

UNIVERSITAS
LAMBUNG MANGKURATIrfan Prasetya <iprasetya@ulm.ac.id>

Surat Keterangan Penerimaan Naskah

1 message

Jurnal Jalan-Jembatan <jurnal.jalanjembatan@pu.go.id>
To: Irfan Prasetya <iprasetya@ulm.ac.id>

Wed, Jun 21, 2023 at 3:15 PM

Kepada Yth. Penulis

Kami sampaikan Surat Keterangan Penerimaan Naskah yang telah diterbitkan pada Jurnal Jalan Jembatan Vol. 40 No. 1 Januari - Juni 2023.

Kami informasikan terbitan ini akan terbit secara cetak terlebih dahulu, untuk online akan kami informasikan kembali apabila portal jurnal sudah selesai dalam maintenance (<https://binamarga.pu.go.id/jurnal>)


Demikian kami sampaikan atas perhatian dan kerjasamanya diucapkan terima kasih.

Best Regards,
Redaksi Jurnal Jalan-Jembatan

Kementerian Pekerjaan Umum Perumahan Rakyat
Direktorat Jenderal Bina Marga
Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan
e-mail: jurnal.jalanjembatan@pu.go.id

2 attachments

 **684-KET-Be.4-2023 SK Naskah Ilmiah - Irfan Prasetya.pdf**
238K

 **Jurnal Jalan-Jembatan Volume 40 No.1 Januari-Juni 2023_V.6.2.pdf**
4451K



KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT
DIREKTORAT JENDERAL BINA MARGA

DIREKTORAT BINA TEKNIK JALAN DAN JEMBATAN

Kantor: Jl. Pattimura No.20, Kebayoran Baru, Jakarta Selatan 12110. Telp. 021-7260850 email: bintekjatan@pu.go.id
Lab: Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung Bandung 40294, Telp. 022-7802251, Fax. 022-7802726

SURAT KETERANGAN
PENERIMAAN NASKAH ILMIAH
NOMOR: 684/KET/Be.4/2023

Diberitahukan bahwa, Naskah ilmiah yang dengan judul:

PENGARUH PERBEDAAN KUALITAS LIMBAH KERAMIK TERHADAP SIFAT MEKANIS
BLOK PERKERASAN

Yang diserahkan oleh,

Nama Penulis : Irfan Prasetia¹⁾, Rholly Akhrizani Akhbar²⁾

Instansi : ^{1),2)}Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat

Telah diterima dan dipublikasikan pada Jurnal Jalan Jembatan Volume 40 No. 1 Januari-Juni 2023. Demikian surat ini dibuat untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 20 Juni 2023

Kepala Subdirektorat Data dan Pengembangan
Sistem Informasi Jalan dan Jembatan,


Irfan Permana Wadani, ST, M.PP
NIP 198012012005021001

Volume 40 No. 1, Januari-Juni 2023

ISSN 1907 - 0284 (Versi cetak)
ISSN-L 2527 - 8681 (Versi elektronik)

JURNAL JALAN - JEMBATAN



Terakreditasi 200/M/KPT/2020
Berlaku : Vol. 38 No. 1 Tahun 2021 - Vol. 42 No.2 Tahun 2025

JURNAL JALAN - JEMBATAN

Jurnal Jalan-Jembatan adalah wadah informasi bidang Jalan dan Jembatan berupa hasil penelitian, studi kepustakaan maupun tulisan ilmiah terkait yang meliputi **Bidang Bahan dan Perkerasan Jalan, Geoteknik Jalan, Transportasi dan Teknik Lalu-Lintas serta Lingkungan Jalan, Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan**. Terbit pertama kali tahun 1984, dengan frekuensi terbit tiga kali setahun pada bulan April, Agustus, dan Desember. Mulai tahun 2016 terbit dengan frekuensi dua kali setahun, edisi Januari - Juni dan edisi Juli - Desember, dalam versi cetak dan versi elektronik. Sesuai Surat Keputusan Dirjen Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Ristekdikti No: 200/M/KPT/2020, Jurnal Jalan - Jembatan telah **Terakreditasi Peringkat 2**.

Pelindung

Direktur Jenderal Bina Marga

Penanggung Jawab

Direktur Bina Teknik Jalan dan Jembatan

Ketua Dewan Redaksi

Gede Budi Suprayoga, S.T., M.T., Ph.D

Reviewer:

Internal Editor

Drs. Gugun Gunawan, M.Si (Bidang lingkungan Jalan)
Dr. Drs. Madi Hermadi, MM (Bidang Teknik Jalan)
Dr. Greece Maria Lawalata, ST., MT. (Bidang Transportasi)
Dr. Fahmi Aldiamar, ST., MT. (Bidang Geoteknik)
Dea Pertiwi, S.T., M.T (Bidang Geoteknik)
Cahya Ahmad Gumilar, S.T., M.Sc. (Bidang Geoteknik)
Redrik Irawan, S.T., M.T. (Bidang Jembatan)

Eksternal Editor / Mitra Bestari

Prof. Ir. Lanneke Trisanto (Bidang Struktur Jembatan)
Prof. Ir. Wimpy Santosa, M.Sc., Ph.D. (Bidang Transportasi)
Prof. Paulus P. Rahardjo, MSCE., Ph.D (Bidang Geoteknik)
Prof. Dr. Ir. Bambang Suryoatmono, M.Sc. (Bidang Struktur)
Prof. Dr. Eng. Ir. Made Suangga, MT (Bidang Geoteknik)
Prof. Dr. Ir. Hidayat Soegihardjo, M.S. (Bidang Perkerasan Jalan)
Dr. Ir. Hikmat Iskandar, M.Sc. (Bidang Transportasi)
Dr. Ir. Harmein Rahman, MT (Bidang Perkerasan Jalan)
Dr. Ir. Imam Aschuri, MT (Bidang Perkerasan Jalan)
Ir. Latif Budi Suparma, M.Sc., Ph.D. (Bidang Perkerasan Jalan)
Endra Susila, ST, MT, Ph.D. (Bidang Geoteknik)

Editor Teknis

Firman Permana Wandani, ST. M.PP.
Ani Mulyani, S.Sos, M.Ak.
Iwan Pirdaus, S.A.P.
Risma Hermawati, ST.
Herma Nurulaeni, S.Kom

Sekretariat

Uman Sumantri, S.SI
Aditya Abdurachman

Jurnal Jalan-Jembatan diterbitkan oleh Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Alamat Redaksi/Penerbit:

Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Jl. A.H. Nasution No. 264, Kotak Pos 2 Ujungberung – Bandung 40294 Tlp. (022)7802251-7802252-7802253
e-mail: jurnal.jalanjembatan@pusjatan.pu.go.id, Fax.: (022)7802726-781147
website: <http://jurnal.pusjatan.pu.go.id/index.php/jurnaljalanjembatan>

Prakata

Pembangunan jalan memerlukan dukungan material jalan yang berkualitas. Dengan tren mengarah pada pembangunan jalan yang berkelanjutan, pengembangan teknologi material jalan menjadi faktor kunci untuk menurunkan emisi karbon dan menerapkan prinsip-prinsip 3R (*reduce, reuse, dan recycle*) dalam konstruksi jalan. Kebijakan nasional telah mendorong praktik pemanfaatan material lokal dalam rangka meningkatkan kemantapan jalan mencapai 99% pada tahun 2030 (Kementerian PUPR, 2020).

Pada edisi kesatu volume 40 tahun 2023, Jurnal Jalan dan Jembatan menerbitkan enam makalah. Empat diantaranya berasal dari bidang material jalan. Sisanya adalah satu makalah bidang struktur dan satu makalah bidang transportasi jalan. Seluruh makalah menyajikan penelitian yang orisinal dan mengandung kebaruan untuk mewujudkan pembangunan jalan yang lebih andal, ekonomis, berkeselamatan, dan berkelanjutan.

Tulisan pertama menyajikan kinerja beban layan dan deformasi pada jembatan gantung tipe suspended dengan lantai kaca. Uji pembebanan statis diberlakukan pada segmen lantai kaca dan struktur jembatan secara keseluruhan. Hasil uji menunjukkan bahwa besaran respon struktur jembatan dapat dimodelkan sehingga dapat dilakukan simulasi yang mendekati beban layan saat beroperasi (Nugraha dkk., 2023).

Tulisan kedua membandingkan dampak lingkungan produksi campuran panas modifikasi polimer melalui metode modifikasi bitumen (PMB) dan metode aplikasi ke dalam campuran (*dry mix*). Perbandingan dampak diamati dari hasil asesmen daur hidup (*life-cycle assessment*) dengan menggunakan basis data *Ecoinvent dan Eurobitume*. Studi menemukan bahwa metode kedua atau metode *dry mix* lebih ramah lingkungan dibandingkan PMB (Daniel dkk., 2023)

Makalah ketiga membahas kinerja campuran aspal berpori yang menggunakan kombinasi limbah plastik dan ban bekas (*rubber*). Dengan komposisi kadar limbah 1-3% pada campuran, penulis menemukan peningkatan dari kinerja dari lima parameter yang diuji. Pada komposisi 2% limbah, campuran aspal menunjukkan kinerja yang baik.

Makalah keempat mengenai pemanfaatan limbah dalam konstruksi jalan dengan limbah keramik jenis B1a dan B11b. Pemanfaatan limbah keramik diuji pada komposisi yang berbeda pada sampel mortar dan blok perkerasan dan diuji kesesuaiannya dengan mutu yang potensial untuk dimanfaatkan pada lahan parkir dan jalur pejalan kaki (Prasetya dan Akbar, 2023).

Potensi pemanfaatan material pasir dan kerikil silika dieksplorasi pada tulisan kelima. Dengan mendasarkan pada sumber sisa penambangan batu kapur, makalah menunjukkan peningkatan kuat tekan dan kemampuan untuk menahan retak dari hasil uji penelitian.

Terakhir, Sutandi (2023) mengembangkan analisis *blackspot* (rawan kecelakaan) yang didasarkan atas tiga kriteria (a.l., kondisi jalan, fatalitas kecelakaan, dan analisis risiko). Pengembangan kriteria ini dapat membantu penetapan lokasi rawan kecelakaan secara lebih akurat dan dapat dilakukan mitigasi melalui pengembangan rencana program penanganan jalan.

Kami mengucapkan terima kasih kepada para pengulas (*reviewer*) yang telah memberikan saran dan masukan konstruktif agar Jurnal Jalan dan Jembatan terus dapat meningkatkan kualitasnya. Kami juga mengapresiasi para penulis yang memasukkan karya-karyanya bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi bidang jalan. Semoga makalah pada terbitan ini bermanfaat bagi para pemerhati infrastruktur jalan, praktisi, dan akademisi. Redaksi mengucapkan selamat membaca.

Redaksi Jurnal Jalan dan Jembatan

JURNAL JALAN-JEMBATAN

DAFTAR ISI

Prakata	i
Daftar Isi	ii
Abstrak	xiii
Evaluasi Performa Jembatan Gantung Tipe <i>Suspended</i> Pejalan Kaki Dengan Lantai Kaca Berdasarkan Uji Pembebanan Statis (<i>Performance Evaluation of A Glass Floor Suspended Type Suspension Footbridge Based on Static Load Testing</i>) Widi Nugraha, Budi Subrata, Indra Sidik Permadi, Gatot Sukmara, Achmad Riza Chairulloh, Hari Triwibowo, dan Umar Saripudin	1-16
Perbandingan Dampak Lingkungan Produksi Skala Laboratorium Campuran Aspal Modifikasi Polimer dengan Metode Campuran Basah dan Kering menggunakan <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA) (<i>Environmental Impact Comparison of Laboratory-Scale Production of Polymer-Modified Asphalt with Dry and Wet Mixing Methods using Life Cycle Assessment</i>) Christian Gerald Daniel, M. Rifqon, Fadhil M. Firdaus, Khairina A. Canny	17-31
Kinerja Perkerasan Aspal Berpori dengan Campuran Limbah Plastik dan Karet (<i>The Performance of Porous Asphalt Pavement using Rubber and Plastic Waste</i>) Hery Awan Susanto, Bagyo Mulyono, Arnie Widyaningrum, Widhiatmoko Herry Purnomo	32-43
Pengaruh Perbedaan Kualitas Limbah Keramik terhadap Sifat Mekanis Blok Perkerasan (<i>The Effect of Different Quality of Ceramic Waste on The Mechanical Properties of Paving Block</i>) Irfan Prasetia, Rholly Akhrizani Akhbar	44-53
Penggunaan Pasir dan Kerikil Silika dari Sisa Penambangan Batu Kapur sebagai Substitusi Agregat untuk Perkerasan Jalan Kaku (<i>The Utilization of Silica Sand and Gravel from Limestone Mining Waste as Aggregate Substitution for Rigid Pavement</i>) Etri Suhelmidawati, Gusri Yaldi, Zulfira Mirani, Fahmiza Yufajri, Muhammad Ikhsan	54-66
Analisis Blackspot di Indonesia Berdasarkan Perbedaan Kondisi Jalan, Fatalitas Kecelakaan, dan Analisis Risiko (<i>The Analysis of Blackspot in Indonesia Based on Road Condition Difference, Accident Fatality, and Risk Analysis</i>) Anastasia Caroline Sutandi	67-76

JURNAL JALAN - JEMBATAN

Volume 40 No. 1, Januari – Juni 2023	ISSN 1907 - 0284 (Versi cetak) ISSN-L 2527 - 8681 (Versi elektronik)
Kata kunci bersumber dari artikel. Lembar abstrak ini boleh dikopi tanpa ijin dan biaya	

<p>UDC: 624.5 Widi Nugraha¹⁾, Budi Subrata²⁾, Indra Sidik Permadi³⁾, Gatot Sukmara⁴⁾, Achmad Riza Chairulloh⁵⁾, Hari Triwibowo⁶⁾, dan Umar Saripudin⁷⁾ (¹⁾Institut Teknologi Bandung, ²⁾ ³⁾ ⁵⁾ ⁶⁾ ⁷⁾Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR, ⁴⁾Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Kepulauan Riau, Kementerian PUPR)</p> <p>Evaluasi Performa Jembatan Gantung Tipe <i>Suspended</i> Pejalan Kaki dengan Lantai Kaca Berdasarkan Uji Pembebanan Statis</p> <p>Jurnal Jalan-Jembatan Vol. 40 No.1 Januari – Juni 2023, hal. 1-16</p> <p>Jembatan Kaca Bromo merupakan jembatan gantung tipe <i>suspended</i> dengan lantai kaca struktural yang dibangun oleh Kementerian PUPR di Kawasan Strategis Prioritas Nasional (KSPN) Taman Nasional Bromo Tengger Semeru, Jawa Timur, Indonesia. Jembatan ini dibangun untuk memberikan pengalaman yang unik bagi para pengunjung, yaitu dengan melihat pemandangan indah di sekitar gunung Bromo dari atas lantai jembatan yang transparan. Penggunaan kaca struktural sebagai lantai jembatan perlu diuji terhadap aspek keamanan dan kenyamanan dengan pengujian pembebanan pada segmen lantai kaca struktural dan struktur jembatan secara keseluruhan. Uji pembebanan bertujuan untuk mengetahui apakah jembatan mampu menahan beban yang akan dilewatinya, dalam hal ini beban pejalan kaki. Pada penelitian ini, uji pembebanan pada Jembatan Kaca Bromo dilakukan dengan beban operasional rencana, yaitu sekitar 100 orang pejalan kaki. Besaran beban tersebut dikonversi menjadi 240 buah karung pasir yang digunakan untuk uji pembebanan dengan berat masing masing karung sekitar 35 kg. Respons maksimum jembatan hasil pengukuran akibat beban uji terbesar antara lain deformasi vertikal 72.70 mm pada kondisi beban merata sepanjang bentang, gaya kabel maksimum sebesar 19.84 ton, dan tegangan frame baja sistem lantai kaca sebesar 125.96 MPa. Besaran respons struktur jembatan hasil pengukuran tersebut dapat dimodelkan dengan baik melalui model struktur yang digunakan dalam penelitian ini, sehingga dapat dilakukan simulasi pembebanan yang lebih besar untuk evaluasi beban layan. Hasil dari analisis</p>	<p>menunjukkan bahwa Jembatan Kaca Bromo aman untuk digunakan dengan pembatasan beban layan hingga 400 kg/m². Selain itu, jembatan tersebut memiliki deformasi yang relatif kecil dibanding deformasi ijin, sehingga memenuhi kriteria kenyamanan.</p> <p>Kata kunci: jembatan gantung, tipe <i>suspended</i>, sistem lantai kaca struktural, uji pembebanan, lendutan</p> <p>Kata Kunci: lintasan kritis, acuan, bahan tambah kimia, kuat tekan, metode perendaman.</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>UDC: 625.85 Christian Gerald Daniel¹⁾, M. Rifqon²⁾, Fadhil M. Firdaus³⁾, Khairina A. Canny⁴⁾ ^(1,2) Departemen Teknik Sipil Universitas Pelita Harapan, ³⁾ Air Quality Research Analyst at World Resources Institute, ⁴⁾ Smart Construction and Civil Engineering, Calvin Institute of Technology)</p> <p>Perbandingan Dampak Lingkungan Produksi Skala Laboratorium Campuran Aspal Modifikasi Polimer dengan Metode Campuran Basah dan Kering Menggunakan <i>Life Cycle Assessment (LCA)</i></p> <p>Jurnal Jalan-Jembatan Vol. 40 No.1 Januari – Juni 2023, hal. 17-31</p> <p>Kajian ini mengevaluasi dampak lingkungan produksi campuran aspal panas modifikasi polimer melalui dua metode: memodifikasi bitumen (Polymer Modified Bitumen – PMB) serta aplikasi langsung ke campuran atau metode kering (dry mix) menggunakan metode Life Cycle Assessment (LCA) berdasarkan pengukuran emisi di laboratorium untuk produksi 5 sampel per tipe campuran. Polimer yang digunakan untuk metode kering adalah EVA (Ethylene-Vinyl Acetate) sebanyak 5% - 6% berat bitumen. Ruang lingkup kajian ini adalah dari akuisisi bahan baku hingga produksi skala laboratorium. Pengukuran emisi kegiatan produksi sampel di lab menunjukkan kenaikan emisi CO₂ 21.78 – 38.3%, Volatile Organic Compound (VOC) sebesar 16.69 – 28.93%, serta formaldehida dan partikulat (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) sebesar 14.6 – 20.17% dan 7 – 37% untuk produksi dengan PMB akibat suhu pemanasan yang lebih tinggi. Perbandingan hasil LCA menunjukkan kategori dampak Global Warming Potential untuk produksi sampel PMB hingga 2.8kg CO₂-eq / 5 sampel, meningkat 1.1 – 4.1%. Pada kategori Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential, dampak penggunaan PMB tercatat sebesar 0.32 kg 1.4-DB eq/ 5 sampel, meningkat 9.15 – 12.33%, serta kategori Human Toxicity dan Photochemical Oxidation Potential sebesar 167 kg 1.4-DB eq dan 0.00081 kg C₂H₄ eq / 5 sampel, 14.35 – 25% lebih tinggi dari hasil sampel aspal modifikasi polimer EVA dengan metode kering. Penggunaan EVA menghasilkan sampel dengan Marshall Quotient 67.7% lebih tinggi dan stabilitas 14% lebih rendah dari PMB, dengan sifat volumetrik setara. Disimpulkan bahwa aplikasi polimer dengan metode campuran kering memiliki kualitas setara dengan PMB dan lebih ramah lingkungan.</p> <p>Kata Kunci: life cycle assessment, cradle-to-gate, metode campuran kering, bitumen modifikasi polimer, EVA</p>	<p>UDC: 665.775.4 Hery Awan Susanto¹⁾, Bagyo Mulyono²⁾, Arnie Widyaningrum³⁾, Widhiatmoko Herry Purnomo⁴⁾ ^(1,2,3)Universites Jenderal Soedirman)</p> <p>Kinerja Perkerasan Aspal Berpori dengan Campuran Limbah Plastik dan Karet</p> <p>Jurnal Jalan-Jembatan Vol. 40 No.1 Januari – Juni 2023, hal. 32-43</p> <p>Salah satu upaya penanganan dampak perubahan iklim adalah penerapan konstruksi campuran aspal berpori pada perkerasan jalan. Penggunaan campuran aspal berpori masih terbatas karena kinerjanya yang masih rendah dibandingkan konstruksi campuran aspal pada umumnya. Kajian secara komprehensif untuk meningkatkan kinerja campuran agar optimal dilakukan dalam rangka penggunaan yang lebih luas. Penelitian bertujuan untuk mengetahui kinerja campuran aspal berpori dengan menggunakan limbah plastik dan ban bekas yang dicampur ke dalam aspal melalui pengujian laboratorium (baik dalam kondisi kering dan basah) sesuai dengan AAPA 2004, Indirect Tensile Strength (ITS) (dalam kondisi kering dan basah), ravelling, dan permeabilitas diperoleh dengan variasi kadar limbah plastik dan ban bekas 1-3%. Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa terjadi peningkatan kinerja Marshall, ketahanan terhadap retak, ravelling (berdasarkan uji abrasi) pada campuran aspal berpori dengan limbah plastik dan ban bekas. Campuran aspal berpori dengan limbah plastik dan ban bekas 2% menunjukkan tingkat durabilitas yang baik yang ditunjukkan oleh nilai Indeks Kekuatan Sisa (IKS) sedangkan tingkat keawetan yang baik yang diperoleh dari nilai Tensile Strength Ratio (TSR) pada semua kadar limbah plastik dan ban bekas. Dari nilai porositas dan ketahanan terhadap kelembaban, hasil menunjukkan penurunan tingkat porositas dan ketahanan kelembaban. Penurunan yang terjadi tersebut pada kadar limbah plastik dan ban bekas 2% tidak terlalu tinggi antara sampel kondisi kering dan basah. Hasil penelitian ini merekomendasikan penambahan limbah plastik dan ban bekas sebesar 2% dapat menghasilkan campuran aspal pori yang berkualitas baik.</p> <p>Kata Kunci: campuran aspal berpori, limbah, Marshall, ITS, ravelling, permeabilitas.</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>UDC:625.84 Irfan Prasetya¹⁾, Rholly Akhrizani Akhbar²⁾ (^{1,2})Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat)</p> <p>Pengaruh Perbedaan Kualitas Limbah Keramik terhadap Sifat Mekanis Blok Perkerasan</p> <p>Jurnal Jalan-Jembatan Vol. 40 No.1 Januari – Juni 2023, hal. 44-53</p> <p>Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perbedaan limbah keramik (jenis B1a dan B11b) yang digunakan sebagai pengganti pasir sebesar 15%, terhadap sifat mekanis blok perkerasan dan pemanfaatannya pada industri konstruksi. Pada penelitian menggunakan dua jenis sampel yaitu mortar (50x50x50 mm) dan blok perkerasan (210x110x60 mm). Pada sampel mortar digunakan kombinasi limbah keramik 25% B1a dan 75% B11b (M1), 50% B1a dan 50% B11b (M2), 75% B1a dan 25% B11b (M3), 100% B1a (M4) dan 100 % B11b (M5). Sedangkan untuk blok perkerasan digunakan variasi 50% B1a dan 50% B11b (BB1), 75% B1a dan 25% B11b (BB2) serta 100% B1a (BB3). Sifat mekanis dianalisis berdasarkan pengujian kuat tekan untuk kedua sampel dan juga penyerapan air untuk sampel blok perkerasan. Dari hasil penelitian diketahui bahwa perbedaan kualitas limbah keramik berpengaruh terhadap nilai kuat tekan, yang dikonfirmasi dengan pengujian kuat tekan dan pengujian ANOVA. Sampel M4 memiliki hasil kuat tekan tertinggi untuk sampel mortar yaitu 16 MPa, sedangkan sampel BB3 memiliki hasil kuat tekan tertinggi untuk sampel blok perkerasan sebesar 25 MPa. Namun, hasil kuat tekan dan penyerapan sampel BB2 dan BB3 dapat dikategorikan ke dalam mutu yang sama yaitu mutu B berdasarkan SNI 03-0691-1996. Sehingga variasi BB2 lebih direkomendasikan untuk diaplikasikan sebagai material pembuatan lahan parkir. Hal ini terutama karena jumlah keramik jenis B1a relatif lebih sedikit bila dibandingkan dengan keramik jenis B11b. Adapun sebagai material pembuatan jalur pejalan kaki dapat menggunakan variasi BB1.</p> <p>Kata Kunci: limbah keramik B1a dan B11b, kuat tekan, penyerapan air, blok perkerasan, mortar</p>	<p>UDC: 625.022 Etri Suhelmidawati¹⁾, Gusri Yaldi²⁾, Zulfira Mirani³⁾, Fahmiza Yufajri⁴⁾, Muhammad Ikhsan⁵⁾ (^{1,2,3,4,5})Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Padang)</p> <p>Penggunaan Pasir dan Kerikil Silika dari Sisa Penambangan Batu Kapur sebagai Substitusi Agregat untuk Perkerasan Jalan Kaku</p> <p>Jurnal Jalan-Jembatan Vol. 40 No.1 Januari – Juni 2023, hal. 54-66</p> <p>Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui dampak penggunaan pasir dan kerikil silika terhadap kuat tekan dan kuat lentur pada beton yang dihasilkan sebagai substitusi agregat kasar dan agregat halus dan guna meningkatkan nilai kuat tekan dan kuat lentur pada beton pada perkerasan jalan (rigid pavement). Penelitian ini menerapkan metode eksperimen yang meliputi pengujian bahan, pengujian kuat tekan dan pengujian kuat lentur beton, sesuai dengan American Standard Testing and Material (ASTM). Dari hasil pengujian nilai kuat tekan tertinggi diperoleh dari variasi beton ke-3 dengan campuran beton 100% pasir silika + kerikil alami + sikament NN dengan nilai kuat tekan sebesar 41,14 MPa. Untuk nilai kuat lentur optimum didapat pada campuran beton dengan variasi ke-4 yaitu 100% pasir alami + kerikil silika + sikament NN dengan nilai kuat lentur 1,6 MPa. Berdasarkan hasil tersebut, variasi beton ke-4 dipilih untuk diterapkan dengan dasar nilai kuat lentur optimum dan dengan nilai kuat tekan yang melebihi dari kuat tekan rencana yaitu 32,36 MPa (fc' rencana 30 MPa). Manual Desain Perkerasan (MDP) 2017 digunakan untuk merencanakan perkerasan kaku pada Jalan Simpang Anak Aia – Fly Over Bandara Internasional Minangkabau STA 22+800 s/d STA 22+800. Perhitungan tebal perkerasan didapatkan tebal perkerasan 27.5 cm. Pasir dan kerikil silika dapat digunakan untuk meningkatkan kuat tekan dari beton normal setelah penambahan material silika, dan berperan dalam menahan retak pada benda uji silinder.</p> <p>Kata Kunci: pasir silika, kerikil silika, kuat tekan, kuat lentur, perkerasan kaku</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

