan patok, pemantauan penurunan muka tanah, pengolahan data, dan proses pelaporan. Pemantauan penurunan muka tanah dilakukan dengan pengamatan ekstraterrestrial menggunakan GNSS *receiver* selama 8 jam dalam satu sesi selama 1 tahun, sehingga dapat diketahui besar perubahan koordinat dan kecepatan dari penurunan muka tanah yang terjadi. Pengolahan data GNSS dilakukan dengan menggunakan *software* saintifik untuk mengeliminasi pengaruh-pengaruh atmosfer, pasang surut, waktu pengamatan, dan pergerakan yang terjadi selama pengamatan. Luaran dari tulisan ini adalah mengetahui nilai *trend* linier penurunan muka tanah pada proyek Jalan Tol Semarang-Demak.

TINJAUAN PUSTAKA

Kajian Penurunan Muka Tanah pada Area Studi Semarang-Demak

Pengukuran ini dilaksanakan di dua kabupaten/kota yakni Kota Semarang dan Kabupaten Demak. Area pembangunan Jalan Tol Semarang-Demak memiliki panjang 26,7 km yang terbagi dalam dua seksi, yakni Seksi 1 (Semarang/Kaligawe-Sayung) sepanjang 10,39 km yang merupakan porsi pemerintah. Sedangkan Seksi 2 (Sayung-Demak) sepanjang 16,31 km merupakan porsi Badan Usaha Jalan Tol (BUJT) PT Pembangunan Perumahan Semarang Demak. Secara teknis Jalan Tol Semarang-Demak Seksi 2 direncanakan memiliki dua Simpang Susun (SS) yaitu, SS Sayung dan SS Demak.

Sedangkan untuk pemantauan penurunan muka tanah dibuat 10 *benchmark* yang tersebar di sekitar area Jalan Tol Semarang-Demak. Gambar 1 merupakan gambaran lokasi penempatan titik *benchmark*.



Gambar 1 Persebaran Titik *Benchmark*

Mitigasi bencana dilakukan untuk mengurangi risiko bencana bagi masyarakat yang berada pada kawasan rawan bencana dengan kegiatan sebagai berikut: 1) Pelaksanaan penataan tata ruang, 2) Pengaturan pembangunan, pembangunan infrastruktur, tata bangunan, dan 3) Penyelenggaraan pendidikan, penyuluhan, dan pelatihan baik secara konvensional maupun modern.

Pemantauan GNSS dilakukan untuk mendeteksi perubahan kondisi dan posisi yang terjadi secara temporal sebagai rangka mitigasi, mengingat area pembangunan mengalami penurunan muka tanah dan rawan terjadinya banjir pasang-surut. Proses mitigasi ini mengacu pada nilai penurunan muka tanah yang ditolerir sebesar 15-20 cm/tahun. Apabila melebihi nilai tersebut, diharapkan kebijakan-kebijakan lanjutan dapat dibuat untuk mencegah atau menurunkan tingkat penurunan muka tanah yang terjadi (Azeriansyah, Prasetyo, & Yuwono, 2019).

Penurunan Muka Tanah (PMT)

Penurunan muka tanah merupakan fenomena turunnya elevasi permukaan tanah terhadap bidang referensi yang dianggap stabil. Penurunan muka tanah dapat terjadi secara perlahan atau juga terjadi secara mendadak. Beberapa faktor penyebab penurunan muka tanah di antaranya sebagai berikut (Khoirunisa, 2015): 1) Penurunan muka tanah alami (*natural subsidence*) yang disebabkan oleh proses-proses geologi, seperti aktivitas vulkanik dan tektonik, siklus geologi (seperti pelapukan, pengendapan, dan pergerakan kerak bumi), adanya rongga di bawah permukaan tanah, dan lain-lain; 2) Faktor pengambilan bahan cair yang ada di perut bumi seperti air tanah dan minyak bumi secara berlebihan dapat mengakibatkan berkurangnya jumlah air tanah pada suatu lapisan akuifer; 3) Adanya beban-beban berat di atas permukaan bumi seperti struktur bangunan yang membuat lapisan tanah di bawahnya mengalami kompresi/konsolidasi; 4) Faktor adanya pengambilan bahan padat dari dalam bumi, seperti adanya aktivitas penambangan; 5) Sedimentasi daerah cekungan (*sedimentary basin*) yang semakin lama semakin banyak dan menimbulkan beban yang bekerja semakin meningkat; serta 6) Adanya rongga di bawah permukaan tanah sehingga atap rongga runtuh dan hasil runtuhannya membentuk lubang yang disebut *sinkhole*.

Secara umum PMT disebabkan oleh aktivitas alam dan manusia. Pesisir Kota Semarang dan Demak sendiri memiliki komposisi batuan pasir dan lempung, sehingga, secara natural mempercepat terjadinya PMT (Sarah, Hutasoit, Delinom, & Sadisun, 2020).

GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*)

GNSS adalah sekumpulan sistem satelit penentuan posisi yang memiliki fungsi utama untuk memberikan posisi tiga dimensi objek di seluruh permukaan bumi (Ramadhon, 2021). GNSS merupakan suatu sistem satelit yang terdiri dari konstelasi satelit yang menyediakan informasi waktu dan lokasi, memancarkan bermacam-macam sinyal dalam berbagai frekuensi secara terus-menerus, yang tersedia di semua lokasi di atas permukaan bumi (UNOOSA, 2011).

Saat ini GNSS yang paling dikenal adalah *Global Positioning Systems* (GPS). Semua sistem (GPS, *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*/GLONASS, Galileo, Compass) memiliki cara kerja yang hampir sama sehingga deskripsi cara kerja GPS juga untuk mengetahui prinsip kerja dari GNSS. Prinsip penentuan posisi dengan GPS adalah menggunakan metode reseksi jarak, dimana pengukuran jarak dilakukan secara simultan ke beberapa satelit yang telah diketahui koordinatnya. Parameter yang ditentukan dalam pengukuran GPS adalah (Haqqi, 2015): parameter koordinat X (L), parameter koordinat Y (B), parameter koordinat Z (h), dan parameter kesalahan waktu akibat ketidaksinkronan jam osilator di satelit dengan jam di *receiver GPS*.

Komponen utama dari suatu *receiver GPS* secara umum adalah antena dengan *amplifier*, bagian *Radio Frequency* (RF) dengan pengidentifikasi sinyal dan pemroses sinyal; pemroses mikro untuk pengontrolan *receiver*; data sampling dan pemroses data (solusi navigasi); osilator presisi, catu daya, unit perintah dan tampilan; memori serta perekam data (Saputra, 2017). GPS dapat dibagi menjadi tiga wilayah, yaitu *ground segment*, *space segment*, dan *user segment*.

Pelaksanaan survei GPS pada umumnya dilakukan per *baseline* selama selang waktu tertentu (menit hingga hari sesuai dengan tingkat ketelitian yang diinginkan). Pada sistem GPS terdapat beberapa kesalahan komponen sistem yang akan memengaruhi ketelitian hasil posisi yang diperoleh, seperti kesalahan orbit satelit, kesalahan jam satelit, kesalahan jam *receiver*, kesalahan pusat fase antena dan *multipath* (Saputra, 2017).

PEMBAHASAN

Perencanaan dan Desain Titik-Titik Pengamatan

Tahap perencanaan merupakan tahapan hitung perataan yang dilakukan setelah koordinat sementara di lapangan didapatkan. Hal ini menyesuaikan dengan posisi paling optimal dari titik pengamatan yang disesuaikan dengan titik-titik *Continuously Operating Reference Station* (CORS) sebagai titik referensi atau titik ikat. Metode yang diterapkan dalam hitung perataan ini adalah metode parameter dimana perhitungannya dilakukan dengan menggunakan parameter yang telah diketahui untuk mencari parameter lain yang tidak diketahui.

Rumus yang digunakan dari hitung kuadrat terkecil terdapat pada rumus berikut:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \dots\dots\dots (1)$$

dengan:

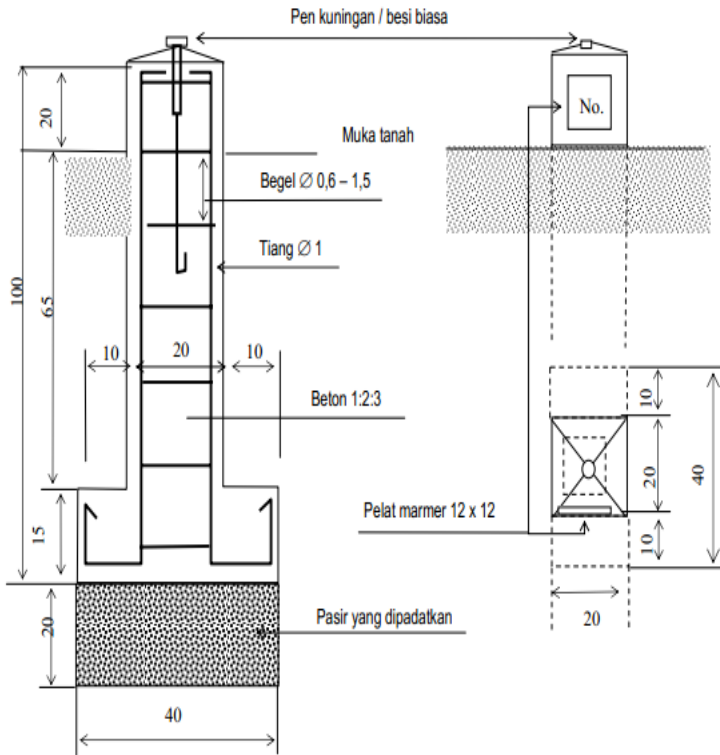
- A = Turunan pertama dari persamaan pengamatan yang diturunkan terhadap nilai parameternya
- L = Nilai koordinat pengamatan yang telah diambil ketika survei lapangan

Berdasarkan hasil tersebut didapatkan koordinat pasti dari titik pengamatan sehingga dapat diaplikasikan secara langsung di lapangan. Nilai matriks varian dan kovarian yang didapatkan dari hitung kuadrat terkecil dapat digunakan untuk menentukan baik dan buruknya titik pengamatan. *Benchmark* dalam pekerjaan ini telah memenuhi standar SNI 19-6724-2002 Jaring Kontrol Horizontal dan SNI 19-6988-2004 Jaring Kontrol Vertikal dengan Metode Sipat Datar. Konsep spesifikasi *benchmark* berdasarkan Lampiran B Desain dan ukuran tugu untuk orde-0 SNI 19-6724-2002 dapat dilihat pada Gambar 3. Spesifikasi teknis metode dan strategi pengamatan jaring titik kontrol geodetik orde-0 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi Teknis Metode dan Strategi Pengamatan Jaring Kontrol Geodetik Orde-0

Metode pengamatan	Survei GPS
Lama pengamatan per sesi (minimum)	24 jam
Data pengamatan utama untuk penentuan posisi	Fase dua frekuensi
Moda pengamatan	Jaring
Pengamatan independen di setiap titik	
1. Setidaknya 3 kali (% dari jumlah titik)	50%
2. Setidaknya 2 kali (% dari jumlah titik)	100%
Interval data pengamatan (detik)	30
Jumlah satelit minimum	4 satelit
Nilai <i>Positional Dilution of Precision</i> (PDOP) yang diperlukan	Lebih kecil dari 10
Elevasi satelit minimum	15°
Pengamatan data meteorologis	ya

Sumber: Badan Standardisasi Nasional (2002)



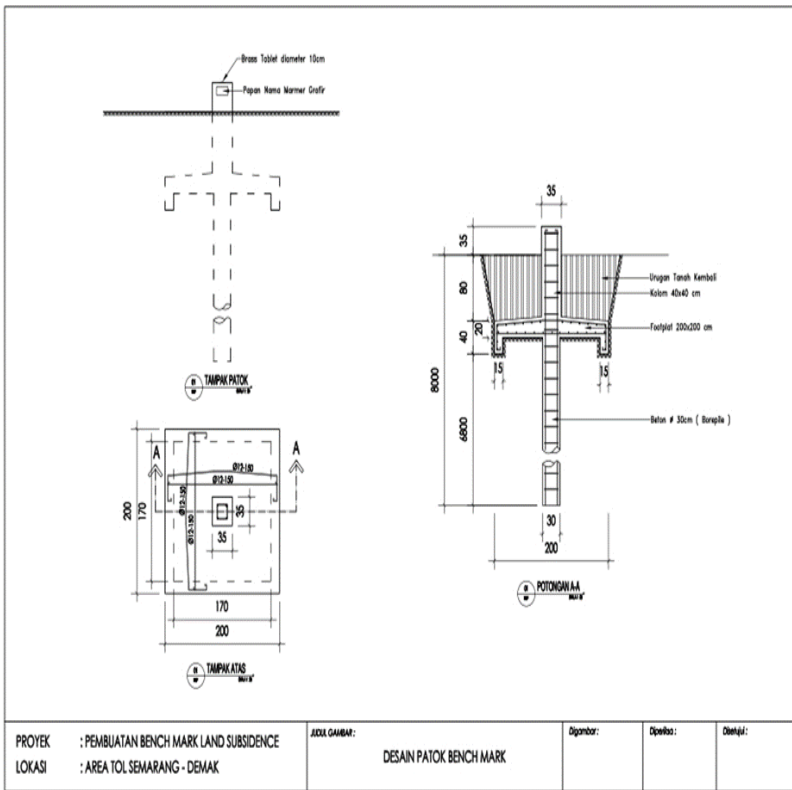
Sumber: Badan Standardisasi Nasional (2002)

Gambar 3 Spesifikasi Desain *Benchmark* dan Ukuran Tugu untuk Orde-0

Pada pekerjaan pengukuran yang dilakukan untuk menggunakan *Benchmark Land Subsidence* (BMLS) dengan ketelitian orde-0 dengan panjang pilar yang lebih panjang dari spesifikasi seharusnya, yaitu mencapai 8 meter yang dapat dilihat pada Gambar 4.

BMLS dipasang dengan radius minimal 2,5 km dari jalur jalan tol, tetapi dalam pemasangannya terdapat beberapa permasalahan yaitu 1) adanya permasalahan pada saat pembebasan lahan mengakibatkan jarak *benchmark* dengan jalur jalan tol kurang dari 2,5 km sehingga tidak memenuhi syarat jarak minimal. Hal ini berdampak pada *noise*

pengukuran; dan 2) terdapat genangan air atau banjir di perbatasan Kota Semarang dan Kabupaten Demak yang disebabkan oleh penurunan muka tanah sehingga dibutuhkan *benchmark* yang memenuhi syarat tidak hanya dari aksesibilitas saja, tetapi juga desain *benchmark* yang bisa menahan tekanan banyak dari atas seperti struktur konstruksi cakar ayam.



Gambar 4 Spesifikasi Ukuran BMLS

Pemasangan BMLS terdiri dari beberapa tahapan berikut:

1. Persiapan

Pada tahapan ini terdapat beberapa langkah kerja berikut: a) pemeriksaan lapangan, b) penyiapan personil, c) pada daerah-

daerah tertentu dilakukan pemagaran keliling agar tidak terjadi longsor ketika proses galian, d) rambu-rambu pengaman proyek dipasang sebelum melakukan pekerjaan.

2. Pengendalian mutu bahan dan kecakapan kerja

Pada tahapan ini terdiri atas beberapa langkah berikut: a) semua bahan yang dipasok sesuai dengan spesifikasi dan telah disetujui oleh Direksi Teknis atau personil yang telah ditunjuk, b) semua kecakapan kerja memenuhi uraian dan persyaratan spesifikasi dokumen kontrak serta dilaksanakan secara optimal, c) Formula pencampuran material diuji pada interval tertentu dengan spesifikasi yang telah disepakati.

3. Pengelolaan lapangan, diperlukan Pimpinan Lapangan

4. Pengukuran dan pematokan

5. Pelaksanaan pekerjaan

Pada tahapan ini dilakukan beberapa langkah kerja berikut: a) pekerjaan persiapan, berupa kegiatan pembersihan lokasi yang akan dikerjakan, b) pekerjaan galian, berupa kegiatan pengeboran dengan kedalaman yang telah direncanakan, pengecoran tulangan kolom *borpile* secara manual hingga titik - 1,2 meter, pembuatan galian untuk *footplate*, dan pembuatan dinding penahan.

Proses Pengukuran GNSS

Pengukuran penurunan muka tanah dalam pekerjaan proyek Jalan Tol Semarang-Demak dilakukan menggunakan GNSS *receiver* yang dilengkapi dengan *tribrach*, *tripod*, dan *roll meter*. Pengamatan dilakukan selama 6-8 jam mengingat konstelasi satelit GPS akan mulai muncul hingga kembali tak terlihat selama waktu tersebut. Langkah-langkah yang perlu dilakukan antara lain sebagai berikut:



(1) Pasang *tripod* dalam posisi berdiri pada titik pengamatan dengan kondisi bidang *level* tepat di atas titik pengamatan dan diapit oleh kaki statif. Posisikan bidang *level* sedatar mungkin, (2) Pasangkan *tribrach* ke atas bidang *level tripod* lalu posisikan *tribrach* tepat di atas titik pengamatan dengan bantuan *optical plummet*, (3) Atur *nivo* horizontal pada *tribrach* dengan mengatur ketinggian kaki statif dan sekrup pendatar (*centering*), (4) Setelah posisi *centering*, pasang GNSS *receiver* di atas *tribrach*, (5) Ukur dan catat tinggi antenna GNSS *receiver* dari titik pengamatan hingga batas pada GNSS *receiver*, (6) Nyalakan GNSS *receiver* untuk proses inisiasi selama 10-15 menit, (7) Lakukan proses perekaman dengan menggunakan tombol pada GNSS *receiver* atau melalui pengaturan *controller*, dan (7) Catat tipe *receiver*, tipe antenna, waktu pengamatan, kondisi geografis dan kenampakan lapangan pada *log sheet* pengukuran.



Gambar 5 Teknis Pengukuran GNSS

Pengukuran dalam pekerjaan proyek Jalan Tol Semarang-Demak terbagi 4 sesi pengukuran sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Pengukuran dengan GNSS

Dokumentasi	Keterangan
	<p>Pengukuran Sesi 1 Pada pengukuran GNSS yang pertama, data yang dihasilkan akan dijadikan sebagai data awal dalam perhitungan penurunan muka tanah yang terjadi. Pengukuran pada sesi pertama dilakukan pada titik BMLS yang sudah dipasang pada pekerjaan sebelumnya.</p>
	<p>Pengukuran Sesi 2, 3 dan 4 Pengukuran GNSS sesi ke-2, 3 dan 4 digunakan untuk mendapat data koordinat muka tanah dalam arah vertikal dan horizontal. Data pada sesi-sesi tersebut digunakan untuk menghitung selisih muka tanah</p>

Data hasil pengukuran disajikan pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 3 Nilai Rata-rata Kecepatan Perubahan Koordinat Hasil Pengolahan Data Pengukuran Sesi 1 - Sesi 3

Stasiun	Vn (mm/ tahun)	Ve (mm/ tahun)	Vu (mm/ tahun)	Std N	Std E	Std U
LS01	-16,370	13,188	-244,70	14,88	67,96	214,5
LS02	-27,320	31,941	-173,50	21,16	10,51	90,13
LS03	-8,311	24,762	-83,520	3,896	2,955	133,6
LS04	8,286	38,602	-117,20	3,544	14,74	230,9
LS05	239,770	81,783	25,258	160,21	67,39	91,80

Tabel 3 Nilai Rata-rata Kecepatan Perubahan Koordinat Hasil Pengolahan Data Pengukuran Sesi 1 - Sesi 3 (lanjutan)

Stasiun	Vn (mm/tahun)	Ve (mm/tahun)	Vu (mm/tahun)	Std N	Std E	Std U
LS06	50,036	-48,730	-62,88	61,56	63,25	1,482
LS07	-9,268	12,504	-131,60	24,34	19,84	53,28
LS08	-41,890	17,288	-186,00	2,957	24,45	248,9
LS09	-43,47	46,267	110,12	32,86	29,55	119,9
LS10	-19,25	11,424	-98,67	7,274	35,40	26,06

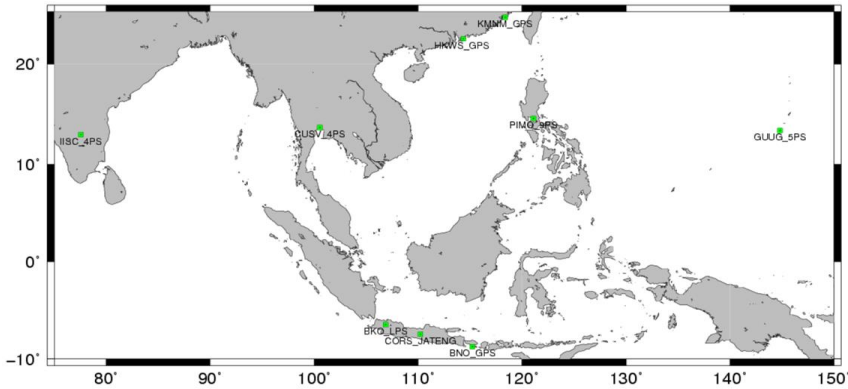
Tabel 4 Laju Kecepatan Penurunan Muka Tanah dari Hasil Pengukuran Sesi 1 - Sesi 4

Stasiun	Vn (mm/tahun)	Ve (mm/tahun)	Vu (mm/tahun)	Std N	Std E	Std U
LS01	0,025	7,429	-105,596	0,041	25,97	316,495
LS02	0,025	-20,158	-166,650	0,048	41,97	47,979
LS03	0,022	-8,369	-111,146	0,027	23,97	80,291
LS04	0,036	10,806	-115,027	0,014	17,03	100,859
LS05	0,096	205,466	66,014	0,101	71,49	59,099
LS06	-0,028	29,778	-50,895	0,101	71,49	59,099
LS07	0,019	-0,871	-86,286	0,026	11,19	67,105
LS08	0,030	-21,547	-95,018	0,063	40,91	317,851
LS09	0,120	-27,547	17,239	0,244	73,09	263,043
LS10	0,022	-20,769	122,713	0,024	23,25	32,637

Proses Pengolahan Data

Software yang digunakan untuk melakukan pengolahan data adalah *software* GAMIT/GLOBK versi 10.7. Titik pengamatan diikatkan dengan CORS milik Badan Informasi Geospasial (BIG) dan CORS IGS yang tersebar di beberapa negara di dunia. CORS merupakan stasiun pengamatan GNSS secara kontinyu yang melakukan pengamatan secara terus menerus selama 24 jam untuk memantau pergerakan geodinamik dan referensi dalam pengukuran. Hal ini bertujuan untuk mengetahui posisi relatif titik pengamatan terhadap titik referensi yang telah diketahui koordinat pastinya. Pada

pengolahan penurunan muka tanah, jumlah CORS yang digunakan ada sebanyak 12 buah stasiun yakni BAKO, BNOA, IISC, CUSV, PIMO, GUGG, HKWS, KMMN, dan 4 stasiun CORS BIG.



Sumber: InaCORS BIG (2002)

Gambar 6 Persebaran Titik CORS IGS dan BIG

Parameter yang digunakan pada pengolahan menggunakan *software* GAMIT adalah informasi orbit satelit yang presisi, data pengamatan, data CORS titik ikat, dan parameter lainnya. Hasil pengolahan yang didapatkan berupa posisi koordinat dalam sistem koordinat kartesian 3D, sistem koordinat toposentrik dan sistem koordinat dalam sistem proyeksi UTM (*Universal Transverse Mercator*).

Hasil pengolahan dibagi menjadi 4 sesi pengukuran sesuai dengan pelaksanaan pengukuran GNSS. Hasil pengolahan pada pengukuran sesi 1 dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Hasil Pengolahan *Software* GAMIT/GLOBK Sesi 1

Stasiun	Std N	Std E	Std U
LS01	0,01336	0,01882	0,06953
LS02	0,00808	0,01172	0,04601

Tabel 5 Hasil Pengolahan *Software* GAMIT/GLOBK Sesi 1 (lanjutan)

Stasiun	Std N	Std E	Std U
LS03	0,00581	0,00663	0,02995
...
LS10	0,00436	0,00521	0,01906

Hasil pengolahan pada pengukuran sesi 2 menggunakan *software* GAMIT/GLOBK dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 Hasil Pengolahan *Software* GAMIT/GLOBK Sesi 2

Stasiun	Std N	Std E	Std U
LS01	0,0160	0,0080	0,0520
LS02	0,0090	0,0060	0,0250
LS03	0,0090	0,0060	0,0240
...
LS10	0,0070	0,0050	0,0160

Hasil pengolahan pada pengukuran sesi 3 menggunakan *software* GAMIT/GLOBK dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Hasil Pengolahan *Software* GAMIT/GLOBK Sesi 3

Stasiun	Std N	Std E	Std U
LS01	0,0140	0,0080	0,0380
LS02	0,0110	0,0080	0,0310
LS03	0,0100	0,0070	0,0230
...
LS10	0,0080	0,0060	0,0180

Hasil pengolahan pada pengukuran sesi 4 menggunakan *software* GAMIT/GLOBK dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8 Hasil Pengolahan *Software* GAMIT/GLOBK Sesi 4

Stasiun	Std N	Std E	Std U
LS01	0,0083	0,0099	0,0464

Tabel 8 Hasil Pengolahan *Software* GAMIT/GLOBK Sesi 4 (lanjutan)

Stasiun	Std N	Std E	Std U
LS02	0,0069	0,0082	0,0413
LS03	0,0058	0,0071	0,0268
...
LS10	0,0042	0,0051	0,0199

Proses Analisis Data

Tahap analisis data bertujuan untuk mengestimasi nilai posisi relatif setiap titik pengamatan melalui proses *fitting* pada pengamatan fase *double-difference* GNSS melalui persamaan berikut:

$$P(x, y, z, \tau) \cong P(x_0, y_0, z_0, \tau_0) + (x - x_0) \frac{\partial P}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial P}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial P}{\partial z} + (\tau - \tau_0) \frac{\partial P}{\partial \tau} \dots\dots\dots(2)$$

$$P(x, y, z, \tau) = P_{computed} + \frac{\partial P}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial P}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial P}{\partial \tau} \Delta \tau \dots\dots\dots(3)$$

dengan *x*, *y*, dan *z* menunjukkan posisi dan τ menunjukkan bias waktu.

Proses ini memanfaatkan algoritma *weight least squares* untuk mencari nilai koordinat final (parameter) dengan memanfaatkan pengamatan koordinat pada jangka waktu tertentu dan posisi pasti dari stasiun referensi yang ada (observasi). Solusi yang diberikan algoritma ini antara lain koordinat awal dalam ketelitian desimeter (dm) dan koordinat akhir. Koordinat akhir yang dihasilkan merupakan koordinat akhir yang sudah tereferensi pada kerangka referensi ITRF dan telah dikombinasikan dengan jaring kontrol dunia (IGS) secara spasial maupun temporal. Pada pengamatan

penurunan muka tanah di area jalan tol, titik pengamatan berjumlah 10 titik (BMLS01 sampai BMLS10) ditambahkan 8 titik pengamatan dari IGS (BAKO, COCO, PIMO, DARW, SIN1, GUAM, KARR, XMIS).

Analisis penurunan muka tanah berfokus pada identifikasi dan kalkulasi perbedaan koordinat antar dua waktu atau *epoch* yang berbeda agar didapatkan nilai pergeseran vertikal dan horizontal yang terjadi di area pembangunan Jalan Tol Semarang – Demak. Proses analisis perhitungan data GNSS dilakukan dengan menghitung selisih dari setiap sesi pengukuran. Tabel merupakan hasil perhitungan selisih pengolahan data pengukuran pada tiap sesi seperti ditunjukkan pada Tabel 9 sampai dengan Tabel 11.

Tabel 9 Hasil Perhitungan Selisih Pengolahan Data Pengukuran Sesi 1 dan Sesi 2

Stasiun	Std N	Std E	Std U
LS01	16,00	8,00	52,00
LS02	9,00	6,00	25,00
LS03	9,00	6,00	24,00
...
LS10	7,00	5,00	16,00

Tabel 10 Hasil Perhitungan Selisih Pengolahan Data Pengukuran Sesi 1 dan Sesi 3

Stasiun	Std N	Std E	Std U
LS01	14,00	8,00	38,00
LS02	11,00	8,00	31,00
LS03	10,00	7,00	23,00
...
LS10	8,00	6,00	18,00

Tabel 11 Hasil Perhitungan Selisih Pengolahan Data Pengukuran Sesi 1 dan Sesi 4

Stasiun	Std N	Std E	Std U
LS01	8,30	9,90	46,40
LS02	6,90	8,20	41,30
LS03	5,80	7,10	26,80
...
LS10	4,20	5,10	19,90

Selanjutnya dilakukan analisis *trend* atau kecepatan perubahan koordinat untuk mendapatkan rata-rata kecepatan penurunan muka tanah per tahun dan mengeliminasi kesalahan sistematis yang terjadi pada saat pengukuran dan pengolahan dilakukan. Analisis ini mengadopsi persamaan regresi linier berbobot dimana data masukkan berupa nilai akumulasi perubahan koordinat dan bobot berupa nilai standar deviasi dari hasil pengolahan koordinat. Hasil pengolahan data pengukuran sesi 1 sampai dengan sesi 4 diperoleh nilai rata-rata kecepatan perubahan koordinat seperti yang ditunjukkan pada Tabel 12.