UDC: 004.413.4

Anastasia Caroline Sutandi
(Universitas Katolik Parahyangan)

Analisis Blackspot di Indonesia Berdasarkan
Perbedaan Kondisi Jalan, Fatalitas Kecelakaan, dan
Analisis Risiko

Jurnal Jalan-Jembatan

Vol. 40 No.1 Januari – Juni 2023, hal. 67-76

Blackspot adalah lokasi yang dinyatakan rawan karena jumlah kecelakaan yang tinggi. Terdapat banyak definisi blackspot, berdasarkan negara, lokasi, dan tingkat keparahan korban kecelakaan lalu lintas jalan (kecelakaan). Salah satu definisi blackspot di Indonesia, yaitu lokasi sepanjang 300 – 500 meter dengan jumlah kecelakaan yang tinggi. Blackspot pada umumnya hanya dianalisis berdasarkan jumlah korban dan keparahan korban kecelakaan saja. Dalam studi ini blackspot dianalisis berdasarkan 3 kriteria (1) perbedaan kondisi jalan, (2) jumlah korban kecelakaan meninggal dunia, dan (3) analisis risiko dalam satuan waktu tertentu. Perbedaan kondisi jalan ditinjau dari kondisi geometrik jalan, kondisi permukaan perkerasan jalan, dan kondisi perlengkapan jalan. Jumlah korban kecelakaan meninggal diambil dari data Kepolisian Republik Indonesia atau dari Biro Pusat Statistik (BPS). Analisis risiko adalah analisis yang menentukan nilai risiko, kategori risiko, dan rekomendasi aksi untuk mengurangi jumlah kecelakaan dan tingkat keparahan korban kecelakaan yang terjadi. Selanjutnya, dilakukan perbandingan antara penentuan lokasi blackspot berdasarkan jumlah dan keparahan korban kecelakaan dengan penentuan lokasi blackspot berdasarkan 3 kriteria dalam studi ini. Hasil dari analisis berdasarkan 3 kriteria menunjukkan bahwa penentuan lokasi blackspot lebih akurat. Hasil analisis blackspot dalam studi ini lebih akurat dan detail serta dapat digunakan di seluruh lokasi di Indonesia dengan menggunakan data kecelakaan yang lengkap, tepat, dan up to date, agar hasilnya sah dan bermanfaat untuk menggambarkan kondisi riil sebenarnya.

Kata Kunci: analisis blackspot, perbedaan kondisi jalan, fatalitas kecelakaan, analisis risiko, Indonesia

JURNAL JALAN - JEMBATAN

Volume 40 No. 1, January – June 2023	ISSN 1907 - 0284 (Versi cetak) ISSN-L 2527 - 8681 (Versi elektronik)
Kata kunci bersumber dari artikel. Lembar abstrak ini boleh dikopi tanpa ijin dan biaya	

<p>UDC: 624.5</p> <p>Widi Nugraha¹⁾, Budi Subrata²⁾, Indra Sidik Permadi³⁾, Gatot Sukmara⁴⁾, Achmad Riza Chairulloh⁵⁾, Hari Triwibowo⁶⁾, dan Umar Saripudin⁷⁾</p> <p>(¹⁾Institut Teknologi Bandung, ²⁾³⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR, ⁴⁾Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Kepulauan Riau, Kementerian PUPR)</p> <p><i>Performance Evaluation of A Glass Floor Suspended Type Suspension Footbridge Based On Static Load Testing</i></p> <p><i>Jurnal Jalan-Jembatan</i> Vol. 40 No.1 January – June 2023, pp. 1-16</p> <p><i>The Glass Bridge of Bromo is a suspended type of footbridge with a structural glass floor that was built by the Ministry of Public Works and Public Housing in the Bromo Tengger Semeru National Park, East Java, Indonesia. The bridge was built to provide a unique experience for visitors by allowing them to enjoy the beautiful scenery around Mount Bromo from the transparent floor of the bridge. The use of structural glass as a bridge floor needs to be tested for safety and comfort aspects by testing the load on the structural glass floor segment and the entire bridge structure. Load testing aims to determine whether the bridge is capable of withstanding the load that will pass over it, in this case, pedestrian load. In this study, load testing was carried out on the Glass Bridge of Bromo with an operational planned load of around 100 pedestrians. The load was converted to 240 sandbags with a weight of approximately 35 kg each. The maximum bridge response due to the largest test load was a vertical deformation of 72.70 mm over the entire span, maximum cable force of 19.84 tons, and steel frame stress of the glass floor system of 125.96 MPa. The structural response due to the measured load was well-modeled using the structure model used in this study, allowing for simulation of larger loads for service load evaluation. The analysis results show that the Glass Bridge of Bromo is safe to use with a service load restriction of up to 400 kg/m².</i></p>	<p><i>Additionally, the bridge has relatively small deformations compared to the allowable deformation, thus meeting comfort criteria.</i></p> <p>Keywords: <i>suspension bridge, suspended type, structural glass floor system, load testing, vertical deformation</i></p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

UDC: 625.85

Christian Gerald Daniel¹⁾, M. Rifqon²⁾, Fadhil M. Firdaus³⁾, Khairina A. Canny⁴⁾

(^{1),2)} Departemen Teknik Sipil Universitas Pelita Harapan, (³⁾Air Quality Research Analyst at World Resources Institute, (⁴⁾ Smart Construction and Civil Engineering, Calvin Institute of Technology)

Environmental Impact Comparison of Laboratory-Scale Production of Polymer-Modified Asphalt with Dry and Wet Mixing Methods using Life Cycle Assessment

Jurnal Jalan-Jembatan

Vol. 40 No.1 January – June 2023, pp. 17-31

This study evaluates the environmental impact of polymer-modified bituminous mix production through wet-mixed polymer-modified bitumen (PMB) and direct, dry mixing technique using the Life Cycle Assessment (LCA) method based on emission monitoring in the lab for 5 samples per each type of mix. Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) of 5% and 6% bitumen weight was incorporated for the dry mix. The scope of this study was from raw material acquisition to lab-scale production. Emission monitoring from the sample production stage in the lab showed that producing PMB-based samples increased CO₂ concentration by 21.78 – 38.3%, Volatile Organic Compound by 16.69 – 28.93%, as well as formaldehyde and particulate matter by 14.6 – 20.17% and 7 – 37%, all were due to a higher heating temperature. LCA outcomes showed that the Global Warming Potential impact category of 5 PMB sample production was 2.8kg CO₂-eq, increasing by 1.1 – 4.1%. The Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential of 5 PMB samples production was 0.32 kg 1.4-DB eq, 9.15 – 12.33% higher than the EVA-modified specimens, and both Human Toxicity and Photochemical Oxidation increased by 14.35 – 25% to 167 kg 1.4-DB eq and 0.00081 kg C₂H₄ eq. The Marshall Quotient and Stability of the EVA-Modified mix were 67.7% higher and 14% lower than the PMB-based specimens with similar volumetric properties, indicating an eco-friendlier solution from the dry-blended polymer-modified asphaltic mixtures approach with similar properties.

Key words: life cycle assessment, cradle-to-gate, dry mix method, polymer modified bitumen, EVA

UDC: 665.775.4

Hery Awan Susanto¹⁾, Bagyo Mulyono²⁾, Arnie Widyaningrum³⁾, Widhiatmoko Herry Purnomo⁴⁾

(^{1),2),3)}Universites Jenderal Soedirman)

The Performance of Porous Asphalt Pavement using Rubber and Plastic Waste

Jurnal Jalan-Jembatan

Vol. 40 No.1 January – June 2023, pp. 32-43

One of the measures to mitigate climate change is to apply a porous asphalt mixture in pavement construction. The use of porous asphalt mixture is still limited, because of low performance compared to some other asphalt mixtures. A comprehensive study to improve the optimal performance necessary to problems improve the application. This research aims to determine the performance of porous asphalt using plastic and used tires waste mixed into asphalts by using some laboratory testings (both in dry and in wet conditions) according to AAPA 2004. Indirect Tensile Strength (ITS) (both in dry and wet conditions), ravelling, and permeability are obtained with variations plastic and used tires waste levels of 1-3%. There is an increase in Marshall performance, resistance to cracking, ravelling (based on abrasion test) on porous asphalt mixtures with plastic and used tires waste. A porous asphalt mixture with 2% of plastic and used tires waste has produced a good level of durability indicated by the Residual Strength Index (IKS) value and from the Tensile Strength Ratio (TSR) value at all levels of plastic and used tires waste. From the value of porosity and moisture resistance, a decrease in the level of porosity and moisture resistance are shown. The decrease that occurred at 2% plastic and used tires waste level was not too high between dry and wet condition samples. The results of this study recommend that the addition of plastic and used tires waste at 2% can produce a good quality of porous asphalt mixture.

Key words: permeable asphalt mixture, waste, Marshall, ITS, ravelling, permeability.

<p>UDC: 625.84 Irfan Prasetya¹⁾, Rholly Akhrizani Akhbar²⁾ (^{1),2)}Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat)</p> <p>The Effect of Different Quality of Ceramic Waste on The Mechanical Properties of Paving Block</p> <p>Jurnal Jalan-Jembatan Vol. 40 No.1 January – June 2023, pp.. 44-53</p> <p><i>This study aims to determine the effect of ceramic waste differences (types B1a and B1b) as substitute for sand by 15% on the mechanical properties of paving block and their utilization in construction industry. Two types of samples were used: mortar (50x50x50 mm) and paving block (210x110x60 mm). The mortar sample variations were 25% B1a and 75% B1b (M1), 50% B1a and 50% B1b (M2), 75% B1a and 25% B1b (M3), 100% B1a (M4) and 100% B1b (M5). The paving block sample variations were 50% B1a and 50% B1b (BB1), 75% B1a and 25% B1b (BB2), and 100% B1a (BB3). Mechanical properties were analyzed according to the compressive strength test for both samples and also water absorption for paving block samples. The difference in the quality of ceramic waste affects the compressive strength, which was confirmed by compressive strength test and ANOVA test. The M4 had the highest compressive strength (16 MPa) for mortar sample, while BB3 had the highest compressive strength (25 MPa) for paving block sample. However, based on BB2 and BB3 compressive strength and absorption tests, the two samples can be categorized into the same quality (B quality) based on SNI 03-0691-1996. Thus, BB2 variation is recommended to be applied as material for making parking lots. This is due to the number of B1a-type ceramics being relatively less when compared to B1b. For pedestrian paths, variation of BB1 is proposed.</i></p> <p>Keywords: ceramic waste B1a and B1b, compressive strength, water absorption, paving block, mortar</p>	<p>UDC: 625.022 Etri Suhelmidawati¹⁾, Gusri Yaldi²⁾, Zulfira Mirani³⁾, Fahmiza Yufajri⁴⁾, Muhammad Ikhsan⁵⁾ (^{1),2),3),4),5)}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Padang)</p> <p>The Utilization of Silica Sand and Gravel from Limestone Mining Waste as Aggregate Substitution for Rigid Pavement</p> <p>Jurnal Jalan-Jembatan Vol. 40 No.1 January – June 2023, pp. 54-66</p> <p><i>The purpose of this study is to determine the effects of using silica sand and gravel in concrete as a substitution of coarse aggregates and fine aggregates and to increase the value of compressive strength and flexural strength in concrete for road pavement. This study applied the experimental methods, including material testing, compressive strength and concrete flexural strength testing, referring to the American Standard Testing and Materials (ASTM). From the test results, the highest compressive strength value of concrete was obtained from the 3rd concrete variation with a concrete mixture of 100% silica sand + natural gravel + sikament NN with a compressive strength value of 41.14 MPa. The optimum flexural strength value is obtained from the concrete mix in the 4th variation, namely 100% natural sand + silica gravel + sikament NN with a flexural strength value of 1.6 MPa. Based on these results, the 4th concrete variation was chosen to be applied on the basis of its optimum flexural strength value and compressive strength value that exceeds the design compressive strength, namely 32.36 MPa (fc' design 30 MPa). Manual Desain Perkerasan (MDP) 2017 is used to design rigid pavement on Aia Anak Simpang Road – Minangkabau International Airport Fly Over STA 22+800 to STA 22+800. The pavement thickness obtained is 27.5 cm. Therefore, silica sand and gravel can increase the compressive strength of normal concrete after the addition of silica material, play a role in resisting cracks in cylindrical specimens.</i></p> <p>Keywords: silica sand, silica gravel, compressive strength, flexural strength, rigid pavement</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

UDC: 004.413.4

Anastasia Caroline Sutandi

(Universitas Katolik Parahyangan)

The Analysis of Blackspot in Indonesia Based on Road Condition Difference, Accident Fatality, and Risk Analysis

Jurnal Jalan-Jembatan

Vol. 40 No.1 January – June 2023, pp. 67-76

Blackspot is a prone location with a high number of accidents. There are a number of definitions of blackspot, i.e. based on country, location, and the severity of road traffic accidents (accidents). One definition of blackspot in Indonesia is a location of 300 up to 500 meters long with a high number of accidents. Usually, blackspot is only analyzed based on the number of accidents and the severity of accidents. In this study, blackspot is analyzed based on 3 criteria i.e. (1) differences in road conditions, (2) the number of accident fatality, and (3) risk analysis in a specific time period. The differences in road conditions in terms of geometric conditions, road pavement surface conditions, and road furniture conditions. The number of accident fatality data can be taken from the National Police of the Republic of Indonesia or from the Central Bureau of Statistics in Indonesia. Risk analysis is an analysis to determine the risk value, risk category, and action recommendation in order to reduce the number of accidents and the fatality of the accident. Furthermore, comparison is carried out between determination of blackspot location based on the number and the severity of accident and those based on the three criteria. The results based on the three criteria show that determination of blackspot location is more accurate. The results of the study produce a more accurate and detailed blackspot analysis and can be used in all locations in Indonesia using complete, accurate, and up-to-date accident data, so that the results are valid and useful for explaining actual real conditions.

Keywords: blackspot analysis, road condition difference, accident fatality, risk analysis, Indonesia

EVALUASI PERFORMA JEMBATAN GANTUNG TIPE SUSPENDED PEJALAN KAKI DENGAN LANTAI KACA BERDASARKAN UJI PEMBEBANAN STATIS (PERFORMANCE EVALUATION OF A GLASS FLOOR SUSPENDED TYPE SUSPENSION FOOTBRIDGE BASED ON STATIC LOAD TESTING)

Widi Nugraha¹⁾, Budi Subrata²⁾, Indra Sidik Permadi³⁾, Gatot Sukmara⁴⁾, Achmad Riza Chairulloh⁵⁾, Hari Triwibowo⁶⁾, dan Umar Saripudin⁷⁾

¹⁾Institut Teknologi Bandung

^{2) 3) 5) 6) 7)}Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR

⁴⁾Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Kepulauan Riau, Kementerian PUPR

¹⁾Jl Ganesha No 10, Bandung

^{2) 3) 5) 6) 7)}Jl. A.H. Nasution No. 264, Bandung

⁴⁾Komplek Terpadu Kementerian PUPR, Jl. S Parman, Batam

¹⁾widi.nugraha@pu.go.id, ²⁾budisubrata@pu.go.id, ³⁾indrasidik@pu.go.id, ⁴⁾gatot.sukmara@pu.go.id, ⁵⁾riza.achmad@pu.go.id,

⁶⁾hari.triwibowo@pu.go.id, ⁷⁾umarsaripudin@pu.go.id

Diterima: 19 Januari 2023 ; direvisi: 12 Mei 2023 ; disetujui: 6 April 2023

ABSTRAK

Jembatan Kaca Bromo merupakan jembatan gantung tipe suspended dengan lantai kaca struktural yang dibangun oleh Kementerian PUPR di Kawasan Strategis Prioritas Nasional (KSPN) Taman Nasional Bromo Tengger Semeru, Jawa Timur, Indonesia. Jembatan ini dibangun untuk memberikan pengalaman yang unik bagi para pengunjung, yaitu dengan melihat pemandangan indah di sekitar gunung Bromo dari atas lantai jembatan yang transparan. Penggunaan kaca struktural sebagai lantai jembatan perlu diuji terhadap aspek keamanan dan kenyamanan dengan pengujian pembebanan pada segmen lantai kaca struktural dan struktur jembatan secara keseluruhan. Uji pembebanan bertujuan untuk mengetahui apakah jembatan mampu menahan beban yang akan dilewatinya, dalam hal ini beban pejalan kaki. Pada penelitian ini, uji pembebanan pada Jembatan Kaca Bromo dilakukan dengan beban operasional rencana, yaitu sekitar 100 orang pejalan kaki. Besaran beban tersebut dikonversi menjadi 240 buah karung pasir yang digunakan untuk uji pembebanan dengan berat masing masing karung sekitar 35 kg. Respons maksimum jembatan hasil pengukuran akibat beban uji terbesar antara lain deformasi vertikal 72.70 mm pada kondisi beban merata sepanjang bentang, gaya kabel maksimum sebesar 19.84 ton, dan tegangan frame baja sistem lantai kaca sebesar 125.96 MPa. Besaran respons struktur jembatan hasil pengukuran tersebut dapat dimodelkan dengan baik melalui model struktur yang digunakan dalam penelitian ini, sehingga dapat dilakukan simulasi pembebanan yang lebih besar untuk evaluasi beban layan. Hasil dari analisis menunjukkan bahwa Jembatan Kaca Bromo aman untuk digunakan dengan pembatasan beban layan hingga 400 kg/m². Selain itu, jembatan tersebut memiliki deformasi yang relatif kecil dibanding deformasi izin, sehingga memenuhi kriteria kenyamanan.

Kata kunci: jembatan gantung, tipe suspended, sistem lantai kaca struktural, uji pembebanan, lendutan.

ABSTRACT

The Glass Bridge of Bromo is a suspended type of footbridge with a structural glass floor that was built by the Ministry of Public Works and Public Housing in the Bromo Tengger Semeru National Park, East Java, Indonesia. The bridge was built to provide a unique experience for visitors by allowing them to enjoy the beautiful scenery around Mount Bromo from the transparent floor of the bridge. The use of structural glass as a bridge floor needs to be tested for safety and comfort aspects by testing the load on the structural glass floor segment and the entire bridge structure. Load testing aims to determine whether the bridge is capable of withstanding the load that will pass over it, in this case, pedestrian load. In this study, load testing was carried out on the Glass Bridge of Bromo with an operational planned load of around 100 pedestrians. The load was converted to 240 sandbags with a weight of approximately 35 kg each. The maximum bridge response due to the largest test load was a vertical deformation of 72.70 mm over the entire span, maximum cable force of 19.84 tons, and steel frame stress of the glass floor system of 125.96 MPa. The structural response due to the measured load was well-modeled using the structure model used in this study, allowing for simulation of larger loads for service load evaluation. The analysis results show that the Glass Bridge of Bromo is safe to use with a service load restriction of up to 400 kg/m². Additionally, the bridge has relatively small deformations compared to the allowable deformation, thus meeting comfort criteria.

Keywords: suspension bridge, suspended type, structural glass floor system, load testing, vertical deformation.

PENDAHULUAN

Pada tahun 2022, Kementerian PUPR menyelesaikan konstruksi Jembatan Kaca Bromo, seperti dapat dilihat pada Gambar 1, yang merupakan jembatan gantung pejalan kaki tipe *suspended* dengan lantai kaca struktural. Jembatan tipe *suspended* merupakan jembatan gantung dengan sistem lantai yang dipasang di atas kabel utama jembatan, sehingga pada arah memanjang, jembatan tipe ini memiliki pelat lantai yang cekung, mengikuti lengkungan *catenary* dari kabel. Sistem ini digunakan karena di lokasi dibangunnya Jembatan Kaca Bromo, kondisi kedua sisi tumpuan jembatan berada di elevasi yang cukup tinggi, sehingga dengan menggunakan sistem *suspended*, kondisi seperti ini bisa dimanfaatkan dan secara sistem struktur tidak memerlukan pilon seperti jembatan gantung pada umumnya. Jembatan Kaca Bromo ini dibangun di Seruni Point yang terletak di Kawasan Taman Nasional Bromo Tengger Semeru, Provinsi Jawa Timur, yang merupakan salah satu Kawasan Strategis Prioritas Nasional (KSPN). Tujuannya adalah untuk memberikan pengalaman yang unik bagi para pengunjung, yaitu dengan melihat pemandangan indah di sekitar gunung Bromo dari atas jembatan dengan lantai kaca yang transparan.

Kaca merupakan salah satu material yang memiliki karakteristik estetik dan transparan, sehingga mulai banyak digunakan sebagai material pemikul beban struktural pada lantai bangunan dan jembatan (Pariafsai 2016). Contoh dari penggunaan kaca pada bangunan dan jembatan yang terkenal adalah Glacier Skywalk di Kanada dan Skydeck Chicago di Amerika Serikat. Di Tiongkok, terdapat setidaknya enam belas jembatan yang menggunakan sistem lantai kaca sebagai pemikul beban, salah satunya adalah Jembatan Grand Canyon Zhangjiajie (Gong et al. 2021). Serupa dengan Jembatan Kaca Bromo, seperti dapat dilihat pada Gambar 2, Jembatan Grand Canyon Zhangjiajie yang dibangun di kawasan pariwisata Provinsi Hunan, memiliki panjang bentang 430 meter dan lebar 6 meter, memanfaatkan karakteristik kaca yang estetik dan transparan pada elemennya untuk memberikan pengalaman yang unik bagi para pengunjung, sekaligus meningkatkan daya tarik kawasan wisata tersebut (Ma, Guo, and Sun 2017).

Perkembangan teknologi laminasi kaca telah memungkinkan penggunaan kaca sebagai material lantai yang kuat dan tahan lama. Kaca laminasi terdiri dari beberapa lapisan kaca yang ditempelkan satu sama lain dengan material perekat, seperti *polyvinil butyral* (PVB) atau *sentryglas plus* (SGP). Teknologi laminasi memungkinkan lapisan interlayer maupun lapisan kaca berikutnya masih dapat bertahan jika terjadi kehancuran pada salah satu lapisan kaca, sehingga memberikan sifat kegagalan *ductile* yang tidak terjadi secara tiba-tiba (Luo and Wang 2017). Dalam hal ini, kaca laminasi dipandang sebagai material yang sangat kuat dan tahan lama.

Keunggulan kaca laminasi tidak hanya terletak pada sifat kekuatannya, namun juga pada sifat visualnya. Kaca laminasi masih transparan dan estetik, sehingga penggunaannya untuk tujuan estetika struktur menjadi sangat menarik. Selain itu, lantai kaca struktural dianggap sebagai material yang ramah lingkungan karena tidak memerlukan perawatan khusus seperti lantai baja yang perlu dicat ulang agar terhindar dari korosi atau lantai kayu yang akan lapuk akibat pengaruh cuaca dan usia (Ma, Guo, and Sun 2017). Oleh karena itu, penggunaan kaca laminasi sebagai material lantai struktural semakin banyak diminati dan diaplikasikan dalam proyek-proyek bangunan dan jembatan modern.



Gambar 1. Jembatan Kaca Bromo



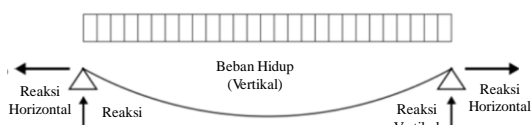
Gambar 2. Jembatan Kaca Zhangjiajie Grand Canyon (Haim Dotan Ltd. 2022)

Sistem struktur lantai kaca berikut pagar dipasang pada fase kedua dalam tahapan konstruksi Jembatan gantung dengan lantai kaca, yaitu setelah kabel dan *frame* lantai dipasang. Lantai kaca diperhitungkan sebagai beban mati tambahan dan tidak diperhitungkan dalam desain distribusi beban, sehingga gelagar melintang yang dibutuhkan lebih besar dibanding jembatan gantung dengan sistem lantai konvensional (Ma, Guo, and Sun 2017).

Penggunaan kaca sebagai material pemikul beban secara struktural pada jembatan menimbulkan tantangan tersendiri dalam hal keamanan dan kenyamanan. Oleh karena itu, uji pembebanan pada jembatan perlu dilakukan dengan lantai kaca sebelum dibuka untuk umum, untuk memastikan keamanan dan kenyamanan pengunjung. Pada penelitian ini, akan dilakukan uji pembebanan pada Jembatan Kaca Bromo dengan menambahkan beban yang sebanding dengan beban yang akan dilewatinya pada masa operasional, yaitu sekitar 100 orang pejalan kaki. Respons jembatan akibat beban tersebut akan diamati dan diukur sehingga dapat dilakukan evaluasi Jembatan Kaca Bromo terhadap kriteria keamanan dan kenyamanan untuk memastikan kondisi jembatan layak untuk beroperasi.

Perencanaan Jembatan Kaca Bromo

Jembatan Kaca Bromo direncanakan sebagai jembatan pariwisata dengan kategori jembatan gantung kelas 2 (untuk pejalan kaki dan sepeda motor). Adapun besaran beban desain dan lendutan izin untuk jembatan gantung kelas 2 ini diatur dalam Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 02/SE/M/2010 tentang Pemberlakuan Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Konstruksi Jembatan Gantung Untuk Pejalan Kaki (Kementerian Pekerjaan Umum 2010). Berikut pada Tabel 1 merupakan kriteria teknis yang digunakan dalam perencanaan Jembatan Kaca Bromo.



Gambar 3. Respons transfer gaya jembatan gantung tipe *suspended*

Jembatan Kaca Bromo secara prinsip merupakan jembatan gantung tipe *suspended* dengan elemen kabel sebagai elemen struktur utama pemikul beban. Sistem lantai langsung

dipasang di atas kabel *walkway* sehingga transfer beban dari lantai terjadi langsung pada *frame* pemikul lantai kemudian pada kabel utama yang berlokasi di samping kiri kanan lantai. Kemudian transfer beban terjadi pada pylon di kedua sisi jembatan, selanjutnya kabel *backstay* dan di angkur pada blok angkur di sisi paling ujung dari struktur jembatan. Secara sederhana, proses transfer beban pada jembatan tipe *suspended* digambarkan pada **Gambar 3**. Sebagai gambaran, pada Gambar 4 ditampilkan tampak atas desain Jembatan Kaca Bromo.

Tabel 1. Kriteria Teknis Jembatan Kaca Bromo

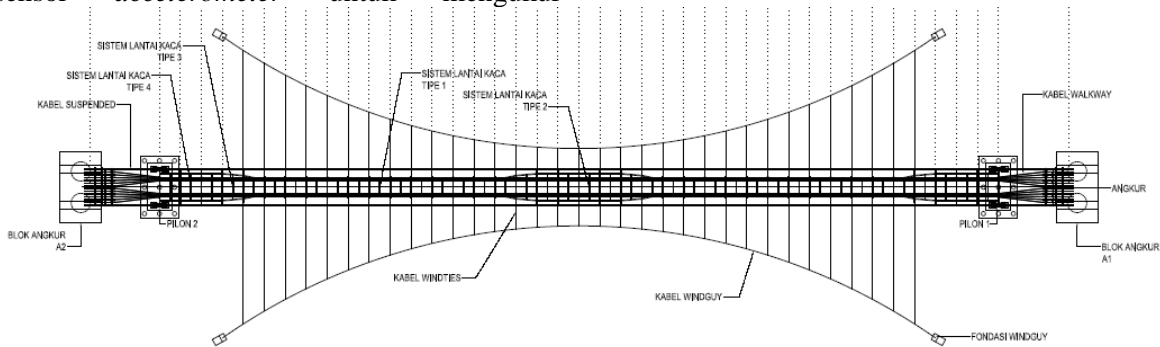
Parameter	Keterangan
Penggunaan	Jembatan gantung pejalan kaki kelas II Penggunaan dibatasi untuk pejalan kaki saja
Tipe Jembatan	<i>Suspended-cable</i>
Lebar	1.8 m
Panjang bentang (m)	120 m
Clearance (m)	>80 m
Tipe fondasi	Tiang bor dan sumuran
Material kaca lantai	Kaca pengaman berlapis (<i>Laminated Glass</i>) terdiri dari dua lembar kaca atau lebih, direkatkan satu sama lain dengan lapisan laminasi (<i>interlayer</i>) Sentryglas Plus (SGP). Kapasitas hingga 1500 kPa
Beban desain	Beban Merata 5 kPa
Lendutan izin	L/100
Properties elemen struktur	
- Kabel utama	<i>Wire rope</i> tipe <i>Independent Wire Rope Core</i> (IWRC) kuat tarik 1770 MPa diameter 44 mm
- Beton struktural (abutmen dan pile cap)	$f_c' 30$ MPa
- Baja struktural (<i>frame</i> lantai dan pagar)	$f_y 250$ MPa
- Baja tulangan	$D < 13$ mm: $f_y 240$ MPa $D \geq 13$ mm: $f_y 400$ MPa
- Baut	$f_y 830$ MPa
- Las	490 MPa

Uji pembebanan pada jembatan

Pada jembatan yang akan dioperasikan, uji pembebanan lazim dilakukan sebagai tahapan pengujian tanpa merusak (*non destructive test*) untuk mengetahui performa jembatan aktual terhadap simulasi pembebanan desain maupun

operasional (Nugraha et al. 2017). Fungsi utama dari pengujian beban adalah untuk meyakinkan bahwa jembatan layak dan aman untuk digunakan oleh khalayak publik (Alampalli et al. 2021). Adapun jenis sensor yang akan digunakan untuk uji beban ini adalah sensor *strain gage* untuk mengukur tegangan elemen struktur, sensor *accelerometer* untuk mengukur

percepatan yang terjadi pada elemen struktur yang dapat diolah untuk menghitung frekuensi natural jembatan dan tegangan elemen kabel, dan alat survei seperti Total Station untuk mengukur posisi titik yang diamati deformasi akibat beban yang diberikan (Alampalli et al. 2021).



Gambar 4. Tampak atas Desain Jembatan Kaca Bromo

Sebelum dilakukan uji pembebanan, perlu dilakukan persiapan berupa perencanaan tahapan uji pembebanan, perencanaan lokasi *marking* titik pengukuran deformasi, berikut juga *benchmark* atau titik acuan yang digunakan, dan perencanaan lokasi pemasangan sensor *strain gage* dan *accelerometer* pada elemen struktur yang diamati (Faber, Val, and Stewart 2000). Selain itu, penentuan besaran, skema penempatan beban uji, dan jenis beban uji juga perlu dilakukan, dan kemudian dilakukan simulasi uji pembebanan pada pemodelan struktur, dan penentuan batasan parameter uji berupa tegangan dan lendutan di batas yang masih berada di bawah kriteria batasan kekuatan dan kenyamanan dari struktur (Nugraha et al. 2017)

Evaluasi beban layan izin

Dalam uji pembebanan, dapat diketahui besaran dan konfigurasi beban yang dapat menyebabkan kondisi dimana tegangan elemen dan lendutan sistem struktur maksimal sehingga beban layan izin dapat dievaluasi (Cai et al. 2012). Perilaku dan respons dari struktur jembatan terhadap beban dapat diketahui dari uji pembebanan (Hou and Lynch 2006). Untuk mendapatkan nilai beban layan izin, diperlukan model struktur jembatan yang sesuai dengan kondisi dan perilaku jembatan sesungguhnya akibat pemberian beban (Lantsoght et al. 2017).

Besaran beban uji dan konfigurasi pembebanan yang digunakan dalam uji

pembebanan dapat diterapkan pada model struktur jembatan, untuk kemudian yang didapatkan perilaku jembatan berupa respons struktur seperti frekuensi natural jembatan, deformasi dan gaya dalam efek dari beban. Hasil pengukuran kondisi aktual jembatan pada uji beban perlu digunakan untuk penyesuaian model struktur jembatan agar menghasilkan respons yang mendekati kondisi aktual (Hester et al. 2017). Kemudian simulasi beban hingga beban maksimal dapat dilakukan sehingga dapat dihitung besaran beban yang masih aman terhadap kriteria kekuatan struktur dan kriteria kenyamanan jembatan.

HIPOTESIS

Perilaku struktur Jembatan Kaca Bromo dapat diprediksi dengan menggunakan model FEM yang telah disesuaikan dengan respons struktur jembatan terhadap uji pembebanan. Dengan demikian, evaluasi terhadap beban rencana dapat diproyeksikan untuk memastikan bahwa aspek keamanan dan kenyamanan jembatan sesuai dengan kriteria perencanaan.

METODOLOGI

Dalam penelitian ini akan digunakan metode penelitian eksperimental terbatas dengan melakukan pengidentifikasian respon struktur statis dan dinamis jembatan dengan hasil penerapan beban yang terukur pada struktur

jembatan gantung tipe *suspended* dengan sistem lantai kaca struktural. Pengukuran respon struktur dilakukan dengan menggunakan sensor-sensor yang dapat mengukur besaran kuantitatif dengan beberapa teknik pengukuran. Pertama-tama, akan dilakukan uji pembebanan pada jembatan yang terdiri atas kegiatan perencanaan beban uji dan konfigurasi pembebanan, penempatan titik pengamatan deformasi dan sensor, uji pembebanan sesuai rencana konfigurasi pembebanan dan besaran beban uji, dan kemudian dilakukan analisis.

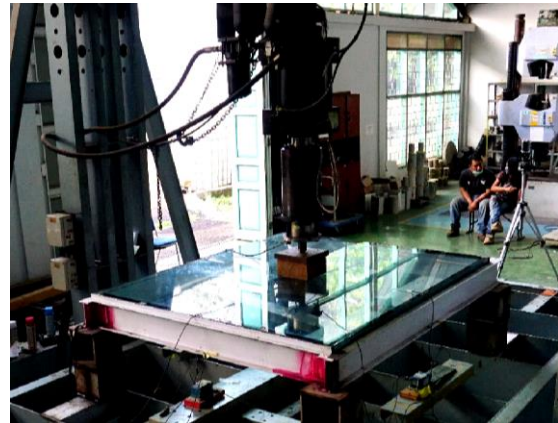
Selanjutnya, dilakukan evaluasi beban layan izin, terdiri dari atas penyesuaian pemodelan terhadap perilaku jembatan aktual pada uji beban. Proyeksi simulasi penambahan beban pada model dilakukan hingga mencapai batasan kriteria keamanan dan kenyamanan struktur, yang disebut beban layan izin.

Uji pembebanan jembatan

Sebelum melakukan uji pembebanan di lapangan, dilakukan pengujian terhadap sistem lantai kaca yang digunakan untuk Jembatan Kaca Bromo di laboratorium. Pengujian yang dilakukan adalah uji beban merata dan uji beban titik (*point load*). Fungsi dari uji beban terhadap panel sistem lantai kaca struktural ini adalah untuk menguji kemampuan sistem lantai kaca akibat beban rencana dan mengukur beban terbesar yang masih dapat dipikul oleh sistem lantai kaca hingga mengalami kerusakan.