Tabel 12 Laju Kecepatan Penurunan Muka Tanah dari Hasil Pengukuran Sesi 1 - Sesi 4

Stasiun	Vn (mm/ tahun)	Ve (mm/ tahun)	Vu (mm/ tahun)	Std N	Std E	Std U
LS01	0,025	7,429	-105,596	0,041	25,97	316,495
LS02	0,025	-20,158	-166,650	0,048	41,97	47,979
LS03	0,022	-8,369	-111,146	0,027	23,97	80,291
...
LS10	0,022	-20,769	122,713	0,024	23,25	32,637

Secara keseluruhan, titik pengukuran penurunan muka tanah di sekitar wilayah pembangunan jalan tol mengalami tren penurunan

tertinggi hingga -166.650 mm/tahun. Akan tetapi, tren ini masih belum bisa menjadi acuan dikarenakan jumlah pengukuran masih sangat minim dan nilai standar deviasi yang cukup besar.

KESIMPULAN

Jalan tol ini dibangun di daerah yang rawan banjir rob dan telah terjadi penurunan muka tanah yang disebabkan oleh adanya pengambilan air berlebih, pembebanan bangunan, dan beberapa faktor lainnya sehingga diperlukan pemantauan secara kontinu.

Pengukuran GNSS dibagi dalam beberapa tahapan, yaitu perencanaan titik *benchmark*, pengamatan penurunan muka tanah dengan GNSS, evaluasi hasil, *post processing*, dan perhitungan nilai pergeseran dan kecepatan penurunan muka tanah. Berdasarkan perencanaan yang disusun terdapat 10 *benchmark* yang tersebar di sekitar area Jalan Tol Semarang-Demak.

Titik *benchmark* yang dipakai dalam pengukuran pemantauan penurunan muka tanah harus memenuhi SNI 19-6724-2002 Jaring Kontrol Horizontal dan SNI 19-6988-2004 Jaring Kontrol Vertikal dengan Metode Sipat Datar dengan *orde-0* dan beberapa syarat lain seperti terjaminnya pembebasan lahan dan struktur *benchmark* yang bisa menahan tekanan banyak dari atas.

Pengukuran dalam proyek ini terbagi dalam 4 sesi pengukuran dan pengolahan data dilakukan dengan perangkat lunak GAMIT/GLOBK dengan titik ikat pengamatan menggunakan CORS milik Badan Informasi Geospasial (BIG). Berdasarkan hasil

perhitungan didapatkan bahwa secara keseluruhan titik pengukuran penurunan muka tanah di sekitar area jalan tol mengalami tren penurunan tertinggi hingga -166.650 mm/tahun dengan toleransi nilai penurunan muka tanah sebesar 15-20 cm/tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- Azeriansyah, R., Prasetyo, Y., dan Yuwono, B. D. 2019. *Land Subsidence Monitoring in Semarang and Demak Coastal Areas 2016-2017 Using Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar*. Earth and Environmental Science, 313: 012040.
- Badan Standardisasi Nasional. 2002. *SNI 19-6724-2002 Jaring Kontrol Horizontal*. Jakarta
- Badan Standardisasi Nasional. 2004. *SNI 19-6988-2004 Jaring Kontrol Vertikal dengan Metode Sipat Datar dengan orde-0*. Jakarta.
- Haqqi, M. K. 2015. *Survei Pendahuluan Deformasi Muka Tanah dengan Pengamatan GPS di Kabupaten Demak (Studi Kasus: Pesisir Pantai Kecamatan Sayung)*. Jurnal Geodesi Undip, 4 (4): 81-90.
- Khoirunisa, R. 2015. *Analisis Penurunan Muka Tanah Kota Semarang Tahun 2015 Menggunakan Perangkat Lunak GAMIT 10.5*. Jurnal Geodesi Undip, 4 (4): 341-350.
- Ramadhon, S. 2021. *Perbandingan Posisi Tiga Dimensi Pengukuran GNSS Menggunakan Metode Diferensial Statik dengan Berbagai Variasi Epoch Rate*. Journal of Geospatial Information Science and Engineering, 4 (1): 49-55.

- Saputra, R. 2017. *Analisis Deformasi di Wilayah Jawa Timur dengan Menggunakan CORS BIG*. Jurnal Geodesi Undip, 6 (4): 422-432.
- Sarah, D., Hutasoit, L., Delinom, R., & Sadisun, I. 2020. *Natural Compaction of Semarang-Demak Alluvial Plain and Its Relationship to the Present Land Subsidence*. Indonesian Journal on Geoscience, 7 (3): 273-289.
- United Nations. 2011. *10 Years of Achievement of the United Nations on Global Navigation Satellite Systems*. Office for Outer Space Affairs. New York, NY.



KAJIAN KRITIS PENGEMBANGAN JALAN TOL DI INDONESIA

Pengelolaan Aspek Teknis dalam Perancangan dan Pembangunan Jalan Tol

KAJIAN PERGERAKAN SATWA DILINDUNGI PADA PROYEK JALAN TOL PROBOLINGGO-BANYUWANGI

Satyawan Pudyatmoko

Fakultas Kehutanan, Universitas Gadjah Mada; Badan Restorasi Gambut dan Mangrove

Andriana Kumalasari

Badan Restorasi Gambut dan Mangrove

Arief Budiman

Fakultas Kehutanan, Universitas Gadjah Mada

PENDAHULUAN

Kebijakan Konservasi Keanekaragaman Hayati di Indonesia

Indonesia dikenal sebagai negara dengan kekayaan keanekaragaman hayati yang tinggi. Peraturan perundangan yang mengatur konservasi keanekaragaman hayati adalah Undang-Undang Nomor 5 Tahun 1990 tentang Konservasi Sumber Daya Alam Hayati dan Ekosistemnya. Menurut peraturan tersebut, konservasi sumber daya alam hayati adalah pengelolaan sumber daya alam hayati yang pemanfaatannya dilakukan secara bijaksana untuk menjamin kesinambungan persediaannya dengan tetap memelihara dan meningkatkan kualitas keanekaragaman dan nilainya. Kegiatan konservasi keanekaragaman hayati mencakup perlindungan sistem penyangga kehidupan, pengawetan keanekaragaman tumbuhan dan satwa liar, serta pemanfaatan secara lestari sumber daya alam hayati

dan ekosistemnya.

Menurut UU Nomor 5 tahun 1990, perlindungan sistem penyangga kehidupan ditujukan untuk memelihara proses ekologis yang menunjang kelangsungan kehidupan. Tindakan-tindakan yang terkait antara lain; perlindungan mata air, tebing, tepian sungai, danau, dan jurang, pantai, pemeliharaan fungsi hidrologi hutan, pengelolaan daerah aliran sungai, serta perlindungan terhadap gejala keunikan dan keindahan alam. Sedangkan upaya pengawetan dan pemanfaatan secara lestari sumber daya alam hayati dan ekosistemnya salah satunya dilakukan dengan penetapan Kawasan Konservasi yang berupa Kawasan Suaka Alam (KSA) dan Kawasan Pelestarian Alam (KPA).

KSA terdiri dari Suaka Alam (SA) dan Cagar Alam (CA), sedangkan KPA terdiri dari Taman Nasional (TN), Taman Hutan Raya, dan Taman Wisata Alam (TWA). Baik KSA maupun KPA juga diharapkan berfungsi sebagai wilayah perlindungan sistem penyangga kehidupan. Saat ini luas kawasan konservasi mencakup kawasan seluas 27,05 juta ha yang terdiri dari adalah 80 Suaka Margasatwa (SM), 237 Cagar Alam (CA), dan 54 Taman Nasional (TN), sedangkan sisanya adalah kawasan konservasi dalam bentuk yang lain (Direktorat Jenderal Konservasi Sumberdaya Alam dan Ekosistem, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan/Ditjen KSDAE KLHK, 2019).

Penetapan kawasan hutan sebagai kawasan konservasi dilandasi oleh berbagai pertimbangan, misalnya adanya jenis tumbuhan atau hewan asli, endemik, langka, atau dilindungi, ekosistem yang khas, ekosistem hutan asli yang utuh atau hutan dengan fenomena-

fenomena lingkungan dan geologi unik, serta keindahan alam yang menonjol. Untuk Taman Nasional, ada tambahan kriteria bahwa kawasan tersebut cukup luas dan dapat dikelola dengan sistem zonasi. Beberapa contoh taman nasional di Indonesia dengan satwa-satwa prioritasnya adalah TN Ujung Kulon dengan prioritas perlindungan badak bercula satu, TN Bali Barat untuk burung jalak bali, TN Leuser untuk orang utan sumatera, harimau sumatera, gajah sumatera dan badak sumatera dan TN Baluran untuk banteng jawa.

Saat ini, keadaan kawasan konservasi ibarat pulau-pulau kecil yang dikelilingi oleh lautan kawasan pertanian, perkebunan, dan permukiman (Kitchener et al., 2004). Kawasan konservasi yang berukuran kecil dan terisolasi dari habitat yang lain karena kegiatan-kegiatan antropogenik dan kualitasnya diperburuk dengan adanya perubahan iklim (Ament et al., 2014; Leito et al., 2015). Tekanan terhadap kawasan konservasi juga makin tinggi dengan adanya perambahan untuk pertanian dan perkebunan, pembalakan liar, dan perburuan terhadap satwa liar. *Mass tourism* dengan berbagai infrastrukturnya juga berpotensi sebagai gangguan terhadap satwa.

Aktivitas manusia yang makin meningkat di kawasan hutan, juga meningkatkan konflik dengan satwa liar, seperti konflik dengan gajah dan harimau (Alfred et al., 2012; Nyhus & Tilson, 2004)) dan orang utan (Thorburn et al., 2014). Dimensi persoalan sosial-ekonomi dalam pengelolaan kawasan konservasi seperti di Indonesia, tidak dijumpai di negara-negara maju, seperti pengelolaan Taman Nasional Banff di Kanada. Tingkat perekonomian yang tinggi, kepadatan penduduk rendah, dan tingkat kepatuhan atas larangan perburuan liar menyebabkan sedikitnya gangguan oleh manusia. Dengan pertimbangan kompleksitas

permasalahan yang berbeda, model-model lintasan satwa liar yang dikembangkan dalam upaya memitigasi dampak pembangunan jalan tol di negara maju, tidak dapat serta merta diadopsi di Indonesia. Perbedaan intensitas ketergantungan masyarakat terhadap taman nasional, luas kawasan konservasi, keragaman stresor yang mengancam satwa, dan posisi geografis yang mempengaruhi konektivitas ekologi dengan lanskap di sekelilingnya harus menjadi faktor yang ikut dipertimbangkan (Forman et al., 2003; Ree et al., 2015).

Pembangunan Infrastruktur Jalan Tol dalam Kawasan Konservasi

Beberapa tahun terakhir kemajuan pembangunan jalan tol meningkat dengan pesat di Indonesia. Pada satu sisi, pembangunan ini bermanfaat meningkatkan konektivitas wilayah yang mendorong pertumbuhan ekonomi, namun di sisi lain keberadaan jalan tol dalam kawasan konservasi dapat menimbulkan ancaman terhadap kelestarian spesies dan ekosistem (Ree et al., 2015). Ruas jalan tol yang melalui kawasan hutan yang sensitif secara ekologi di antaranya yaitu; ruas Jalan Tol Trans Pekanbaru-Dumai (131,48 km) dan rute Jalan Tol Tempino-Bitung-Jambi (191 km) yang melalui SM Dangku, TN Berbak dan TN Sembilang yang merupakan Situs RAMSAR (Ditjen KSDAE, 2020; Badan Pengatur Jalan Tol/BPJT, 2018; Ministry of National Development Planning, 2021). Rencana rute Jalan Tol Trans Jawa Probolinggo-Banyuwangi (172,91 km) akan melintasi TN Baluran sepanjang kira-kira 22 km (BPJT, 2018).

Jenis-jenis pemanfaatan kawasan di Taman Nasional diatur dalam Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 28 Tahun 2011 yang telah diubah

menjadi PP Nomor 108 Tahun 2015 tentang Pengelolaan Kawasan Suaka Alam dan Kawasan Pelestarian Alam. Dalam hal ini, pembangunan jalan tol tidak termasuk dalam pemanfaatan yang diperbolehkan. Pembangunan jalan tol sebagai pembangunan strategis diatur dalam Peraturan Menteri Kehutanan Nomor 85 Tahun 2014 yang telah diubah menjadi Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 44 Tahun 2019 tentang Tata Cara Kerja Sama Penyelenggaraan Kawasan Suaka Alam dan Kawasan Pelestarian Alam. Berbagai persyaratan telah ditentukan untuk meminimalkan pengaruh negatif jalan tol terhadap integritas ekosistem.

Jalan tol yang membelah taman nasional menimbulkan dampak negatif terhadap satwa serta habitatnya (Ament et al., 2008; Ree et al., 2015). Dampak dapat terjadi selama proses pembangunan jalan tol dan tetap berlanjut selama jalan beroperasi (Forman et al., 2003; Ree et al., 2015). Pembangunan jalan tol akan menambah stresor baru yang mengancam jenis-jenis satwa (Andrews, 1990; Healey et al., 2020; Johnson et al., 2017; Kummoo et al., 2020; Laurance et al., 2009; Sarie et al., 2015; Spellerberg, 2002). Keberadaan jalan tol dapat memecah populasi menjadi sub-sub populasi kecil, menghalangi pergerakan satwa, kematian langsung akibat tabrakan, menghalangi konektivitas, memutus aliran gen, serta merusak sistem hidrologi alami sebagai faktor kunci kelestarian ekosistem.

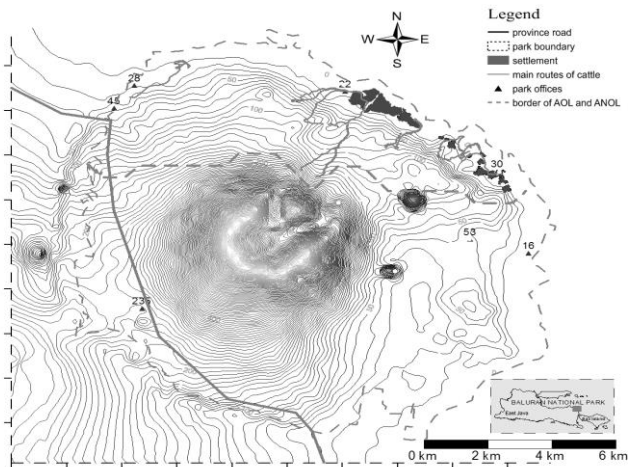
Rancangan geometris rencana Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi yang membelah TN Baluran harus mampu mengintegrasikan kepentingan pelestarian keanekaragaman hayati dan pembangunan. Jalan tol tidak boleh menghalangi atau memutus rute pergerakan satwa liar, terutama satwa-satwa berukuran besar seperti banteng,

rusa, kijang, dan ajag dan tidak mengganggu habitat mikro yang penting, serta tidak meningkatkan potensi terjadinya kecelakaan satwa.

KAJIAN PUSTAKA

Taman Nasional Baluran sebagai Ruang Hidup Satwa

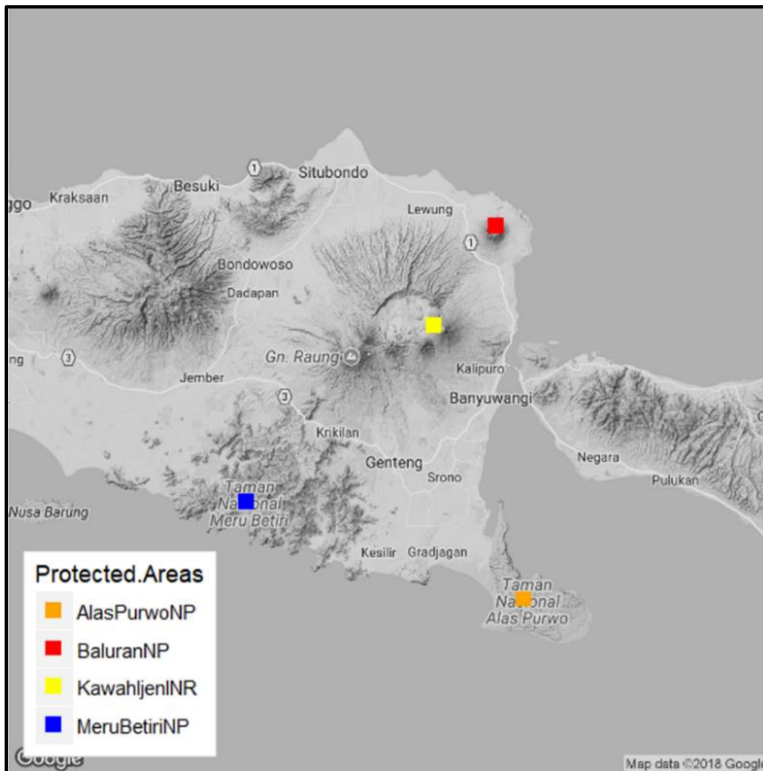
Taman Nasional adalah kawasan pelestarian alam yang mempunyai ekosistem asli, dikelola dengan sistem zonasi yang dimanfaatkan untuk tujuan penelitian, ilmu pengetahuan, pendidikan, menunjang budidaya, pariwisata, dan rekreasi. Taman Nasional Baluran (Gambar 1) adalah salah satu dari lima taman nasional tertua di Indonesia (Whitten dkk., 1996). TN Baluran memiliki luas 25.000 ha, dan merupakan zona inti dari kawasan Cagar Biosfer Belambangan seluas 778.647 ha (Gambar 2).



Sumber: Whitten dkk. (1996)

Gambar 1 Peta Taman Nasional Baluran, Jawa Timur

Sebagai zona inti, TN Baluran merupakan habitat yang sangat penting bagi mamal besar dan burung yang kritis, terancam punah dan rentan seperti; banteng (*Bos javanicus*), ajag (*Cuon alpinus*), macan tutul jawa (*Panthera pardus spp. melas*), rusa jawa (*Rusa timorensis*), dan lutung jawa (*Tracypithecus auratus*), merak hijau (*Pavo muticus*), jalak putih (*Acridotheres melanopterus*), gelatik jawa (*Lonchura oryzivora*), dan bangau tongtong (*Leptoptilos javanicus*).



Sumber: Google (2018)

Gambar 2 Peta Cagar Biosfer Belambangan, Jawa Timur dengan 3 Taman Nasional (TN Baluran, TN Alas Purwo, TN Meru Betiri) dan 1 Cagar Alam (CA Kawah Ijen) Sebagai Zona Inti

TN Baluran terletak di ujung timur Pulau Jawa. Di tempat ini, curah hujan relatif sedikit dengan rata-rata 1500 mm/tahun, dengan periode waktu kemarau relatif panjang selama 7–8 bulan (Pudyatmoko, 2017). Di bagian tengah berdiri Gunung Baluran dengan ketinggian 1.100 m. TN Baluran memiliki ekosistem yang unik, dengan komposisi tutupan hutan berupa mosaik vegetasi, seperti hutan musim yang menggugurkan daun, hutan hijau sepanjang tahun, hutan jati, *Acacia nilotica*, hutan mangrove, dan sabana (Pudyatmoko, 2017).

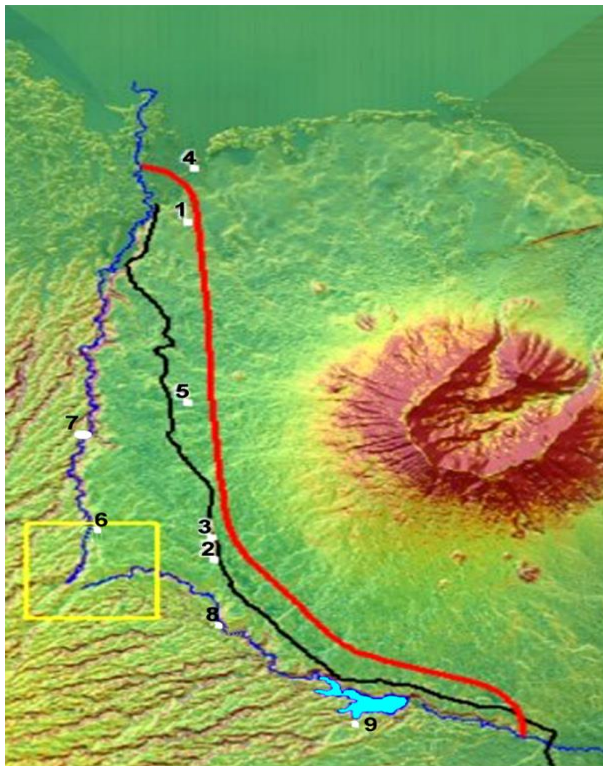


Gambar 3 Induk Banteng Bersama Anaknya Menyeberang Jalan Batangan-Bekol

Kondisi topografi taman nasional bervariasi dari datar, landai bergelombang, curam, hingga sangat curam di lereng-lereng Gunung Baluran. Kawasan hutan di sisi barat yang terhubung dengan lanskap sisi selatan ke arah Gunung Ijen, relatif tinggi dibandingkan dengan kawasan hutan di sisi utara dan timur yang berbatasan dengan perairan laut. Perbedaan kondisi topografi dan ketinggian tersebut

mempengaruhi sebaran air alami ketika musim kemarau panjang tiba dengan puncaknya di bulan Oktober. Sumber-sumber air alami mengering dan hanya tersisa di beberapa sumber air tawar dan payau di sepanjang pesisir utara dan timur.

Hutan di sisi barat yang didominasi oleh hutan jati seluas 5.600 ha, yang letaknya relatif lebih tinggi, merupakan wilayah terkering di lanskap TN Baluran. Tempat ini adalah lokasi yang akan dibangun jalan tol (Gambar 4).



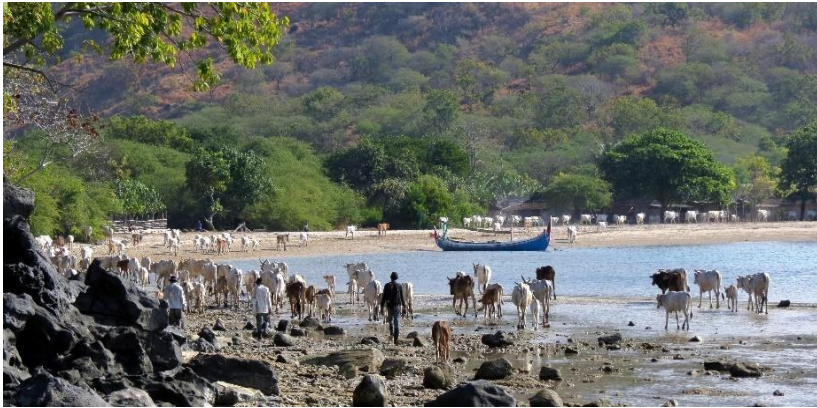
Gambar 4 Peta Situasi Kawasan Sisi Barat Taman Nasional Baluran

Keterangan: Punggungan Amparan (kotak kuning), jalan propinsi (garis hitam), sumbu tengah jalan tol (garis merah); 1. Bukit Watunumpuk; 2. Jalan Amparan; 3. Bitakol; 4. Watunumpuk; 5. Telaga; 6. Batas TNB nomor TN358; 7. Sungai Kelokoran; 8. Sungai Bajulmati (Sungai Panjaitan-anak sungai Bajulmati tidak terlihat di peta), 9. Bendungan Bajulmati

Pada saat musim kemarau, sumber air yang tersedia hanya di sumber air telaga, dan Sungai Panjaitan (anak Sungai Bajulmati), Sungai Bajulmati, dan Sungai Kelokoran yang berada di luar kawasan taman nasional. Banteng, macan tutul, ajag, rusa, dan kijang, serta satwa lainnya sangat tergantung hidupnya pada sumber mata air tersebut terutama pada musim kemarau. Pada musim kemarau, banyak satwa dari arah timur menyeberang jalan yang menghubungkan Situbondo-Banyuwangi menuju ke sumber air di Sungai Panjaitan dan Sungai Kelokoran.

Bagian TN Baluran di sepanjang sisi selatan ke arah barat, yang ditandai oleh keberadaan Bendungan Bajulmati dan Sungai Kelokoran merupakan tempat yang sangat penting bagi satwa liar. Hasil pengamatan keberadaan satwa liar tahun 2015-2016 menunjukkan banyaknya jejak berbagai satwa di sepanjang aliran sungai tersebut. Hal ini membuktikan bahwa satwa liar mengakses sumber daya air sungai tersebut.

Selain ketersediaan sumber air, faktor pembatas lain yang menentukan sebaran alami satwa liar adalah adanya gangguan antropogenik, antara lain; penggembalaan sapi sejumlah 3.852 ekor yang menggunakan area kawasan sisi utara seluas 5.596 ha (Gambar 5), aktivitas penduduk yang memanen hasil hutan, aktivitas transportasi lokal yang menggunakan akses jalan taman nasional, dan perburuan liar (Pudyatmoko et al., 2018). Biasanya, satwa liar akan menghindari area-area dengan aktivitas manusia yang tinggi, atau mereka akan mengubah waktu aktivitasnya agar tidak bertemu manusia.



Gambar 5 Pengembalaan Sapi, Perjalanan Pulang Melalui Pesisir Pantai Lempuyang

Ekologi Lanskap dan Kompleksitas Sosial-Ekonomi di Taman Nasional Baluran

Ekologi lanskap

Secara ekologis, satwa memerlukan ruang hidup yang aman dan minimum dari gangguan. Adanya pemukiman di sekitar TN Baluran dan kegiatan manusia di dalam taman nasional merupakan potensi gangguan yang cukup besar. Penting dipikirkan juga untuk membuat desain jalan tol yang tidak mendukung makin tingginya gangguan manusia di TN Baluran. Terdapat tiga klaster pemukiman yang berpengaruh. Pertama, klaster pemukiman timur laut (Balanan–Merak) yang berada dalam zonasi khusus; kedua, klaster pemukiman tenggara (Desa Wonorejo, Bajulmati, dan Watukebo); dan ketiga, klaster pemukiman barat laut (Dusun Karang Tekok dan Karang Anyar, Desa Sumber Waru). Banyak penduduk yang menggantungkan kehidupannya dari sumber daya yang berada dalam taman nasional.

Aktivitas ilegal yang dilakukan di dalam TN Baluran antara lain berupa pencurian kayu dan perburuan liar. Lokasi-lokasi yang rawan atas ancaman tersebut, terutama wilayah yang berdekatan dengan akses jalan baik jalan setapak di hutan maupun jalan provinsi. Kayu yang menjadi sasaran pencurian terutama kayu berharga tinggi seperti jati dan sonokeling, sedangkan perburuan menysasar banteng (Gambar 6), kerbau, rusa, dan merak hijau.



Gambar 6 Banteng Korban Pemburu Liar, Meninggalkan Kerangka dengan Bekas Keratan Pisau (Kiri) dan Sisa Bagian Kulit (Kanan)

Infrastruktur berkelanjutan

Pembangunan Jalan Tol yang menembus kawasan pelestarian mengikuti ketentuan yang diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 44 Tahun 2019 tentang Tata Cara Kerja Sama Penyelenggaraan Kawasan Suaka Alam (KSA) dan Kawasan Pelestarian Alam (KPA). Pada pasal 4 butir c disebutkan pembangunan strategis yang tidak dapat dielakkan tercakup dalam ruang lingkup kegiatan kerjasama dalam penyelenggaraan KSA dan KPA. Selanjutnya, dalam pasal 13 butir a dinyatakan yang termasuk dalam kerjasama dalam rangka pembangunan strategis salah satunya adalah kegiatan yang

mempunyai pengaruh terhadap kedaulatan negara dan pertahanan keamanan negara, yang kemudian diuraikan lebih lanjut di pasal 14 butir h bahwa jalan lintas provinsi termasuk dalam kegiatan kerja sama yang dimaksud.