Untuk pengujian beban merata, metode yang digunakan adalah menggunakan simulasi beban pejalan kaki merata berupa beban orang sedemikian sehingga mencapai beban rencana yaitu 500 kg/m^2 yang terdistribusi merata seluas panel lantai jembatan yaitu $1,8 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$, kemudian pada tahapan berikutnya beban ditingkatkan menjadi 1250 kg/m^2 yang didistribusikan secara merata pada luasan panel lantai. Pengujian beban titik (*point load*) dilakukan dengan pemberian beban dari aktuator dengan bidang kontak $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ untuk mensimulasikan kondisi ekstrim jika beban pejalan kaki terkonsentrasi di salah satu titik segmen lantai jembatan, seperti dapat dilihat pada Gambar 5. Adapun beban diberikan secara bertahap, melewati beban rencana ekuivalen, yaitu $1,39 \text{ ton}$ (500 kg/m^2 dikali luasan panel lantai $1,5 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}$), kemudian terus ditambah hingga kedua lapis kaca mengalami kerusakan

sehingga didapatkan besaran beban titik maksimal hasil pengujian.



Gambar 5. Pengujian *point load* pada sistem lantai kaca struktural

Beban uji yang digunakan adalah 240 buah karung berisi pasir dengan berat setiap karung adalah sebesar 35 kg dengan penempatan seperti dapat dilihat pada Gambar 6. Jumlah beban karung pasir yang digunakan berdasarkan perhitungan setara dengan 10% beban rencana 5 kPa, yaitu total sekitar 8400 kg. Sehingga didapatkan jumlah karung pasir untuk total panjang jembatan adalah 240 buah karung pasir.

Pengambilan besaran beban uji ini dimaksudkan untuk menggambarkan rencana beban operasional yaitu sekitar 100 orang. Selain itu, besaran beban yang lebih kecil dari beban rencana dipilih agar uji pembebanan dapat berjalan sesuai prinsip pengujian tidak merusak (*non-destructive test*) dan struktur masih berperilaku linear setelah uji pembebanan selesai (Hou and Lynch 2006). Sebuah model struktur yang telah disesuaikan dengan hasil uji pembebanan, dapat digunakan untuk simulasi pembebanan maksimum (Alampalli et al. 2021).



Gambar 6. Pembebanan karung pada Uji beban statis Jembatan Kaca Bromo

Respon tegangan statis diperoleh dengan menempatkan *sensor strain gauge* pada elemen

balok sistem pemikul lantai yang terhubung pada *data logger* sebagai perekam data, tegangan pada kabel *backstay* jembatan saat jembatan diberikan beban uji, diperoleh dengan mengukur frekuensi getar saat jembatan diberikan beban uji dengan alat *accelerometer*, massa kabel *backstay* dengan menghitung dimensi dan berat jenis baja kabel, dan juga panjang kabel *backstay*, kemudian pengukuran deformasi jembatan menggunakan alat *total station* yang mengukur perubahan koordinat dari beberapa titik acuan pada struktur jembatan akibat beban uji (Alampalli et al. 2021).

Pada uji pembebanan statis, penempatan beban pada lantai jembatan dilakukan secara bertahap dan perlahan untuk meminimalisasi efek dinamis pada jembatan dan juga kerusakan pada permukaan lantai kaca. Adapun tahapan penempatan beban untuk uji pembebanan Jembatan Kaca Bromo terdiri atas enam tahapan, termasuk kondisi awal tanpa beban dan kondisi pengosongan beban (*unloading*), seperti ditampilkan pada Tabel 2.

Tahapan beban pertama adalah sebesar 5600 kg, dengan jumlah 160 karung yang ditempatkan merata sepanjang bentang jembatan. Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, beban berupa karung pasir yang digunakan memiliki berat 35 kg untuk setiap karung. Kemudian pada tahap kedua diberikan beban 8400 kg, dengan jumlah 240 karung pasir, dimana dilakukan penambahan 80 karung dari tahap pembebanan pertama, penambahan karung ditempatkan di tengah bentang dan disusun merata pada kedua sisi lantai jembatan, seperti terlihat pada Gambar 6. Tahapan pembebanan ketiga yaitu beban *unbalance*, total beban 2800 kg yang terdiri atas 80 karung pasir ditempatkan pada setengah bentang utama jembatan untuk memeriksa respons jembatan akibat efek beban *unbalance*, dan kemudian pembebanan tahap terakhir yaitu beban *unbalance* satu sisi sebesar 1400 kg, beban 40 karung isi pasir hanya diberikan pada setengah bentang utama jembatan dan di satu sisi lantai untuk memeriksa respons jembatan akibat efek torsi beban *unbalance*.



Gambar 7. Pengujian frekuensi getar kabel *backstay* dengan *trigger* getaran *impact hammer*



Gambar 8. Uji getar Jembatan Kaca Bromo dengan *trigger* orang berjalan kaki

Jembatan ini merupakan jembatan bertipe *suspended-cable* sehingga parameter deformasi adalah parameter yang paling penting untuk diamati. Titik pengamatan deformasi ditandai dengan *sticker* khusus yang ditempatkan pada *frame* lantai setiap dua segmen lantai (jarak antar pengamatan setiap 6 m). Sedangkan sensor *strain gauge* dipasang pada flens bawah pada batang melintang dan memanjang pada salah satu segmen sistem *frame* penyangga lantai. Kemudian untuk mengukur tegangan kabel *backstay*, dipasang sensor *accelerometer* pada enam kabel *backstay* untuk mengukur tegangan kabel pada setiap tahapan pembebanan uji. Untuk dapat mengukur getaran natural kabel, dilakukan *trigger* getaran dengan memukul semua kabel yang diukur bergantian menggunakan *impact hammer* seperti terlihat pada Gambar 7 setiap tahapan pengujian. Adapun titik pengamatan deformasi dan juga skema penempatan sensor untuk uji beban ini dapat dilihat pada Gambar 9.

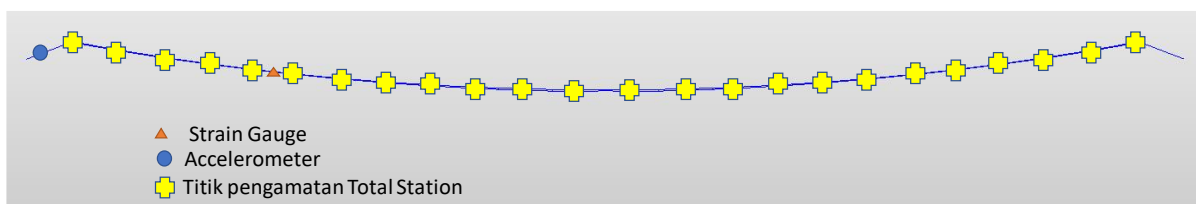
Untuk mendapatkan parameter tambahan dalam rangka memudahkan penyesuaian model dengan kondisi aktual jembatan, dalam uji pembebanan dilakukan pula uji getar jembatan. Uji getar jembatan ini dilakukan dengan

memberikan *trigger* berupa getaran akibat tiga orang berjalan kaki berdampingan melintasi jembatan seperti terlihat pada Gambar 7, sehingga jembatan bergetar secara natural setelah *trigger* tersebut melintas. Pada kondisi getaran bebas jembatan tersebut respons percepatan jembatan direkam dengan menggunakan sensor *accelerometer*. Kemudian pada rekaman getaran bebas tersebut dilakukan pengolahan sinyal berupa *Fast Fourier Transform* (FFT) sehingga didapatkan frekuensi natural jembatan. Pengukuran dilakukan dengan menempatkan beberapa sensor *accelerometer* yang terhubung dengan sebuah *data logger* sebagai perekam data.

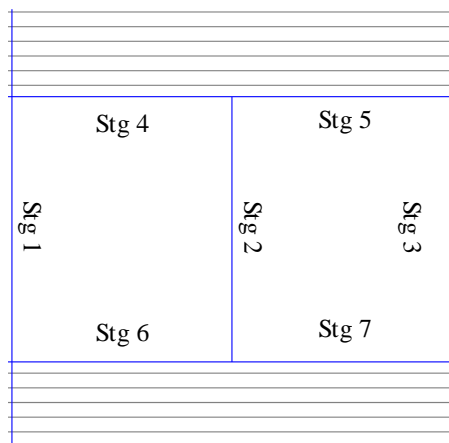
Pemodelan dan analisis struktur jembatan

Untuk digunakan dalam prediksi respons struktur jembatan akibat simulasi beban yang

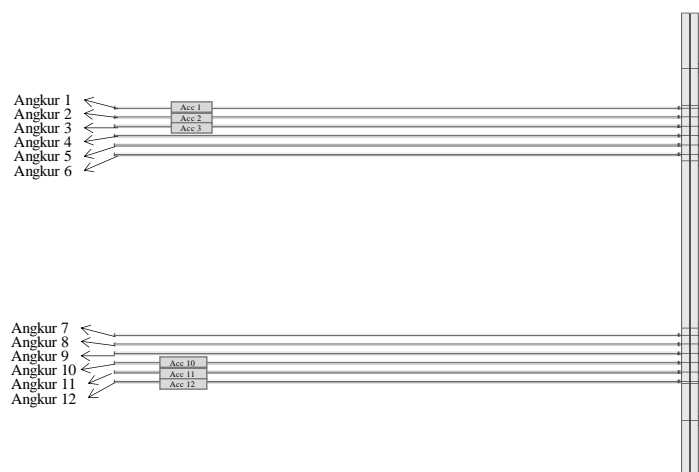
lebih besar dari uji beban, model struktur jembatan yang digunakan pada tahapan perencanaan memerlukan penyesuaian terhadap kondisi aktual lapangan, khususnya respons jembatan yang diukur pada uji pembebanan. Dalam penelitian ini, pemodelan dan analisis struktur menggunakan metode FEM dengan bantuan piranti lunak *MIDAS Civil*. Pertama-tama, model struktur awal diberikan simulasi pembebanan uji berdasarkan skema dan tahapan pembebanan pada uji pembebanan sesuai dengan yang ditampilkan pada Tabel 2. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan deformasi struktur dan juga tegangan di elemen struktur yang diamati pada uji beban. Selain itu, analisis moda getar juga dilakukan untuk mendapatkan frekuensi natural jembatan teoritis untuk kemudian nanti disesuaikan dengan hasil uji getar pada jembatan.



(a) Tampak samping jembatan




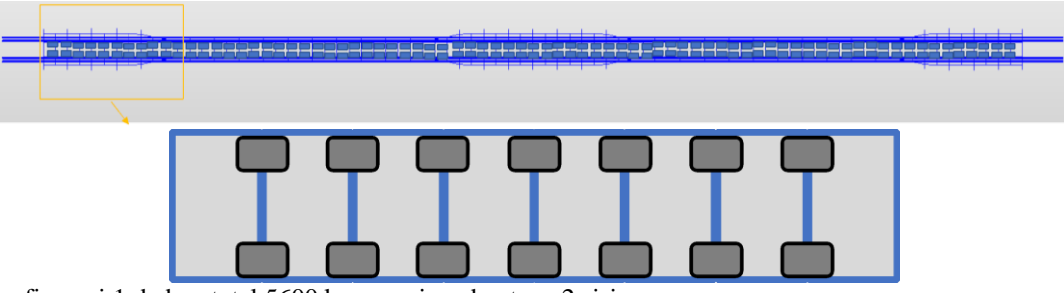
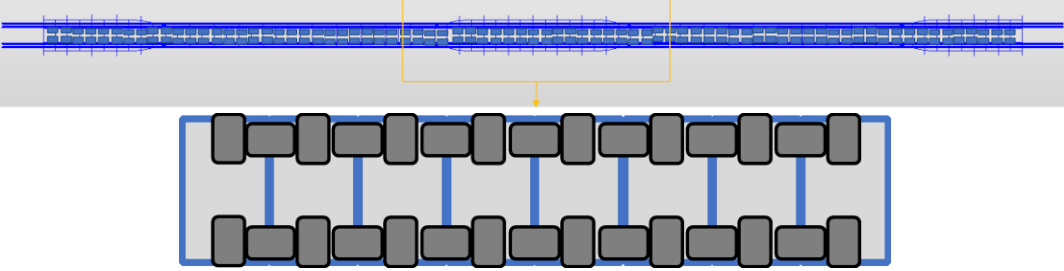
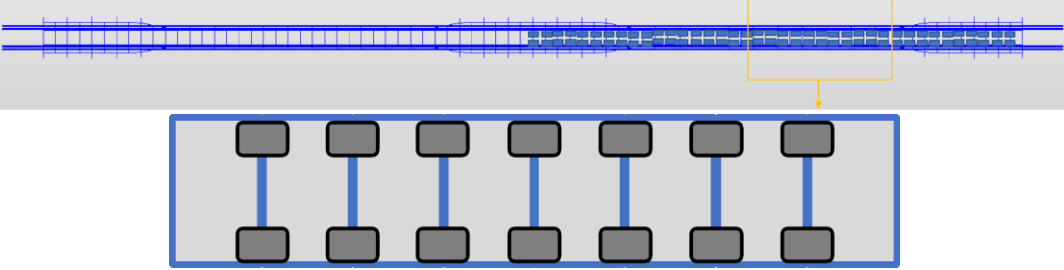
(b) Penempatan sensor *strain gauge* pada segmen lantai jembatan

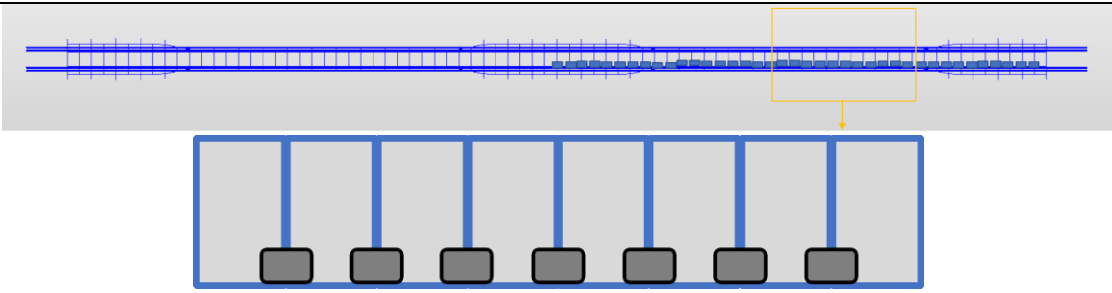
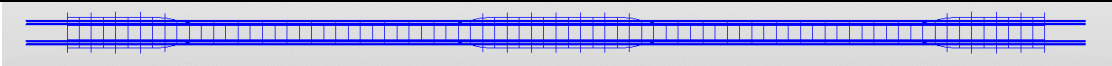


(c) Penempatan sensor *accelerometer* pada kabel *backstay* jembatan

Gambar 9. Titik pengamatan deformasi dan lokasi penempatan sensor uji pembebanan Jembatan Kaca Bromo

Tabel 2. Tahapan pembebanan uji pembebanan Jembatan Kaca Bromo

No	Sketsa dan keterangan
1	 <p>Konfigurasi <i>Initial</i>: dimana jembatan dilakukan pengukuran tanpa adanya beban uji</p>
2	 <p>Konfigurasi 1: beban total 5600 kg sepanjang bentang 2 sisi dimana jembatan dilakukan pengukuran dengan beban 160 karung isi pasir dengan jarak penempatan 1.5 m antar karung yang ditempatkan di atas <i>frame</i> lantai pada kedua sisi lantai</p>
3	 <p>Konfigurasi 2: beban total 8400 kg sepanjang bentang 2 sisi dimana jembatan dilakukan pengukuran dengan beban 240 karung isi pasir dimana dilakukan penambahan 80 karung dari konfigurasi 1, penambahan karung ditempatkan tengah bentang dengan jarak penempatan 0.75 m antar karung yang disusun di atas lantai kaca pada kedua sisi lantai, di antara karung yang sudah ditempatkan pada konfigurasi 1</p>
4	 <p>Konfigurasi 3: beban total 2800 kg setengah bentang 2 sisi (<i>unbalance</i>) dimana jembatan dilakukan pengukuran dengan beban 80 karung isi pasir dengan jarak penempatan 1.5 m antar karung yang ditempatkan di atas <i>frame</i> lantai pada kedua sisi lantai. Beban hanya diberikan pada setengah bentang utama jembatan untuk memeriksa respons jembatan akibat efek beban <i>unbalance</i></p>

5	 <p>Konfigurasi 4: beban total 1400 kg setengah bentang 1 sisi (<i>unbalance</i> + puntir) dimana jembatan dilakukan pengukuran dengan beban 40 karung isi pasir dengan jarak penempatan 1.5 m antar karung yang ditempatkan di atas <i>frame</i> lantai pada kedua sisi lantai. Beban hanya diberikan pada setengah bentang utama jembatan dan di satu sisi lantai untuk memeriksa respons jembatan akibat efek torsi beban <i>unbalance</i></p>
6	 <p>Konfigurasi <i>unloading</i> akhir: dimana jembatan dilakukan pengukuran tanpa adanya beban uji</p>

Evaluasi beban layan izin

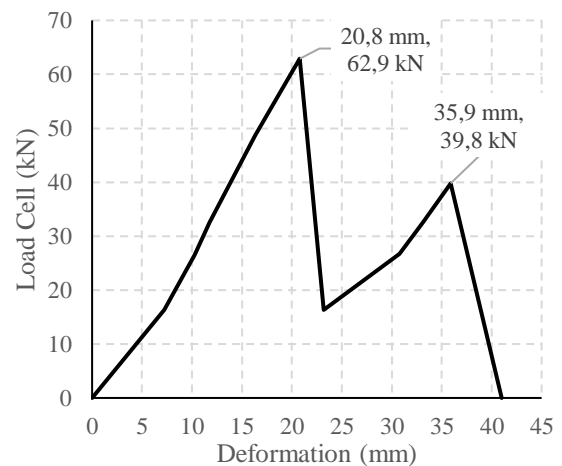
Setelah model struktur jembatan disesuaikan dengan perilaku jembatan aktual akibat uji pembebanan, dapat dilakukan evaluasi beban layan izin. Dari model yang sudah disesuaikan dengan kondisi aktual tersebut kemudian dilakukan analisis struktur dengan proyeksi penambahan beban yang lebih besar daripada beban uji coba pada model struktur jembatan hingga ditemukan besaran beban yang masih memenuhi batasan kriteria keamanan dan kenyamanan, yang kemudian dapat disebut sebagai beban layan izin.

HASIL DAN ANALISIS

Pengujian laboratorium lantai kaca

Pengujian terhadap sistem lantai struktur Jembatan Gantung Lantai Kaca Bromo dilakukan di laboratorium Kementerian PUPR. Adapun panel sistem lantai struktur Jembatan Gantung Lantai Kaca Bromo memiliki ukuran 1.8 m x 1.5 m dan terdiri dari dua lapis kaca dengan tebal masing-masing 12 mm dan interlayer tipe SGP setebal 1.52 mm. Panel tersebut diberikan beban uji beban merata 500 kg/m² sesuai dengan beban desain pejalan kaki SNI 1725 2016 (Badan Standardisasi Nasional 2016), dan kemudian dilanjutkan hingga beban 1250 kg/m². Pada pengujian dengan beban 500 kg/m² maupun 1250 kg/m² tersebut, tidak terlihat kerusakan secara visual, namun terdapat lendutan kaca sebesar 3 mm dengan tegangan 12

MPa yang masih berada di bawah batasan lendutan izin.



Gambar 10. Hasil pengujian beban titik sistem lantai kaca

Pengujian sistem lantai kaca dengan jenis beban titik (*point load*) dilakukan, dimana beban dari aktuator disalurkan ke benda uji melalui bidang kontak 15 cm x 15 cm, seperti dapat dilihat pada Gambar 5. Untuk tipe pengujian dengan beban titik ini, terjadi kerusakan pertama pada lapisan pertama kaca saat diberikan beban sebesar 6.29 ton dengan defleksi yang dihasilkan sebesar 20.8 mm, beban dilepaskan untuk kemudian diberikan beban titik untuk menguji lapisan kedua kaca yang masih belum mengalami kerusakan. Pada pengujian dengan beban kedua, terjadi kerusakan pada lapisan kedua kaca pada beban uji sebesar 3.98 ton dengan defleksi 35.9 mm. Hasil pengujian untuk beban titik ini dapat dilihat pada Gambar 11.

Meskipun terjadi kerusakan, pada saat kerusakan pertama, pecahan kaca menjadi serpihan tetapi tidak lepas dari lapisan interlayer. Pada saat terjadi kerusakan kedua, kedua lapis kaca pecah tetapi kerusakan yang terjadi tidak *brittle*.