Dalam pasal 18 diatur sepuluh kewajiban minimum yang harus dilakukan oleh mitra dalam pelaksanaan kerja sama tersebut. Di antara kewajiban tersebut yang paling relevan dengan konservasi keanekaragaman hayati adalah; melakukan kegiatan perlindungan dan pengamanan kawasan di sekitar lokasi pembangunan dari kemungkinan kebakaran hutan, perambahan/pemukiman liar; menghindari pembangunan yang menyebabkan fragmentasi habitat sehingga mengganggu perpindahan hidupan liar; menghindari penggunaan material baik hidup atau mati yang dapat berakibat terjadinya perubahan struktur vegetasi dan keragaman jenis sehingga muncul spesies invasif maupun terjadi perubahan fungsi kawasan; menjaga dan melindungi keberadaan hidupan liar yang berada di sekitarnya; merehabilitasi kawasan yang rusak akibat dampak pembangunan kerjasama; dan tidak mengganggu keindahan lanskap, struktur maupun warna bangunannya disesuaikan dengan kondisi di sekitarnya.

International Finance Corporation (IFC), sebuah organisasi komplementer dalam grup Bank Dunia, juga menyusun *framework* yang menyatakan komitmen strategis perusahaan terhadap pembangunan berkelanjutan. *Framework* tersebut di antaranya berisi tentang standar kinerja IFC (*IFC performance standard*) yang memberikan panduan dalam mengidentifikasi risiko dan dampak, dan dirancang untuk membantu mencegah, memitigasi, dan mengelola resiko dan dampak sesuai prinsip pembangunan

berkelanjutan. Untuk proyek-proyek pembangunan yang berada di habitat kritis, yang relevan adalah standar kinerja 6 (IFC PS 6) tentang *Biodiversity Conservation and Sustainable Management of Living Natural Resources*. Yang dimaksud dengan habitat kritis adalah area dengan nilai konservasi tinggi yang meliputi; (1) habitat spesies terancam punah, (2) habitat spesies endemik atau spesies yang memiliki sebaran terbatas, (3) habitat yang mendukung spesies migran, (4) ekosistem terancam, dan (5) habitat yang mendukung proses kunci evolusi.

Dalam dokumen IFC PS 6 diatur rencana mitigasi yang meliputi: 1) proyek dapat dilakukan dalam habitat kritis apabila memang tidak terdapat alternatif tempat yang lain, 2) proyek tidak mengarah pada dampak merugikan terhadap nilai keanekaragaman hayati yang menjadi tujuan penetapan habitat kritis dan pada proses ekologi yang mendukung nilai keanekaragaman hayati tersebut, 3) proyek tidak mengarah pada pengurangan ukuran populasi global dan/atau nasional/regional dari spesies yang sangat terancam punah atau terancam punah; dan 4) ada program pemantauan dan evaluasi keanekaragaman hayati yang kuat, dirancang dengan tepat, dan berjangka panjang dan diintegrasikan ke dalam program manajemen proyek. Hal tersebut kemudian diwujudkan dalam bentuk strategi mitigasi proyek yang disebut sebagai Rencana Aksi Keanekaragaman Hayati (International Finance Corporation, 2012).

Pembangunan jalan tol di TN Baluran harus mendapat masukan dari para ekologis di setiap tahapan; seperti pra-konstruksi (tahapan perencanaan strategis dan perencanaan fisik), konstruksi, dan operasional (Ree et al., 2015). Dengan melakukan kolaborasi dengan ahli ekologi dalam setiap tahap, diharapkan dapat menghindari

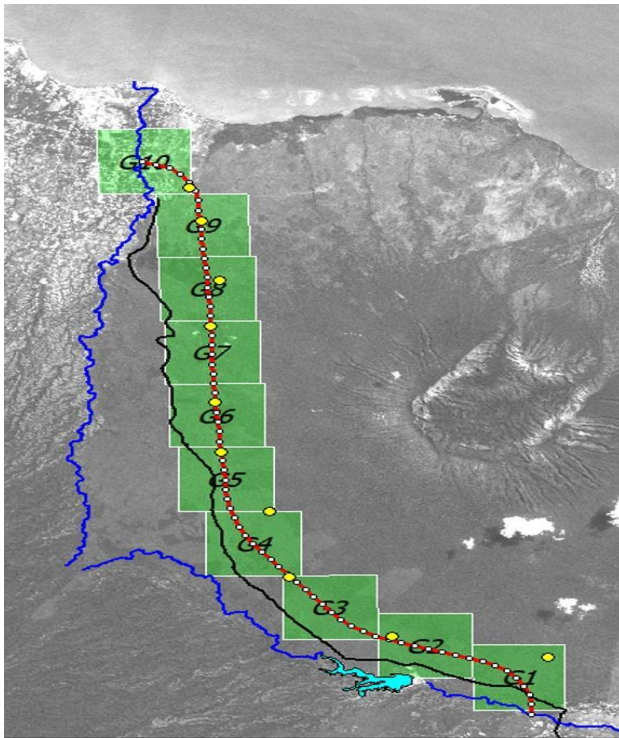
dampak serius akan terjadi pada ekosistem hutan yang kompleks, termasuk sistem drainase alami yang menyokong kelangsungan hidup flora dan fauna di dalamnya. Pembangunan jalan yang ditinggikan di atas timbunan atau tanggul, pada ekosistem kering akan berdampak signifikan pada sistem hidrologi alami, karena tanpa struktur yang memadai, tanggul dapat bertindak sebagai penghalang pola alami aliran air di bentang lahan yang luas (Ree et al., 2015). Aspek lain yang juga penting untuk diperhatikan dalam pembangunan infrastruktur jalan pada lokasi habitat satwa liar adalah geometrik jalan, baik alinyemen vertikal maupun horizontal, mengingat geometri jalan memiliki pengaruh signifikan terhadap kelangsungan hidup satwa liar di sekitar jalan tersebut (Lozano et al., 2020).

ANALISIS DAN PARAMETER DALAM PENYUSUNAN REKOMENDASI

Analisis Kehadiran dan Penggunaan Ruang oleh Satwa Liar

Studi ini memberikan rekomendasi geometri jalan tol Probolinggo-Banyuwangi, khususnya alinyemen vertikal, dengan trase alinyemen horizontal yang telah ditetapkan. Parameter yang dianalisis dalam penyusunan rekomendasi ini adalah tingkat penggunaan calon lokasi tersebut oleh satwa liar. Untuk itu, dilakukan penelitian yang menghasilkan dua *output* utama yaitu informasi terkait sebaran satwa liar dan kesesuaian lokasi calon jalan tol sebagai habitat satwa liar. Asumsi pokok dalam penelitian ini adalah semakin banyak satwa yang hadir dan semakin sesuai habitat tersebut, maka pada tempat tersebut perubahan terhadap alam dan dampak pembangunan

harus ditekan seminimal mungkin. Penelitian ini dilakukan selama bulan Mei-April tahun 2021, yang mencakup area rencana lokasi Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi (143 ha) dan habitat di sekitarnya seluas 4.000 ha. Area penelitian tersebut mengikuti sumbu tengah jalan sepanjang 20 km yang melintasi zona Rimba TN Baluran (Gambar 7).

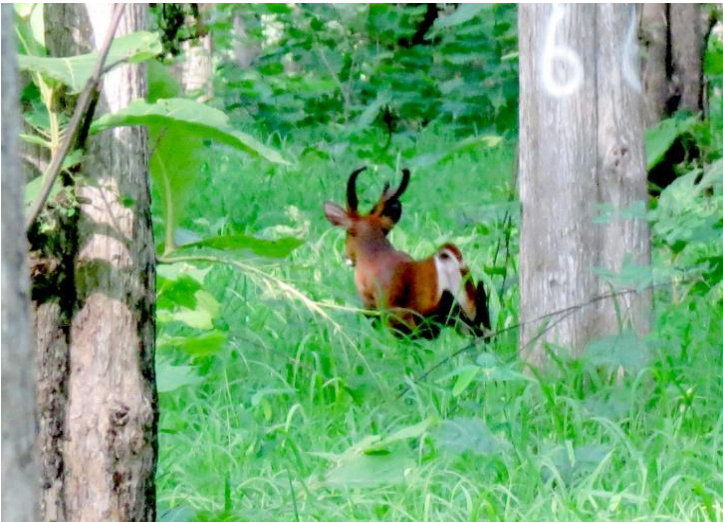


Gambar 7 Peta Lingkup Wilayah Studi

Keterangan: total luas *grid* 4000 ha (*grid* hijau 400 ha x 10 *grid*), 2,8 ha plot habitat (plot putih 0,04 ha x 70 plot), transek strip 21.000 m x 100 m (garis merah), kamera trap 10 lokasi (lingkaran kuning)

Satwa yang menjadi fokus studi adalah banteng (*Bos javanicus*), macan tutul (*Panthera pardus spp. melas*), kijang (*Muntiacus muntjak*) dan ajag (*Cuon alpinus*). Pengumpulan data lapangan

dilakukan dalam 10 *grid* dengan ukuran 2 x 2 km² (luas 4000 ha), dan pada setiap *grid* dipasang sebuah kamera trap (model: *Bushnell Trophycam HD Max*) yang mampu merekam kehadiran satwa secara terus-menerus. Pengamatan juga dilakukan pada transek dengan lebar 100 m sepanjang 21.000 m (luas 210 ha) untuk mengetahui keberadaan satwa berdasarkan jejak, kotoran, atau perjumpaan langsung, aktivitas manusia dan keberadaan sumber-sumber air (Gambar 8). Pengambilan data habitat mengikuti *Protocol Sampling* (Noon, 1981). Jumlah total plot sebanyak 70. Pengamatan juga dilakukan pada habitat-habitat penting di sekitarnya, terutama batas hutan alam dengan hutan jati dan hutan di tepi sungai dan curah (sungai temporer). Setiap poin koordinat perjumpaan dengan satwa liar direkam menggunakan alat *Global Positioning System (GPS) receiver*.



Gambar 8 Keberadaan Kijang di Dekat Rencana Jalan Tol (G2)

Keterangan: Kijang (*Muntiacus muntjak*) terekam kamera foto bulan Januari 2020 saat merumput dalam hutan Jati, ± 200 m sisi selatan rencana jalan tol (G2)

Analisis Kualitas Habitat Satwa Liar

Analisis kualitas habitat dilakukan untuk areal seluas 27.220,28 ha yang mencakup area calon areal jalan tol dan area kehadiran dan penggunaan ruang oleh satwa liar serta area-area yang berada di sekitarnya. Metode yang dilakukan untuk menganalisis kualitas habitat adalah pemodelan habitat “Analisis Faktor Relung Ekologi” (*Ecological Niche Factor Analysis/ENFA*). Keuntungan dari pendekatan ini adalah hanya membutuhkan data kehadiran satwa (Basille et al, 2008; Hirzel et al., 2002). Metode ini menggabungkan kekuatan teknologi GIS dengan analisis *statistic multivariate* untuk mengevaluasi kesesuaian habitat (Immordino et al., 2019). Mekanisme ENFA didasarkan pada teori bahwa suatu spesies mendiami satu habitat apabila faktor abiotik dan biotik serta akses terpenuhi (Guisan et al., 2017).

Model ini menggunakan 2 (dua) jenis variabel, yaitu variabel ekogeografis (EGV), yang meliputi variabel biogeografis dan gangguan manusia sebagai variabel prediktor, dan data keberadaan spesies sebagai variabel dependen. Untuk itu, ada dua data utama yang digunakan. Pertama, peta tematik raster indeks dan peta jarak. Peta tematik raster indeks meliputi NDVI (*Landsat Normalized Difference Vegetation Index*), SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), *Healthy Vegetation* dan *Digital Elevation Model*, sedangkan peta jarak meliputi jarak ke air, ke jalan dan ke pemukiman. Kedua, peta tematik raster *boolean* atau *binary* kehadiran satwa (0/tidak hadir, 1/hadir) sebagai variabel respon.

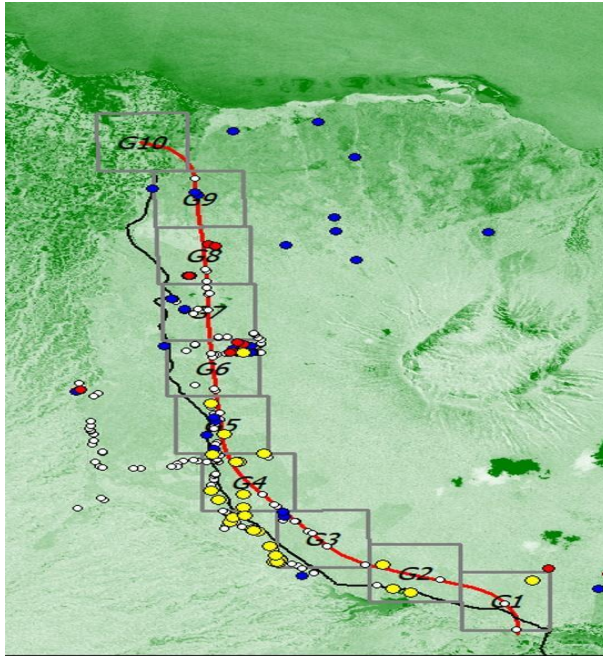
Pada metode ini, peta studi diubah menjadi peta raster yang terdiri dari N sel isometrik. Dalam ENFA, fungsi kesesuaian dihitung

dengan membandingkan distribusi spesies dalam ruang EGV dengan sel-sel keseluruhan. Prosedur matematis dalam *Software Biomapper* dijelaskan secara rinci oleh Hirzel et. al. (2002). Penggunaan habitat satwa diidentifikasi dari hasil peta kesesuaian habitat yang merupakan prognosis tentang luas dan kualitas habitat. Dalam studi ini kualitas habitat dibagi menjadi empat kelas yaitu kelas habitat optimal, sesuai, marginal dan tidak sesuai.

Citra satelit yang digunakan dalam studi ini adalah Sentinel 2A yang menghasilkan raster multiband yang meliputi 12 band yaitu 1. raster *Coastal aerosol*; 2. *Blue*; 3. *Green*; 4. *Red*; 5. *Red edge1*; 6. *Red edge2*; 7. *Red edge3*; 8. *Near Infrared*; 8A. *Red edge8*; 9. *Water vapour*; 11. *Shortwave Infrared1* dan 12. *Shortwave Infrared2* (European Space Agency Spatiale Europeenne, 2015). Dalam skala lokal, citra satelit dengan resolusi sel antara 10–60 m dapat digunakan sebagai data peta raster tematik) dan peta raster *Binary* (ESA EUSpace, 2019; Gatti et al., 2017; Immordino et al., 2019).

HASIL STUDI KUALITAS HABITAT SATWA LIAR

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa lokasi calon jalan tol dan daerah di sekitarnya merupakan habitat sangat penting untuk satwa. Dalam survei ditemukan kehadiran satwa sebanyak 29 lokasi untuk banteng, 14 untuk macan tutul, 31 untuk ajag dan 148 lokasi untuk kijang (Gambar 9). Dari 10 *Grid* yang diamati 60% di antaranya dijumpai adanya banteng (G1-G6), 30% dijumpai macan tutul (G1, G6 dan G8), 60 % dijumpai ajag (G3-G7 dan G9) serta 90% dijumpai kijang (G1-G9).



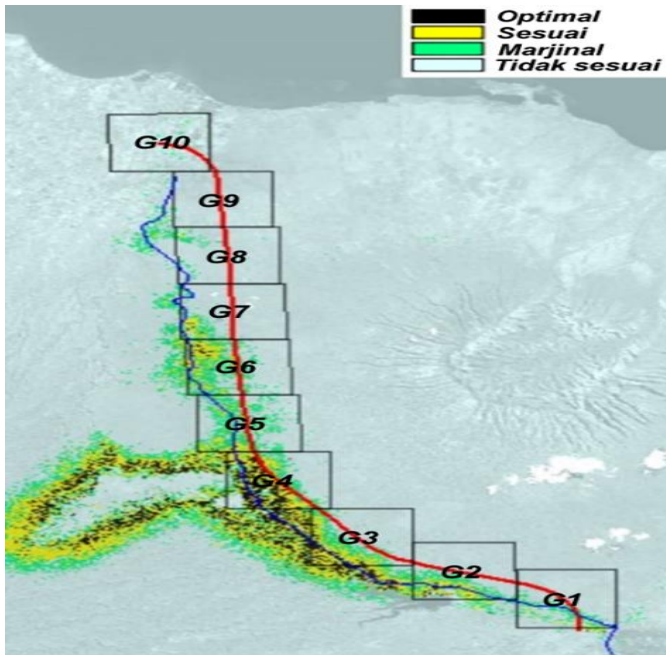
Gambar 9 Peta Sebaran Keberadaan Satwa

Keterangan: *Bos Javanicus* (kuning), *Panthera Pardus* (merah), *Cuon Alpinus Javanicus* (biru) dan *Muntiacus Muntjak* (putih)

Analisis Kualitas Habitat Satwa Liar

Dari Peta Kesesuaian Habitat Banteng (Gambar 10) diketahui bahwa total luas habitat yang cocok adalah 2.669 ha, yang terdiri dari tiga kelas yaitu marginal 1229,66 ha, sesuai 1023 ha, dan optimal 416,18 ha. Persentase luas habitat yang cocok hanya 9,9%, sedangkan sisanya 27686,13 ha merupakan habitat yang tidak sesuai. Dari peta tersebut terlihat bahwa habitat yang cocok berada sangat dekat dengan calon jalan tol. Banteng relatif tidak menggunakan ruang habitat yang dekat dengan klaster pemukiman barat laut, dan sebaliknya, aktif menggunakan ruang antara sumber air Telaga, area sekitar waduk Bajulmati, dan kawasan di luar taman nasional di

sekitar punggungan Amparan yang relatif tidak terganggu.



Gambar 10 Peta Kesesuaian Habitat Banteng

Hasil temuan penggunaan ruang oleh banteng tersebut, konsisten dengan teori, bahwa mamal besar lebih tidak toleran terhadap gangguan manusia, dibanding mamal kecil (Samia et al., 2015). Hasil penelitian tahun 2015-2016 menunjukkan, bahwa banteng tidak menggunakan area yang diokupasi oleh aktivitas penggembalaan liar (Pudyatmoko, 2017). Banteng cenderung menghindari area terganggu secara spasial dan temporal. Di tempat yang terganggu, spesies ini mengubah waktu aktifnya dari siang ke malam hari hingga menjelang pagi. Dengan tujuan menggunakan gelapnya malam sebagai *cover* untuk menutupi tubuhnya.

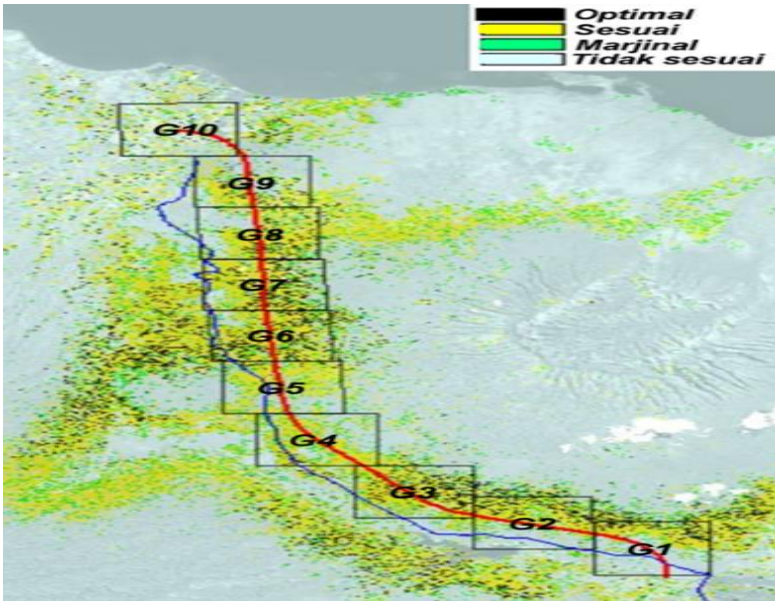
Habitat yang cocok untuk macan tutul adalah seluas 7.108,26 ha, dan

menggunakan areal sekitar calon jalan tol. Dengan perincian 1.609,12 ha merupakan habitat marginal, 4.686,46 ha merupakan habitat sesuai dan 812,68 habitat optimal. Sebaran habitat yang cocok lebih luas daripada banteng (Gambar 12). Meskipun demikian, secara total persentase habitat yang cocok hanya 26% dari keseluruhan luas habitat. Sisanya seluas 23.247,02 ha merupakan habitat yang tidak sesuai. Macan tutul yang berukuran sedang dan memiliki *home range* luas. Satwa ini menyukai hewan mangsa lutung, monyet ekor panjang, kijang dan rusa. Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan macan tutul tidak mendiami habitat yang terganggu oleh penggembalaan liar dan menghindari perjumpaan dengan manusia (Pudyatmoko, 2017).



Gambar 11 Keberadaan Macan Tutul

Keterangan: Macan tutul meminimum sumber air payau di habitat hutan mangrove pesisir timur ketika sumber-sumber air tawar mengering saat puncak musim kemarau bulan Oktober tahun 2015



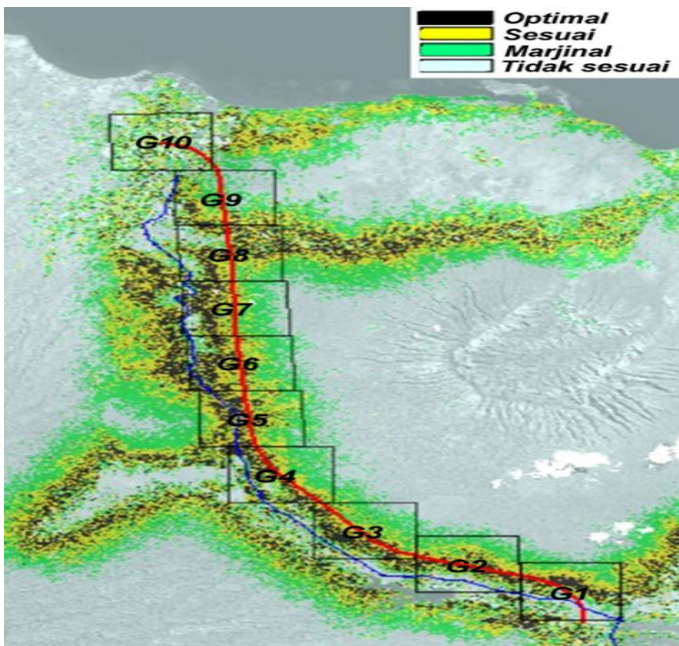
Gambar 12 Peta Kesesuaian Habitat Macan Tutul

Habitat yang cocok untuk ajag adalah yang paling luas apabila dibandingkan dengan satwa-satwa yang lain yaitu seluas 10.441,62 ha (Gambar 14). Habitat optimal dan sesuai berada di sekitar calon jalan tol. Luas habitat dengan klasifikasi optimal juga relatif tinggi yaitu 2.049,31 ha, sedangkan habitat yang sesuai dan marginal masing-masing seluas 4.798,03 ha dan 3594,28 ha. Sebaran habitat yang cocok juga luas dan relatif merata di semua tempat. Meskipun demikian, luas habitat yang tidak cocok masih lebih luas yaitu 19.913,67 ha atau 73,16%. Tingginya penggunaan ruang oleh satwa predator ajag ini, berkaitan dengan aktivitas pemangsaan hewan ternak yang terjadi di beberapa lokasi sisi utara taman nasional. Lokasi tersebut berada di sekitar Bukit Lempuyang di sisi timur, curah Waru dan sekitar Sijile di sisi utara dan area sekitar Bukit Watunumpuk di sisi barat laut. Naluri, ukuran fisik, dan kemampuannya sebagai predator, memudahkannya untuk

beradaptasi pada habitat semi terbuka hingga habitat terbuka dengan kepadatan tumbuhan bawah yang relatif rendah, serta cekungan kontur curah, dapat dimanfaatkan sebagai *cover* (Nurvianto et al., 2015, 2016)

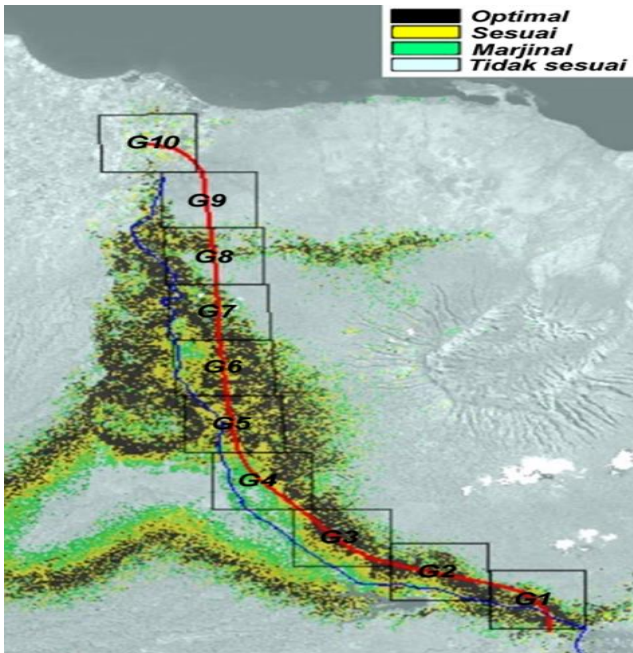


Gambar 13 Ajag Mengintai Mangsa Rusa



Gambar 14 Peta Kesesuaian Habitat Ajag

Hasil pemodelan kelas kesesuaian habitat untuk kijang menunjukkan bahwa habitat yang cocok adalah seluas 7.001,24 ha atau 25,72%, dengan luas habitat yang optimal paling tinggi yaitu seluas 2.705,55 ha disusul dengan habitat yang sesuai seluas 2.464,08 ha dan habitat marginal seluas 1.831,61 ha (Gambar 15). Kijang, sebagai *herbivora*, menggunakan habitat yang lebih beragam dibandingkan rusa dan banteng dengan kemampuannya untuk menjelajah pada lereng-lereng curam. Satwa ini menyukai habitat yang relatif tidak terganggu oleh aktivitas perburuan dan satwa dapat mendiami area penggembalaan ternak (Pudyatmoko, 2017).



Gambar 15 Peta Kesesuaian Habitat Kijang

Hasil penggunaan ruang yang relatif luas oleh satwa-satwa tersebut di atas, tidak jauh berbeda dengan hasil penggunaan ruang dalam sepuluh (10) *grid* seluas 4.000 ha, yang berada di ruang yang

mengikuti transek pada sumbu tengah rencana jalan bebas hambatan, sepanjang 20 km.

Tabel 1 menunjukkan, bahwa satwa dengan nilai rata-rata penggunaan ruang terendah adalah banteng sebesar 978 ha (rata-rata 97,8 ha per *grid* atau 24,4%), kemudian diikuti oleh macan tutul seluas 2.366,8 ha (rata-rata 236,7 ha; 59,2%), kijang 2.537,2 ha (rata-rata 253,7 ha; 63%), dan yang tertinggi adalah ajag 3.222,8 ha (rata-rata 322,3 ha; 80,6%).

Tabel 1 Perbandingan Luas dan Persentase Penggunaan Ruang per *Grid*, Keempat Satwa

	Banteng		Macan		Ajag		Kijang		rerata
	ha	persen	ha	%	ha	%	ha	%	
G1	53,6	13,4%	167,5	41,9%	297,1	74,3%	240,9	60,2%	47,4%
G2	100,3	25,1%	232,5	58,1%	309,0	77,3%	293,2	73,3%	58,4%
G3	153,5	38,4%	303,1	75,8%	340,8	85,2%	346,6	86,7%	71,5%
G4	246,6	61,7%	238,2	59,6%	335,0	83,7%	318,8	79,7%	71,2%
G5	172,9	43,2%	237,1	59,3%	394,4	98,6%	397,1	99,3%	75,1%
G6	172,8	43,2%	331,3	82,8%	365,4	91,4%	384,8	96,2%	78,4%
G7	47,5	11,9%	306,3	76,6%	321,2	80,3%	264,7	66,2%	58,7%
G8	20,1	5,0%	265,3	66,3%	357,9	89,5%	206,9	51,7%	53,1%
G9	1,1	0,3%	168,2	42,1%	263,7	65,9%	27,5	6,9%	28,8%
G10	9,7	2,4%	117,3	29,3%	238,3	59,6%	56,5	14,1%	26,4%
Total	978,0		2366,8		3222,8		2537,2		
Persen	24,4%		59,2%		80,6%		63,4%		
Rerata	97,8		236,7		322,3		253,7		

Dari rata-rata penggunaan ruang habitat tersebut, dapat disimpulkan bahwa habitat sesuai yang digunakan banteng relatif sempit dibandingkan dengan luasan habitat yang tersedia. Tubuhnya yang besar dan bersifat *cryptic* menunjukkan sensitivitasnya pada area yang terganggu oleh manusia.

Tekanan aktivitas manusia dari arah pemukiman klaster barat laut mendesak atau menyusutkan luas habitat banteng, sehingga banteng lebih memilih habitat yang relatif jauh dari gangguan, termasuk

penggunaan ruang habitat di luar batas taman nasional yang dicapai melewati kontur landai punggung Ambaran.