Jika dibandingkan dengan beban rencana yaitu 500 kg/m² yang berupa beban merata yang dikonversi menjadi beban titik ekuivalen, yaitu 500 kg/m² dikali luas penampang panel 1.5 m x 1.8 m sehingga didapat beban titik ekuivalen sebesar 1.35 ton. Berdasarkan uji beban sistem lantai, dimana sistem lantai direncanakan untuk mampu memikul beban titik ekuivalen sebesar 1.35 ton dan beban merata 500 kg/m², sistem lantai kaca mampu memikul beban yang lebih besar, dimana untuk pengujian beban titik lantai kaca baru mengalami kerusakan pertama pada beban 6.29 ton, sedangkan untuk uji beban merata, tidak terjadi kerusakan pada sistem lantai hingga beban 1250 kg/m². Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem lantai kaca struktural dari Jembatan Kaca Bromo aman untuk digunakan untuk lantai jembatan pejalan kaki sesuai SNI 1725-2016.

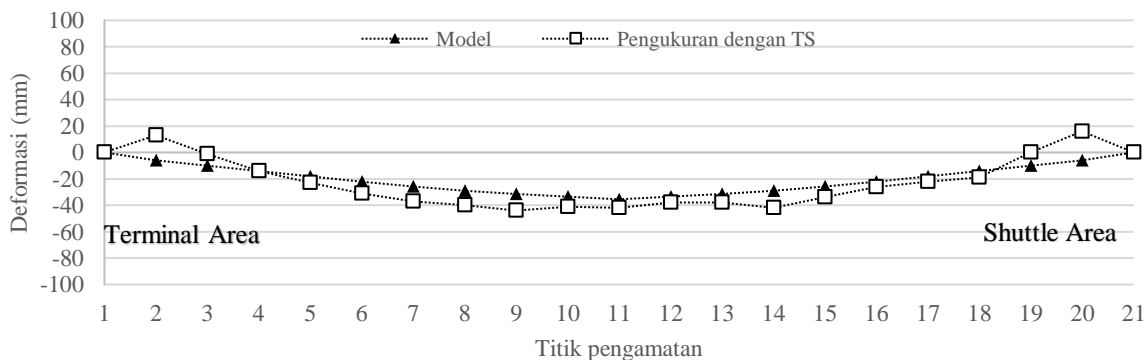
Pengujian beban struktur Jembatan Kaca

Berdasarkan hasil uji pembebanan Struktur Jembatan Kaca Bromo yang dilakukan di lapangan, seperti dapat dilihat pada Gambar 11, Gambar 12, Gambar 13, dan Gambar 14 di bawah ini, pada perbandingan deformasi hasil pengukuran dengan model untuk setiap tahapan pembebanan, terlihat kemiripan pola deformasi, walaupun secara besaran memiliki beberapa perbedaan. Deformasi terbesar terjadi pada kondisi pembebanan tidak merata, yaitu pada pembebanan tahap ke 3 dan ke 4, seperti terlihat

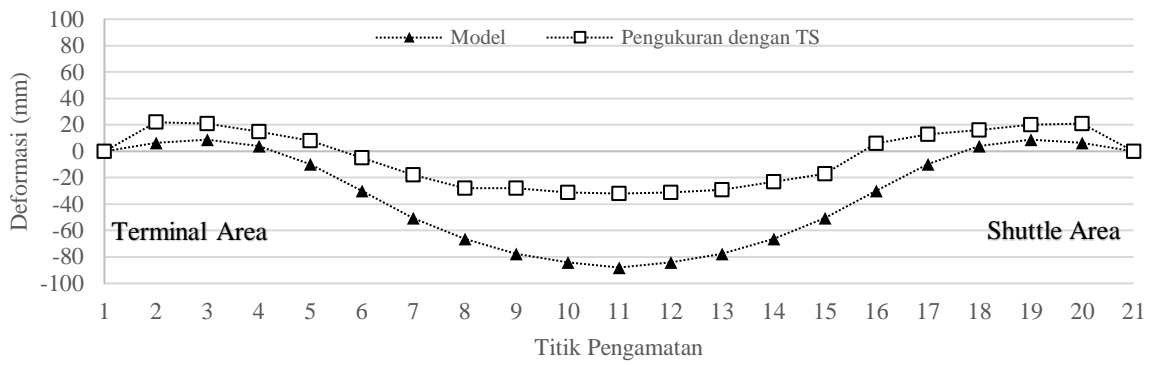
pada Gambar 13 dan Gambar 14. Untuk menghindari kondisi deformasi vertikal terbesar yang dapat terjadi sesuai tahapan uji beban tersebut, maka saat operasional kondisi yang perlu dihindari adalah konsentrasi pengguna jembatan di setengah bentang saja dan atau di salah satu sisi saja seperti simulasi pembebanan tahap ke 3 dan 4.

Untuk gaya kabel *backstay* dari model akibat simulasi tahapan pembebanan uji tahap 1 sampai dengan tahap 4, gaya terbesar terjadi pada kabel *backstay* dengan nomor ankur 2, 3, 11, 12 dengan skema nomor ankur kabel *backstay* dapat dilihat pada Gambar 9.(c)., dengan nilai terbesar terjadi pada pembebanan tahap kedua seperti dapat dilihat pada **Gambar 12**, dengan gaya kabel bernilai 19.53 tonf. Sebagai pembandingan, gaya kabel *backstay* terbesar akibat beban mati saja pada model adalah sebesar 10.7 tonf.

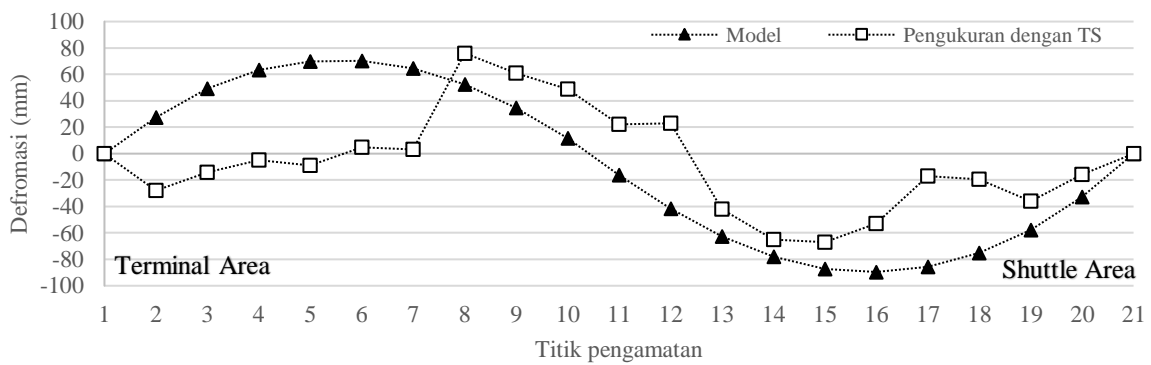
Perbandingan hasil uji lapangan dari gaya kabel *backstay* (Tabel 3) dengan gaya kabel hasil simulasi pada model ditampilkan pada Gambar 15. Pada perbandingan tersebut, gaya kabel yang terjadi antara model dan hasil uji cukup berbeda, hal ini kemungkinan terjadi karena distribusi tegangan kabel yang terjadi lebih besar terjadi pada kabel di tengah bentang, dan membutuhkan waktu cukup lama untuk redistribusi ke bagian *backstay*/angkur jembatan, terkait perilaku tumpuan kabel/*saddle* aktual yang tidak dapat mereplikasi kondisi ideal *saddle* model yang licin sempurna. Namun, secara umum kondisi operasional jembatan masih dalam batasan yang aman untuk besaran setara beban uji yang digunakan dalam pelaksanaan pengujian beban ini.



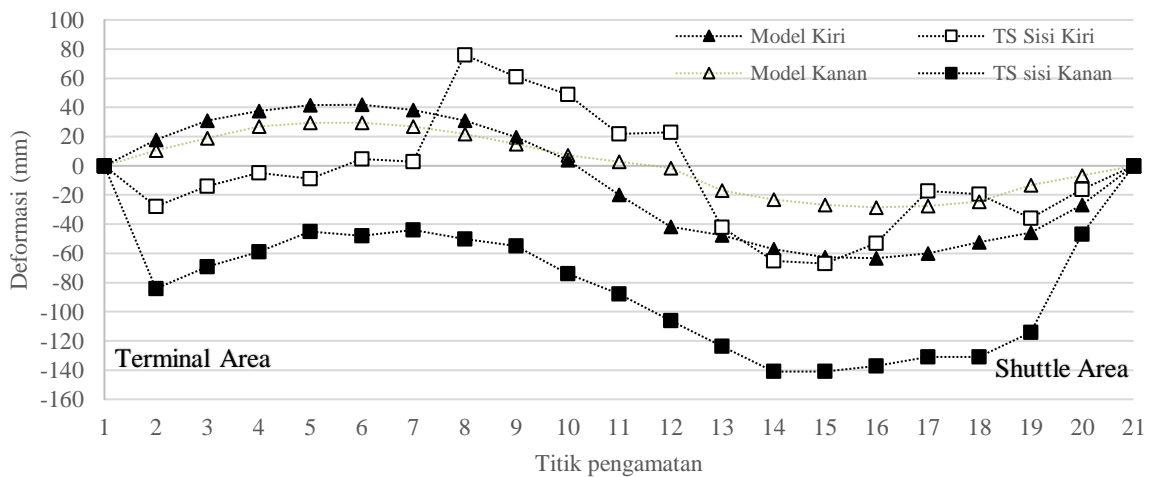
Gambar 11. Perbandingan Deformasi untuk Konfigurasi Pembebanan 1, dengan beban total 5600 kg sepanjang bentang 2 sisi



Gambar 12. Perbandingan Deformasi untuk Konfigurasi Pembebanan 2, dengan beban total 8400 kg sepanjang bentang 2 sisi



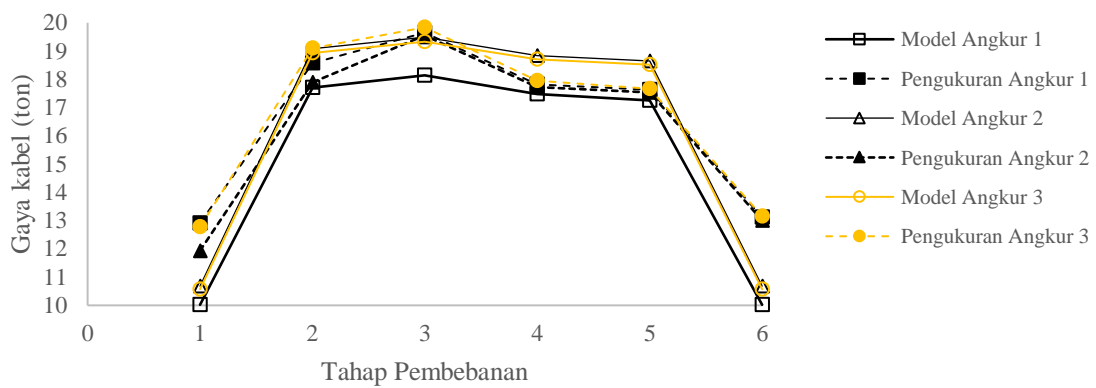
Gambar 13. Perbandingan Deformasi untuk Konfigurasi Pembebanan 3, dengan beban total 2800 kg setengah bentang 2 sisi (*unbalance*)



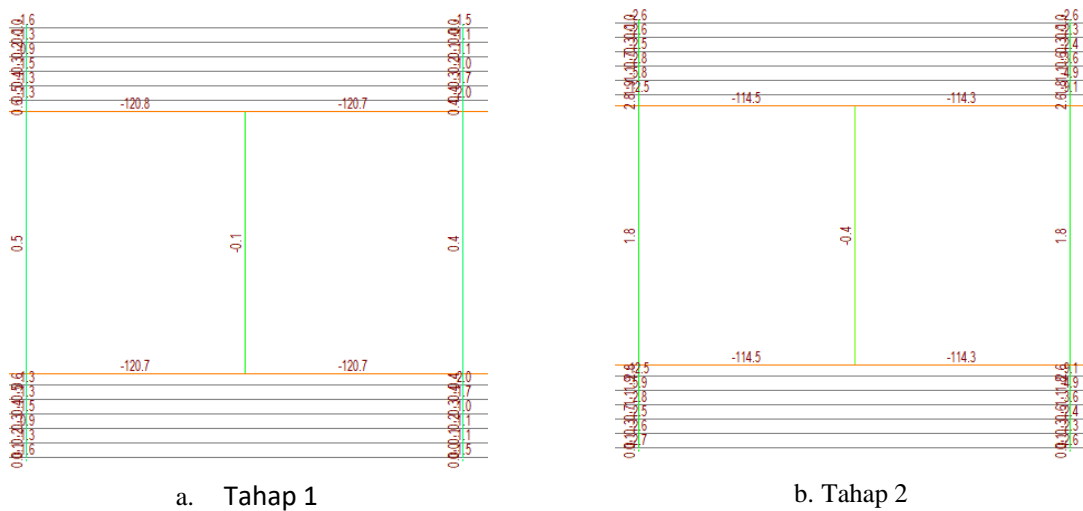
Gambar 14 Perbandingan Deformasi untuk Konfigurasi Pembebanan 4, dengan beban total 1400 kg setengah bentang 1 sisi (*unbalance + puntir*)

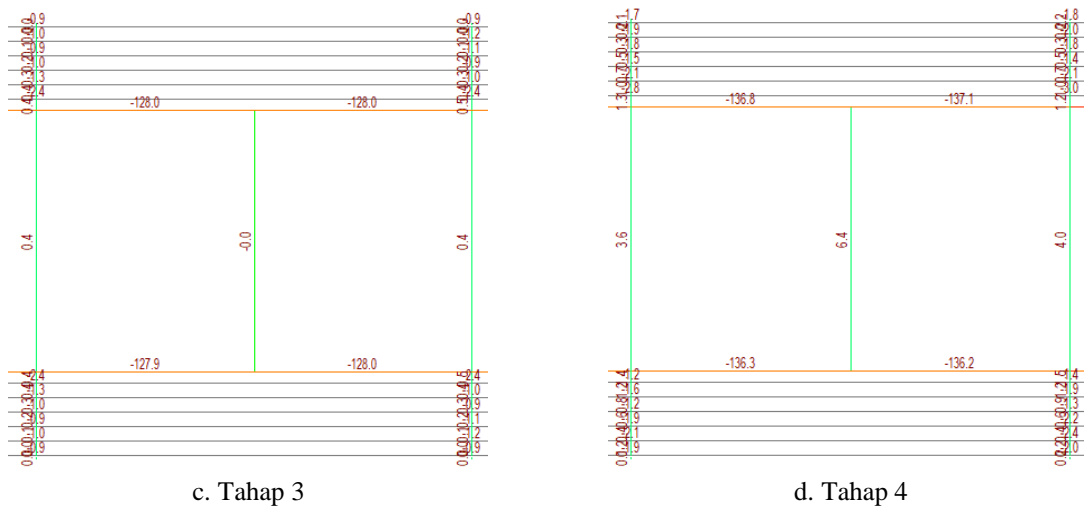
Tabel 3. Gaya kabel *backstay* uji pembebanan Jembatan Kaca Bromo

Lokasi	Panjang Kabel (m)	Speksifikasi kabel (kg/m)	Gaya Kabel (Ton)					Unload
			Initial (Beban Mati)	Beban Tahap 1	Beban Tahap 2	Beban Tahap 3	Beban Tahap 4	
Angkur 1	13.07	8.182	12.913	18.572	19.649	17.811	17.624	13.121
Angkur 2	13.06	8.182	11.936	17.893	19.551	17.723	17.540	13.003
Angkur 3	13	8.182	12.775	19.095	19.838	17.954	17.675	13.163
Angkur 10	13.04	8.182	13.099	19.045	19.818	17.953	17.701	13.204
Angkur 11	13	8.182	12.455	18.427	19.091	17.043	17.311	13.106
Angkur 12	13	8.182	13.099	19.095	19.493	17.341	17.513	13.066



Gambar 15. Perbandingan gaya kabel *backstay* model dan hasil pengukuran akibat tahapan pembebanan

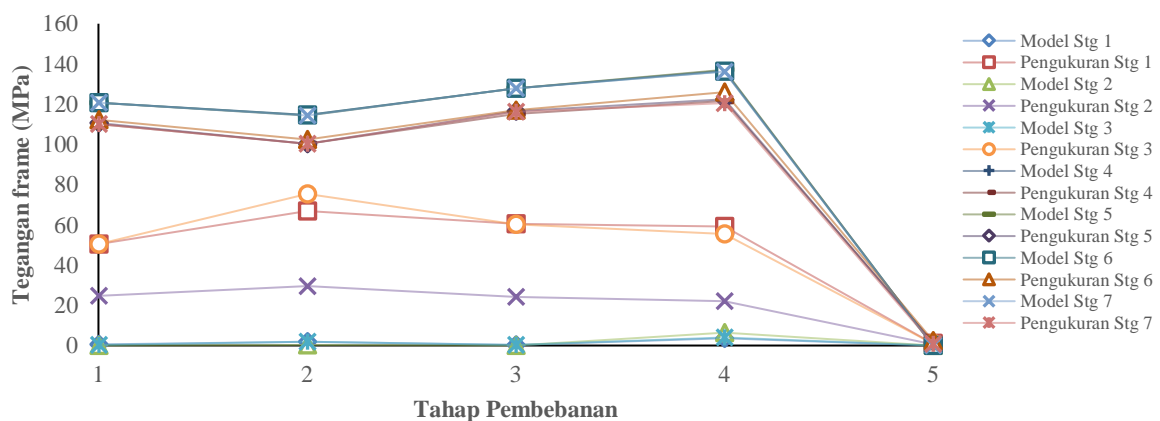




Gambar 16. Tegangan *frame* sistem pemikul lantai model akibat uji pembebanan

Tabel 4. Tegangan *frame* sistem pemikul lantai hasil pengukuran akibat uji pembebanan

Lokasi	Tegangan serat bawah <i>frame</i> lantai akibat pembebanan (MPa)				
	Tahap 1	Tahap 2	Tahap 3	Tahap 4	Unload
Stg 1	50.32	66.88	60.37	59.11	0.97
Stg 2	24.71	29.56	24.17	22.12	0.60
Stg 3	50.43	75.37	60.36	55.37	0.95
Stg 4	110.21	100.18	115.12	121.60	1.80
Stg 5	110.53	100.16	116.48	122.43	1.47
Stg 6	112.14	102.49	117.11	125.96	2.53
Stg 7	110.07	100.40	116.27	120.54	0.78



Gambar 17. Perbandingan tegangan *frame* sistem pemikul lantai model dan hasil pengukuran akibat tahapan pembebanan

Untuk parameter tegangan serat bawah *frame* sistem pemikul lantai, hasil simulasi pada model seperti dapat dilihat pada Gambar 16, terlihat bahwa tegangan terbesar terjadi pada *frame* memanjang pada kedua sisi sistem lantai

yaitu *frame* pada lokasi sensor *strain gage* nomor 4, 5, 6, dan 7 sesuai Gambar 9), dengan nilai terbesar bernilai 137.10 MPa yang masih berada dalam batasan izin. Sebagai pembandingan, tegangan *frame* terbesar akibat beban mati di

lokasi yang sama model adalah sebesar 71.60 MPa.

Jika dibandingkan dengan hasil uji lapangan pada Tabel 4, besaran yang dihasilkan cukup mirip, seperti dapat dilihat pada Gambar 17. Namun, untuk tegangan pada kondisi uji lapangan lebih terdistribusi pada balok melintang. Hal ini karena asumsi yang digunakan dalam pemodelan adalah pendefinisian beban sebagai beban titik sehingga memberikan konsentrasi tegangan yang lebih besar dibanding kondisi aktual di lapangan dimana beban yang digunakan adalah beban karung dengan luasan tapak yang lebih besar. Hal ini memungkinkan untuk beban terdistribusi lebih baik pada elemen struktur *frame* pemikul lantai dan performa distribusi tegangan menjadi lebih baik dibanding pemodelan. Secara umum, sistem *frame* dalam kondisi aman untuk memikul beban layan.

PEMBAHASAN

Perilaku struktur jembatan eksisting terhadap uji pembebanan secara keseluruhan menyerupai pemodelan. Untuk parameter deformasi sebagai batasan aspek kenyamanan, deformasi vertikal tengah bentang yang merupakan deformasi terbesar akan diacu untuk dibandingkan dengan batasan lendutan izin. Dalam hal ini, dengan asumsi target tingkat kenyamanan dalam penggunaan Jembatan Kaca adalah setara dengan tingkat kenyamanan dalam penggunaan jembatan gantung kelas 2, dengan besaran lendutan izin $L/100$ seperti dapat dilihat di kriteria teknis pada Tabel 1.

Untuk Jembatan Kaca yang memiliki panjang bentang utama 200 m, lendutan izin adalah 2000 mm akibat beban hidup. Pada uji beban statis, untuk beban maksimal 8.4 ton, didapat deformasi vertikal terbesar pada bentang utama jembatan adalah 72.70 mm. Maka dari itu jika beban layan disesuaikan untuk beban desain, yaitu setara dengan 20 kali beban uji statis, maka lendutan yang terjadi jika perilakunya dianggap linear adalah sebesar 727.00 mm. Perilaku kabel pada dasarnya adalah material yang bersifat non-linear, namun untuk jembatan gantung pejalan kaki yang telah melewati tahapan konstruksi bertahap dan telah terpasang sempurna dimana beban mati struktur dan tambahan sudah bekerja, efek beban hidup operasional pejalan kaki besarnya cukup kecil sehingga dapat

diasumsikan berperilaku linear terbatas (Gong et al. 2021).

Besaran lendutan yang dihitung dengan regresi linear ini cukup dekat dengan hasil simulasi pembebanan desain pada model yang sudah disesuaikan dengan perilaku aktual jembatan, yaitu 731.98 mm. Hal ini didukung dengan simulasi tahapan pembebanan dimana beban bersifat linear dan perubahan deformasi yang terjadi juga sifatnya linear. Sehingga besaran deformasi simulasi beban desain maksimal ini lebih kecil dibandingkan lendutan izin 2000 mm. Maka dapat disimpulkan bahwa jembatan telah memenuhi aspek kenyamanan, sehingga beban layan tidak perlu disesuaikan lagi, cukup mengikuti batasan beban layan dari aspek keamanan dari parameter tegangan.

Untuk parameter gaya kabel *backstay*, kabel dengan respon haya terbesar akan diacu untuk penentuan beban layan izin dari evaluasi ini. Kabel dengan respon gaya terbesar tersebut adalah kabel kedua dari sisi luar, dimana gaya terbesar yang bekerja pada lokasi dipasangnya accelerometer ini terjadi pada kondisi konfigurasi beban kedua dengan berat total beban 8.4 tonf (240 karung pasir dengan berat 35 kg untuk setiap karung) yaitu 10.42 tonf. Jika dibandingkan dengan respon struktur model yang paling mendekati, besaran gaya di lokasi tersebut adalah 8.8 tonf. Karena kemungkinan distribusi gaya kabel aktual lebih terkonsentrasi di kabel tengah bentang karena perilaku *saddle* jembatan aktual yang tidak 100% ideal seperti perilaku *saddle* pada model yang licin sempurna, maka perlu dilakukan pembatasan beban operasional untuk mengantisipasi gaya berlebih pada kabel khususnya yang terjadi di tengah bentang jembatan. Dengan distribusi gaya terbesar kabel tengah bentang terhadap gaya terbesar kabel *backstay* pada model adalah 14.40 tonf berbanding 8.4 tonf atau setara 1,7: 1. Maka jika diasumsikan perbandingan lebih besar pada kondisi aktual akibat perilaku *saddle* yang tidak seideal model, diambil rasio 2:1, maka perlu dilakukan pembatasan beban operasional menjadi sekitar 80% dari beban rencana, yaitu menjadi 4 kPa atau setara 400 kg / m².

Untuk parameter tegangan *frame* lantai, batang dengan respon tegangan terbesar akan diacu untuk penentuan beban layan izin dari evaluasi ini. Batang dengan respon tegangan terbesar tersebut adalah memanjang di kedua sisi sistem *frame* lantai, dimana tegangan terbesar

yang bekerja pada lokasi dipasangnya *strain gage* STG 5 dan STG 6 ini terjadi pada kondisi konfigurasi beban kedua dimana terdapat 10 karung pasir di atas satu panel lantai tersebut, dengan nilai tegangan terbesar yaitu 137.10 MPa.

Jika dibandingkan dengan hasil uji lapangan, besaran yang dihasilkan cukup mirip, namun tegangan pada kondisi uji lapangan lebih terdistribusi pada balok melintang. Hal ini karena asumsi yang digunakan dalam pemodelan adalah pendefinisian beban sebagai beban titik sehingga memberikan konsentrasi tegangan yang lebih besar dibanding kondisi aktual di lapangan dimana beban yang digunakan adalah beban karung dengan luasan tapak yang lebih besar. Selain itu, dari hasil pengujian sistem segmen lantai struktural di laboratorium, didapatkan hasil berupa kemampuan memikul beban dari panel lantai kaca struktural Jembatan Kaca Bromo cukup tinggi, dimana kerusakan baru terjadi untuk beban titik sekitar 450%. Faktanya, beban aktual pejalan kaki terdistribusi lebih merata pada elemen struktur frame pemikul lantai dan performa distribusi tegangan menjadi lebih baik dibanding pemodelan maupun uji segmen di laboratorium. Secara umum, sistem *frame* dan lantai kaca struktural dalam kondisi aman untuk memikul beban layan dengan mengikuti pembatasan dari parameter tegangan kabel, yaitu 400 kg/m².

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan evaluasi beban layan izin yang telah dilakukan berdasarkan uji pembebanan, didapatkan hasil bahwa struktur jembatan layak untuk difungsikan sebagai jembatan pejalan kaki dengan pembatasan beban layan yang diizinkan yaitu setara dengan 80% beban desain atau 400 kg/m². Pembatasan beban ini dilakukan untuk memenuhi aspek keamanan penggunaan jembatan. Secara teknis Jembatan Kaca ini dapat memikul beban cukup besar, namun dengan mempertimbangkan aspek lokasi wisata dan karakter jembatan yang direncanakan sebagai wisata yang membutuhkan penyesuaian psikologis pengguna jembatan dalam melintasi jembatan karena lantai yang digunakan adalah kaca yang tembus pandang hingga dapat terlihat dasar dari jurang di bawahnya, maka sebaiknya dilakukan pembatasan jumlah orang yang

diizinkan menjadi 100 orang dengan berat rata-rata 70 kg sesuai beban uji yang digunakan dalam pengujian ini.

Secara teknis Jembatan Kaca ini dapat memikul beban cukup besar, namun dengan mempertimbangkan aspek penggunaannya untuk digunakan sebagai fasilitas pariwisata yang membutuhkan penyesuaian psikologis bagi pengguna jembatan untuk melintasi lantai yang transparan dengan ketinggian *clearance* vertikal hingga 80 meter, maka dilakukan pembatasan beban operasional yang diizinkan menjadi 100 orang dengan berat rata-rata 70 kg sesuai beban uji yang digunakan dalam pengujian ini.

Saran

Dalam penelitian ini, belum dilakukan analisis terhadap pengaruh angin dan pengaruh percepatan dinamis pengguna jembatan terhadap perilaku jembatan. Oleh karena itu, untuk melengkapi kajian yang telah dilakukan dalam penelitian ini, disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan yang fokus pada aspek tersebut. Penelitian ini dapat memperdalam pemahaman kita tentang respons struktural jembatan terhadap beban angin dan pengaruh gerakan dinamis pengguna jembatan, sehingga dapat meningkatkan keandalan dan keamanan jembatan dalam kondisi lingkungan yang berbeda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR atas kesempatan untuk terlibat dalam Uji pembebanan Jembatan Kaca Bromo. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Pengelola Taman Nasional Bromo Tengger Semeru dan Pemerintah Provinsi Jawa Timur yang telah memberikan dukungan penuh dalam pembangunan Jembatan Kaca Bromo ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alampalli, Sreenivas, Dan M. Frangopol, Jesse Grimson, Marvin W. Halling, David E. Kosnik, Eva O. L. Lantsoght, David Yang, and Y. Edward Zhou. 2021. "Bridge Load Testing: State-of-the-Practice." *Journal of Bridge Engineering* 26 (3): 1–17. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001678](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001678).
- Badan Standardisasi Nasional. 2016. *SNI 1725-2016 Pembebanan Untuk Jembatan*. Badan

- Standardisasi Nasional*. Jakarta: Indonesia: Badan Standarisasi Nasional.
- Cai, Hubo, Osama Abudayyeh, Ikhlas Abdel-Qader, Upul Attanayake, Joseph Barbera, and Eyad Almaita. 2012. "Bridge Deck Load Testing Using Sensors and Optical Survey Equipment." *Advances in Civil Engineering* 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/493983>.
- Faber, Michael H., Dimitri V. Val, and Mark G. Stewart. 2000. "Proof Load Testing for Bridge Assessment and Upgrading." *Engineering Structures* 22 (12): 1677–89. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00111-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00111-X).
- Gong, Ming, Yunsheng Li, Ruili Shen, and Xinxin Wei. 2021. "Glass Suspension Footbridge: Human-Induced Vibration, Serviceability Evaluation, and Vibration Mitigation." *Journal of Bridge Engineering* 26: 5021014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001788](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001788).
- Haim Dotan Ltd. 2022. "Zhangjiajie Grand Canyon Glass Bridge." Architonic. 2022. <https://www.architonic.com/en/project/haim-dotan-ltd-zhangjiajie-grand-canyon-glass-bridge/5105373>.
- Hester, David, James Brownjohn, Mateusz Bocian, and Yan Xu. 2017. "Low Cost Bridge Load Test: Calculating Bridge Displacement from Acceleration for Load Assessment Calculations." *Engineering Structures* 143: 358–74. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.04.021>.
- Hou, T.-C., and J P Lynch. 2006. "Rapid-to-Deploy Wireless Monitoring Systems for Static and Dynamic Load Testing of Bridges: Validation on the Grove Street Bridge." *Proceedings of SPIE* 6178. <https://doi.org/10.1117/12.658902>.
- Kementerian Pekerjaan Umum. 2010. "Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No . 02 / SE / M / 2010 Tentang Pemberlakuan Pedoman Perencanaan Dan Pelaksanaan Konstruksi Jembatan Gantung Untuk Pejalan Kaki." *Kementerian Pekerjaan Umum*, no. 02.
- Lantsoght, Eva O.L., Cor van der Veen, Ane de Boer, and Dick A. Hordijk. 2017. "State-of-the-Art on Load Testing of Concrete Bridges." *Engineering Structures* 150: 231–41. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.050>.
- Luo, H.-Y, and Z.-B Wang. 2017. "Design of Foundations of Zhangjiajie Grand Canyon Glass Floor Bridge." *Bridge Construction* 47: 96–100.
- Ma, L, K Guo, and S.-K Sun. 2017. "Principal Construction Techniques of Zhangjiajie Grand Canyon Glass Floor Bridge." *Bridge Construction* 47: 99–104.
- Nugraha, Widi, Gatot Sukmara, Pusat Litbang, and Jalan Dan Jembatan. 2017. "Evaluasi Beban Layan Jembatan Apung Pejalan Kaki Tipe Pelengkung Rangka Baja Berdasarkan Uji Pembebanan (Evaluation of Service Live Load of Floating Arch-Truss Pedestrian Bridge Based on Load Testing)." *Jurnal Jalan-Jembatan* 34 (2): 64–78.
- Pariafsai, Fatemeh. 2016. "A Review of Design Considerations in Glass Buildings." *Frontiers of Architectural Research* 5 (2): 171–93. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.01.006>.

PERBANDINGAN DAMPAK LINGKUNGAN PRODUKSI SKALA LABORATORIUM CAMPURAN ASPAL MODIFIKASI POLIMER DENGAN METODE CAMPURAN BASAH DAN KERING MENGGUNAKAN *LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)* (*ENVIRONMENTAL IMPACT COMPARISON OF LABORATORY-SCALE PRODUCTION OF POLYMER-MODIFIED ASPHALT WITH DRY AND WET MIXING METHODS USING LIFE CYCLE ASSESSMENT*)

Christian Gerald Daniel¹⁾, M. Rifqon²⁾, Fadhil M. Firdaus³⁾, Khairina A. Canny⁴⁾

^{1),2)} Departemen Teknik Sipil Universitas Pelita Harapan

³⁾ Air Quality Research Analyst at World Resources Institute

⁴⁾ Smart Construction and Civil Engineering, Calvin Institute of Technology

^{1),2)} MH Thamrin Boulevard 1100, Klp. Dua, Kec. Klp. Dua, Kota Tangerang

³⁾ Jakarta, Indonesia

⁴⁾ Jl. Industri Blok B14, RW.10, Pademangan Timur, Jakarta

¹⁾christian.geraldaniel@gmail.com, ²⁾christian.daniel@uph.edu, ³⁾Fadhil.firdaus@wri.org, ⁴⁾khairina.anindya@calvin.ac.id

Diterima: 24 Maret 2023 ; direvisi: 25 Mei 2023; disetujui: 30 Mei 2023;

ABSTRAK

Kajian ini mengevaluasi dampak lingkungan produksi campuran aspal panas modifikasi polimer melalui dua metode: memodifikasi bitumen (Polymer Modified Bitumen – PMB) serta aplikasi langsung ke campuran atau metode kering (dry mix) menggunakan metode Life Cycle Assessment (LCA) berdasarkan pengukuran emisi di laboratorium untuk produksi 5 sampel per tipe campuran. Polimer yang digunakan untuk metode kering adalah EVA (Ethylene-Vinyl Acetate) sebanyak 5% - 6% berat bitumen. Ruang lingkup kajian ini adalah dari akuisisi bahan baku hingga produksi skala laboratorium. Pengukuran emisi kegiatan produksi sampel di lab menunjukkan kenaikan emisi CO₂ 21.78 – 38.3%, Volatile Organic Compound (VOC) sebesar 16.69 – 28.93%, serta formaldehida dan partikulat (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) sebesar 14.6 – 20.17% dan 7 – 37% untuk produksi dengan PMB akibat suhu pemanasan yang lebih tinggi. Perbandingan hasil LCA menunjukkan kategori dampak Global Warming Potential untuk produksi sampel PMB hingga 2.8kg CO₂-eq / 5 sampel, meningkat 1.1 – 4.1%. Pada kategori Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential, dampak penggunaan PMB tercatat sebesar 0.32 kg 1.4-DB eq / 5 sampel, meningkat 9.15 – 12.33%, serta kategori Human Toxicity dan Photochemical Oxidation Potential sebesar 167 kg 1.4-DB eq dan 0.00081 kg C₂H₄ eq / 5 sampel, 14.35 – 25% lebih tinggi dari hasil sampel aspal modifikasi polimer EVA dengan metode kering. Penggunaan EVA menghasilkan sampel dengan Marshall Quotient 67.7% lebih tinggi dan stabilitas 14% lebih rendah dari PMB, dengan sifat volumetrik setara. Disimpulkan bahwa aplikasi polimer dengan metode campuran kering memiliki kualitas setara dengan PMB dan lebih ramah lingkungan.

Kata Kunci: life cycle assessment, cradle-to-gate, metode campuran kering, bitumen modifikasi polimer, EVA

ABSTRACT

This study evaluates the environmental impact of polymer-modified bituminous mix production through wet-mixed polymer-modified bitumen (PMB) and direct, dry mixing technique using the Life Cycle Assessment (LCA) method based on emission monitoring in the lab for 5 samples per each type of mix. Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) of 5% and 6% bitumen weight was incorporated for the dry mix. The scope of this study was from raw material acquisition to lab-scale production. Emission monitoring from the sample production stage in the lab showed that producing PMB-based samples increased CO₂ concentration by 21.78 – 38.3%, Volatile Organic Compound by 16.69 – 28.93%, as well as formaldehyde and particulate matter by 14.6 – 20.17% and 7 – 37%, all were due to a higher heating temperature. LCA outcomes showed that the Global Warming Potential impact category of 5 PMB sample production was 2.8kg CO₂-eq, increasing by 1.1 – 4.1%. The Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential of 5 PMB samples production was 0.32 kg 1.4-DB eq, 9.15 – 12.33% higher than the EVA-modified specimens, and both Human Toxicity and Photochemical Oxidation increased by 14.35 – 25% to 167 kg 1.4-DB eq and 0.00081 kg C₂H₄ eq. The Marshall Quotient and Stability of the EVA-Modified mix were 67.7% higher and 14% lower than the PMB-based specimens with similar volumetric properties, indicating an eco-friendlier solution from the dry-blended polymer-modified asphaltic mixtures approach with similar properties.

Key words: life cycle assessment, cradle-to-gate, dry mix method, polymer modified bitumen, EVA

PENDAHULUAN

Penggunaan polimer pada campuran aspal sudah merupakan aplikasi yang lazim saat ini di Indonesia. Terdapat dua metode yang biasanya digunakan untuk memodifikasi campuran aspal dengan polimer, yaitu dengan cara mencampurkan terlebih dahulu ke bitumen untuk membentuk bitumen modifikasi polimer (*Polymer Modified Bitumen – PMB*) yang dikenal dengan metode campuran basah (*wet mix method*), serta dengan cara mencampurkan polimer secara langsung pada saat proses pencampuran bitumen dan agregat berlangsung yang dikenal dengan metode campuran kering (*dry mix method*) dan menghasilkan produk campuran aspal modifikasi polimer (*Polymer Modified Asphalt – PMA*) (McNally and Pötschke 2011). Kedua metode pencampuran ini juga dibahas pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Seksi 6.5, dalam kasus ini digunakan untuk aplikasi material aspal Buton pada campuran aspal panas.

Polimer yang sering digunakan untuk modifikasi campuran aspal umumnya diklasifikasikan dalam dua kategori, yakni elastomer serta termoplastik. Penggunaan polimer elastomer yang memiliki menghasilkan bitumen yang memiliki nilai *elastic recovery*, fleksibilitas serta *damping energy* yang tinggi, serta datang baik dalam bentuk natural, seperti karet natural yang juga memiliki kuat tarik serta ketahanan terhadap lelah yang tinggi, maupun dari hasil rekayasa seperti karet vulkanisasi yang memiliki kekakuan lebih tinggi dari karet alam serta proses kopolimerisasi dengan contoh *Styrene-Butadiene-Styrene* (SBS) dan *Styrene-Butadiene-Rubber* (SBR) yang memiliki kekakuan yang lebih tinggi dari karet alam tetapi masih memiliki sifat fleksibilitas yang baik, maupun durabilitas dan ketahanan terhadap abrasi yang tinggi (Hakami, Alokesh and Animesh 2022; Hashim and Ong 2016; Sousa 2017).

Polimer yang tergolong dalam kategori termoplastik memiliki kekakuan yang cukup tinggi dibandingkan elastomer akibat kekakuan pada ikatan monomernya sendiri, tetapi dengan tingkat viskositas yang rendah sehingga mudah dibentuk dalam tekanan yang lebih rendah dibandingkan produk termoset. Produk termoplastik seperti PE dan EVA dapat digunakan sebagai bahan modifikasi bitumen

dengan efek peningkatan kekakuan yang menghasilkan ketahanan terhadap deformasi permanen serta keretakan yang tinggi (Silva et al. 2018; Sharma, Sitansh, and Niraj 2019; Desidery, Lanotte, and Devasahayam 2021). Hanya saja, kadar polimer yang digunakan harus diperhatikan, dimana salah satu penelitian menunjukkan adanya perubahan sifat reologi bitumen ke arah gel akibat konsentrasi molekul PE maupun EVA yang tinggi dan menerus, jika ditambahkan dengan kadar lebih dari 6% (Okhotnikova et al. 2019; Nizamuddin, Boom, and Giustozzi 2021).

Selain menjadi bahan modifikasi bitumen, termoplastik umumnya dapat digunakan sebagai bahan tambah pada campuran aspal dengan metode campuran kering (*dry mix*), dimana polimer yang digunakan bisa dalam bentuk cacahan plastik (PE dan PP), dalam bentuk pelet seperti EVA, maupun dalam bentuk fiber seperti aramid atau PET. Penggunaan termoplastik dalam ketiga bentuk ini terbukti meningkatkan kekakuan, kekuatan, serta meningkatkan umur hidup dan ketahanan terhadap deformasi permanen pada campuran aspal dengan penggunaan polimer beragam dari 0.05% hingga 6% dari berat campuran (Suksiripattanapong et al. 2022; Apostolidis et al. 2020; C.G. Daniel et al. 2021; Slebi-Acevedo et al. 2020). Adapun penggunaan EVA dengan metode *dry mix* belum banyak diuji lebih lanjut, dengan penelitian sebelumnya menunjukkan adanya peningkatan akibat penggunaan EVA dengan dosis 5 – 6% dari berat bitumen terhadap kekuatan, energi fraktur, serta modulus kekakuan dan umur hidup campuran aspal (C.G. Daniel et al. 2022; Montanelli and srl 2013).