Dari seluruh *grid*, *Grid 6 (G6)* memiliki persentase rata-rata nilai penggunaan ruang tertinggi bagi keempat satwa, dibanding ke-9 *grid* lainnya, yaitu sebesar 78,4 %. Hal itu menunjukkan bahwa ruang habitat *G6* dengan keberadaan sumber air telaga, merupakan ruang habitat *grid* yang paling penting bagi empat satwa di sepanjang rencana jalur jalan bebas hambatan. Selain itu, apabila dievaluasi dari penggunaan ruang oleh banteng sebagai satwa *flagship spesies* di TN Baluran, *Grid 1-6* memiliki persentase tertinggi dalam penggunaan ruang. dari perbandingan nilai rata-rata dalam proporsi luas segmen *grid* yang sama; antara segmen (G1-G5):(G6-G10) = 64,7%:49,1%, menunjukkan bahwa segmen *grid 1* hingga *grid 5*, memiliki perbedaan besar persentase penggunaan ruang yang signifikan, dibanding segmen *grid* yang lebih dekat ke klaster pemukiman.

Bila berdasarkan *grid* tempat perjumpaan banteng (G1-G6), nilai rata-ratanya dijumlahkan, maka akan diketahui besarnya proporsi penggunaan ruang, yaitu sebesar 67%. Hal itu menggambarkan luas area yang digunakan oleh keempat satwa hampir mendekati 70% dari luas total enam *grid* (2.400 ha). Luas proporsi penggunaan habitat tersebut, menunjukkan, bahwa segmen *grid 1* hingga *grid 6*, merupakan segmen ruang habitat yang paling penting bagi keempat satwa, dibanding segmen ruang habitat *grid* lain.

Dari hasil analisis ENFA, dengan luaran berupa peta kesesuaian habitat (Gambar 10, 11, 14, 15), diketahui bahwa keempat satwa fokus menggunakan habitat di sekitar punggung yang

menghubungkan lanskap Gunung Baluran dengan Gunung Ijen. Keberadaan habitat dengan kontur landai dan adanya dua aliran sungai, serta jauh dari jangkauan aktivitas manusia, menjadi daya tarik bagi satwa, termasuk mamalia besar banteng. Temuan ini memverifikasi adanya konektivitas ekologi antar lanskap dalam zona penyangga Cagar Biosfer Belambangan.

Menjaga eksistensi peranan konektivitas ekologi agar tetap terhubung dengan koridor satwa dalam Cagar Biosfer Belambangan, menjadi hal yang penting bagi upaya konservasi dan kelangsungan hidup satwa liar dalam kawasan TN Baluran. Selama 5 tahun terakhir, perubahan habitat satwa liar terus terjadi hingga saat ini, termasuk rencana pembangunan jalan bebas hambatan dan jalur Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) baru. Perubahan habitat akibat kegiatan eradikasi akasia, hilangnya tegakan pohon randu menjadi kebun tebu, perubahan zonasi dari *zona* rimba menjadi zona pemanfaatan, terus mempersempit ruang habitat satwa. Oleh karena itu, keberadaan akses koridor hutan dan konektivitas ekologi yang memungkinkan satwa bergerak sebagai respon atas dinamika perubahan tersebut, menjadi hal yang kritis untuk dipertahankan.

INTEGRASI JALAN TOL DAN KONSERVASI KEANEKARAGAMAN HAYATI

Pola penggunaan lahan yang radikal di Pulau Jawa, hanya menyisakan sedikit sisa-sisa ekosistem alami dataran rendah (Lavigne & Gunnell, 2006). Salah satu penyebabnya adalah laju perubahan penggunaan lahan bagi pembangunan jaringan

transportasi seiring dengan laju ledakan populasi penduduk (BPS-Statistic Indonesia, 2022). Keberadaan jalan baru seringkali menjadi faktor pendorong terjadinya fragmentasi habitat yang tidak terkendali (Noss, 1993; Sanderson et al., 2002).

Jalan dapat sebagai penghalang yang membatasi penyebaran (*dispersal*) organisme, yang berpotensi mengisolasi habitat dan populasi (Riley et al., 2006); meningkatkan kebisingan dan mendegradasi habitat karena efek tepi yang negatif (Reijnen et al., 1996); dan berdampak pada satwa liar melalui kematian langsung (Trombulak & Frissell, 2000).

Pertumbuhan dan kelestarian populasi satwa liar dapat berlangsung apabila konektivitas ekologis mendukung pergerakan proses biotik (pergerakan hewan, perbanyak tanaman, pertukaran genetik) dan proses abiotik (air, energi, bahan) (Ament et al., 2014; Beier et al., 2006). Pergerakan penting bagi kelangsungan hidup jangka panjang populasi satwa liar, termasuk upaya mencari makan, pergerakan musiman, *dispersal*, dan melakukan perkawinan dengan sub populasi yang lain untuk menghindari dampak negatif *inbreeding* (Ament et al., 2014).

Dalam konservasi keanekaragaman hayati dikenal adanya konsep *Minimum Viable Population* (MVP) yaitu ukuran populasi minimum yang harus dipertahankan agar suatu spesies hewan bisa lestari dalam jangka panjang dengan resiko kepunahan yang kecil. Untuk mencapai ukuran minimum populasi tersebut, misalnya 500 individu, maka diperlukan habitat yang utuh dan tidak terganggu dengan luasan tertentu. Apabila luas habitat berkurang, maka individu yang bisa didukung jumlahnya akan lebih sedikit daripada

jumlah minimum yang dipersyaratkan. Pada kondisi ini, resiko terjadinya kepunahan akan meningkat. Dalam kenyataannya, beberapa habitat satwa liar di Indonesia ukurannya lebih kecil daripada luas yang dibutuhkan untuk mendukung MVP. Oleh sebab itu, antar habitat-habitat kecil tersebut harus dijaga konektivitas ekologisnya.

Pembangunan jalan tol sangat berpotensi memutus konektivitas ekologis, baik berupa barrier terhadap pergerakan hewan maupun terganggunya sistem hidrologi alami yang penting sebagai penjamin untuk tersedianya sumber daya bagi satwa liar. Dalam beberapa kejadian, keberadaan dan geometri jalan bahkan memiliki pengaruh signifikan terhadap kelangsungan hidup satwa liar (Lozano, et al., 2020). Rekonsiliasi antara nilai penting tak bernilai (*intangible*) konektivitas ekologi dan konektivitas jalan adalah kolaborasi antara perencana jalan dan ahli ekologi dengan memasukkan masalah keanekaragaman hayati ke dalam desain jalan (Forman et al., 2003; Lesbarreres & Fahrig, 2012; Ree et al., 2015).

Kolaborasi itu diharapkan menghasilkan desain jalan atau lintasan yang ramah lingkungan (*ecopassages*) sesuai dengan tujuan untuk melindungi satwa fokus yang terancam punah, fungsi ekosistem sebagai sistem penyangga kehidupan, dan memperhitungkan karakteristik habitat wilayah yang sensitif secara ekologi (Forman et al., 2003; Lesbarreres & Fahrig, 2012; Ree et al., 2015). Ada hirarki mitigasi yang dapat dilakukan yaitu; (i) menghindari pembangunan di daerah yang sensitif secara ekologis atau jalan dengan volume lalu lintas rendah, (ii) meminimalkan dampak, (iii) mengurangi dampak dan (iv) mengimbangi atau mengkompensasi dampak (Forman et al., 2003; Ree et al., 2015).

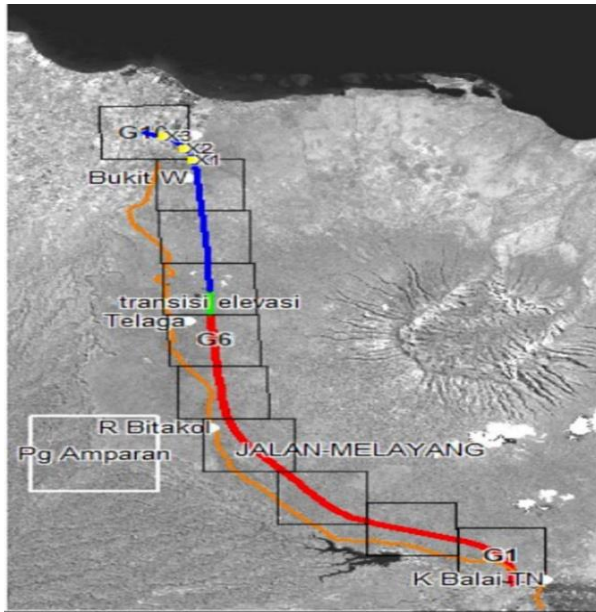
Rekomendasi Geometris dan Elemen Jalan Tol

Dari hasil pembahasan di atas, maka rekomendasi yang berkaitan dengan upaya mitigasi rencana pembangunan jalan bebas hambatan pada rute segmen G1-G10 adalah sebagai berikut:

Pertama, membuat jalan melayang sepanjang $\pm 13,5$ kilometer (ukuran panjang pada bidang datar), di atas ruas segmen *Grid* satu hingga *Grid* enam. Berawal dari sumbu tengah Sungai Bajulmati (G1) dan berakhir di batas G6 daerah Telaga, dengan area transisi elevasi ke jalan melayang, berada pada area sebelum dan sesudah batas ujung tersebut (lihat Gambar 16). Jalan melayang ini untuk mengakomodasi konsentrasi satwa liar yang tinggi pada wilayah tersebut, khususnya pada areal G3 hingga G6.

Kedua, membuat jalan darat sepanjang 6,5 kilometer dari ujung jalan transisi elevasi; G7 hingga G10 dengan tiga '*overpass*' pada persimpangan jalan truk akasia (X_1) (koordinat; S7.77803 E114.31762), jalan jalur penggembalaan sapi (X_2) (koordinat; S7.77429 E114.31612) dan, jalan aspal lalu lintas kendaraan penduduk lokal (X_3) (koordinat; S7.77013 E114.31171).

Ketiga, di kedua sisi jalan dengan desain tidak melayang yang melintas dalam kawasan TN Baluran, dilengkapi pagar kawat setinggi 2,4 m dengan jalinan kawat halus pada bagian bawah, untuk meminimalkan satwa melintas, baik satwa melata, terrestrial dan arboreal, seperti ular, biawak, musang luwak, garangan, monyet ekor panjang, kijang, rusa, ajag, dan satwa lainnya.



Gambar 16 Peta Rekomendasi Jalan Bebas Hambatan Melayang

Keempat, di kedua sisi jalan dengan desain tidak melayang yang melintas dalam kawasan Taman Nasional, dilengkapi dengan penerangan yang cukup bagi pengguna jalan agar dapat menghindari kemungkinan insiden tabrakan dengan satwa liar yang melintas.

Kelima, pemasangan rambu-rambu satwa melintas dan batas kecepatan, termasuk rambu yang memberitahukan kepada pengguna bila berada dalam kawasan konservasi.

Keenam, sistem *drainase* tepi jalan dirancang dalam keadaan tertutup, agar tidak mengundang satwa berkumpul dan memancing satwa untuk melintas.

Ketujuh, pemasangan hidran pada titik-titik tertentu sepanjang jalan untukantisipasi kejadian kebakaran hutan yang akan

membahayakan bagi pengguna jalan dan satwa.

Kedelapan, membuat *underpass* pada setiap curah sesuai dimensi curah/sungai temporer (± 33 curah), untuk menjaga dan memelihara tata kelola air alami sebagai bagian dari jejaring ekologi habitat yang menyediakan sumber daya penting bagi satwa, seperti menjaga ketersediaan pasokan air ke sumber air telaga.

Kesembilan, tidak direkomendasikan membuat ruang *rest area* di sepanjang jalan bebas hambatan dalam kawasan TN Baluran yang dapat mengundang interaksi antara pengguna jalan dengan satwa liar di sekelilingnya, karena akan menimbulkan kerumunan satwa yang berpotensi menimbulkan insiden tabrakan.

Kesepluluh, perlu rencana mitigasi antara pengelola jalan tol dengan pengelola kawasan taman nasional, bila terjadi insiden tabrakan pengguna dengan satwa liar.

Kesebelas, perlu rencana mitigasi sebelum dan sesudah proses pembangunan jalan tol, untuk meminimalkan dampak negatif akibat pembangunan, termasuk rehabilitasi kerusakan tanaman dengan sumber bibit spesies tumbuhan yang tumbuh dalam kawasan.

KESIMPULAN

Evaluasi kuantitatif penggunaan ruang pada wilayah studi kawasan TN Baluran merupakan upaya mitigasi rencana pembangunan jalan bebas hambatan. Studi ini mengidentifikasi penggunaan ruang dalam segmen grid sumbu tengah rencana jalan G1-G10 oleh satwa liar,

dengan data kehadiran empat spesies mamal dan data ekogeografi. Hasil evaluasi studi menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

Pertama, dari hasil perbandingan penggunaan ruang oleh empat spesies satwa diketahui bahwa ketersediaan habitat oleh banteng adalah yang paling sempit, sedangkan untuk ajag paling luas.

Kedua, banteng sebagai *flagship species* (spesies bendera) di TN Baluran merupakan mamal yang paling tidak toleran pada gangguan manusia. Dengan demikian, spesies banteng merupakan spesies yang paling rentan terhadap pembangunan jalan tol.

Ketiga, ruang habitat satwa G6 (*Grid 6*) merupakan habitat paling penting dibandingkan ruang habitat *grid* yang lainnya. Persentase penggunaan ruang oleh satwa memiliki nilai persentase tertinggi; 78,4%. Keberadaan sumber air alami Telaga di G6, menjadi satu-satunya penyedia persediaan air paling penting bagi satwa dalam kawasan TN Baluran di sisi barat selama musim kemarau yang berlangsung antara 7-8 bulan. Ruang habitat ini merupakan lokasi ruang habitat persilangan koridor hutan bagi satwa untuk memfasilitasi pergerakan dari dan ke timur-barat serta utara-selatan, baik bagi spesies karnivor yang memiliki *home range* luas maupun spesies herbivora.

Keempat, Sungai Bajulmati, Sungai Kelokoran dan Sungai Panjaitan merupakan sumber mata air yang penting bagi semua satwa liar sehingga jalur akses satwa liar dari kawasan TN Baluran ke sumber air tersebut tidak boleh terhalang.

Kelima, berdasarkan temuan jejak keberadaan banteng di G1-G10,

diketahui bahwa perbandingan persentase nilai penggunaan ruang habitat oleh banteng dan satwa lainnya pada segmen G1-G6 lebih tinggi dibandingkan segmen G7-G10. Tingginya persentase proporsi luas penggunaan ruang habitat dalam ruas segmen G1-G6, menunjukkan pentingnya keutuhan ruang habitat ruas segmen ini dibandingkan ruang habitat pada ruas segmen lain.

Keenam, penggunaan ruang habitat punggungan Amparan dengan kontur landai yang menghubungkan lanskap Baluran dan lanskap Ijen oleh empat satwa, memverifikasi keberadaan konektivitas ekologi antar lanskap dalam zona inti dan zona penyangga Cagar Biosfer Belambangan. Menjaga keutuhan keterhubungan ruang antara konektivitas ekologi dengan koridor hutan dalam zona-zona tersebut menjadi hal yang paling kritis bagi upaya mitigasi menghadapi kontinuitas dampak perubahan lingkungan akibat kegiatan antropogenik, demi kelangsungan populasi satwa-satwa yang dilindungi oleh undang-undang.

Ketujuh, dalam kasus pembangunan jalan tol di TN Baluran, jalan melayang merupakan solusi untuk mengintegrasikan keanekaragaman hayati dan pembangunan. Jalan melayang tidak akan mengurangi luas habitat yang cocok, tidak menyebabkan fragmentasi habitat, mencegah konsentrasi perburuan dan tidak mengubah sistem hidrologi alami.

DAFTAR PUSTAKA

Alfred, R., Ahmad, A. H., Payne, J., Williams, C., Ambu, L. N., How, P. M., dan Goossens, B. 2012. *Home Range and*

- Ranging Behaviour of Bornean Elephant (Elephas maximus borneensis) Females*. PLoS ONE, 7 (2): 1-12.
- Ament, R., Callahan, R., McClure, M., Reuling, M., dan Tabor, G. 2014. *Wildlife Connectivity: Fundamentals for Conservation Action*. The Center for Large Landscape Conservation. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3958.0561>.
- Andrews, A. 1990. *Fragmentation of Habitat by Roads and Utility Corridors: A Review*. Australian Zoologist, 26 (3-4), 130-141.
- Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT). 2018. *Rencana Pembangunan Jalan Tol Trans Sumatera*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Jakarta.
- Badan Pusat Statistik. 2022. *Statistik Indonesia 2022*. Jakarta.
- Basille, M., Calenge, C., Marboutin, É., Andersen, R. dan Gaillard, J. 2008. *Assessing Habitat Selection Using Multivariate Statistics: Some Refinements of the Ecological-Niche Factor Analysis*. Ecological Modelling, 211 (1-2), 233-240.
- Beier, P., Majka, D., dan Jenness, J. 2006. *Conceptual Steps for Designing Wildlife Corridors*. The Environmental Research, Development and Education for the New Economy (ERDENE). Northern Arizona University, Arizona. Flagstaff, AZ.
- Direktorat Jenderal Konservasi Sumberdaya Alam dan Ekosistem. 2019. *Statistik Direktorat Jenderal Konservasi Sumberdaya Alam dan Ekosistem 2019*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Jakarta.
- Direktorat Jenderal Konservasi Sumberdaya Alam dan Ekosistem. 2020. *Laporan Kinerja 2020 Direktorat Kawasan Konservasi*. Kementerian Lingkungan Hidup dan

Kehutanan. Jakarta.

- European Space Agency (ESA). 2019. *Copernicus: Sentinel Scientific Data Hub*. European Commission. Brussels.
- European Space Agency Spatiale Europeenne. 2015. *SENTINEL-2 User Handbook* (Issue 1). European Commission. Brussels.
- Forman, R.T.T., Sperling, D., Bissonette, J. A., Clevenger, A.P., Cutshall, C.D., Virginia H. Dale, V. H., Fahrig, L., France, R. L., Goldman, C. R., Heanue, K., Jones, J., Swanson, F., Turrentine, T., dan Winter, T. C. 2013. *Road Ecology: Science and Solutions*. Washington, DC: Island Press.
- Gatti, A., Naud, C., dan Castellani, C. 2017. *Sentinel-2 Products Specification Document Sentinel-2*. European Commission. Brussels.
- Guisan, A., Thuiller, W., dan Zimmermann, N. E. 2017. *Habitat Suitability and Distribution Models*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Healey, R. M., Atutubo, J. R., Dikari, M., Howard, L., Page, F., Hallisey, N., dan Karraker, N. E. 2020. *Road Mortality Threatens Endemic Species in a National Park in Sulawesi, Indonesia*. *Global Ecology and Conservation*, 24: 1-10.
- Hirzel, A. H., & Lay, G. Le. 2008. *Habitat Suitability Modelling and Niche Theory*. *Journal of Applied Ecology*, 45: 1372–1381.
- Hirzel, A. H., Hausser, J., & Perrin, N. 2002. *Ecological-Niche Factor Analysis: How to Compute Habitat-Suitability Maps without Absence Data?* *Ecology*, 83 (2): 2027–2036.
- Hutama Karya (Persero), PT. 2020. *Rekapitulasi Progres Jalan Tol Trans Sumatera*. Jakarta
- Immordino, F., Barsanti, M., Candigliota, E., Cocito, S., Delbono, I., dan Peirano, A. 2019. *Application of Sentinel-2 Multispectral Data for Habitat Mapping of Pacific Islands*:

- Palau Republic (Micronesia, Pacific Ocean)*. Journal of Marine Science and Engineering, 7 (9): 1-16.
- Indonesia MAB Programme National Committee. 2019. *Country Report 2018-2019: Management and Development of Biosphere Reserves in Indonesia*. UNESCO. Paris.
- International Finance Corporation. 2012. *Performance Standard 6 Biodiversity Conservation and Sustainable Management of Living Natural Resources*. Washington, DC.
- Johnson, C. D., Evans, D., dan Jones, D. 2017. *Birds and Roads: Reduced Transit for Smaller Species over Roads Within an Urban Environment*. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5: 36.
- Kitchener, D., Brown, T., dan Merrill, R. 2004. *Report on Biodiversity and Tropical Forests in Indonesia*. USAID. Jakarta.
- Kummoo, W., Teampanpong, J., Utsa, P., dan Paansri, P. 2020. *Impact of Highway on Vertebrate Roadkill in Nam Nao National Park, Thailand*. *Biodiversitas*. 21 (11): 5540–5549.
- Laurance, W. F., Goosem, M., dan Laurance, S. G. W. 2009. *Impacts of Roads and Linear Clearings on Tropical Forests*. *Trends in Ecology and Evolution*, 24 (12): 659–669.
- Lavigne, F., dan Gunnell, Y. 2006. *Land Cover Change and Abrupt Environmental Impacts on Javan Volcanoes, Indonesia: a long-term perspective on recent events*. *Regional Environmental Change*, 6 (1-2): 86–100.
- Leito, A., Gerald, R., Bunce, H., dan Ku, M. 2015. *The Potential Impacts of Changes in Ecological Networks, Land Use and Climate on the Eurasian Crane Population in Estonia*. *Landscape Ecology*, 30 (5):1-18.

- Lesbarreres, D., dan Fahrig, L. 2012. *Measures to Reduce Population Fragmentation by Roads: What Has Worked and How Do We Know?* Trends in Ecology and Evolution, 27: 374–380.
- Lozano, J. A. dan Patiño-Siro, D. 2020. *Does the Geometrical Design of Roads Influence Wildlife Roadkills? Evidence from a Highway in Central Andes of Columbia.* European Journal of Ecology, 6 (1): 58-70.
- Man and the Biosphere Program. 2016. *Belambangan Biosphere Reserves, East Java, Indonesia.* UNESCO. Paris.
- Ministry of National Development Planning. 2021. *Public-Private Partnership: Infrastructure Projects Plan in Indonesia 2021.* Jakarta.
- Noon, B. R. 1981. *Techniques for Sampling Avian Habitats.* In Capen D.E. (Ed.), *The Use of Multivariate Statistics in Studies of Wildlife Habitat.* USDA Forest Service. General Technical Report RM-87. Washington, DC.
- Noss, R. 1993. *A Conservation Plan for the Oregon Coast Range: Some Preliminary Suggestions.* Natural Areas Journal, 13: 276-290.
- Nurvianto, S., Eprilurahman, R., Imron, M. A., dan Herzog, S. 2016. *Feeding Habits of Pack Living Dhole (Cuon Alpinus) in a Dry Deciduous Forest of East Java, Indonesia.* Taprobanica, The Journal of Asian Biodiversity, 8 (1): 10-20.
- Nurvianto, S., Imron, M. A., & Herzog, S. 2015. *The Influence of Anthropogenic Activities and Availability of Prey on the Distribution of Dholes in a Dry Deciduous Forest of East Java, Indonesia.* Asian Journal of Conservation Biology, 4 (1): 26–36.
- Nyhus, P. J., & Tilson, R. 2004. *Characterizing Human-Tiger*

- Conflict in Sumatra, Indonesia: Implications for Conservation*. Oryx, 38 (1): 68-74.
- Pudyatmoko, S. 2017. *Free Range Livestock Influence Species Richness, Occupancy, and Daily Behaviour of Wild Mammalian Species in Baluran National Park, Indonesia*. Mammalian Biology, 86: 33-41.
- Pudyatmoko, S., Budiman, A., dan Kristiansen, S. 2018. *Towards Sustainable Coexistence: People and Wild Mammals in Baluran National Park, Indonesia*. Forest Policy and Economics, 90: 151–159.
- Ree, R. vander, Smith, D. J., dan Grilo, C. 2015. *Handbook of Road Ecology*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
- Reijnen, R., Foppen, R., dan Meeuwssen, H. 1996. *The Effects of Traffic on The Density of Breeding Birds in Dutch Agricultural Grasslands*. Biological Conservation, 75 (95): 255–260.
- Riley, S. P. D., Polinger, J. P., Sauvajot, R. M., York, E. C., Bromley, C., Fuller, T. K., dan Wayne, R. K. 2006. *A Southern California Freeway Is a Physical and Social Barrier to Gene Flow in Carnivores*. Molecular Ecology, 15 (7):1733-1741.
- Samia, D. S. M., Nakagawa, S., Nomura, F., Rangel, T. F., dan Blumstein, D. T. 2015. *Increased Tolerance to Humans Among Disturbed Wildlife*. Nature Communications, 6: 8877.
- Sarie, F., Bisri, M., Wicaksono, A., dan Effendi, R. 2015. *Types of Road Pavement Damage for Road on Peatland, A Study Case in Palangkaraya, Central Kalimantan, Indonesia*. Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology, 9 (12): 53–59.

- Spellerberg, I. F. 2002. *Ecological Effects of Roads*. Enfield, NH: Science Publishers.
- Thorburn, C., Thorburn, C. C., dan Kull, C. A. 2014. *Peatlands and Plantations in Sumatra, Indonesia: Complex Realities for Resource Governance, Rural Development, and Climate Change Mitigation*. *Asia Pacific Viewpoint*, 56 (1): 153-168.
- Whitten, T., Soeriaatmadja, R.E dan Afiff, S.A. 1996. *The Ecology of Java and Bali*. Hongkong: Periplus Editions, Limited.



KAJIAN KRITIS PENGEMBANGAN JALAN TOL DI INDONESIA

Pengelolaan Aspek Teknis dalam Perancangan dan Pembangunan Jalan Tol

ASPEK LANSKAP PADA PERTEMUAN DUA RUAS JALAN TOL

Herfa Memori, Nizar Nasrullah, dan Ahmad Arifin Hadi

Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor

PENDAHULUAN

Infrastruktur jalan sangat penting untuk mendukung kehidupan masyarakat dalam hal peningkatan aksesibilitas menuju destinasi perjalanan. Para produsen ingin mendapatkan *input* bahan baku dengan tepat waktu dan dengan mudah mendistribusikan produknya ke pusat-pusat distribusi. Dengan demikian infrastruktur jalan yang cukup dari segi *network* dan dari segi kuantitas menjadi tantangan untuk setiap wilayah.

Beriringan dengan perkembangan wilayah yang ditandai dengan perkembangan volume kendaraan, kemacetan di jalan raya menjadi hal yang umum ditemukan di kota-kota besar. Merespon kebutuhan untuk mobilitas yang cepat, terhindar dari kemacetan, maka kemudian dikembangkan jalan tol, di samping jalan umum tipe arteri, kolektor, lokal, dan jalan lingkungan. Kenyataannya kemacetan masih terjadi walaupun di jalan tol. Ini tidak lain disebabkan oleh volume kendaraan yang sangat tinggi.

Melihat kemacetan yang masih terjadi, penambahan jalan baru termasuk jalan tol terus dilakukan. Kecenderungan lainnya karena keterbatasan lahan baru untuk penambahan jalan, maka sudah menjadi pemandangan yang mencolok di perkotaan, jalan tol tipe

elevated dibangun pada *right of way* (ROW) jalan eksisting.

Jalan tol ditandai dengan dimensi dan spesifikasi badan jalan untuk kecepatan kendaraan yang tinggi dan ditandai dengan pembatasan jalan masuk (*on-ramp*) serta pembatasan jalan keluar (*off-ramp*) dari jalur utama jalan tol. Salah satu yang menjadi *landmark* pada jalan tol adalah simpang susun atau *interchange*. Pada simpang tidak sebidang ini menjadi *node* persilangan antara jalan tol dengan jalan tol atau jalan tol dengan jalan umum, sehingga pada *node* ini volume kendaraan menjadi sangat tinggi.

Volume kendaraan yang tinggi di jalan tol menjadi akar dari permasalahan lingkungan. Emisi gas buang dari semua kendaraan pada jalan tol menyebar ke lingkungan sekitar jalan. Hal tersebut berkontribusi terhadap level polusi udara secara mikro di sekitar jalan dan secara makro terhadap wilayah. Bising dari alat transportasi dari jalan tol kerap menjadi keluhan warga yang berdiam di sekitar jalan tol. Sementara itu pengembangan jalan tol *elevated* yang kerap dibangun pada ROW jalan eksisting berdampak negatif terhadap kualitas visual lanskap kota.

Permasalahan lingkungan yang ditimbulkan oleh karena kehadiran jalan sebenarnya bukanlah masalah apabila *land use* di sekitar jalan tol bukan merupakan pemukiman atau bisnis dan komersial atau fasilitas pelayanan umum. Jalan tol yang melintas pada *land use* kawasan pertanian bahkan memberi sajian visual yang menarik bagi pengguna jalan tol. Kenyataannya tidak dapat dihindari pengembangan jalan tol justru dilakukan melintasi pemukiman atau bisnis dan komersial.

Konstruksi dan geometri jalan tol didesain dengan memberi prioritas agar pengguna jalan dapat melintas dengan kecepatan tinggi sesuai yang batas izin kecepatan. Tidak kalah penting dari faktor teknis tersebut adalah pertimbangan keselamatan pengguna yang menjadi prioritas utama. Walaupun demikian, kecelakaan pada jalan tol masih terjadi. Beragam faktor menyebabkan kecelakaan di jalan tol dan faktor kesalahan/*error* dari pengemudi menjadi salah satu penyebab penting. Faktor pengemudi mengantuk dan letih menjadi penyebab utama kecelakaan di jalan tol (Komisi Nasional Keselamatan Transportasi/KNKT, 2021). Suasana monoton pada lanskap jalan tol patut diduga menimbulkan kebosanan, sehingga pengemudi menjadi mengantuk dan mengalami pengurangan kesadaran.

Di samping kecelakaan pengguna jalan tol, masih sering terjadi jalan ditutup karena faktor alam. Hujan yang ekstrim menyebabkan tanah longsor dari tebing yang berbatasan dengan ROW. Sejumlah masalah yang diuraikan menjadi tantangan untuk menyiapkan mitigasi dari sejak tahapan desain sampai pada tahap pengoperasian agar tujuan ideal penyediaan jalan tol dapat dicapai.

Jalur hijau jalan merupakan elemen lanskap jalan yang penting karena secara langsung berkontribusi pada sisi kelancaran dan keselamatan pengguna jalan. Walaupun demikian, jalur hijau belum dijadikan sebagai kelengkapan jalan tol. Pada Undang-Undang Nomor 2 tahun 2022 tentang Perubahan Kedua atas Undang-Undang Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan, Peraturan Pemerintah Nomor 34 tahun 2006 tentang Jalan dan Peraturan Pemerintah Nomor 15 tahun 2005 tentang Jalan Tol, elemen vegetasi masih belum tercantum dengan jelas sebagai persyaratan jalan tol, karena status

jalur hijau jalan masih dipandang bukan kelengkapan jalan yang mutlak disediakan pada jalan tol. ROW yang ditempati jalur hijau secara formal masih dipandang sebagai ruang cadangan untuk pelebaran jalan di kemudian hari. Karena itu, seringkali jalur hijau yang sudah *established* ditebang untuk pelebaran ruang manfaat jalan atau untuk dijadikan jalur moda transportasi lain, misalnya untuk untuk kebutuhan *Light Rail Transit* (LRT).

Jalur hijau jalan sebagai elemen lanskap jalan menjadi komponen penting dari sistem Ruang Terbuka Hijau (RTH) kota yang dilintasi jalan tol. Peranannya menjadi penting karena *coverage* vegetasinya yang luas serta distribusinya yang menyebar luas mengikuti jaringan jalan. Terdapat beragam bentuk topografi atau profil jalan di luar ruang manfaat jalan, yaitu topografi datar, lereng atau lembah di kanan kiri jalan. Selain itu dari tipe yang telah disebutkan, terdapat tipe kanal atau *retaining wall* tegak di sisi jalan serta tipe terowongan pada segmen tertentu dari jalan tol. Bagaimanapun bentuk topografi lahan di sisi jalan, terdapat sisa ROW yang tidak terbangun, oleh karena itu pada sisa ROW berpotensi dikembangkan sebagai jalur hijau jalan.

Pada *interchange*, konstruksi jalan yang terdiri atas beberapa jalan berbentuk *curve* dan *loop* menyisakan lahan tidak terbangun yang luas, sehingga lahan terbuka ini berpotensi dikembangkan sebagai jalur hijau yang memperkuat karakter lanskap *interchange* sebagai *landmark* kota.

Sehubungan dengan sejumlah permasalahan lingkungan yang muncul menyertai pengembangan jalan tol, maka tulisan ini bertujuan untuk membahas konsep jalur hijau sebagai komponen

lanskap jalan tol. Konsep jalur hijau jalan ini tidak hanya fokus pada bagaimana jalur hijau jalan akan mendukung kelancaran dan keselamatan lalu lintas, tetapi juga memberi sajian keindahan jalan dan berfungsi dalam mengurangi dampak jalan tol terhadap area di sekitar jalan serta berkontribusi dalam menjaga kualitas lingkungan wilayah.

Untuk itu dalam tulisan ini sebagai studi kasus akan dibahas jalur hijau pada *interchange* Cimanggis yang merupakan *node* yang menghubungkan Jalan Tol Jagorawi dan Jalan Tol Cijago. Segmen *interchange* dipilih karena dilewati oleh volume kendaraan yang tinggi sehingga emisi polutan relatif banyak tersebar ke lingkungan sekitar *interchange*. Selain itu pada *interchange* terdapat beragam bentuk geometrik jalan yang mencakup jalan berbentuk lurus, *curve*, *loop*, bahkan terdapat jalan tipe *elevated* dan terowongan. Konsep penataan jalur hijau pada *interchange* ini akan mewakili penataan tipe-tipe jalan lainnya dalam mewujudkan jalur hijau jalan yang berkontribusi dalam memberi kelancaran, keselamatan dan memberi sajian keindahan bagi pengguna jalan tol. Selain itu yang tak kalah penting dari jalur hijau jalan ini adalah fungsinya untuk mengurangi dampak lingkungan akibat volume kendaraan yang tinggi terhadap lingkungan sekitar *interchange*.

TINJAUAN PUSTAKA

Vegetasi pada jalur hijau jalan merupakan komponen RTH pada suatu wilayah yang memberi peranan penting dalam menyangga kehidupan. Secara garis besar fungsi vegetasi RTH pada perkotaan mencakup fungsi sebagai berikut: 1) ameliorasi unsur iklim, 2)

rekayasa kualitas lingkungan fisik, 3) penggunaan yang bersifat arsitektural atau penggunaan sebagai elemen pembentuk ruang di *outdoor*, dan 4) untuk memberi estetika yang menarik dalam lanskap termasuk lanskap jalan (Grey and Deneke, 1978).

Penggunaan elemen lanskap pada setiap tapak berorientasi pada manfaat bagi pengguna. Pada jalan tol, tajuk vegetasi tipe pohon tidak memberi naungan langsung pada Ruang Manfaat Jalan tol pada umumnya, tetapi dapat secara efektif memberi naungan pada *rest area* atau pada sebagian segmen *interchange*. Demikian pula jalur hijau yang memisahkan antara jalan tol dan jalan umum yang berdampingan dengan jalan tol dapat memberi kenyamanan termal pada sisi pedestrian jalan umum. RTH jalan memberi kenyamanan dengan menurunkan suhu udara melalui *cooling effect* (Effendy dan Afrihatmoko, 2014).

Tata letak pohon dan jenis *land use* tempat pohon berada mempengaruhi suhu udara. Dalam hal ini RTH berbentuk garis pada jalur hijau jalan pada siang hari lebih efektif menurunkan suhu dibanding RTH berbentuk titik pada pohon tunggal dan jauh lebih efektif dibanding pada area terbangun (Effendy dan Afrihatmoko, 2014). Sebagai penayang lebar, naungan menjadi pertimbangan pemilihan pohon penayang sehingga tajuk pohon bentuk tajuk bulat (*rounded*), kubah (*dome*), dan melebar (*spread*) digunakan sebagai tanaman penayang.

Thermal Humidity Index sebagai indeks yang menunjukkan kenyamanan thermal dipengaruhi oleh LAI (*Leaf Area Index*). Kenyamanan *thermal* pada kanopi dengan LAI 1,68-4,53 berbeda nyata dengan area tanpa kanopi, tetapi LAI yang lebih rendah 0,96-1,36 tidak berbeda secara signifikan dengan area tanpa kanopi

(Effendy dan Afrihatmoko, 2014). Bentuk tajuk dan jenis alas berpengaruh terhadap suhu dan kelembaban, suhu terendah diperoleh di bawah tajuk bulat dibandingkan dengan bentuk tajuk kubah dan kolumnar, sedang pada tutupan permukaan rumput suhu lebih rendah dibanding permukaan perkerasan (Femi, Budiarti, Nasrullah 2014). Selain itu didapatkan korelasi antara LAI dengan suhu udara pada jarak tertentu dari batang. Dengan penambahan jarak dari pohon maka suhu akan meningkat namun kelembaban berkurang (Nasution, 2019).

Tata letak menentukan efek pohon terhadap pengontrolan suhu udara. Pohon tinggi, besar dan tajuk *overlapping* merupakan bentuk jalur hijau terbaik dalam mengurangi level PET (*Physically Equivalent Temperature*) (Sabrin *et.al*, 2021). Jenis bangunan di sekitar jalan turut mempengaruhi *cooling rate* dari tajuk pohon di jalan. Pada area perumahan dan *mixed-used*, pohon jalan memberi kenyamanan lebih baik dibandingkan dengan pada area komersial.

Bising merupakan salah satu masalah yang ditemukan di sekitar jalan sehingga pemanfaatan jalur hijau jalan sebagai *noise barrier* berpotensi digunakan. Pengukuran di Jalan Metro Pondok Indah Jakarta pada jarak 61 m dari jalan, pada area bervegetasi yang didominasi pohon sengon yang ditanam berlapis dengan tebal tajuk 20 m terukur bising 56,3-59,4 dBA sedang pada area tanpa vegetasi level bising 77,3-79,4 dBA, sehingga vegetasi dapat mengurangi 20-21 dBA (Kemala, 2013). Pada penelitian lain, pohon jalur hijau jalan trembesi dapat mengurangi bising 7,3-16 dBA, Angsana 7,2-13,3 dB, mahoni 5,2-13,5 dB, kalijawa (*Lannea coromandelica*) mengurangi 6,3-11,9 dB (Hamidun, Baderan, Malle, 2021). Sementara itu pada *vegetative barrier* dengan kerimbunan sedang sampai padat,

dapat mengurangi bising 9-11 dB, tingkat kerimbunan menentukan tingkat pengurangan bising dari transportasi. Disebutkan ketebalan 10 m jalur hijau merupakan *threshold* dari efektivitas *barrier* dalam mengurangi bising, sedang ketebalan *barrier* 5 m merupakan ketebalan ideal untuk pengurangan bising (Ow and Gosh, 2017). Selain itu dari hasil penelitian menggunakan kuesioner dan *electroencephalogram* (EEG), dilaporkan tanaman lanskap secara psikologis memberi kesan pengurangan bising (*psychological noise reduction*) (Yan, Bao & Zhu, 2011). Jarak antara tanaman dan sumber bising menentukan efektivitas tanaman mengurangi bising. Bila jarak tersebut diperpendek, maka efektivitas pengurangan bising akan meningkat (Akay and Onder, 2022).

Selain polusi bising, polusi udara yang dilepas oleh kendaraan dari jalan memberi dampak terhadap lingkungan sekitar jalan dan wilayah yang lebih luas. Jalur hijau jalan sebagai komponen lanskap jalan berpotensi digunakan untuk mengurangi polusi udara. Vegetasi jalur hijau jalan mengurangi sebaran polutan dengan 5 mekanisme. Polutan partikel dikurangi oleh tanaman dengan proses (1) penyerapan dan (2) deposisi partikel oleh permukaan daun dan bagian permukaan tanaman lainnya, sedang polutan gas dapat diserap tanaman melalui stomata daun (3), dan (4) mendorong aliran difusi polutan ke atmosfer luas dengan pengaliran emisi polutan ke atas tajuk tanaman jalur hijau jalan.

Efektivitas tanaman menyerap polutan partikel ditentukan morfologi permukaan daun. Tanaman *conifer* yang berdaun jarum atau berdaun kasar, atau daun lebar yang memiliki trikoma (bulu halus) dan daun kasar memiliki serapan lebih tinggi dibanding daun dengan permukaan tidak kasar. Sementara itu tanaman yang tergolong tinggi

dalam serapan gas NO_2 memiliki nilai tinggi dalam konduktans stomata, fotosintesis dan laju evapotranspirasi. Selain itu serapan yang lebih tinggi didapatkan pada tanaman yang berdaun tipis, dan memiliki berat jenis daun yang rendah (Patra, 2002). Demikian pula tanaman yang memiliki kepadatan stomata dan ukuran stoma yang besar menunjukkan serapan gas NO_2 yang lebih tinggi. Difusi polutan dari jalan raya yang mengalir ke jalur hijau terhambat oleh vegetasi jalur hijau karena massa daun yang rapat dari jalur hijau jalan membelokkan aliran udara ke puncak tanaman yang menyebabkan pencampuran polutan dengan udara yang lebih luas sehingga konsentrasi polutan yang mengalir ke sekitar menjadi terencerkan. Konsentrasi polutan yang menyebar ke lingkungan sekitar jalan menurun sesuai pertambahan jarak dari jalan. Namun demikian jalur hijau jalan berperan penting mengurangi konsentrasi polutan di sekitar jalan. Vegetasi jalur hijau jalan mengurangi konsentrasi polutan SPM pada jarak 10-70 m dari jalan sebesar 24,3 – 37,9% (Nasrullah, Tatsumoto, Misawa 1994a).

Sementara itu sebaran polutan gas NO_2 dari jarak 5 m sampai 150 m dari jalan, vegetasi mengurangi konsentrasi gas NO_2 sebesar 11,1-17,0% (Nasrullah, Tatsumoto, Misawa, 1994b), sedang konsentrasi sudah menurun 17 % pada jarak 10 m dari jalan. Melihat sebaran polutan gas CO, jalur hijau jalan mengurangi 8.5% konsentrasi dibanding segmen jalan tanpa jalur hijau jalan (Nur Izzah, Nasrullah, Sulistyantara, 2019). Sementara itu, diketahui faktor kerapatan tajuk mempengaruhi kapasitas tanaman menurunkan konsentrasi gas NO_2 di sekitar jalan. Tanaman dengan tajuk yang rapat paling banyak menurunkan konsentrasi gas NO_2 di sekitar jalan (Desyana, Sulistyantara, Nasrullah, 2017). Selain itu tanaman *Cupressus sempervirens* dengan tajuk kontinyu bersinggungan dalam barisan

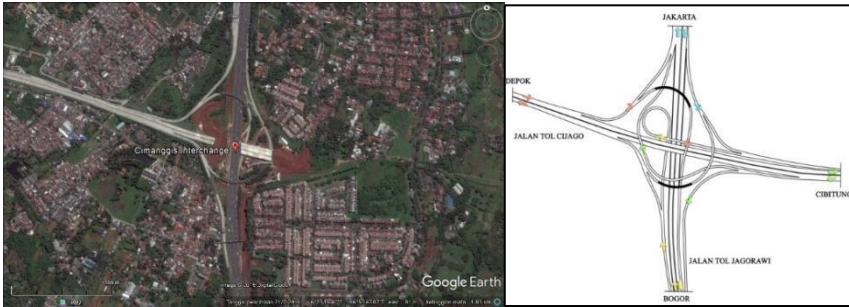
pohon tanpa celah efektif menurunkan konsentrasi PM_{2.5} sampai 17% yang membuat konsentrasi sama dengan konsentrasi *background* (Ozdemir, 2019).

Desain penanaman pada jalur hijau jalan sebagai elemen lanskap jalan selayaknya berkontribusi dalam meningkatkan kualitas visual jalan tol. Oleh karena itu, elemen desain yang ditampilkan oleh jalur hijau seperti warna daun, warna bunga, atau bentuk tajuk dapat diapresiasi oleh pengguna jalan yang bergerak cepat. Satu jenis elemen lanskap akan dikenali apabila dipandang minimal 1,1 detik (Harris and Dines, 1998). Oleh karena itu penyajian satu jenis tanaman yang menampilkan daun atau bunga menarik paling tidak ditanam dengan panjang barisan setara dengan paling kurang 1,1 detik perjalanan dengan kecepatan maksimum yang diperkenankan di jalan tol. Dengan demikian penanaman satu jenis secara massal dalam barisan yang panjang akan lebih mudah diapresiasi oleh pengguna jalan tol.

PERENCANAAN JALUR HIJAU PADA LANSKAP SIMPANG SUSUN CIMANGGIS

Lokasi dan *Land Use* Sekitar

Simpang Susun Cimanggis terletak di Kota Depok, Jawa Barat dengan batas geografis 6°23'13.4" lintang selatan dan 106°53'44.1" bujur timur. Simpang susun ini dikelola oleh PT Translingkar Kita Jaya sejak tahun 2012 yang berfungsi untuk menghubungkan Jalan Tol Cinere dengan Jalan Tol Jagorawi sepanjang 2,2 km. Peta lokasi *interchange* Cimanggis disajikan dalam Gambar 1 berikut:



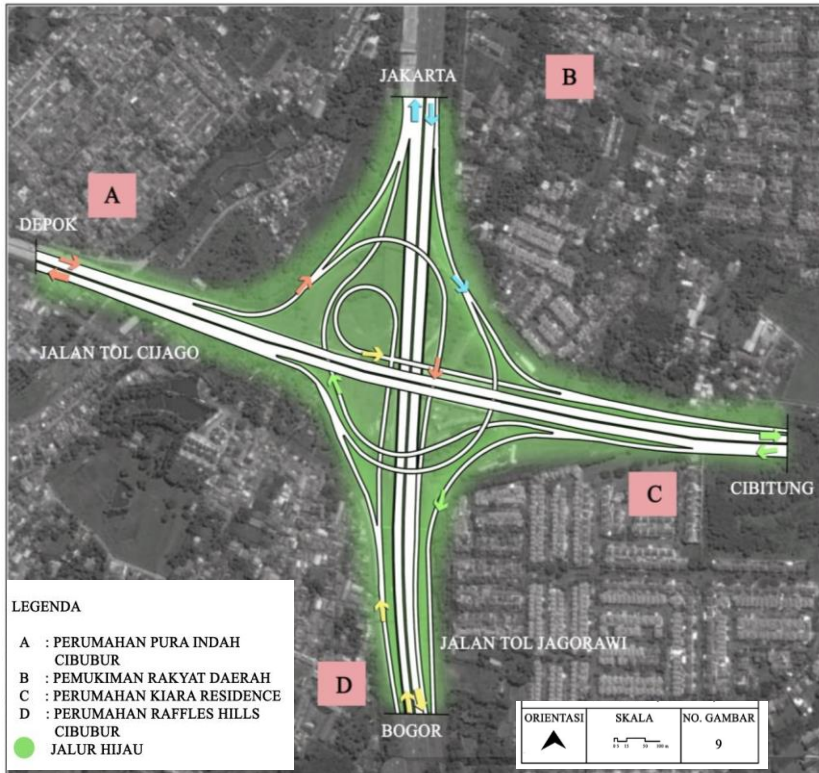
Gambar 1 Peta Lokasi *Interchange* Cimanggis

Simpang Susun Cimanggis dapat ditempuh melalui empat ruas jalan tol, yaitu ruas Jalan Tol Jagorawi dari arah selatan, ruas Jalan Tol Cibubur dari arah utara, ruas Jalan Tol Cijago dari arah barat dan ruas Jalan Tol Cibitung dari arah timur. Kawasan Simpang Susun Cimanggis berbatasan langsung dengan pemukiman warga. Simpang Susun Cimanggis bagian barat berbatasan dengan Perumahan Pura Indah Cibubur, bagian timur berbatasan dengan Perumahan Kiara Residence, bagian selatan berbatasan dengan Perumahan Raffles Hills Cibubur, dan bagian utara berbatasan dengan pemukiman milik pemerintah daerah. Simpang Susun Cimanggis dapat ditempuh melalui empat ruas jalan tol, yaitu ruas Jalan Tol Jagorawi dari arah selatan, ruas Jalan Tol Cibubur dari arah utara, ruas Jalan Tol Cijago dari arah barat dan ruas Jalan Tol Cibitung dari arah timur (Gambar 2).

Tanah dan Topografi

Berdasarkan hasil penelitian Nofalina 2010, kawasan Simpang Susun Cimanggis memiliki jenis tanah asosiasi latosol merah dengan latosol coklat kemerahan. Tanah yang dominan berwarna merah terdapat di tepi jalan tol menuju Simpang Susun Cimanggis dari arah

Jalan Tol Cijago, tepatnya pada daerah dengan kemiringan tinggi. Kondisi tersebut masih bisa ditoleransi untuk penanaman tanaman jalur hijau karena pemilihan jenis tanaman jalur hijau tidak berorientasi pada hasil seperti tanaman berbuah. Lokasi Simpang Susun Cimanggis berada di ketinggian ± 115 meter di atas permukaan laut dengan kemiringan landai sampai agak curam. Lereng agak curam terdapat pada sisi jalan dari Jalan Tol Cijago menuju Simpang Susun Cimanggis. Hal ini bukan terbentuk secara alami namun hasil modifikasi tapak untuk memenuhi persyaratan konstruksi jalan khususnya untuk konstruksi jalan pada simpang susun yang berbatasan langsung dengan pemukiman.



Gambar 2 Peta Kondisi Awal

Iklm

Kawasan Simpang Susun Cimanggis memiliki suhu udara rata-rata sebesar 27,8°C dengan suhu udara rata-rata tertinggi sebesar 28,5°C. Suhu ini masih termasuk ke dalam suhu yang mendukung kenyamanan relatif manusia pada kawasan tropis menurut Laurie (1985) yaitu 27-28°C. Tanaman tropis dataran rendah masih toleran pada *range* suhu ini. Curah hujan rata-rata pada kawasan ini bernilai 297 mm/bulan dengan curah hujan tertinggi 394 mm dan curah hujan terendah sebesar 182 mm. Kelembaban rata-rata pada simpang susun ini adalah 81,45%. Persentase ini berada di atas rata-rata nyaman untuk manusia menurut Laurie (1985) yaitu 40-75%.

Kawasan Simpang Susun Cimanggis memiliki rata-rata kecepatan angin 3,15 km/jam dengan arah angin ke utara. Berdasarkan Aji dan Cahyadi (2015), kecepatan angin pada Simpang Susun Cimanggis termasuk ke dalam skala kelas 2 (sedikit hembusan) yaitu 0,3-1,5 m/s dalam skala Beaufort. Bagi pengguna jalan dan tanaman pada Simpang Susun Cimanggis, kecepatan angin ini tidak membahayakan, namun tetap mampu mendistribusikan polutan dari satu titik ke titik lain. Pergerakan angin juga akan dipengaruhi oleh laju kendaraan pada badan jalan. Arah angin juga mempengaruhi arah penyebaran polusi dari kendaraan di jalan tol menuju arah utara menjadi lebih dominan.

Bentuk dan Konstruksi Simpang Susun

Simpang Susun Cimanggis memiliki bentuk *partial cloverleaf* berdasarkan klasifikasi Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat tahun 2012. *Partial cloverleaf* adalah bentuk

simpang susun dari kelompok *cloverleaf* yang hanya sebagian bentuknya mengadopsi bentukan *cloverleaf* atau daun semanggi. Pada Simpang Susun Cimanggis terdapat satu bagian simpangan yang membentuk daun semanggi. Pada simpang susun ini, panjang jalan ruas Jalan Tol Jagorawi adalah 920,53 m sedangkan panjang jalan ruas Jalan Tol Cijago sebesar 1.237,19 m sehingga panjang total jalan Simpang Susun Cimanggis adalah 2,2 km. Pada bagian *cloverleaf* terdapat jalan yang merupakan *elevated road* yang memiliki ketinggian ± 9 meter dari jalan di bawahnya sehingga tanaman yang berada di jalur hijau sisi jalan tetap dapat berfungsi.

Tutupan Lahan

Penutup lahan pada kawasan Simpang Susun Cimanggis terdiri dari ruang terbangun dan ruang terbuka. Lahan terbangun terdiri dari dua jenis, yaitu pemukiman yang berbatasan langsung dengan tapak dan perkerasan pada jalan Simpang Susun Cimanggis. Bagian ruang terbuka terdiri dari jalur hijau yang berada di tepi jalan tol dan pada bagian *loop* simpang susun.

Kondisi Visual

Kondisi visual pada lanskap Simpang Susun Cimanggis dapat dikatakan tidak semuanya baik. Hal ini karena adanya bagian sisi jalan tol dari ruas Jalan Tol Cijago menuju Simpang Susun Cimanggis yang memiliki lereng agak curam ditutupi *pavement*. Selain *bad view*, terdapat *good view* pada simpang susun Cimanggis yaitu *borrowed landscape* berupa Gunung Salak yang dapat dilihat dari arah ruas Jalan Tol Jagorawi (dari Jakarta ke arah Bogor).

Volume Kendaraan

Berdasarkan data dari PT Translingkar Kita Jaya dan PT Jasa Marga cabang Jagorawi, pada tahun 2016 volume lalu lintas harian Simpang Susun Cimanggis sebesar 117.519 kendaraan. Kendaraan yang melintas di jalan tol terdiri dari 5 golongan, yaitu golongan I terdiri dari jenis kendaraan sedan, jip, *pick up*/truk kecil, dan bus, golongan II terdiri dari jenis kendaraan truk dengan 2 gandar, golongan III terdiri dari jenis kendaraan truk dengan 3 gandar, golongan IV terdiri dari jenis kendaraan truk dengan 4 gandar, dan golongan V terdiri dari jenis kendaraan truk dengan 5 gandar (Keputusan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 370/KPT/M/2007).

Kendaraan golongan I berbahan bakar bensin sedangkan kendaraan golongan II sampai golongan V berbahan bakar solar. Jumlah dan jenis kendaraan berdasarkan golongan kendaraan dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1 Volume Lalu Lintas Harian Jalan Tol Berdasarkan Golongan Kendaraan

Ruas Jalan Tol	Tahun	Golongan				
		I	II	III	IV	V
Cijago	2016	37.478	1.131	332	104	41
	2017	37.880	1.144	377	115	43
Jagorawi	2016	69.235	6.051	2.168	566	413
	2017	65.799	6.030	2.264	568	428
Jumlah Rata-Rata Kendaraan per Hari berdasarkan Jenis Bahan Bakar		52.598		1.360		

Sumber: PT Translingkar Kita Jaya dan PT Jasa Marga Cabang Jagorawi (2017)

Emisi Kendaraan

Setiap kendaraan menghasilkan nilai emisi yang berbeda sesuai dengan jenis bahan bakar yang digunakan. Perhitungan emisi

berdasarkan bahan bakarnya dijelaskan pada Tabel 2. Ada pun perhitungan dilakukan dengan mengalikan rata-rata emisi yang dihasilkan setiap kendaraan berdasarkan jenis bahan bakarnya dengan jumlah kendaraan harian dan panjang jalan yang dilalui. Total emisi per hari yang dihasilkan adalah 8.005.698 gram.

Tabel 2 Perhitungan Emisi

Jenis Emisi	Rata-rata Emisi (g/km)	Bensin		Solar		Total per Jenis Emisi (g)	Total Emisi (g)
		Rata-rata Kendaraan per Hari	Emisi (g/km)	Rata-rata Emisi (g/km)	Rata-rata Kendaraan per Hari		
SO ₂	0,17		19.672	0,47		21.078	
CO ₂	60		6.942.936	2,57		6.950.625	
NO ₂	2,2	52.598	254.574	1,02	1.360	257.626	8.005.698
HC	5,9		682.722	2,07		688.915	
Debu	0,22		25.457	1,28		29.287	
PB	0,49		56.701	0,49		58.167	

Keterangan: panjang jalan 2,2 km

Sumber: Strauss dan Mainwaring (1984) dalam Sulistijorini (2009)

Vegetasi Jalur Hijau Eksisting

Vegetasi eksisting pada jalur hijau Simpang Susun Cimanggis ditanam pada bagian sisi jalan, median jalan, dan *loop*. Terdapat vegetasi berbaris dan vegetasi berkelompok. Vegetasi berbaris dominan pada simpang susun ini berada pada sisi jalan dan median jalan. Sementara itu vegetasi berkelompok berada pada *loop* simpang susun.

Vegetasi pada jalur hijau Simpang Susun Cimanggis dapat dikelompokkan menjadi empat kelompok, yaitu pohon, perdu, semak, dan rumput. Pada bagian jalan utama, pohon yang dominan adalah pohon sukun (*Artocarpus altilis* (Parkinson)), pohon bunga

kupu-kupu (*Bauhinia purpurea* L.), dan pohon dadap merah (*Erythrina christa-galli* L.). Tanaman pada bagian median jalan terdiri dari pohon kecil berupa palem putri (*Veitchia merrillii* (Becc.)), perdu dan semak seperti bugenvil (*Bouganvillea* sp.), kaca piring (*Gardenia augusta* Merr.), serta teh-tehan merah (*Acalypha wilkesiana* Mull.Arg). Pada bagian *loop* simpang susun Cimanggis, pohon yang mendominasi adalah pohon mahoni (*Swietenia mahagoni* L.). Selain itu *groundcover* berupa rumput jenis rumput paetan (*Axonopus compressus* P. Beauv) menyebar pada setiap bagian simpang susun termasuk di antara tanaman pohon, perdu, dan semak.