Selain kajian mengenai sifat mekanis campuran aspal modifikasi polimer dengan metode campuran kering dan basah, studi yang ada juga telah membandingkan dampak lingkungan yang dihasilkan keduanya menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). LCA dapat didefinisikan sebagai suatu metode sistematis untuk menganalisis dan mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu produk atau suatu proses kerja pada seluruh tahapan daur hidupnya (Klopffer and Grahl 2014). Penggunaan metode analisis LCA untuk penilaian dampak lingkungan akibat penggunaan campuran aspal untuk perkerasan

jalan telah dilakukan sebelumnya. Contoh aplikasinya yakni analisis penggunaan plastik cacahan pada campuran aspal, baik melalui modifikasi bitumen maupun dengan metode *dry mix*, yang telah diketahui menghasilkan campuran aspal yang memiliki sifat mekanis yang meningkat serta dapat didaur ulang untuk penggunaan lebih lanjut, bahkan dengan tingkat emisi *Volatile Organic Compound* (VOC) serta *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon* (PAH) yang lebih kecil dibandingkan proses daur ulang dengan aspal standar (Giustozzi et al. 2022a; Giustozzi et al. 2022b). Selain itu, terdapat satu kajian yang membandingkan penggunaan plastik daur ulang untuk modifikasi metode *wet mix* serta *dry mix* dengan hasil dampak *human carcinogenic toxicity* yang lebih rendah oleh penggunaan metode *dry mix* akibat emisi *Particulate Matter* (PM) dan PAH yang lebih kecil (Oreto et al. 2021). Contoh lain adalah evaluasi dampak lingkungan dari penggunaan campuran aspal hangat menggunakan data yang berasal dari Eropa (Araujo, Joao, Gilberto 2022; Vega et al., 2019; Vidal et al., 2013) serta Asia Tengah (Milad et al. 2022), yang mana dibuat berdasarkan data dari *Ecoinvent* serta pengukuran pada lokasi studi tersebut serta menggunakan teknologi aspal daur ulang.

Untuk skala nasional, penggunaan metode LCA dalam analisis dampak lingkungan di Indonesia masih relatif sedikit, dengan beberapa studi eksisting melakukan studi kasus untuk mengukur dampak dari proyek konstruksi jalan serta membandingkan alternatif material beton dan aspal untuk kasus konstruksi jalan di daerah tertentu (Wirahadikusumah and Sahana 2012; Fistcar 2020). Selain itu, terdapat juga studi yang menganalisis dampak penggunaan teknologi aspal daur ulang pada ruas jalan di Propinsi Jawa Barat (Sarasputri 2022). Seluruh kajian tersebut menggunakan metode evaluasi LCA berdasarkan data inventori yang disediakan dari *database* LCA yang ada sebelumnya di aplikasi seperti Simapro dan Open LCA.

Dari penelitian sebelumnya, pengaruh penggunaan polimer EVA melalui metode campuran kering belum diteliti lebih lanjut dan dibandingkan dengan penggunaan PMB yang komersil di Indonesia, serta kajian yang ada belum memperlihatkan secara detail efek dari setiap tahap dalam proses produksi campuran

aspal sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut.

HIPOTESIS

Akibat suhu pengerjaan yang lebih rendah, aplikasi polimer pada campuran aspal dengan metode pencampuran kering (*dry mix*) dipandang akan memiliki dampak lingkungan yang lebih kecil dibandingkan penggunaan material PMB pada campuran aspal dengan sifat mekanis yang dapat dibandingkan. Penelitian ini mengkaji seberapa jauh dampak lingkungan yang dihasilkan dan seberapa ekuivalen sifat mekanis yang dihasilkan perlu dikuantifikasi lebih lanjut.

METODOLOGI

Persiapan dan Produksi Sampel

Sebelum melakukan pemeriksaan dampak lingkungan dan sifat mekanis dari semua sampel aspal, seluruh bahan baku campuran, yaitu agregat dan bitumen perlu melalui pengecekan sifat fisik dan mekanis berdasarkan standar Bina Marga 2018. Bitumen yang digunakan adalah bitumen standar penetrasi 60/70 serta PMB PG-76 dari Shell yang menggunakan modifikasi polimer *Styrene-Butadiene-Styrene* (SBS), sedangkan agregat kasar dan halus yang digunakan diambil dari *quarry* Parung Panjang, seperti yang ditampilkan pada Gambar 1 (Kiri). Setelah memastikan bahwa seluruh bahan baku campuran memenuhi standar, proses produksi sampel pun dibuat di laboratorium perkerasan jalan di Universitas Pelita Harapan dengan metode produksi mengacu pada Bina Marga 2018 untuk campuran aspal panas yang dimodifikasi polimer *Ethylene-Vinyl Acetate* (EVA) dengan metode pencampuran kering (*dry mix*) maupun yang menggunakan PMB. Semua material campuran aspal dipanaskan pada suhu 160°C selama 45 menit, kemudian semua material dicampur didalam mixer *planetary* untuk menjaga tingkat pencampuran sampel agar dapat merata ketika agregat dicampurkan dengan polimer dan bitumen. Polimer yang digunakan untuk modifikasi campuran HMA dalam penelitian ini berbahan dasar EVA dengan dosis sebesar 5% dan 6% dari berat bitumen. Pemilihan kadar polimer ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya yang telah dipublikasikan bahwa dosis tersebut

memberikan hasil yang paling optimum dari segi kekuatan dan daya tahan terhadap keretakan (Montanelli and srl 2013; C.G. Daniel et al. 2022). Polimer EVA yang digunakan memiliki nama dagang Superplast produksi Iterchemica, dengan spesifikasi teknis ditampilkan pada Tabel 1 berdasarkan data dari manufaktur (C.G. Daniel et al. 2022). Campuran yang terbentuk kemudian dipadatkan melalui alat pemadat Marshall dengan jumlah tumbukan 75 kali per sisi (total 150 kali).

Tabel 1. Sifat fisik dan mekanis polimer EVA Superplast

Propertis	Nilai	Satuan
Warna	Abu-abu	
Berat jenis	0.4 – 0.6	gr/cm ³
Titik leleh	150	°C

Sumber: (Iterchemica, n.d.)

Adapun untuk aplikasi produksi campuran aspal menggunakan PMB, seperti yang terlihat pada Gambar 1 (Kanan), campuran dipanaskan dalam suhu 180°C dengan durasi yang serupa untuk menjaga workabilitas pada saat proses pencampuran dan kompaksi. Selain itu, polimer EVA tidak digunakan lagi di dalam sampel ini. Alat-alat yang digunakan untuk produksi ditampilkan pada Gambar 2 (kiri). Spesifikasi material dan *mix design* akan ditampilkan pada segmen berikutnya.



Gambar 1. (Kiri) Campuran aspal menggunakan polimer EVA dan (Kanan) Campuran aspal menggunakan PMB PG-76

Pengukuran sifat volumetrik dan mekanis

Selain pengukuran dampak lingkungan dan analisis menggunakan metode LCA, sampel aspal yang diproduksi juga diobservasi terhadap sifat volumetrik dan mekanismenya. Sifat volumetrik yang diobservasi antara lain berat isi, rongga udara, serta rongga pada mineral (*Void in Mineral Aggregate – VMA*). Pengujian sifat volumetrik spesimen adalah bagian dari pengujian parameter Marshall dilakukan dengan metode standar SNI 06-2489-

1991, dimana sampel padat berbentuk silinder ditimbang beratnya pada tiga kondisi: kondisi kering, dalam air, serta kering permukaan (*Saturated Surface Dry - SSD*). Sifat mekanis yang didapatkan dari pengujian Marshall yakni stabilitas, kelelahan (*flow*), serta *Marshall Quotient* (MQ). Semua ini bertujuan untuk membandingkan performa dari HMA modifikasi polimer EVA dengan HMA yang menggunakan PMB. Sampel yang diuji pada penelitian kali ini ditunjukkan pada Gambar 2 (Kanan).



Gambar 2. (Kiri) Peralatan untuk Produksi Sampel dan (Kanan) Sampel Briket Aspal hasil produksi

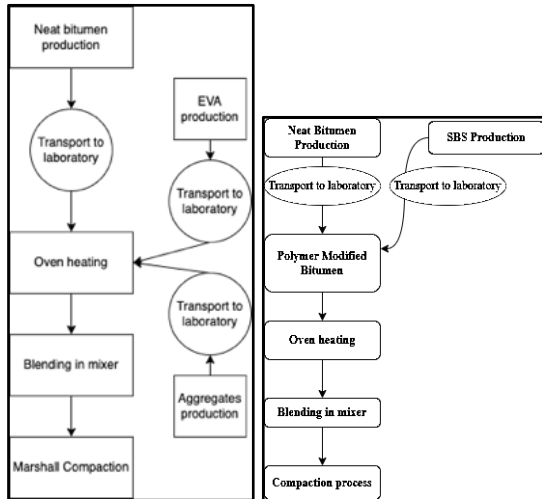
Tahapan *Life-Cycle Assessment* (LCA)

Tahap 1: Penentuan Unit Fungsi dan Cakupan (*Scope*)

Perumusan tujuan analisis perlu ditetapkan secara kuantitatif sehingga penentuan titik kritis, atau perbandingan antara dampak lingkungan suatu produk/metode dapat terjaga objektivitas dan terukur. Terkait itu, maka dibuatlah suatu unit fungsi yang menyatakan tujuan analisis secara kuantitatif. Sesuai dengan tujuan dari studi ini untuk mengukur dampak lingkungan dari aplikasi produksi campuran aspal panas (HMA) yang menggunakan PMB dibandingkan yang menggunakan modifikasi polimer EVA dengan metode pencampuran kering (*dry mix*), maka unit fungsi yang digunakan dalam studi ini adalah analisis dampak lingkungan akibat produksi masing-masing 5 sampel, atau 6.986 kilogram, untuk 3 jenis campuran aspal, yakni campuran yang menggunakan material PMB, serta menggunakan polimer EVA dengan kadar 5% dan 6% dari berat bitumen.

Setelah menetapkan unit fungsi, suatu analisis LCA perlu menetapkan batasan masalah, yang dikenal dengan istilah ruang lingkup (*scope*). Pemilihan ruang lingkup untuk studi ini dilakukan dalam cakupan *Cradle-to-Gate*, yang dimulai dari proses produksi

material penyusun campuran (bitumen standar 60/70 atau alternatif PMB PG76, agregat, dan polimer EVA untuk HMA modifikasi polimer) hingga proses pembuatan spesimen di laboratorium. Batasan sistem yang digunakan di dalam kajian ini untuk penentuan dampak lingkungan ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Batasan system LCA untuk (kiri) analisis produksi HMA modifikasi EVA dan (kanan) produksi HMA menggunakan PMB

Tahap 2: Metode akuisisi data dampak lingkungan di laboratorium

Tahap selanjutnya analisis LCA adalah analisis inventori, yang dibuat berdasarkan bank data (*database*) yang tersedia secara global maupun regional. Selain menggunakan data sekunder dari *database* yang ada, pengumpulan inventori dapat dilakukan dari hasil pengukuran langsung di lapangan yang umumnya dilakukan dengan dua metode, yakni dengan mengukur konsentrasi polutan pada udara ambien yang dikenal dengan nama metode *Ambient Air Quality Monitoring* (AQM) serta pengukuran emisi pada sistem tertutup yang dikenal dengan metode *Continuous Emission Monitoring* (CEM). Pengukuran dengan metode AQM bertujuan untuk mengecek perbandingan komposisi udara pada suatu lokasi dengan kondisi sebelum munculnya konsentrasi polusi dominan (atau biasa disebut *background concentration*) dengan setelah munculnya sumber emisi / polusi (Tiwary and Colls 2010). Sementara pada metode CEM, sistem yang akan diukur perlu diisolasi dari pengaruh eksternal sehingga emisi yang diukur dari suatu luaran dapat diukur untuk menghasilkan kadar murni polusi yang

tidak tercampur dengan udara ambien, hanya saja dengan biaya pengujian yang lebih tinggi karena konfigurasi yang rumit (Jahnke 2022).

Dalam kajian ini, pengumpulan data inventori dilakukan melalui dua fase. Untuk fase pertama, data yang diperlukan diperoleh langsung melalui pengukuran emisi di laboratorium menggunakan alat *Indoor Air Quality Measurement* (AQM) merk *Dienmerrn* tipe 502-03 dengan jangkauan pengukuran hingga 100 meter dan ketepatan pengukuran tiap 1.5 detik yang dilakukan pada seluruh proses produksi di laboratorium mulai dari pemanasan material campuran, pencampuran di *mixer*, serta pemadatan di alat kompaksi. Sensor yang digunakan untuk mengukur PM berupa *laser scattering*, untuk pengukuran formaldehida menggunakan sensor elektrokimia, sedangkan sensor yang digunakan untuk mengukur VOC berupa sensor semikonduktor.

Alat AQM diletakkan tepat di atas permukaan peralatan produksi yang digunakan sehingga dapat mencatat tingkat emisi yang dihasilkan dengan sepresisi mungkin, seperti terlihat pada Gambar 4. Untuk setiap sampel yang diproduksi diberikan selang waktu pengukuran sebanyak 10 menit agar alat pengukur dapat terkalibrasi kembali ke posisi awal tanpa adanya interferensi nilai dari hasil pengukuran emisi kegiatan produksi sampel sebelumnya.



Gambar 4. Pengukuran nilai emisi pada (kiri) oven, (tengah) mixer dan (kanan) alat kompaksi Marshall

Gedung laboratorium UPH, yang ditunjukkan pada Gambar 5, telah dijaga dalam kondisi terisolasi agar tingkat emisi ambien dapat terjaga dengan stabil. Akses sirkulasi udara dapat dibuka ketika proses produksi satu sampel selesai untuk menetralkan emisi yang timbul untuk kemudian ditutup kembali saat kegiatan produksi sampel berikutnya mulai dilaksanakan.



Gambar 5. Interior dan eksterior ruangan laboratorium aspal UPH

Selain hasil dari pengukuran emisi di laboratorium, data untuk analisis juga diperoleh dari faktor transportasi setiap material bahan baku ke laboratorium UPH sesuai Gambar 6, dan diukur tingkat jarak tempuhnya menggunakan aplikasi *Google Maps* untuk kemudian diproses lebih lanjut dengan bank data sekunder, juga dengan aspek fabrikasi masing-masing material bahan baku campuran aspal tersebut, yakni agregat, bitumen penetrasi 60/70, polimer EVA, dan PMB. Data sekunder ini dikonversikan ke inventori dampak berdasarkan pada *database Ecoinvent*, sedangkan untuk produksi bahan bitumen menggunakan data dari Eurobitume.



Gambar 6. Transportasi (kiri) bitumen 60/70 dan PMB (tengah) material agregat dan (kanan) polimer EVA ke UPH

Tahap 3: Pengolahan data inventori dan analisis dampak

Pada studi ini, data inventori yang telah dihimpun kemudian digunakan untuk proses evaluasi dampak setelah dikalibrasikan ke masing-masing faktor dampak menggunakan faktor karakteristik (*characterization factor – CF*) yang diambil dari *CML-IA Midpoint Category (Centrum voor Milieukunde Leiden)* dari Universitas Leiden, Belanda sesuai dengan Persamaan (1).

$$Impact\ Category = \sum Output \times CF \quad (1)$$

Empat kategori dampak yang menjadi hasil kajian ini yakni *Global Warming Potential (GWP)*, *Human and Freshwater Ecotoxicity Potential (HTP and FAETP)*, dan *Photochemical Oxidation Potential (POP)* yang didapatkan dengan konversi data dari inventori dengan faktor karakteristik (*characterisation factor – CF*) dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabel daftar faktor karakteristik untuk dampak yang dianalisis

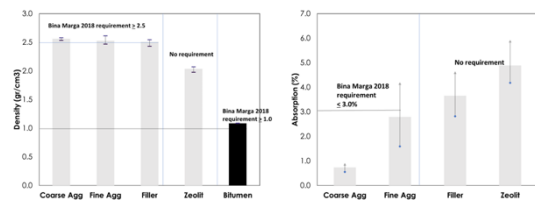
Jenis emisi	GWP	FAETP	HTP	POP
CO ₂	1	0	0	0
VOC	0	0.000000837	1900	0.0092
HCHO	0	8.26	0.83	0
PM ₁	0	0	0.82	0
PM _{2,5}	0	0	0.82	0
PM ₁₀	0	0	0.82	0

Sumber: *CML-IA Database, Midpoint*

GWP adalah suatu kategori dampak yang menggambarkan efek pemanasan global akibat gas rumah kaca, yang dinyatakan dalam satuan referensi kg CO₂-eq (Ain, Auvaria, dan Nurmaningsih 2022). FAETP sebagai kategori dampak digunakan untuk menyatakan dampak polusi terhadap ketersediaan air bersih terkait dengan kerusakan ekosistem yang dapat merusak kerusakan keanekaragaman hayati dan dinyatakan dalam satuan referensi kg 1,4-*Dichlorobenzene-eq* (Centre for Ecotoxicology and of Chemicals 2016). HTP sebagai dampak merupakan potensi menghasilkan zat beracun yang dapat membahayakan lingkungan khususnya manusia dan dinyatakan dalam satuan referensi kg 1,4-*Dichlorobenzene-eq* (Mckone and Hertwich 2001; Hertwich et al. 2001). Sedangkan POP digunakan untuk menyatakan polusi udara sekunder yang terjadi akibat reaksi antara cahaya dengan emisi dari pembakaran dengan bahan bakar fosil, dan dinyatakan dalam satuan kg C₂H₄-eq (Tarannum et al. 2021; Life Cycle Association of New Zealand 2019).

HASIL DAN ANALISIS

Hasil pengujian sifat-sifat volumetrik dan reologi material komponen campuran aspal pada studi ini disajikan pada Gambar 7 serta Tabel 3.

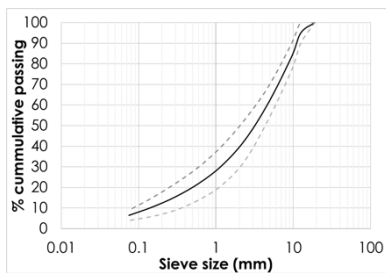


Gambar 7. (Kiri) Berat jenis dan (kanan) penyerapan material komponen campuran aspal

Tabel 3. Sifat reologi material bitumen

Sifat reologi	Hasil	Syarat (Bina Marga 2018)
Penetrasi (mm ⁻¹)	67.4	60 – 70
Titik lembek (°C)	48	≥ 48
Titik nyala (°C)	314	≥ 280

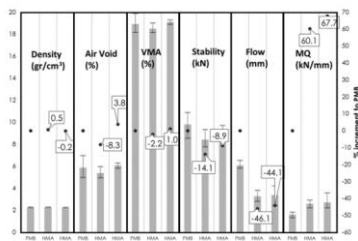
Dari Tabel 3, dapat dilihat bahwa material yang digunakan telah memenuhi persyaratan dalam Standar Bina Marga 2018. Kemudian, gradasi campuran aspal yang akan diproduksi juga berdasarkan kriteria pada Standar Bina Marga 2018 yang disajikan pada Gambar 8. Sedangkan kadar aspal yang digunakan adalah 5.5% yang mengikuti penelitian penulis sebelumnya (C.G. Daniel et al. 2022).



Gambar 8. Gradasi campuran aspal rencana berdasarkan Bina Marga 2018

Perbandingan Sifat Volumetrik dan Marshall

Pengujian sifat volumetrik dan mekanis dilakukan untuk membandingkan sifat-sifat dari campuran aspal yang diproduksi menggunakan polimer EVA dengan metode pencampuran kering (*dry mix*) dan menggunakan produk PMB, dengan hasil observasi dapat dilihat pada Gambar 9.



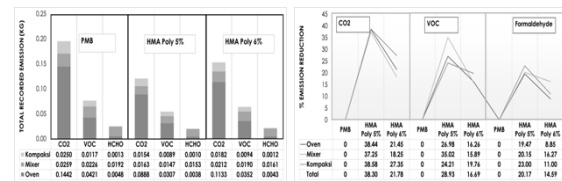
Gambar 9. Hasil pengujian volumetrik dan Marshall campuran aspal

Berdasarkan Gambar 9, terlihat bahwa sifat volumetrik campuran aspal yang menggunakan polimer EVA tidak memiliki

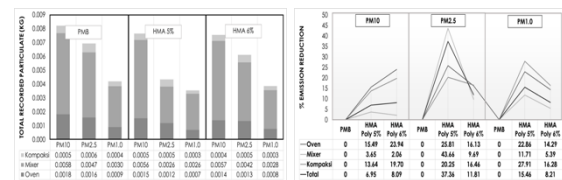
perbedaan signifikan dibandingkan dengan campuran yang menggunakan PMB, yang terlihat dari nilai berat isi, rongga udara dan VMA yang memiliki perbedaan < 10% (0.5%, 8.3% dan 2.2%). Dapat dilihat juga bahwa stabilitas Marshall sampel aspal yang menggunakan polimer EVA berada sedikit di bawah sampel aspal dengan PMB dengan selisih maksimum pada 14.1%, juga dengan kelelahan yang berada pada selisih hingga 46.1%. Meninjau dari segi *Marshall Quotient* (MQ), dimana campuran aspal dengan polimer EVA memiliki nilai yang relatif jauh lebih tinggi dari yang menggunakan PMB dengan selisih hingga 67.7%, dapat disimpulkan bahwa penggunaan polimer EVA meningkatkan kekakuan campuran aspal hingga melebihi penggunaan PMB yang berbahan dasar elastomer, tetapi tidak selalu berarti memiliki kekuatan yang lebih tinggi.