Vegetasi yang memberikan nilai estetika jalan ditempatkan dominan pada median jalan, yaitu perdu bugenvil (*Bouganvillea* sp.), kaca piring (*Gardenia augusta* Merr.), pohon bunga kupu-kupu (*Bauhinia purpurea* L.), dan trengguli (*Cassia fistula* L.) di sisi jalan. Jenis pohon lainnya seperti glodokan bulat (*Polyathia fragrans* (Dalz.)), bintaro (*Cerbera manghas* L.), pinus (*Pinus merkusii* Jungh.), dan mahoni (*Swietenia mahagoni* L.) difungsikan sebagai vegetasi penyangga untuk perbaikan iklim. Beberapa jenis pohon yang memiliki fungsi khusus untuk menyerap polusi, seperti dadap merah (*Erythrina crista-galli* L.) ditanam dominan pada sisi Jalan Tol Cijago, sementara pada bagian tikungan simpang susun dan Jalan Tol Jagorawi jumlahnya sangat minim.

Perencanaan Jalur Hijau

Perencanaan lanskap Simpang Susun Cimanggis berfokus pada perencanaan vegetasi jalur hijau yang berkontribusi untuk kelancaran dan keselamatan pengguna jalan, menyajikan keindahan

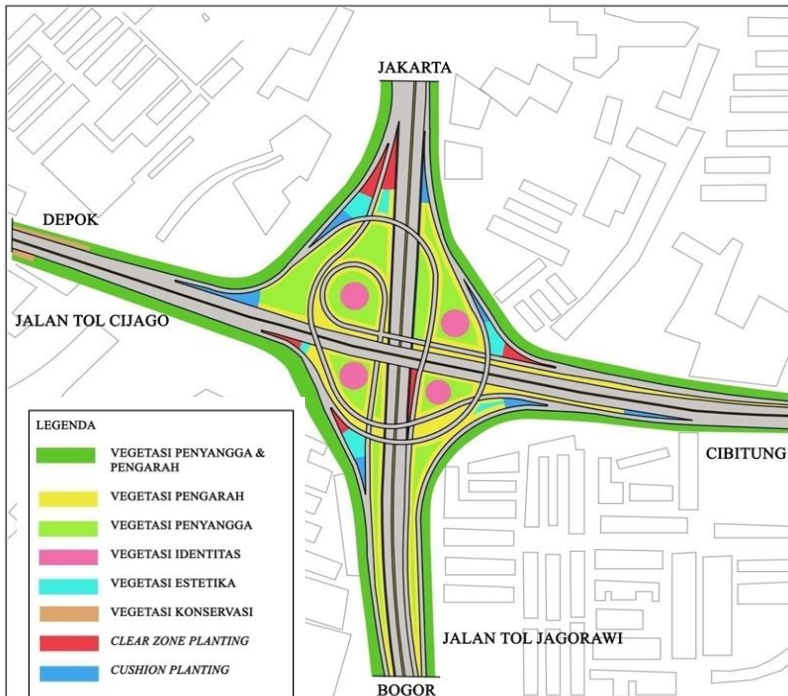
dan *landmark*/identitas lokasi, serta memberi prioritas fungsinya dalam untuk mengurangi sebaran polusi udara ke lingkungan. Untuk memaksimalkan setiap fungsi tersebut, direncanakan vegetasi yang sesuai dengan kriteria tiap fungsi. Perencanaan mencakup pemilihan spesies tanaman, jumlah populasi, peletakan, dan pola penanaman yang dipilih sesuai dengan kriteria setiap fungsi. Setiap spesies dipilih berdasarkan sifat fisik vegetasi untuk masing-masing fungsi dan sifat ekologis tanaman yang sesuai dengan faktor ekologis lokasi sehingga dapat tumbuh maksimal sesuai dengan yang direncanakan. Vegetasi yang dipilih merupakan jenis vegetasi yang tergolong ke dalam vegetasi yang berkapasitas tinggi dalam mengurangi polusi udara. Jumlah populasi yang direncanakan dapat mengurangi sebagian besar emisi polutan yang dihasilkan kendaraan yang melintas. Zona-zona untuk vegetasi dengan fungsi yang diinginkan pada simpang susun disajikan pada Gambar 3.

Zona Penanaman

Vegetasi penyangga

Vegetasi penyangga ditempatkan pada sisi terluar pada jalur hijau, berfungsi untuk mengurangi dampak negatif polusi kendaraan di kawasan sekitar Simpang Susun Cimanggis. Secara umum, kriteria vegetasi yang digunakan sebagai vegetasi penyangga untuk mengurangi polusi dalam bentuk gas dan partikel adalah jenis pohon tinggi bertajuk lebar (kolumnar, kubah, dan bulat), dikombinasi dengan semak. Spesies tanaman yang digunakan pohon tinggi, kerimbunan daun tinggi, berdaun kasar dan tebal, berdaun jarum atau lebar, dan memiliki cabang yang banyak dengan batang yang besar. Secara khusus menurut Grey and Deneke (1978), kriteria vegetasi yang dapat menjebak atau menahan polutan padat adalah

vegetasi yang memiliki daun kasar dan berbulu (memiliki *trichoma*) serta memiliki nilai yang tinggi dalam konduktans stomata, fotosintesa dan evapotranspirasi.



Gambar 3 Rencana Zona Penanaman

Vegetasi konservasi

Vegetasi konservasi pada perencanaan jalur hijau Simpang Susun Cimanggis berfokus pada kemampuan vegetasi dalam mengontrol erosi tanah pada lereng agak curam. Jenis vegetasi yang digunakan memiliki kriteria berupa akar yang dalam dan kuat, percabangan horizontal, dan kerapatan daun tinggi (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 5 Tahun 2012 tentang Pedoman Penanaman Pohon pada Sistem Jaringan Jalan).

Vegetasi pengarah

Vegetasi pengarah berfungsi untuk mengontrol keselamatan dan keamanan dengan mengarahkan pandangan pengguna jalan ke arah jalur jalan dan kendaraan lain di sekitarnya. Fungsi ini diutamakan pada lengkung horizontal jalan atau tikungan. Kriteria yang digunakan adalah jenis pohon tinggi dengan tajuk piramidal, kolumnar atau memiliki batang tegak yang tidak menghalangi pandangan pengemudi.

Clear zone dan cushion planting

Clear zone planting ditempatkan pada daerah penyatuan dua jalur jalan (konvergensi) sehingga memberi pandangan bebas bagi pengguna jalan dari dua jalur yang berbeda. Pada bagian *clear zone* tidak digunakan vegetasi yang dapat mengganggu pandangan pengguna jalan sehingga pada zona ini hanya digunakan hamparan rumput. *Cushion planting* ditempatkan pada daerah pemisahan satu jalur jalan menjadi dua jalur (divergensi) untuk mengontrol arah jalur yang dipisahkan dan berfungsi mengurangi risiko kecelakaan apabila terjadi kendaraan yang keluar jalur. Pada ruang *cushion planting*, kriteria vegetasi yang digunakan adalah vegetasi jenis semak atau perdu *softwood*.

Vegetasi estetika

Vegetasi estetika berfungsi untuk meningkatkan kualitas visual lanskap jalan, memanipulasi *bad view* pada jalan, menambah kesan menyenangkan bagi pengguna jalan, dan mengurangi kemonotonan atau kesan kaku pada jalan. Kriteria vegetasi estetika terdiri dari jenis pohon, atau semak yang memiliki keunggulan fisik tanaman berupa keindahan bunga, warna daun, tekstur daun yang menarik atau bentuk percabangan yang unik. Setiap spesies yang ditanam selalu

disajikan secara massal dalam barisan.

Vegetasi identitas

Vegetasi identitas/*landmark* berfungsi untuk menciptakan karakter Simpang Susun Cimanggis sehingga menjadi lokasi yang memiliki ciri khas. Karakter vegetasi yang dipilih memiliki keunggulan dari segi dimensi dan warna bunga yang menarik. Pohon yang direncanakan sebagai pemberi identitas adalah pohon flamboyan (*Delonix regia* (Bojer) Raf.) yang memiliki bunga dengan warna merah mencolok sehingga menjadi *landmark* pada simpang susun ini. Pemilihan jenis pohon flamboyan ini berkaitan dengan karakter fisiknya yang memiliki kapasitas serapan polutan gas yang tinggi.

Rencana Vegetasi

Setiap vegetasi ditentukan berdasarkan sifat morfologi dan sifat fisik vegetasi untuk masing-masing fungsi sehingga dapat tumbuh maksimal sesuai dengan yang direncanakan. Vegetasi yang dipilih merupakan jenis vegetasi yang tergolong ke dalam vegetasi yang berkapasitas tinggi dalam mengurangi polusi. Demikian pula digunakan vegetasi yang sesuai fungsinya pada bagian-bagian *interchange*. Rencana vegetasi disajikan pada Tabel 3.

Rekomendasi perencanaan jalur hijau Simpang Susun Cimanggis disajikan pada Tabel 3. Selain itu penanaman vegetasi pada jalur Jalan Tol Jagorawi, *clear-area* pada area *convergence*, dan pada area *cushion planting* disajikan masing-masing pada Gambar 4 hingga Gambar 7.

Tabel 3 Rencana Vegetasi pada Simpang Susun Cimanggis

Fungsi	Lokasi	Spesies	Jarak Tanam (m)	Pola Penanaman	Luas (ha)	Populasi
Penyangga	Tepi jalan dan loop	Trembesi (<i>Samanea saman</i> (Jacq.))	8 x 8	Barbaris	0,064	10
		Ketapang (<i>Terminalia catappa</i> (Gaertn.))	4 x 4	Barbaris dan Berkelompok	0,1472	92
		Cendana (<i>Santalum album</i> L.)	4 x 4	Berkelompok	0,456	285
		Dadap (<i>Erythrina variegata</i> L.)	6 x 6	Berkelompok	2,8224	784
		Kaliandra (<i>Calliandra surinamensis</i> Benth.)	5 x 5	Berkelompok	0,795	318
		Jambu (<i>Psidium guajava</i> L.)	6 x 6	Berkelompok	1,7208	478
		Flamboyan (<i>Delonix regia</i> (Bojer) Raf.)	4 x 4	Bujur sangkar	0,576	360
		Bunga kupu-kupu (<i>Bauhinia purpurea</i> L.)	5 x 5	Berkelompok	1,0625	425
		Kayu putih (<i>Eucalyptus alba</i> Blume)	4 x 4	Berkelompok	0,32	200
		Angsana (<i>Pterocarpus indicus</i> Willd.)	5 x 5	Bujur sangkar	0,64	256
		Bintaro (<i>Cerbera manghas</i> L.)	4 x 4	Berkelompok	0,296	185
		Kenari (<i>Canarium asperum</i> Benth)	5 x 5	Berkelompok	0,655	262
		Sukun (<i>Atrocarpus altiss</i> (Parkinson))	5 x 5	Berkelompok	1	400
Kayu manis (<i>Cinnamomum burmanni</i> Schaeff)	4 x 4	Barbaris dan berkelompok	0,7568	473		
	5 x 5	Barbaris dan berkelompok	1,225	490		
Sub Total					15,3757	5,976
Konservasi	Tepi Jalan	Akar wangi (<i>Veriver</i> sp.)	0,3 x 0,3	Berkelompok	0,24	m ²
		Paetan (<i>Axonopus compressus</i> P. Beauv)		Berkelompok	1,802	m ²
Sub Total					1802,24	m²
Pengarah	Tepi Jalan	Kaya (<i>Kiuya senegalensis</i> (Desr.))	3 x 3	Barbaris dan berkelompok	0,3879	431
		Ketapang (<i>Terminalia catappa</i> (Gaertn.))	4 x 4	Barbaris dan berkelompok	0,8	500
		Gilodokan bulat (<i>Polyathia fragrans</i> (Dalz.))	4 x 4	Barbaris dan berkelompok	0,352	220
		Kayu manis (<i>Cinnamomum burmanni</i> Schaeff)	5 x 5	Barbaris dan berkelompok	0,4875	195
		Kenari (<i>Canarium asperum</i> Benth)	5 x 5	Barbaris dan berkelompok	0,55	220

Tabel 3 Rencana Vegetasi pada Sempang Susun Cimanggis (lanjutan)

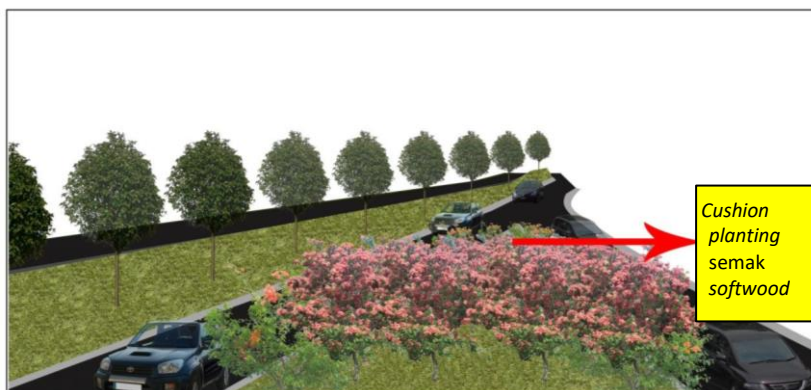
Fungsi	Lokasi	Spesies	Jarak Tanam (m)	Pola Penanaman	Luas (ha)	Populasi
	Median Jalan	Palem putri (<i>Veitchia merrillii</i> (Becc.))	2 x 2	Berbaris	0,09	225
		Bugenvil (<i>Bougainvillea</i> sp.)	1 x 1	Berbaris	0,0175	175
		Soka (<i>Ixora javanica</i> (Blume) DC.)	1 x 1	Berbaris	0,015	150
		Teh-tehan merah (<i>Acalypha wilkesiana</i> Mull.Arg)	1 x 1	Berbaris	0,022	220
Sub Total					2,7219	2336
	Cushion planting	Teh-tehan merah (<i>Acalypha wilkesiana</i> Mull.Arg)	1 x 1	Berbaris	0,0225	225
		Nusa indah (<i>Mussaenda erythrophylla</i> Schumach.)	3 x 3	Berkelempok	0,198	220
		Bugenvil (<i>Bougainvillea</i> sp.)	2 x 2	Berkelempok	0,092	230
Sub Total					0,3125	675
Clear zone		Pactan (<i>Axonopus compressus</i> P. Beauv)		Berkelempok		3.530 m ²
Sub Total					0,352	3.530 m²
Estetika	Traffic island dan loop	Bunga kupu-kupu (<i>Bauhinia purpurea</i> L.)	4 x 4	Berkelempok	0,352	220
		Dadap (<i>Erythrina variegata</i> L.)	5 x 5	Berkelempok	0,525	210
		Flamboyan (<i>Delonix regia</i> (Bojer) Raf.)	4 x 4	Berkelempok	0,256	160
		Bugenvil (<i>Bougainvillea</i> sp.)	1 x 1	Berbaris dan Berkelempok	0,025	250
		Soka (<i>Ixora javanica</i> (Blume) DC.)	1 x 1	Berbaris dan Berkelempok	0,02	200
		Kaca piring (<i>Gardenia augusta</i> Merr.)	1 x 1	Berbaris	0,018	180
		Lolipop kuning (<i>Pachystachys lutea</i> Nees)	1 x 1	Berkelempok	0,028	280
Sub Total					1,224	1500
Identitas/ landmark	Loop	Flamboyan (<i>Delonix regia</i> (Bajer) Raf.)	10 x 10	Berkelempok	0,4	40
Sub Total					0,4	40
Total Pohon						8.557
Total Semak/ Perdu						2.130
Total rumput						5.332 m²



Gambar 4 Rencana Jalur Hijau Untuk Lanskap Simpang Susun Cimanggis



Gambar 5 Perspektif *Interchange* pada Jalur Jalan Tol Jagorawi



Gambar 6 Perspektif *Cusson Planting* pada Area *Convergence*



Gambar 7 Perspektif *Clear Area* pada Area *Convergence*

KESIMPULAN

Perencanaan lanskap Simpang Susun Cimanggis berfokus pada penggunaan spesies vegetasi jalur hijau untuk mengurangi emisi polusi udara yang dibuang oleh kendaraan bermotor yang melintas pada simpang susun. Demikian pula perencanaan ini dikombinasikan penggunaan tanaman yang berkontribusi dalam memberi kelancaran dan keselamatan pengguna jalan, dan memberi

keindahan dan *landmark* pada Simpang Susun Cimanggis. Untuk itu direncanakan zona-zona penanaman berdasarkan fungsi tanaman yang diinginkan pada simpang susun. Fungsi-fungsi tersebut terdiri dari fungsi penyangga, fungsi keselamatan yang terdiri dari fungsi pengarah, *clear zone area*, dan *cushion planting*, serta fungsi estetika dan identitas.

Pohon yang direncanakan berjumlah 8.557 batang yang terdiri dari beberapa jenis seperti kenari (*Canarium asperum*), trembesi (*Samanea saman (Jacq.)*), dadap (*Erythrina variegata L.*), kaliandra (*Calliandra surinamensis Benth.*), bunga kupu-kupu (*Bauhinia purpurea L.*), tanjung (*Mimusoph elengi L.*), dan jenis-jenis lainnya. Jumlah tanaman semak yang direncanakan adalah 2.130 batang yang terdiri dari bugenvil (*Bougenvillea sp.*), soka (*Ixora javanica (Blume) DC.*), teh-tehan merah (*Acalypha wilkesiana Mull.Arg*), lolipop kuning (*Pachystachys lutea Nees*) serta 5.332 m² *ground cover*. Pada setiap zona penanaman jumlah dan spesies vegetasi yang direncanakan merupakan vegetasi berkapasitas tinggi dalam pengurangan polusi udara khususnya CO₂, NO₂, dan partikel debu.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, D. R dan Cahyadi, N. 2015. *Analisa Karakteristik Kecepatan Angin dan Tinggi Gelombang. Menggunakan Data Satelit Altimetri*. Journal of Geodesy and Geomatics, 11 (1): 75-78. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya (ID).
- Akay, A., Onder, S. 2022. *An acoustical landscaping study: the impact of distance between the sound source and the landscape plants on traffic noise reduction*. Environ Dev

Sustain 24: 12036–12058 <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01930-y>.

- Desyana R.D, Sulistyantara, B., Nasrullah, N. 2017. *Study of the effectiveness of several tree canopy types on roadside green belt in influencing the distribution of NO₂ gas emitted from transportation*. Proceeding International Seminar on Science, Sciences on Precision and Sustainable Agriculture. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Volume 58: 0120456, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/58/1/012045>.
- Effendy S, Afrihatmoko F. 2014. *Kaitan Ruang Terbuka Hijau dengan Kenyamanan Termal Perkotaan*. Jurnal Agromet Indonesia, 28 (1): 23-32. <https://doi.org/10.29244/J.Agromet.28.1.23-32>.
- Femi, Budiarti, T., Nasrullah., N. 2014. *Pengaruh Tata Hijau Terhadap Suhu Dan Kelembaban Relatif Udara, Pada Balai Besar Pengembangan Mekanisasi Pertanian, Serpong*. Jurnal Lanskap Indonesia, 6 (2): 21-28. <https://doi.org/10.29244/jli.2014.6.2.21-28>.
- Grey and Deneke. 1978. *Urban Forest*. John Wiley and Son Inc. Canada, US.
- Hamidun M.S., Baderan, D.B.K., Malle M. 2021. *Efektivitas Penyerapan Kebisingan oleh Jenis Pohon Pelindung Jalan di Provinsi Gorontalo*. Jurnal Ilmu Lingkungan, 19 (3): 661-669.
- Harris C.H., Dines N.T. 1998. *Time-Saver Standards for Landscape Architecture: Design and Construction Data*, Second Edition. McGraw-Hill Publishing Company.
- Kemala. 2013. *Potensi Vegetasi Sebagai Peredam Ingar Bunyi Kendaraan Bermotor*. Skripsi (tidak dipublikasikan).

- Institut Pertanian Bogor. <https://repository.ipb.ac.id/bitstream/handle/123456789/67406/G13kem.pdf?sequence=1&isAllowed=n>. Diakses 15 Oktober 2022.
- Komite Nasional Keselamatan Transportasi. 2021. *80 Persen Kecelakaan di Tol Akibat Mengantuk dan Letih*. <https://www.viva.co.id/berita/nasional/1427758>. Diakses 10 Mei 2023.
- Laurie, M. 1985. *Pengantar kepada Arsitektur Pertamanan*. Bandung: PT. Intermatra.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2012. *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 5 Tahun 2012 tentang Pedoman Penanaman Pohon pada Sistem Jaringan Jalan*. Jakarta.
- Nasution, A.D. 2019. *Analisis Pengaruh Bentuk Tajuk Pohon dan Jenis Lantai di bawah Tajuk Pohon terhadap Kenyamanan Termal*. Skripsi (tidak dipublikasikan). Institut Pertanian Bogor.
- Nasrullah, N., Tatsumoto, H., Misawa, A. 1994a. *Effect of roadside planting on suspended particulate matter concentration near the road*. *Environmental Technology*, 15: 293-298. <https://doi.org/10.1080/09593339409385431>.
- Nasrullah, N., Tatsumoto, H., Misawa, A. 1994b. *Effect of roadside planting and Road Structure on NO₂ Concentration Near the Road*. *Jpn. Toxic. Environ. Health*, 40 (4): 328-337.
- Nofalina. 2010. *Analisis Ruang Terbuka Hijau Kota Depok dengan Pendekatan Model Konservasi Air Melalui Sistem Informasi Geografis*. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Nur Izzah, A., Nasrullah, N., Sulistyantara, B. 2019. *Efektivitas Jalur Hijau Jalan dalam Mengurangi Polutan Gas CO*. *J Ilmu Pertan Indones*. 24 (4): 337–342. <http://dx.doi.org/>

10.18343/jipi.24.4.337.

- Ow, L. F., Gosh, S. 2017. *Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation*. Applied Acoustic. 120: 15-20. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.007>.
- Ozdemir, H. 2019. *Mitigation impact of roadside trees on fine particle pollution*. Science of The Total Environment, 659: 1176-1185. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.262>
- Patra, A. D. 2002. *Faktor Tanaman Dan Faktor Lingkungan Yang Mempengaruhi Kemampuan Tanaman Dalam Menyerap Polutan Gas NO₂*. Tesis Pascasarjana (tidak dipublikasikan). Institut Pertanian Bogor.
- Pangesti, N., Nasrullah, N., Sisworo, E.L. 2007. *Faktor Fisiologi Tanaman Tepi Jalan yang menentukan Kemampuan Serapan Polusi Udara ¹⁵NO₂*. Risalah Seminar Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi BTNN, Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi Jakarta, 75-80.
- Sabrin, S., Karimi, M., Nazari, R., Pratt, J., Bryk, J. 2021. *Effects of Different Urban-Vegetation Morphology on the Canopy-level Thermal Comfort and the Cooling Benefits of Shade Trees: Case-study in Philadelphia*. Sustainable City and Society: 66. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102684>.
- Sulistijorini. 2009. *Keefektifan dan Toleransi Jenis Tanaman Jalur Hijau Jalan dalam Mereduksi Pencemar NO₂ akibat Aktivitas Transportasi*. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Yan F, Bao, Z.Y., Zhu, Z. J. 2011. *An Assessment of Psychological Noise Reduction by Landscape Plants*. Intl. J. Environ Res Public Health, 8(4):1031-1048. <https://doi.org/10.3390%2Fijerph8041032>.



KAJIAN KRITIS PENGEMBANGAN JALAN TOL DI INDONESIA

Pengelolaan Aspek Teknis dalam Perancangan dan Pembangunan Jalan Tol

DESAIN TEMPAT ISTIRAHAT DAN PELAYANAN BANJARATMA KM 260 DAN SALATIGA KM 456A-B SEBAGAI UNSUR NILAI TAMBAH DALAM PELAYANAN JALAN TOL

Ikaputra dan Dyah Titisari Widyastuti
Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

PENDAHULUAN

Jalan tol adalah jalan umum yang merupakan bagian dari sistem jaringan jalan dan berfungsi sebagai jalan nasional yang penggunaannya diwajibkan membayar tol. Salah satu infrastruktur yang berada di ruas jalan tol adalah Tempat Istirahat dan Pelayanan (TIP), yang merupakan suatu tempat istirahat yang dilengkapi dengan berbagai fasilitas umum bagi pengguna jalan tol, sehingga pengemudi, penumpang, maupun kendaraannya dapat beristirahat untuk sementara (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat/PUPR, 2018).

Tempat Istirahat dan Pelayanan atau *rest area* adalah komponen penting dalam lalu lintas angkutan darat yang terletak pada jaringan jalan raya (Tun et.al, 2013; 4; Al-Kaisy et. al., 2011; 146; Alkhatni, et. Al., 2021; 260). Tempat istirahat ini merupakan fasilitas umum yang terletak di pinggir jalan raya, biasanya jalan arteri primer, terutama jalan antar propinsi, atau jalan bebas hambatan (jalan tol) tempat pengemudi dan penumpang dapat beristirahat, atau mengisi

bahan bakar tanpa keluar ke jalan sekunder, atau tanpa keluar dari jalan raya (Moore, 1994; 1; Tun et.al., 2013; 41; Plovnick, 2017; 3).

Dalam sejarahnya, *rest area* dibangun untuk alasan keamanan sebagai tempat pemberhentian darurat atau sementara bagi pengendara kendaraan bermotor (Laskara, 2021; 125). *Rest area* merupakan komponen penting dalam upaya mengurangi kecelakaan yang terjadi akibat kelelahan pengemudi. *Rest area* berfungsi sebagai fasilitas agar pengemudi dan penumpang bisa beristirahat dari kelelahan dan kendaraan bisa berhenti untuk dapat diperiksa kelayakan jalannya, sehingga keselamatan berkendara dalam perjalanan yang cukup panjang dapat terjamin dan tidak terjadi kecelakaan. (Tun dkk, 2013; 41; Alkhatni, et.al. 2021; 260). Secara umum, *rest area* bertujuan membantu meningkatkan keselamatan berlalu lintas, mendukung kenyamanan pelaku perjalanan, dan sekaligus menyediakan informasi-informasi penting bagi pengguna jalan (Al-Kaisy et.al., 2011 in Alkhatni, et.al., 2021; 260).

Di Indonesia, pembangunan jalan tol pertama kali adalah jalan tol sepanjang 59 km yang dikenal dengan nama Jagorawi yang beroperasi pada tahun 1978. Dalam rentang waktu 1978-1998 (20 tahun) hingga masa krisis moneter, total panjang jalan tol yang dibangun di Indonesia mencapai 553 km. Secara berturut-turut, pembangunan jalan tol setelah krisis moneter adalah sepanjang 13 kilometer (1999-2004), 228 kilometer (2005-2014), 1.298 kilometer (2015-2019), dan 291 kilometer pada periode 2020-2021. Dengan demikian, total panjang jalan tol yang sudah dibangun dan beroperasi sampai 2021 mencapai 2.391 kilometer yang terbagi dalam 62 ruas. Hal ini menyebabkan kemanfaatan perjalanan jarak jauh dengan kecepatan tinggi menggunakan jalan bebas hambatan

semakin meningkat karena keuntungan waktu perjalanan yang semakin singkat. Namun hal yang perlu diperhatikan seiring bertambah panjang jalan tol adalah adanya peningkatan kecelakaan pengguna jalan yang tidak jarang menimbulkan korban jiwa. Data Kementerian Perhubungan menunjukkan data kecelakaan pada tahun 2017-2018 meningkat dari 1.075 menjadi 1.135 atau bertambah sebesar 5,3%. Penyebab kecelakaan teridentifikasi 80% hingga 90% adalah faktor manusia (kelelahan), sisanya adalah faktor kondisi infrastruktur berkisar 10% hingga 20%, dan penyebab faktor kendaraan kurang dari 10% (Kementerian Perhubungan, 2019 dalam Laskara, 2021; 124).

Penyebab kecelakaan akibat faktor manusia (kelelahan) inilah yang menyebabkan tempat istirahat dan pelayanan atau *rest area* menjadi sangat vital sebagai fasilitas jalan tol. Sampai pada tahun 2021, Setyabudi (2011) menengarai jika keberadaan *rest area* di sepanjang ruas-ruas jalan tol yang ada masih kurang berfungsi sebagaimana mestinya karena fasilitas yang ada belum memenuhi kebutuhan pengguna jalan tol. Hal ini diduga menjadi penyebab para pengemudi dan penumpang enggan untuk berhenti karena tempat istirahat tersebut tidak memiliki fasilitas yang memadai sehingga pengguna jalan tol memilih untuk meneruskan perjalanan dalam kondisi kelelahan dan rasa kantuk (Setyabudi, 2011).

Mengingat *rest area* sebagai fasilitas jalan tol berperan penting dalam mengurangi kecelakaan akibat kelelahan pengemudi dan penumpang, serta tempat mengontrol kelaikan jalan kendaraan, maka tulisan ini bertujuan untuk memahami pemenuhan fasilitas tempat istirahat atau *rest area* yang memenuhi standar yang telah ditentukan. Standar Minimal Perencanaan dan Perancangan Tempat

istirahat telah ditetapkan dalam Peraturan Menteri (Permen) Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) Nomor 10/PRT/M/2018 tentang Tempat Istirahat dan Pelayanan (TIP). Untuk memverifikasi penerapan standar pembangunan *rest area* dari Permen PUPR tersebut, akan dilakukan kajian mengenai TIP di sepanjang jalan tol pada trase Simpang Susun Kanci-Banyudono Kartosuro.

Studi ini juga bertujuan untuk memahami implementasi prinsip-prinsip desain *rest area* yang memiliki unsur nilai tambah dalam pelayanan jalan tol di Indonesia. Kajian penerapan desain “*beyond standard*” yakni TIP yang memiliki “tak hanya kelengkapan fasilitas” tetapi juga daya tarik desain yang unik yang menarik bagi pengguna jalan tol untuk berhenti dan beristirahat. Komponen daya tarik desain TIP yang memiliki keunggulan adalah modal untuk mengurangi risiko kelelahan pengguna jalan tol yang berarti mereduksi risiko kecelakaan. *Rest Area* Salatiga KM 456A dan 456B, serta *Rest Area* Banjarnegara KM 260 pada pada trase simpang susun Kanci-Banyudono Kartosuro menjadi studi kasus yang akan dikaji terkait dengan keunggulan desain sehingga dapat memberikan manfaat lebih bagi pengguna jalan tol.

Secara skematis, konsep pengembangan *rest area* sebagai area layanan pengguna jalan tol disajikan dalam Gambar 1.



Gambar 1 Pembangunan Jalan Tol dan Permasalahan Layanan Pengguna dan Risiko Keselamatan Perjalanan

TINJAUAN PUSTAKA

Menurut Laskara (2021), prinsip perencanaan fasilitas *rest area* pada jalan tol di Indonesia adalah untuk menjamin 1) keselamatan (*safety*), 2) keamanan (*security*), dan 3) kenyamanan (*convenience*). Menjamin keselamatan (*safety*) yang dimaksud adalah keselamatan bagi pelanggan dan pengguna jalan tol di sekitar *rest area* dari bahaya kecelakaan lalu lintas. Penjaminan keamanan (*security*) mencakup upaya preventif dan antisipatif melalui upaya perencanaan dalam meminimalisir tindakan kriminalitas di dan/atau sekitar lingkungan *rest area*. Penjaminan kenyamanan (*convenience*) mencakup segala bentuk upaya untuk menjamin optimasi, efisiensi, dan kelayakan pelayanan bagi pelanggan *rest area*. Sedangkan menurut Moore (1994), *rest area* mempunyai peluang untuk memenuhi berbagai kebutuhan pengguna yang lebih luas, yaitu: kebutuhan fisik pengemudi dan penumpang (*physical needs*), kebutuhan kendaraan (*vehicle running*), menikmati tempat menarik tertentu (*enjoy points of particular interest*), menyediakan lanskap yang memperkaya perjalanan melalui pengalaman yang lebih besar (*provide a microcosm of the landscape and enrich the*

journey through greater immediacy of experience), serta kesempatan untuk menginterpretasi lanskap (*interpret the landscape*).

Fasilitas *rest area* wajib memenuhi prinsip dan kriteria perencanaan untuk memenuhi kebutuhan pengendara, pelaku perjalanan, dan kendaraan itu sendiri. Fasilitas untuk kendaraan meliputi area parkir, bengkel, dan stasiun bahan bakar (SPBU), sedangkan fasilitas untuk pengendara dan pelaku perjalanan meliputi restoran, toilet umum, dan lain-lain (Tun et al., 2013).

Kelengkapan fasilitas yang ada di dalam *rest area* ditentukan berdasar tipologinya. Di Indonesia, tipologi *rest area* diatur dalam Permen PUPR Nomor 10/PRT/M/2018 tentang Tempat Istirahat dan Pelayanan (TIP) pada jalan tol, terbagi menjadi 3 tipe: tipe A, B, dan C. TIP tipe A paling sedikit dilengkapi dengan fasilitas umum yang meliputi pusat Anjungan Tunai Mandiri (ATM) dengan fasilitas isi ulang kartu tol, toilet, klinik kesehatan, bengkel, warung atau kios, minimarket, mushola, stasiun pengisian bahan bakar umum (SPBU), restoran, ruang terbuka hijau, dan sarana tempat parkir. TIP tipe B paling sedikit dilengkapi dengan fasilitas umum meliputi pusat ATM dengan fasilitas isi ulang kartu tol, toilet, warung atau kios, minimarket, mushola, restoran, ruang terbuka hijau, dan sarana tempat parkir. TIP tipe C hanya dioperasikan pada masa libur panjang, libur lebaran/natal, dan tahun baru, paling sedikit dilengkapi dengan fasilitas umum meliputi toilet, warung atau kios, mushola, dan sarana tempat parkir yang bersifat sementara. Standar Perencanaan TIP juga diatur dalam peraturan ini menyangkut jarak antar *rest area*, luas lahan minimal, serta kebutuhan fasilitas minimal yang harus dipenuhi. Tabel 1 menguraikan standar perencanaan TIP masing-masing tipe pada jalan tol di Indonesia.

Tabel 1 Standar Perencanaan Tempat Istirahat dan Pelayanan (TIP) pada Jalan Tol di Indonesia

Tipe	Fungsi Utama	Interval min.	Lahan min.	Parkir min.	Toilet min.	Standar Luas min.
A	ATM; toilet; klinik	Minimal 1 @50km	6 ha / 60.000m ²	Gol I 2.500 m ² 100 unit	10 (P) 20 (W) >30 m ²	SPBU 500 m ² Bengkel 80 m ²
	Kesehatan; bengkel; warung/kios; minimarket; mushola; SPBU; restoran; RTH; area parkir; penginapan (opsi)	>20 km antar tipe A	Lebar >150m	Gol II s/d V 3.000m ² 50 unit		Klinik 50 m ² Mushola 400 m ² Restoran 1.000 m ² Kios 300 m ²
	ATM; toilet; warung/kios; minimarket; mushola; restoran; RTH; area parkir;	Minimal 1 @30km >10 km antara tipe A dan B, serta antar tipe B	3 ha / 30.000m ² Lebar >100m	Gol I 800m ² 30 unit Gol II s/d V 1.200m ² 20 unit	4 (P) 10 (W) >14 m ²	Mushola 200 m ² Bengkel 80 m ² Restoran 800 m ² Kios 200 m ²
C	toilet; warung/kios; mushola; sarana parkir sementara	Jarak tipe C dengan tipe A atau tipe B atau tipe C 2 km	2.500 m ² Lebar min. 25m	Gol I 350m ² 20 unit Gol II s/d V 300m ² 5 unit	4 (P) 8 (W) toilet portabel	Mushola 50m ² Warung/ kios 50m ²

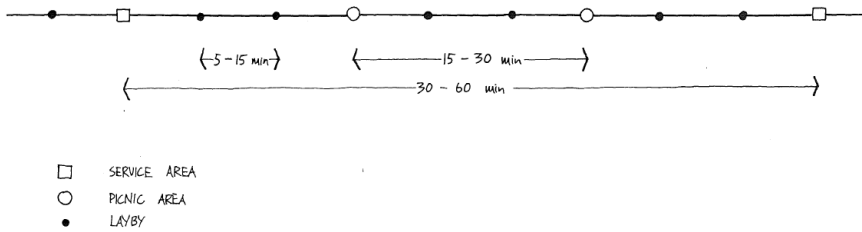
Sumber: Peraturan Menteri PUPR Nomor 10/PRT/M/2018 tentang TIP pada Jalan Tol (2018)

Pada beberapa negara di dunia, ketentuan tentang standar fasilitas yang harus ada di *rest area* juga tergantung pada tipe *rest area*-nya. Jalur tol segmen Świecko-Konin (Polandia) memiliki 3 kelompok *rest area*: Kelas I MOP (*rest area*) harus memiliki toilet serta parkir mobil dan truk, kelas II MOP (*service area*) menawarkan semua fasilitas kelas I ditambah pom bensin, restoran atau fasilitas

penjualan makanan lainnya, dan kelas III MOP menawarkan semua fasilitas kelas II ditambah hotel (Autostrada Wielkopolska S.A. 2017).

Pembangunan *rest area* harus dikendalikan agar tidak berdampak buruk pada kenyamanan dan kelancaran lalu lintas di jalan tol. Ketiadaan *rest area* dapat mengancam keselamatan pengendara dan penumpang akibat kelelahan berkendara yang terlalu lama tanpa beristirahat. Namun, terlalu banyak *rest area* juga dapat menimbulkan dampak negatif, yaitu: mengancam keselamatan pengendara akibat banyak gangguan pada jalur keluar-masuk *rest area* yang merupakan daerah rawan kecelakaan, memperlambat laju kendaraan, operasional menjadi tidak efisien, merugikan secara ekonomi dan bisnis akibat jumlah permintaan dan pasokan yang tidak seimbang, serta gangguan visual pada jalan tol akibat banyaknya jumlah penanda/rambu di tepi jalan tol (Russel, 1986; Moughtin, 2007; Pratama, 2014; Laskara, G. W., 2021).

Moore (1994) menentukan jarak dan penempatan antar *rest area* berdasarkan hirarkinya. Terdapat 3 hirarki *rest area*, yaitu: *service area*, waktu mengemudi 30-60 menit, fasilitas yang disediakan: penjualan bensin, penjualan makanan, makan di luar dan di dalam ruangan, toilet, ruang di luar jalan, tempat berteduh, *picnic area*, waktu mengemudi 15-30 menit, fasilitas yang disediakan: tempat berteduh, makan di luar ruangan, toilet, ruang di luar jalan; *layby*, waktu mengemudi 5-15 menit, fasilitas yang disediakan: ruang di luar jalan, tempat makan di luar ruangan (lihat juga Gambar 2).



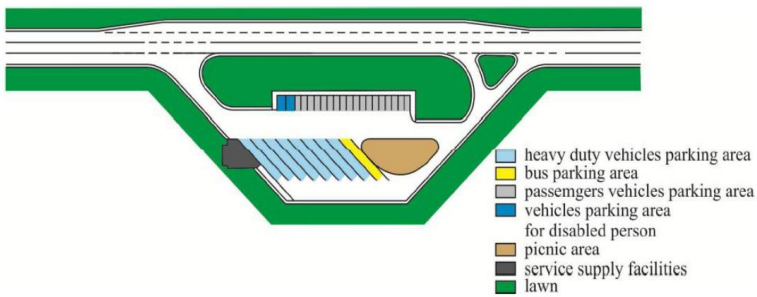
Sumber: Moore, M., W. (1994)

Gambar 2 Jarak dan Penempatan *Rest Area*

Komponen yang akan dikendalikan dalam perancangan *rest area* (*scope of issue*) meliputi: komponen mutlak (*absolute*), yaitu komponen yang wajib dipenuhi saat permohonan awal, mengacu persyaratan yang telah ditetapkan, bersifat *critical* karena terkait/berdampak langsung terhadap seluruh prinsip perencanaan *rest area* (*safety, security, convenience*); dan komponen bersyarat (*negotiable*), yaitu komponen yang wajib dipenuhi namun diizinkan melalui penyesuaian bertahap atau perbaikan saat proses selanjutnya untuk memenuhi syarat yang ditetapkan, yang terkait dengan tuntutan kualitas dan kelayakan pelayanan *rest area* yang memiliki dampak langsung pada prinsip kenyamanan. Komponen mutlak dalam *rest area* adalah: a) lokasi, b) luas tapak, c) aksesibilitas, d) standar luas fungsi utama. Komponen bersyarat *rest area* dirumuskan yaitu a) zonasi, b) sirkulasi, c) penanda, dan d) utilitas (Laskara, 2021).

Pertimbangan urgensi *rest area* didasarkan pada perbedaan kebutuhan pengguna jalan, dengan melihat 3 kelompok utama *rest area* (Alkhatni et al., 2021): pengguna jalan umum, pengemudi truk, dan wisatawan. Setiap kelompok memiliki motivasi yang berbeda untuk berhenti. Pengguna jalan umum termasuk penduduk desa dan kota yang bepergian untuk urusan pribadi, seperti berbelanja atau

bekerja. Pengemudi truk harus berhenti untuk jangka waktu tertentu mengikuti peraturan. Wisatawan biasanya bepergian dalam kelompok yang beragam dan dapat memilih kapan mereka ingin berhenti. Direkomendasikan untuk membagi area menjadi zona fungsional untuk memisahkan lalu lintas kendaraan tertentu di lokasi dan menjaga keselamatan pengguna fasilitas sebagaimana disajikan Gambar 3.



Sumber: Alkhatni, F., Ishak, S. Z., Milad, A. (2021)

Gambar 3 Tipikal Zona Fungsional pada *Rest Area*

Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Texas State Department of Highways and Public Transportation, rekomendasi desain untuk *rest area* meliputi: ruang, persyaratan tapak, contoh desain arsitektur, material, sistem mekanis, operasi dan pemeliharaan, serta rekomendasi untuk energi meliputi: sumber energi, sistem air, dan sistem limbah (Fowler et al., 1988).

PEMBAHASAN

Praktek Penerapan Standar *Rest Area* Indonesia

Pada umumnya, *rest area* dipahami sebagai tempat istirahat yang

tersedia di sepanjang jalan tol, sebagai tempat untuk beristirahat bagi pengendara kendaraan bermotor sekaligus untuk mendinginkan mesin kendaraan setelah atau dalam kondisi melakukan perjalanan jarak jauh. *Rest area* berada pada lokasi dengan berbagai pertimbangan, sehingga dapat secara optimal dimanfaatkan oleh pengendara kendaraan bermotor yang sedang melakukan perjalanan.

Keberadaan fasilitas *rest area* merupakan sebuah keharusan sebagai bagian dari layanan jalan tol. Hal ini disebutkan dalam UU No 22 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan, di mana pengemudi wajib beristirahat selama minimal 30 menit setelah berkendara selama 4 jam. Pengguna jalan tol dapat menggunakan fasilitas parkir pada *rest area* paling lama 3 jam. Mengacu pada Peraturan Menteri PUPR Nomor 10/PRT/M/2018 tentang Tempat Istirahat dan Pelayanan pada Jalan Tol, disebutkan setidaknya ada tiga tipe Tempat Istirahat dan Pelayanan (*TIP/rest area*) di Indonesia, berdasar kelengkapan fasilitas, luas area, serta kapasitas penggunaannya, yaitu *rest area* tipe A, B, dan C. Lokasi *rest area* pada umumnya berada pada area yang relatif datar dan lurus, dengan jarak titik akhir lajur percepatan dengan titik awal lajur perlambatan antara *rest area* dengan simpang susun atau sebaliknya untuk jurusan yang sama minimal 1,5 km atau sesuai dengan kajian kondisi lalu lintas. Lahan *rest area* tipe A dan tipe B disediakan oleh badan usaha, badan hukum, dan/atau instansi, sedangkan lahan *rest area* tipe C dapat disediakan oleh Pemerintah atau BUJT.

Rest area tipe A paling banyak dijumpai di sepanjang jalan tol pulau Jawa dan Sumatera, merupakan tipe *rest area* yang paling lengkap fasilitasnya, terdiri dari ATM, toilet, SPBU, klinik kesehatan, bengkel mobil, minimarket, tempat ibadah (mushola/masjid), kios,

area parkir, ruang terbuka hijau, dan restoran. Fasilitas parkir mampu menampung 100 unit kendaraan golongan I (luas minimal 2.500 m²), dan 50 kendaraan golongan II ke atas (luas minimal 3.000 m²). Dari sisi luas areanya, *rest area* tipe ini memiliki luas minimal 6 hektar dan lebar minimal 150 meter. Berdasar data dari Laporan Tahunan Badan Pengatur Jalan Tol 2020, status pada bulan Oktober 2020, terdapat 55 *rest area* tipe A di sepanjang jalan tol di Jawa, dan 25 *rest area* tipe A di sepanjang jalan tol di Sumatera.

Rest area tipe A dapat dilengkapi dengan fasilitas inap pada ruas jalan tol antarkota. Fasilitas inap untuk istirahat dapat dimanfaatkan dengan durasi waktu paling lama 6 jam. Area fasilitas inap disediakan dengan luas minimal 2.000 m² dengan maksimal jumlah kamar 100 unit, dengan area parkir terpisah dengan area parkir *rest area* untuk minimal 50 kendaraan golongan I (minimal 1.250 m²) dan 30 kendaraan golongan II/III/IV/V (minimal 1.800 m²).

Rest area tipe B memiliki area lebih kecil dari tipe A yaitu minimal 3 hektar dengan lebar minimal 100 meter, terdiri dari fasilitas ATM, toilet, kios, minimarket, tempat ibadah (mushola/masjid), restoran, area parkir, dan ruang terbuka hijau. Fasilitas parkir mampu menampung 30 unit kendaraan golongan I (luas minimal 800 m²), dan 20 kendaraan golongan II ke atas (luas minimal 1200 m²). Berdasar data dari Laporan Tahunan Badan Pengatur Jalan Tol 2020, status pada bulan Oktober 2020, terdapat 36 *rest area* tipe B di sepanjang jalan tol di Jawa, dan 8 *rest area* tipe B di sepanjang jalan tol di Sumatera. *Rest area* tipe ini dapat disediakan pada jalan tol antarkota yang memiliki panjang lebih dari 30 km.

Rest area tipe C merupakan tipe *rest area* yang tidak banyak

keberadaannya pada jalan tol di Jawa dan Sumatera. *Rest area* tipe ini memiliki area paling kecil, dengan minimal luas 2.500 m² dengan lebar minimal 25 meter, dengan fasilitas toilet, kios, tempat ibadah, dan area parkir sementara. Fasilitas parkir mampu menampung 20 unit kendaraan golongan I (luas minimal 350 m²), dan 5 kendaraan golongan II ke atas (luas minimal 300 m²). Dari Laporan Tahunan Badan Pengatur Jalan Tol 2020, status pada bulan Oktober 2020, terdapat 8 *rest area* tipe C di sepanjang jalan tol di Jawa, dan 8 *rest area* tipe C di sepanjang jalan tol di Sumatera. *Rest area* tipe ini hanya dioperasikan pada masa libur panjang, libur lebaran/natal, dan tahun baru.

Persyaratan lain untuk desain *rest area* pada semua tipe adalah harus dilengkapi dengan fasilitas untuk kemudahan penyandang disabilitas. Di samping itu, perletakan masing-masing tipe juga memiliki aturan, yaitu pada setiap 50 km ruas jalan tol masing-masing jurusan setidaknya ada satu *rest area* tipe A, dimana jarak antar *rest area* tipe A minimal 20 km. Pada setiap 30 km ruas jalan tol masing-masing jurusan setidaknya ada satu *rest area* tipe B, dimana jarak antar *rest area* tipe B minimal 10 km. Jarak antar *rest area* dengan tipe yang berbeda juga terdapat aturannya, dalam satu jurusan, *rest area* tipe A dan tipe B berjarak minimal 10 km, dan jarak antara *rest area* tipe C ke *rest area* lain (tipe A atau tipe B) minimal sejauh 2 km. Standar jarak perletakan *rest area* ini berbeda dengan standar yang digunakan negara lain, dimana Amerika menggunakan standar jarak 80-97 km antar *rest area*, sedangkan negara-negara Eropa menggunakan standar jarak 50-60 km dan maksimal 80 km antar *rest area* serta 15-20 km sampai maksimal 25 km untuk jarak antar *rest area* dengan fasilitas minimal (Shibub dan Betro, 2021).

Di sepanjang jalan tol trase Simpang Susun Kanci-Banyudono Kartosuro terdapat 5 *rest area* tipe A dan 13 *rest area* tipe B. *Rest area* tipe A meliputi: *rest area* KM 228A, *rest area* KM 260B, *rest area* KM 282B, *rest area* KM 379A dan *rest area* KM 429A. Sedangkan *rest area* tipe B meliputi: *rest area* KM 229B, *rest area* KM 287A, *rest area* KM 294B, *rest area* KM 338A, *rest area* KM 360B, *rest area* KM 389B, *rest area* KM 391A, *rest area* KM 424B, *rest area* KM 439A, *rest area* KM 456A-B dan *rest area* KM 487A-B (lihat juga Gambar 4). Pengamatan nilai lebih di luar standar (*beyond standard*) yang dianalisis dalam kajian ini fokus pada *rest area* KM 260B dan *rest area* KM 456A-B.



Gambar 4 Pemetaan *Rest Area* di Sepanjang Jalan Tol pada Trase Simpang Susun Kanci-Banyudono Kartosuro

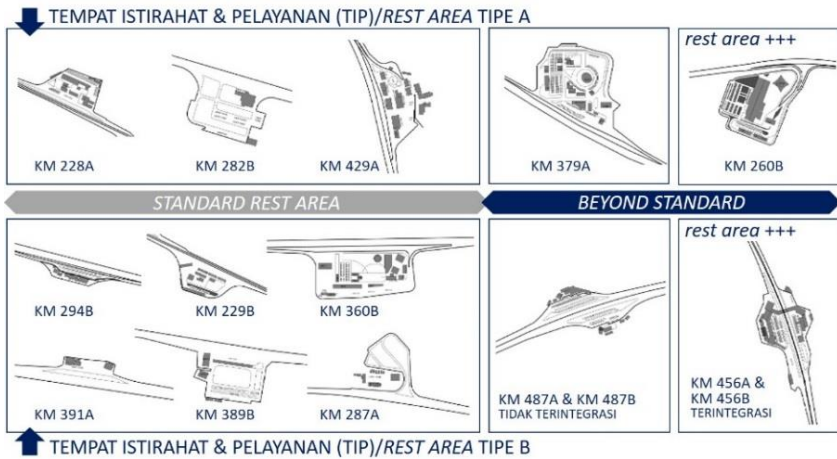
Fasilitas dan desain *rest area* di sepanjang jalan tol pada trase Simpang Susun Kanci-Banyudono Kartosuro sudah cukup memenuhi standar sesuai peraturan pemerintah, baik untuk *rest area* tipe A maupun tipe B. Penggunaan peraturan yang menjadi acuan adalah Peraturan Menteri PUPR Nomor 10/PRT/M/2018 yang masih berlaku saat *rest area* dalam proses membangun. Beberapa standar yang masih belum terpenuhi adalah luas *site* dan luas area parkir, terutama untuk area parkir kendaraan Gol II-V.

Rest area Tipe A yang belum memenuhi standar luasan *site* adalah

rest area KM 228A, *rest area* KM 282B dan *rest area* KM 429A. *Rest area* Tipe B yang belum memenuhi standar luasan *site* adalah *rest area* KM 294B, *rest area* KM 391A, *rest area* KM 424B, *rest area* KM 487A-B dan *rest area* KM 456A-B. Untuk standar layanan kendaraan, ada 3 *rest area* Tipe A yang belum memenuhi standar dikarenakan jumlah kendaraan Gol II-V yang difasilitasi masih di bawah ketentuan standar, yaitu *rest area* KM 282B, *rest area* KM 429A dan *rest area* KM 260B. Pada *rest area* tipe B, terdapat 4 *rest area* yang mewadahi jumlah kendaraan Gol II-V masih di bawah standar, yaitu: *rest area* KM 294B, *rest area* KM 424B, *rest area* KM 487A dan *rest area* KM 487B. Untuk *rest area* KM 287A, layout parkir kendaraan Gol II-V belum diolah, sedangkan di *rest area* KM 391A tidak tersedia *layout* parkir untuk kendaraan Gol II-V. *Rest area* KM 487A juga belum memenuhi standar jumlah parkir kendaraan Gol I dikarenakan luasan *site*-nya yang memang jauh di bawah standar. Tabel 2 menyajikan perbandingan pemenuhan standar layanan *rest area* pada trase Simpang Susun Kanci-Banyudono.

Beberapa *rest area* bahkan mempunyai keunikan dan nilai lebih di luar standar, antara lain: *rest area* KM 379A, *rest area* KM 260B, *rest area* KM 487A-B dan *rest area* KM 456A-B. *Rest area* KM 379A mempunyai kekhasan ritel kuliner dan ritel pakaian (*clothing*), fasilitas khusus *charging station* untuk kendaraan listrik serta bentuk bangunan masjid yang ikonik. *Rest area* KM 260B mempunyai keunikan karena mempertahankan bangunan pabrik gula (*heritage*), dan terdapat bangunan masjid sebagai ikon *rest area*, tambahan fasilitas berupa wahana permainan, taman botani dan kebun binatang mini.

Rest area KM 487A-B mempunyai desain bangunan selaras dengan lanskap alami yang menonjolkan elemen kolam, tanaman kolam, dan sebagainya. Sedangkan keunikan di *rest area* KM 456A-B adalah desain yang mengekspos pemandangan pegunungan, *layout* kios dengan konsep *mal*, *sky bridge* dengan panorama luas menghubungkan *rest area* A dan B, konservasi tanaman buah langka nusantara.



Gambar 5 Penerapan Standar *Rest Area* di Sepanjang Jalan Tol pada Trase Simpang Susun Kanci-Banyudono Kartosuro

Desain sebagai Nilai Tambah pada Fungsi *Rest Area*

Rest area KM 456 dan *rest area* KM 260B merupakan *rest area* yang berada pada jalan tol di Pulau Jawa. *Rest area* KM 456A dan 456B merupakan *rest area* tipe B yang berada pada ruas Jalan Tol Semarang-Solo (Salatiga), dan merupakan salah satu *rest area* terbaik versi PUPR (2021). Sedangkan *rest area* KM 260B merupakan *rest area* tipe A yang berada pada ruas Jalan Tol Pejagan-Pemalang (Brebes), dengan keunikan dalam memanfaatkan dan memberdayakan aset heritage milik BUMN (Pabrik Gula

Banjaratma) yang sudah berhenti beroperasi selama 20 tahun.

Rest Area Heritage KM 260B Banjaratma

Rest Area Heritage KM 260B Banjaratma merupakan *rest area* di bawah manajemen operasional PT PP Sinergi Banjaratma yang berlokasi pada ruas tol Pemalang-Pejagan, ke arah Jakarta, yang beroperasi sejak 17 Maret 2019. *Rest area* ini merupakan *rest area* tipe A, berjarak 22 km dari *rest area* 282B (tipe A) dan 31 km dari *rest area* 229B (tipe A). *Rest area* ini memiliki luas sekitar 10,4 ha. Sesuai dengan standar *rest area* tipe A, *rest area* KM 260B, fasilitas yang disediakan meliputi ATM, toilet, SPBU, bengkel darurat, minimarket, masjid, kios, area parkir, ruang terbuka hijau, restoran, fasilitas bermain anak. Menurut portal resmi pemerintah Provinsi Jawa Tengah (2018), kapasitas parkir pada *rest area* ini mampu menampung sekitar 400 kendaraan pribadi dan 80 kendaraan besar.

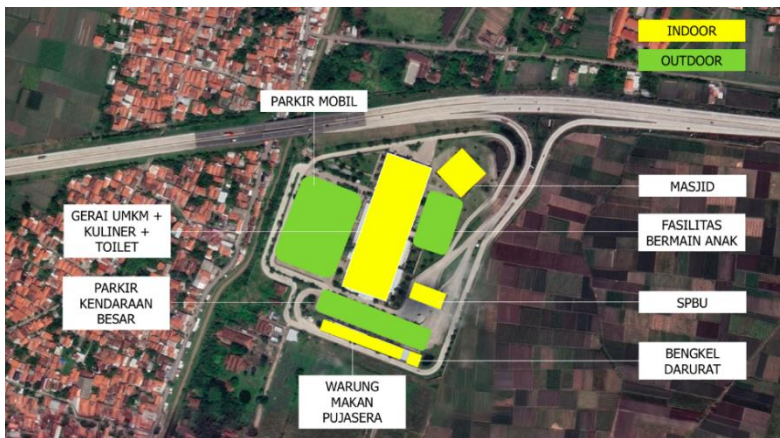


Gambar 6 Lokasi *Rest Area* Heritage KM 260B Banjaratma

Rest area ini berada di wilayah Desa Banjaratma, 5 km di sebelah

barat Kota Brebes, dengan memanfaatkan kembali bangunan dan lahan bekas Pabrik Gula Banjaratma yang didirikan oleh perusahaan perkebunan yang berpusat di Amsterdam, Belanda, NV Cultuurmaatschappij pada tahun 1908. Pabrik gula ini dioperasikan sebagai pabrik gula pada tahun 1913 dan kemudian ditutup pada tahun 1997 dengan status sebagai bangunan cagar budaya. Sejalan dengan dibangunnya Jalan Tol Trans Jawa yang melalui Banjaratma, yang kemudian diikuti dengan pengembangan fasilitas *rest area* di sepanjang jalan tol, kompleks pabrik gula Banjaratma direvitalisasi dengan mempertahankan bangunan lama disesuaikan dengan fungsi baru sebagai kompleks *rest area* dengan nama *Rest Area Heritage Km 260B Banjaratma* yang melibatkan konsorsium PT Waskita Toll Road, PT Rajawali Nusantara Indonesia, PT Pembangunan Perumahan (Persero) Tbk, PT PP Properti, PT Jasamarga Properti, dan PT Perkebunan Nusantara IX (PTPN).

Zonasi fungsi dan fasilitas pada *rest area* heritage KM 260B Banjaratma disajikan dalam gambar berikut:



Gambar 7 Zonasi Fungsi dan Fasilitas pada *Rest Area Heritage* KM 260B Banjaratma

Bangunan utama pabrik gula dimanfaatkan sebagai *UMKM Center*, dengan mempertahankan bagian-bagian penting komponen bangunan lama sebagai penanda konteks sejarah. Gerai *UMKM* tersebut, menurut portal resmi pemerintah Provinsi Jawa Tengah (2021), saat ini mengakomodasi 158 *UMKM* yang mayoritas banyak menjual produk lokal, terdiri dari 130 *UMKM* dengan produk makanan, minuman, kerajinan, dan oleh-oleh serta 28 *UMKM* dengan produk busana yang tergabung dalam sentral batik Indonesia. Selain potensi lokal, *rest area* ini juga mengakomodasi beberapa *tenant* kelas nasional dan internasional sebagai daya tarik dengan menempatkannya pada titik-titik strategis. Tampilan *Rest Area Heritage* KM 260B Banjartma disajikan dalam gambar berikut:



Gambar 8 Bangunan *Heritage* Eks Pabrik Gula *Rest Area* KM 260B Banjartma

Masjid As Safar sebagai fasilitas ibadah didesain dengan arsitektur khas sebagai respon dari arsitektur bangunan lama pabrik gula

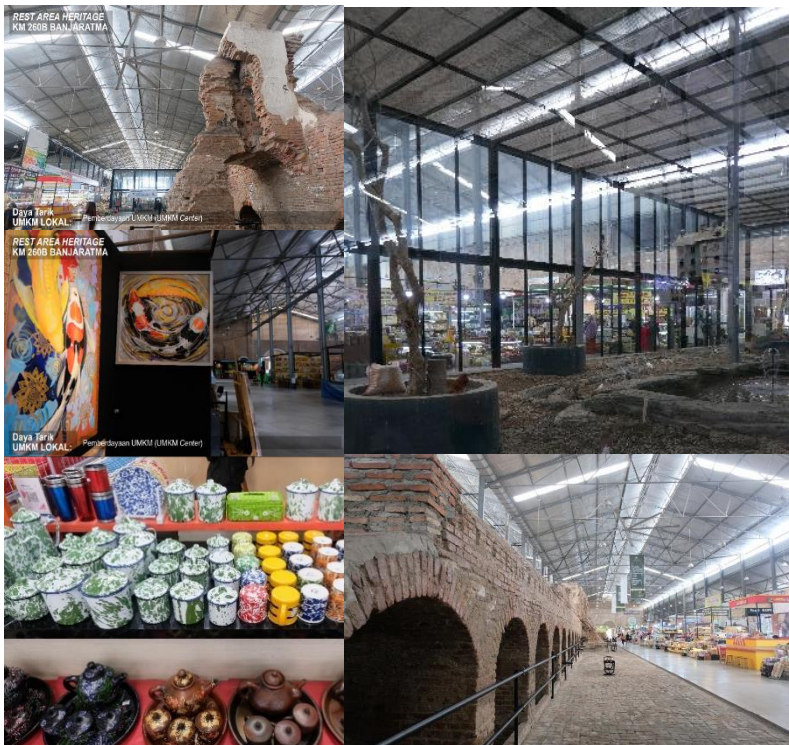
menjadi ikon pelengkap *rest area* ini. Di samping itu, untuk memfasilitasi anak-anak sekaligus menjadi daya tarik, juga dikembangkan area khusus bermain anak berupa wahana permainan, taman botani, dan kebun binatang mini. Keberadaan lokomotif tua di bagian ruang terbuka yang dulu berperan sebagai sarana pengangkut tebu menjadi tetenger yang menguatkan konteks lokasi. Dengan kelengkapan fasilitas yang dimiliki, *rest area* ini juga dimanfaatkan oleh masyarakat sekitar sebagai tempat rekreasi.



Gambar 9 Bangunan Baru Masjid As Safar sebagai Ikon Baru dengan Arsitektur Kontekstual pada *Rest Area Heritage* KM 260B Banjaratma



Gambar 10 Ketersediaan Fasilitas Rekreasi untuk Pengguna *Rest Area* dan Masyarakat Sekitar



Gambar 11 Pemberdayaan UMKM Lokal yang Memanfaatkan Bangunan Utama dengan Keunikan Komponen *Heritage* menjadi Daya Tarik *Rest Area*

Resta Pendopo 456 Salatiga

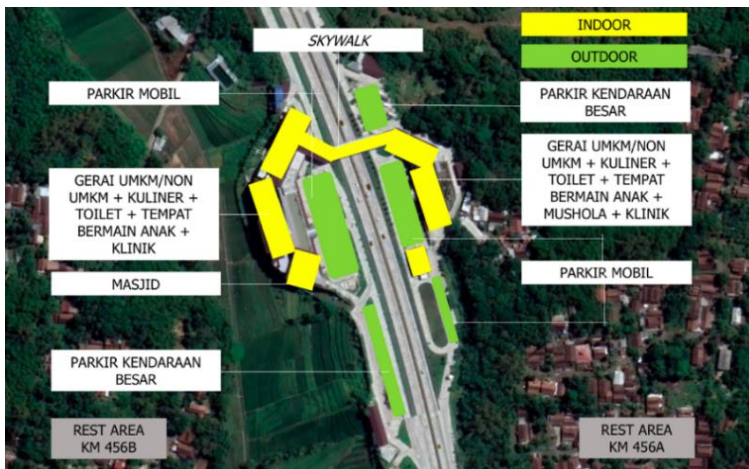
Rest area KM 456A dan 456B dikenal sebagai Resta Pendopo 456 Salatiga, merupakan *rest area* yang berlokasi pada dua sisi berseberangan, pada ruas Jalan Tol Semarang-Solo, ke arah Semarang (456B) dan ke arah Solo (456A), terhubung oleh jembatan yang melintas di atas jalan tol. *Rest area* ini di bawah manajemen operasional PT Astari Marga Sarana, merupakan hasil sinergi PT Trans Marga Jawa Tengah dan ASTRA Internasional yang diinisiasi oleh ASTRA Property dan ASTRA Infra melalui PT Asta Astari Sejahtera, dan membentuk *joint venture* dengan PT Sarana Pembangunan Jawa Tengah, yang beroperasi sejak Agustus 2020.



Gambar 12 Lokasi Resta Pendopo 456 Salatiga

Resta Pendopo 456 Salatiga merupakan *rest area* tipe B, dengan luas lahan total 3,3 ha, terdiri dari 1,1 ha pada *rest area* 456A, dan 2,2 ha pada *rest area* 456B. Resta Pendopo 456A berjarak 27 km dari *rest area* 429A (tipe A) dan 31 km dari *rest area* 487A (tipe B), sedangkan Resta Pendopo 456B memiliki jarak 36 km dari *rest area* 424B (tipe B) dan 31 km dari *rest area* 487B (tipe B). Sesuai dengan

standar *rest area* tipe B, baik *rest area* 456A ataupun 456B memiliki fasilitas ATM, toilet, minimarket, mushola/masjid, restoran, area parkir, dan ruang terbuka hijau. Menurut data dari PT Jasa Marga Trans Jawa Tol, kapasitas parkir pada *rest area* ini mampu menampung sekitar 130 kendaraan pribadi dan 20 kendaraan besar pada *rest area* 456A, serta 77 kendaraan pribadi dan 20 kendaraan besar pada *rest area* 456B. Zonasi fungsi dan fasilitas pada Resta Pendopo 456 Salatiga disajikan dalam gambar-gambar berikut:

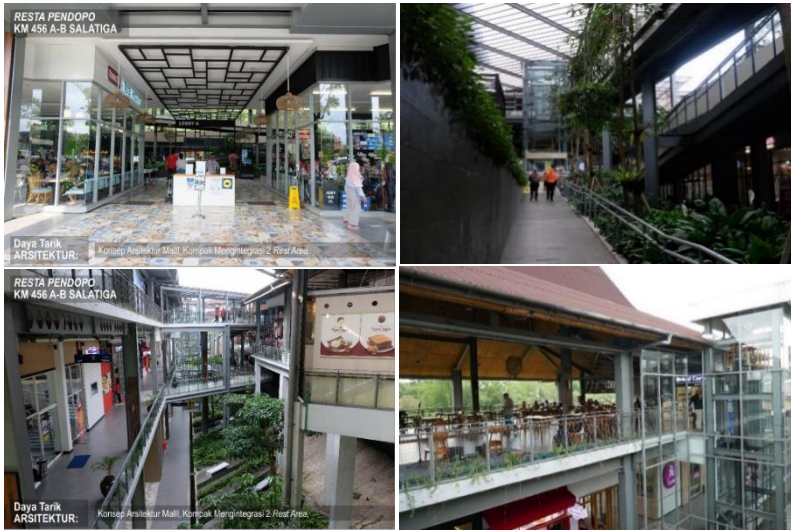


Gambar 13 Zonasi Fungsi dan Fasilitas pada Resta Pendopo 456 Salatiga



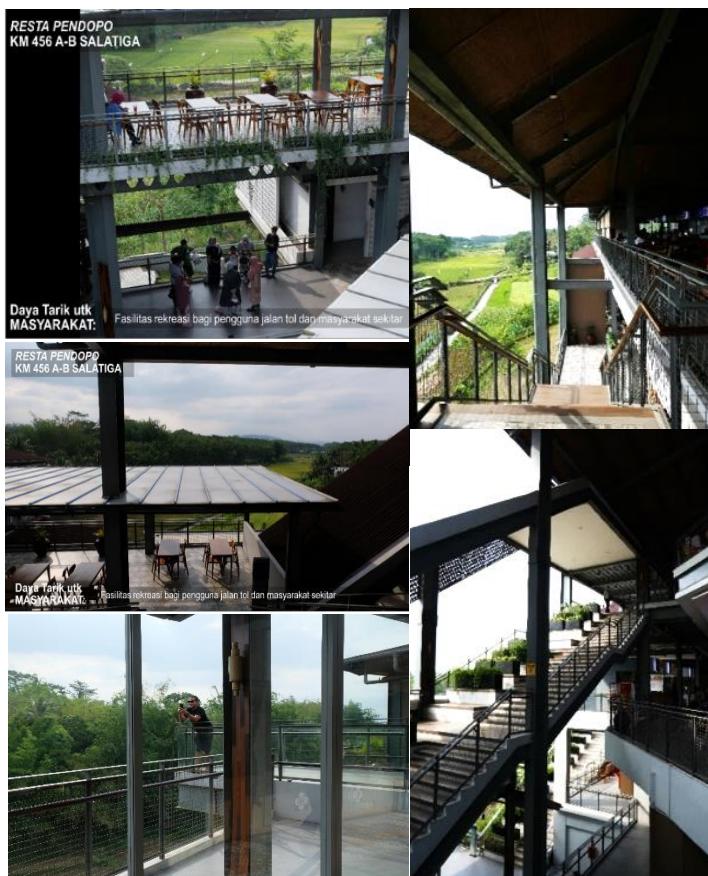
Gambar 14 Konsep *Mixed Use Building* pada Resta Pendopo 456 Salatiga sebagai Daya Tarik

Berbeda dengan *rest area* pada umumnya dengan dominasi ruang terbuka yang dominan serta terdiri dari beberapa bangunan, Resta Pendopo 456 Salatiga ini didesain dengan konsep mal, bangunan besar dengan beberapa lantai ramah disabilitas yang mengakomodasi beragam fungsi (*mixed use building*) sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15 Konsep *Shopping Mall* yang Terintegrasi dengan Alam sebagai Daya Tarik

Dengan prinsip desain terbuka dan menyatu dengan alam, *rest area* ini banyak memanfaatkan penghawaan alami serta ekspos panorama alam sekitar yang indah melalui beberapa titik *deck view* dalam bangunan serta *sky bridge* dengan panorama luas sebagai penghubung antar kedua *rest area*, tidak hanya dirancang sebagai tempat beristirahat bagi pengguna jalan tol, namun juga sebagai tujuan wisata. Keindahan pemandangan pada *rest area* ini dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16 Pemandangan Alam sebagai Daya Tarik untuk Fungsi Rekreasi Masyarakat Sekitar

Terdapat lima buah atap joglo yang melambangkan lima buah gunung yang ada di Jawa Tengah (Merbabu, Merapi, Sumbing, Sindoro, dan Telomoyo) pada bangunannya. Selain memiliki panorama yang indah, Resta Pendopo Salatiga ini memiliki area khusus konservasi tanaman buah langka nusantara.

Pada tahun 2021, Resta Pendopo 456 Salatiga ditetapkan sebagai salah satu Tempat Istirahat dan Pelayanan (TIP) atau *rest area* tipe

B terbaik di Indonesia oleh PUPR. Sebagian gambaran bangunan di *rest area* ini disajikan dalam Gambar 17.



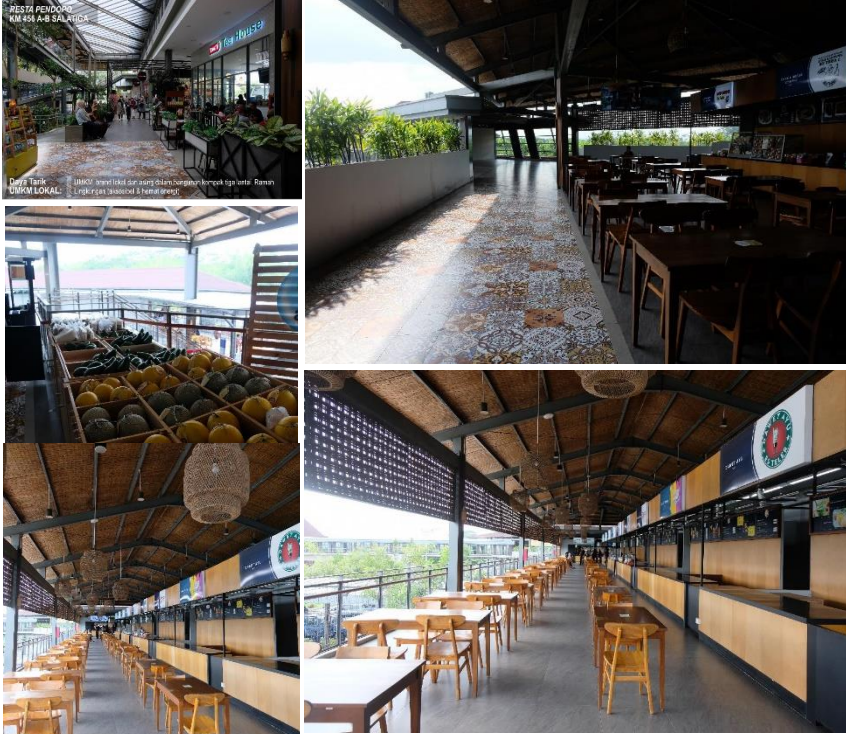
Gambar 17 Fasilitas Parkir di Kedua Sisi Jalan Tol

Selain *tenant-tenant* terkenal, Resta Pendopo 456 Salatiga ini juga mewadahi UMKM lokal yang berada di sekitar Kota Semarang, Salatiga, Boyolali, Solo serta kabupaten lainnya di area kawasan sekitar jalan tol, dalam berbagai bentuk, terutama makanan dan kuliner, sejumlah 36 UMKM dari total 55 *tenants*.

Desain sebagai Nilai Tambah pada Fungsi *Rest Area*

Dari Laporan Tahunan Badan Pengatur Jalan Tol 2020, status pada bulan Oktober 2020, pengembangan TIP/*rest area* dari fungsi dasarnya sebagai tempat beristirahat setelah melakukan perjalanan jauh, didasarkan atas empat konsep, yaitu transit antarmoda, destinasi wisata, hub logistik, dan integrasi dengan kawasan industri. Pengembangan fungsi lain tersebut akan memberikan dampak positif bagi keuntungan ekonomi bagi *rest area*, namun demikian

perlu adanya antisipasi pemenuhan kebutuhan ruang sebagai dampak dari penambahan fungsi baru.



Gambar 18 Pemberdayaan UMKM Lokal Dipadukan dengan *Brand* Lokal dan Asing sebagai Daya Tarik

Pada kasus *rest area* di sepanjang Jalan Tol Trans Jawa, masing-masing sudah tampak menonjolkan nilai lebih dalam desain ataupun fasilitasnya, sesuai dengan potensi lokasi yang dimiliki. Pada umumnya, kelengkapan fasilitas sudah dipenuhi sesuai dengan tipenya, sehingga faktor nilai tambah ini akan menjadi daya tarik yang membedakan dengan *rest area* yang lain, yang akan menarik pengguna jalan tol untuk singgah dan beristirahat. Beberapa kasus *rest area* tipe A dan B banyak menggunakan *tenant* kelas nasional

atau internasional yang ternama sebagai daya tarik. Di sisi lain, masjid sebagai tempat ibadah seringkali menjadi fasilitas yang diekspos desain arsitekturalnya pada banyak kasus *rest area*, sehingga menjadi ikon visual yang mampu menjadi daya tarik. Strategi-strategi memberikan nilai tambah seperti ini sering dijumpai pada kasus-kasus *rest area* dimana tidak memiliki keunikan pada lokasi. Adanya arahan bahwa *rest area* tipe A dapat dilengkapi dengan fasilitas inap pada ruas jalan tol antarkota juga membuka peluang untuk memberikan nilai lebih pada *rest area*.

Pada lokasi-lokasi *rest area* yang memiliki keunikan, tentunya nilai tambah ini menjadi lebih kuat sebagai daya tarik, seperti halnya pada kasus *Rest Area Heritage* KM 260B Banjartatma dan kasus *Resta Pendopo* KM 456 Salatiga. Pemanfaatan kembali bangunan lama bekas kompleks pabrik gula Banjartatma menjadi keunikan yang tidak dijumpai pada *rest area* lainnya. Namun demikian, perlu diperhatikan pada penataan ruang dalam untuk penempatan gerai-gerai UMKM supaya tidak mengurangi nilai keunikan bangunan dan komponen-komponen *heritage* di dalamnya, dan juga masih terdapat beberapa bangunan rumah dinas yang belum difungsikan kembali yang berpotensi untuk menambah fasilitas pada *rest area* yang dapat menguatkan nilai tambahnya. Di sisi lain, penambahan wahana bermain anak pada *Rest Area Heritage* KM 260B Banjartatma pada lahan terbuka yang cukup luas merupakan contoh positif yang dapat dikembangkan pada *rest area* lainnya dalam pemanfaatan lahan terbuka.

Pada kasus *Resta Pendopo* KM 456 Salatiga, nilai lebihnya cukup kuat. Hal ini dapat terlihat dari jumlah kunjungan rata-rata per hari mencapai 7.000 orang, bahkan dapat mencapai 30.000 orang per hari

dalam periode mudik lebaran (Kompas.com, 29/04/2022). Lokasi yang dikelilingi panorama indah pegunungan menjadi nilai tambah yang direspon dengan baik oleh desain arsitektur bangunannya. Selain itu, dengan mengedepankan konsep mal pada desainnya, *rest area* ini juga berfungsi sebagai destinasi rekreasi. Namun demikian, dengan daya tarik yang sangat tinggi, perlu adanyaantisipasi dalam mengakomodasi limpahan pengunjung untuk perhitungan kapasitas parkir kendaraan pribadi, terutama pada periode mudik lebaran.

Pemahaman mengenai nilai tambah *rest area* tidak hanya terfokus pada nilai tambah daya tarik bagi pengunjung yang pada umumnya adalah para pengguna jalan tol, namun juga nilai tambah bagi masyarakat di sekitar *rest area*. Adanya kebijakan untuk selalu memberikan peluang pemanfaatan ruang *rest area* bagi UMKM lokal akan mampu membantu meningkatkan perekonomian masyarakat setempat.

Di samping itu dengan adanya nilai tambah fasilitas rekreasi, seperti halnya taman bermain anak (*Rest Area Heritage* KM 260B Banjaratma) dan mal (Resta Pendopo KM 456 Salatiga) mampu memberikan alternatif tempat rekreasi keluarga bagi masyarakat sekitar.

Tabel 3 Nilai Tambah (*Beyond Standard*) pada *Rest Area* Banjaratma (KM 260B) dan *Rest Area* Salatiga (KM 456A-B)

Aspek Nilai Tambah	<i>Rest Area</i> Banjaratma (KM 260B)	<i>Rest Area</i> Salatiga (KM 456A-B)
Daya Tarik Arsitektur	Konsep <i>Adaptive re-use heritage</i> eks Pabrik Gula Banjaratma & dengan Masjid arsitektur ikonik kontekstual	Konsep Arsitektur Mall, Kompak Mengintegrasikan 2 <i>Rest Area</i> ,

Tabel 3 Nilai Tambah (*Beyond Standard*) pada *Rest Area* Banjaratma (KM 260B) dan *Rest Area* Salatiga (KM 456A-B) (lanjutan)

Aspek Nilai Tambah	<i>Rest Area</i> Banjaratma (KM 260B)	<i>Rest Area</i> Salatiga (KM 456A-B)
Daya Tarik UMKM Lokal	Pemberdayaan UMKM (UMKM Center)	UMKM, <i>brand</i> lokal dan asing dalam bangunan kompak tiga lantai, Ramah Lingkungan (aksesibel & hemat energi)
Daya Tarik untuk Masyarakat	Fasilitas rekreasi bagi pengguna jalan tol dan masyarakat sekitar	Fasilitas rekreasi bagi pengguna jalan tol dan masyarakat sekitar

KESIMPULAN

Rest area yang mempunyai keunikan akan dapat menjadi daya tarik tersendiri bagi pengunjung. Dengan adanya atraktor tersebut, *rest area* akan mempunyai nilai tambah dibandingkan dengan *rest area* lain. Beberapa daya tarik yang bisa dikembangkan di *rest area* adalah 1) Daya tarik fasilitas, dimana pemenuhan fasilitas (baik untuk manusia maupun untuk kendaraan) tidak hanya sesuai standar, tapi memiliki keunikan; 2) Daya tarik arsitektur berupa bentuk bangunan yang ikonik, tema/konsep desain yang memberikan pengalaman ruang berbeda dari *rest area* lainnya; 3) Daya tarik UMKM lokal, dimana *rest area* dapat memberdayakan UMKM lokal; 4) Daya tarik untuk masyarakat, berupa tambahan aktivitas / kegiatan yang dapat dilakukan di *rest area*, seperti rekreasi (wahana bermain, *mini zoo*), edukasi (galeri, museum, dan sebagainya).

DAFTAR PUSTAKA

- Alkhatni, F., Ishak, S. Z., Milad, A. 2021. *Characteristics and Potential Impacts of Rest Areas Proximate to Roadways: A Review*. The Open Transportation Journal, 15: 260-271.
- Autostrada Wielkopolska S.A. 2017. *Motorway Rules Applicable on A2 Toll Motorway Section Świecko – Konin*. www.aesa.pl/en/a2-regulations/. Diakses 5 Oktober 2022.
- Fowler, D. W., Malina, Jr., J. F., Perry, K. W., Vliet, G. C. 1988. *Design Recommendations for Rest Areas*. Center for Transportation Research, The University of Texas. Austin.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2018. *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 10 / PRT /M/2018 tentang Tempat Istirahat dan Pelayanan pada Jalan Tol*. Jakarta.
- Laskara, G. W. 2021. *Prinsip Perencanaan dan Kriteria Pengendalian Pengembangan Fasilitas Rest-Area pada Jalan Tol di Indonesia*. Jurnal Perencanaan Pembangunan Wilayah dan Perdesaan, 5 (2): 123-133.
- Moore, M. W. 1994. *Rest Areas on Tourist Highways*. Lincoln University Digital Dissertation. Thesis of the Diploma at Landscape Architecture at Lincoln College, University of Canterbury.
- Plovnick, A., Berthaume, A., Poe Carson, P., and Hodges, T. 2017. *Sustainable Rest Area Design and Operations*. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Washington DC.
- Tun, T. T., Hlaing M., Win W. 2013. *Comparative Analysis on Highway Rest Centres Along Yangon-Mandalay Expressway*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3 (12): 41-48.

Buku kedua dari buku seri *Kajian Kritis Pembangunan Jalan Tol di Indonesia* ini banyak membahas mengenai kajian “engineering” dari suatu jalan tol. Kajian didasarkan pada pengalaman para pakar dalam mengatasi permasalahan-permasalahan yang dijumpai dalam pembangunan dan pengoperasian jalan tol. Beberapa tema menarik yang dibahas meliputi peran jalan tol dengan pengembangan kawasan ekonomi wilayah, hasil perancangan dan desain jalan tol khususnya dalam bentuk simpang susun, Teknologi Building Information Modelling, pembangunan jalan tol di atas tanah lunak atau “soft soils”, serta perencanaan dan pembangunan jembatan pada jalan tol, penerapan teknologi “terbaru” dalam pemantauan muka tanah timbunan untuk jalan tol. Dalam buku ini juga dibahas konsep “sustainability” dari jalan tol, secara khusus yaitu dalam mempertahankan keanekaragaman hayati di wilayah proyek jalan tol, kemudian aspek lanskap pada jalan tol, terutama pada jalan tol yang akan dan sudah beroperasi, serta pada bagian penutup mengenai peranan Tempat Istirahat dan Pelayanan atau rest area pada jalan tol yang tidak dapat dihindarkan, terutama pada jalan tol yang sangat panjang, seperti Jalan Tol Trans Jawa.

Kami mengapresiasi terbitnya buku ini yang memberikan penjelasan menyeluruh tentang peluang dan tantangan dalam penyelenggaraan jalan tol di Indonesia. Semoga buku ini dapat menjadi inspirasi kepada masyarakat dan penyelenggara jalan tol untuk dapat menciptakan jalan tol yang aman, nyaman, berkeselamatan, dan ramah lingkungan.

Dr. Ir. Hedy Rahadian, M.Sc. - **Direktur Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat**

Mengatasi collaborative inertia model bisnis penyediaan infrastruktur publik (termasuk jalan tol), memerlukan leaderships, tata kelola, dan keterikatan publik yang kuat dalam politik infrastruktur, perencanaan, pengadaan, maupun pelaksanaannya, katalis utama kepastian usaha dan iklim investasi di Indonesia.

Dr. Ir. Krist Ade Sudiyono, M.M - **Group COO ASTRA Infra/ Sekretaris Jenderal Asosiasi Jalan Tol Indonesia**

Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi (FSTPT) sangat mengapresiasi buku ini yang memberikan lesson learned yang bermanfaat bagi akademisi dan praktisi. Buku ini membahas mengenai geometrik, prediksi demand, serta aspek teknologi yang bertujuan menjamin kenyamanan dan keselamatan pengemudi serta kesinambungan jalan tol di Indonesia. Selamat kepada tim penerbit dan kontributor.

Andyka Kusuma, S.T., M.Sc, Ph.D. - **Ketua Umum Forum Studi Transportasi Antar Perguruan Tinggi (FSTPT)**



PT Penjaminan Infrastruktur Indonesia (Persero) Mendukung pertumbuhan ekonomi Indonesia di tengah keterbatasan anggaran Pemerintah. Pemenuhan atas kebutuhan infrastruktur merupakan langkah penting dalam menjaga pertumbuhan ekonomi. Di tengah keterbatasan anggaran Negara, Pemerintah Indonesia mendorong partisipasi Badan Usaha dalam pembangunan infrastruktur Nasional melalui dukungan kebijakan, instrumen dan kerangka fiskal.



UNIVERSITAS GADJAH MADA
PUSAT STUDI TRANSPORTASI DAN LOGISTIK

Pusat Studi Transportasi dan Logistik (Pustral) Universitas Gadjah Mada memiliki visi terwujudnya pusat studi bidang transportasi dan logistik yang unggul dan inovatif berkelas dunia yang mengabdikan kepada kepentingan bangsa dan kemanusiaan. Pustral UGM memiliki lingkup keahlian Infrastruktur, Sistem dan Manajemen; Ekonomi dan Bisnis; Kebijakan, Kelembagaan dan Regulasi; Sosial, Budaya, Keselamatan dan Lingkungan; Tata Rancang Kawasan berbasis Mobilitas; serta Telematika dan Sistem Informasi.