Hasil Pencatatan Emisi pada Laboratorium

Pada sub bab ini, hasil pengukuran tingkat emisi di laboratorium aspal UPH akan diulas dan ditampilkan pada Gambar 10 - Gambar 11.



Gambar 10. (Kiri) Hasil pengukuran emisi CO₂, VOC, dan formaldehida dan (kanan) persentase selisih terhadap sampel kontrol (PMB)



Gambar 11. (Kiri) Hasil pengukuran emisi partikulat dan (kanan) persentase selisih terhadap sampel kontrol (PMB)

Berdasarkan gambar Gambar 10, dapat dilihat bahwa proses pemanasan di oven menjadi penyumbang terbesar emisi karbon dioksida (CO₂) dan *Volatile Organic Compound* (VOC), dengan rasio hingga mencapai 73 – 74% dari total emisi CO₂ serta 55 – 56.6% total emisi VOC. Penggunaan suhu pencampuran yang tinggi menjadi faktor kritis

dalam hasil yang didapatkan ini. Adapun penggunaan EVA dengan dosis 5% memberikan penurunan emisi CO₂ yang konstan pada setiap fase produksi, mulai dari pemanasan material di oven hingga pemadatan pada alat *Marshall Compactor* sebesar 38%. Di sisi lain, penggunaan polimer EVA sebanyak 6% menghasilkan reduksi yang cukup bervariasi antara 18.25% saat proses pencampuran hingga 27% saat proses kompaksi. Nilai yang relatif lebih rendah pada proses pencampuran dapat disebabkan oleh workabilitas campuran yang dipengaruhi oleh penggunaan polimer yang dicampurkan dengan cara kering.

Emisi kedua yang tercatat yaitu VOC, yang memiliki tendensi yang serupa dengan emisi CO₂ yang dibahas sebelumnya. Berkaitan dengan ini, maka dapat terlihat bahwa fase pemanasan di oven menjadi faktor utama dalam total emisi tercatat dengan rasio hingga 55 – 56%, disusul dengan proses pencampuran di mixer dengan rentang 27 – 30% dari total emisi tercatat. Efek dari penurunan suhu pengerjaan tersebut juga dapat terlihat dari adanya penurunan emisi pada tiap fase, dengan selisih hingga 35% pada fase pencampuran di mixer, 27% pada tahap pemanasan oven dan 24.21% pada saat pemadatan; hal ini terutama terlihat pada aplikasi polimer EVA 5%.

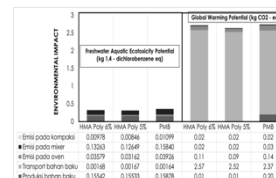
Jenis emisi berikutnya yang tercatat yaitu formaldehida (HCHO). Fase pencampuran di mixer menjadi sumber emisi HCHO tertinggi pada tahap produksi sampel dengan proporsi antara 74 – 76% dari total emisi yang tercatat, sementara tahap pemanasan bahan baku di oven hanya menghasilkan hingga 20% dari total emisi tercatat. Hal ini menjadi konfirmasi hasil temuan EPA sebelumnya, bahwa proses pemanasan dan produksi campuran aspal menghasilkan HCHO dalam jumlah yang cukup signifikan. Selain itu, terjadi penurunan tingkat emisi yang tercatat pada setiap fase dalam proses produksi campuran aspal dengan modifikasi polimer menggunakan metode campuran kering dengan rata-rata 20.87% untuk penggunaan 5% polimer dan 12% untuk penggunaan 6% polimer, dibandingkan dengan penggunaan PMB, dengan penurunan terbesar juga tercatat pada proses pencampuran dengan mixer.

Jenis emisi terakhir yang tercatat pada studi ini ditampilkan pada Gambar 11 adalah

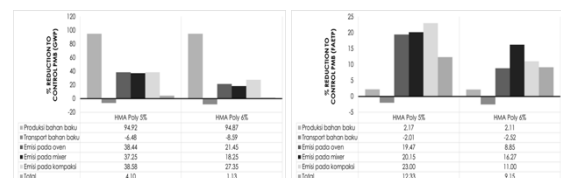
zat partikulat (*Particulate Matter* – PM) yang terbagi atas tiga sub-klasifikasi, yakni PM₁₀, PM_{2.5}, dan PM₁. Terlihat bahwa kontribusi dari proses pencampuran di mixer menghasilkan tingkat emisi terbesar hingga berada para rentang 60 – 76%, dan hasil ini tidak secara eksplisit menunjukkan dampak dari perbedaan aplikasi polimer pada campuran aspal. Adapun perbedaan ini baru terlihat pada proses pemanasan di oven yang lazim menggunakan kipas untuk menghantarkan suhu panas, dimana suhu yang lebih tinggi dapat menghasilkan emisi partikulat yang lebih besar pada kasus penggunaan PMB untuk campuran aspal dengan selisih sebesar 15.5% - 24% untuk PM₁₀, 16.13 – 26% untuk PM_{2.5}, dan 14.3 – 23% untuk PM₁.

Hasil Analisis LCA

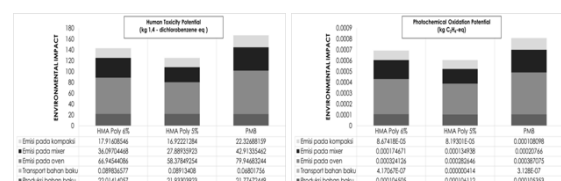
Bagian ini mengulas hasil analisis kajian LCA dalam membandingkan dampak dari produksi 5 sampel aspal, atau total 6.986 kg sampel, menggunakan polimer EVA dengan metode pencampuran kering serta penggunaan bitumen modifikasi polimer (PMB) dengan metode campuran basah, yang ditampilkan pada Gambar 12 - Gambar 15.



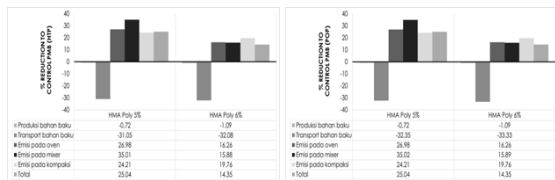
Gambar 12. Total dampak GWP dan FAETP akibat produksi aspal skala lab



Gambar 13. Selisih dampak (kiri) GWP dan (kanan) FAETP dibandingkan sampel kontrol (PMB)



Gambar 14. Total dampak (kiri) HTP dan (kanan) POP akibat produksi aspal skala lab



Gambar 15. Selisih dampak (kiri) HTP dan (kanan) POP dibandingkan sampel kontrol (PMB)

Hasil analisis LCA menunjukkan tingkat dampak *Global Warming Potential* (GWP) tertinggi pada penggunaan teknologi PMB untuk campuran aspal yang ditunjukkan pada Gambar 12 dan Gambar 13. Aspek transportasi material bahan baku ke laboratorium UPH menjadi kontributor terbesar dalam faktor ini hingga mencapai 85 – 95% dari total dampak, disusul dengan faktor pemanasan material di oven sebelum pencampuran sebesar 3 – 5% dari total dampak, dimana pemanasan pada suhu yang lebih tinggi untuk produksi PMB menyebabkan emisi yang lebih tinggi sebesar 21.45% - 8.44% lebih besar dari campuran aspal panas. Adapun produksi bahan baku PMB memegang peranan yang cukup besar hingga mencapai 7.3%, atau sekitar 20 kali lebih besar dari aspek yang sama pada campuran aspal yang memakai EVA. Hal ini dapat disebabkan oleh proses pencampuran antara bitumen murni dengan polimer SBS beserta aditif kimia untuk penambahan adhesi antara polimer dan bitumen yang menghasilkan ekstra dampak dibandingkan dengan penggunaan EVA pada penelitian ini yang langsung dicampurkan pada saat proses produksi campuran aspal.

Faktor kedua yang dianalisis adalah FAETP yang ditunjukkan pada Gambar 12 dan Gambar 13. Pada kategori dampak ini, faktor yang paling dominan adalah tahap produksi bahan baku, dengan rentang antara 43 – 48% dari total dampak, dan emisi pada tahap pencampuran di mixer hingga 39 – 43% dari total dampak. Yang menarik adalah suhu yang lebih tinggi ini juga mempengaruhi selisih tingkat emisi antara penggunaan material PMB dan polimer pada campuran aspal dengan metode campuran kering, yang tercatat pada tahap pemanasan hingga kompaksi dengan rentang 8.85% - 23%.

Dua jenis dampak terakhir adalah HTP dan POP ditunjukkan pada Gambar 14 - Gambar 15, dimana emisi VOC menjadi jenis emisi yang paling dominan pada kedua kategori ini. Disini terlihat bahwa kenaikan suhu

produksi untuk penggunaan material PMB menjadi faktor penentu pada kedua dampak ini, dengan proporsi di antara 46 - 47% dari total dampak yang dihasilkan, disusul oleh faktor emisi tercatat pada proses pencampuran hingga 22 – 25% dari total dampak, dan penurunan suhu produksi ini menyebabkan rasio dampak pada aspek pemanasan di oven hingga proses pemadatan di kompaktor hingga mencapai 16 – 35% secara rata-rata. Selain itu, faktor produksi material bahan baku untuk kedua tipe campuran ini memiliki peran yang relatif penting, dengan kontribusi rata-rata 13 – 17.5% dari total dampak yang dihasilkan.

PEMBAHASAN

Interpretasi Hasil Uji Marshall

Hasil pengujian volumetrik dan mekanis Marshall menunjukkan nilai yang sesuai kriteria standar Bina Marga 2018 untuk seluruh sampel campuran aspal yang menggunakan PMB maupun polimer EVA. Adapun selisih nilai parameter volumetrik yang relatif insignifikan (<10%) menyiratkan bahwa penggunaan EVA yang memiliki berat jenis yang kecil tidak memodifikasi sifat volumetrik campuran aspal dibandingkan penggunaan PMB. Selain itu, nilai stabilitas Marshall sampel campuran aspal modifikasi EVA yang sedikit lebih kecil, kelelahan (*flow*) yang mencapai hingga separuh, serta MQ yang bahkan lebih kecil dengan selisih lebih dari 60% dari sampel aspal yang menggunakan PMB menyiratkan sifat campuran yang lebih getas akibat penggunaan polimer EVA termoplastik dibandingkan PMB yang berbahan dasar SBS elastomer. Hanya saja, rasio perbedaan kekuatan yang relatif kecil (< 15%) dan nilai stabilitas yang berada di atas 8 kN membuat metode modifikasi campuran aspal dengan mencampurkan polimer EVA dengan metode kering menjadi alternatif yang cukup menjanjikan dari segi mekanis.

Interpretasi hasil pengukuran emisi lab

Penggunaan suhu pemanasan yang lebih tinggi pada produksi campuran aspal menggunakan PMB terbukti mencatat emisi total CO₂ sebesar 0.195kg / 6.986 kg campuran (dengan persentase emisi sebesar 4.22% dari material produksi), dengan kenaikan hingga 21.78 – 38.3% lebih tinggi dibandingkan produksi campuran aspal dengan modifikasi

polimer EVA menggunakan metode campuran kering (*dry mix*) sebesar 0.12 kg dan 0.153 kg / 6.986 kg campuran (persentase emisi sebesar 1.71 dan 2.19% dari berat sampel yang diproduksi). Hasil analisis sebelumnya memperlihatkan pengaruh dari suhu pengerjaan yang lebih tinggi dalam pengaruhnya terhadap hasil total ini. Perbandingan yang dibuat ini serupa dengan pencatatan pada studi kasus di Chili dengan produksi aspal untuk jalan ukuran 1 km dan lebar 3.5 m yang memperlihatkan penurunan emisi CO₂ akibat aplikasi polimer dengan cara kering sebesar 33% (Movilla-Quesada et al. 2021). Hal ini juga emisi total VOC yang tercatat pada proses produksi sampel campuran aspal menggunakan PMB, dengan total 0.0764 kg / 6.986 kg campuran atau 1% emisi VOC pada proses produksi, dan terjadi penurunan hingga 16.69 – 28.93% atau sebesar 0.054 dan 0.064 kg / 6.986 kg sampel (0.77 dan 0.92%) untuk campuran aspal yang menggunakan polimer EVA dan metode pencampuran kering (*dry mix*). Dapat terlihat juga bahwa suhu pemanasan material, terutama bitumen, yang tinggi dapat menyebabkan proses oksidasi pada bitumen yang menghasilkan senyawa volatil yang mudah terurai, sehingga menghasilkan pencatatan VOC yang tinggi. Hasil yang cukup beragam ini juga dapat terlihat dari kajian lain yang menggambarkan hasil emisi VOC dari penggunaan karet vulkanisir dengan metode campuran kering dibandingkan dengan campuran aspal menggunakan PMB berbasis dasar SBS dari 5% hingga hampir 20% (Bueno et al. 2021). Pencatatan emisi HCHO pun memiliki tendensi yang sama, dengan emisi total yang dihasilkan oleh produksi sampel dengan PMB mencapai 0.0253 kg / 6.986 kg sampel campuran aspal (persentase emisi sebesar 0.36%), dan penggunaan EVA pada campuran aspal dengan metode campuran kering menghasilkan penurunan emisi sebesar 14.6% - 20.17%, atau tingkat emisi tercatat sebesar 0.02 kg dan 0.022 kg / 6.986 kg sampel aspal (persentase emisi terhadap berat produksi sampel sebesar 0.29% dan 0.31%).

Untuk emisi partikulat, terlihat dari hasil pengukuran emisi pada studi ini bahwa produksi campuran aspal, baik yang menggunakan PMB maupun polimer dengan metode campuran kering mencatatkan emisi yang relatif kecil, dimana emisi maksimum

yang tercatat sebesar 0.0082 kg PM₁₀, 0.0069 kg PM_{2.5}, dan 0.0042 kg PM₁ untuk produksi 6.986 kg sampel campuran aspal (persentase emisi sebesar 0.12%, 0.1%, dan 0.06%), yang semuanya dicatatkan dari proses produksi aspal menggunakan PMB. Adapun aplikasi polimer sebanyak 5% dan 6% berat bitumen dengan cara dicampurkan langsung dapat menurunkan tingkat emisi zat partikulat tersebut dengan rentang 7 – 8% untuk PM₁₀ (0.0075 dan 0.0076 kg / 6.986 kg sampel dan persentase emisi sebesar 0.107% dan 0.109%), 12 – 37% untuk PM_{2.5} (0.004 dan 0.006 kg / 6.986 kg sampel dan persentase emisi sebesar 0.06% dan 0.09%), dan 8 – 15.5% untuk PM₁ (0.0036 dan 0.0039 kg / 6.986 kg sampel dan persentase emisi sebesar 0.05% dan 0.06%), dengan pemanasan pada oven menjadi faktor yang dominan menyumbang nilai emisi tercatat. Penurunan tingkat emisi yang dominan disebabkan oleh faktor suhu produksi yang lebih rendah juga ditemui dalam perbandingan antara produksi campuran aspal hangat dengan suhu 20-30°C lebih rendah dari campuran aspal panas standar sebesar 25 – 55% (Xiu et al. 2020; Martin, Kerstin, and Joachim 2019; Tang et al. 2020; Giustozzi et al. 2022b).

Secara total, dapat disimpulkan melalui hasil pengujian pada tahap ini bahwa penggunaan suhu untuk produksi campuran aspal yang lebih tinggi pada kasus penggunaan PMB menyebabkan emisi CO₂, VOC dan formaldehida yang lebih besar yang berasal dari reaksi bitumen, serta zat partikulat - PM yang mayoritas berasal dari komponen agregat yang digunakan. Selain itu, penggunaan polimer EVA pada suhu pengerjaan tertinggi di 160°C tidak menyebabkan terjadinya degradasi akibat stabilitas termal polimer tersebut yang relatif tinggi, sehingga tidak menimbulkan ekstra emisi.

Interpretasi Hasil Analisis Dampak LCA

Hasil analisis LCA menunjukkan tingkat dampak *Global Warming Potential* (GWP) tertinggi pada penggunaan teknologi PMB untuk campuran aspal dengan emisi mencapai 2.8kg CO₂-eq / 6.986 kg sampel aspal (persentase emisi mencapai 40% dari berat produksi sampel) dengan selisih mencapai 1.1 – 4.1% dari sampel campuran aspal panas menggunakan polimer EVA, dimana penggunaan EVA sebesar 5% dan 6%

menghasilkan dampak GWP sebesar 2.65kg dan 2.73kg CO₂-eq / 6.986 kg sampel aspal, atau persentase emisi sebesar 38% dan 39%. Faktor transportasi disini menjadi bagian mayoritas dalam penelitian ini disebabkan oleh faktor kuantitas produksi yang kecil dibandingkan jarak transportasi material yang relatif besar, sehingga proporsi faktor ini menjadi dominan. Faktor pemanasan di oven pun cukup besar akibat emisi dari pembakaran pada system oven yang ditambah dengan emisi yang berasal dari senyawa bitumen yang terurai saat dipanaskan. Nilai yang dihasilkan pada studi ini cenderung lebih besar dibandingkan studi yang serupa di Italia tetapi menggunakan karet ban, dimana produksi 1 kg sampel aspal menghasilkan dampak GWP sebesar 0.2 kg CO₂-eq, dan faktor suhu pencampuran dan transportasi material juga menjadi faktor penting pada kajian ini (Lima et al. 2022; Landi et al. 2020).

Faktor kedua yang dianalisis adalah FAETP, dimana terlihat bahwa produksi sampel HMA dengan polimer EVA menghasilkan dampak yang lebih kecil dengan selisih hingga 9.15 – 12.33% dari sampel campuran aspal dengan teknologi PMB, dengan total dampak FAETP akibat penggunaan PMB hingga mencapai 0.37 kg 1.4-DB eq/ 6.986 kg (persentase emisi sebesar 5.3% dari berat produksi sampel). Adapun penggunaan EVA dengan dosis 5% dan 6% menghasilkan dampak FAETP sebesar 0.32 kg dan 0.34 kg / 6.986 kg sampel aspal, dengan persentase emisi sebesar 4.6% dan 4.9%. Emisi formaldehida (HCHO) menjadi sumber terbesar untuk dampak FAETP terutama pada saat proses pencampuran sampel, dan di sini terlihat bahwa suhu produksi sampel yang lebih tinggi menyebabkan pembentukan senyawa HCHO yang lebih tinggi dan menghasilkan nilai dampak yang lebih besar, terutama pada saat pencampuran di dalam mixer. Dapat disimpulkan bahwa aplikasi polimer pada campuran aspal panas dengan metode pencampuran kering yang mensyaratkan suhu pengerjaan 20°C lebih rendah dibandingkan penggunaan PMB menjadi faktor kritis dalam mengurangi nilai dampak FAETP hingga mencapai rata-rata 10.7% untuk penggunaan polimer EVA 5% dan 6% dari berat total campuran. Pengaruh suhu campuran yang lebih tinggi telah terbukti menghasilkan nilai dampak FAETP yang lebih

besar, seperti terlihat pada hasil kajian serupa yang mengevaluasi dampak dari produksi campuran aspal hangat dengan suhu pengerjaan 20 – 30°C lebih rendah dari campuran aspal panas standar, dengan tingkat reduksi kurang dari 5% (Martinez-Soto et al. 2023).

Dua jenis dampak terakhir adalah HTP dan POP. Produksi sampel campuran aspal dengan menggunakan PMB menghasilkan dampak total hingga 14.35 – 25% lebih besar dibandingkan penggunaan polimer dengan cara pencampuran kering atau rata-rata sebesar 19.7% lebih besar, dengan total dampak HTP yang dihasilkan penggunaan PMB hingga mencapai 167 kg 1.4-DB eq (persentase emisi sebesar 2391%) dan POP sebesar 0.00081 kg C₂H₄ eq / 6.986 kg (persentase emisi sebesar 0.012%). Penggunaan EVA dengan dosis 5% dan 6% menghasilkan dampak HTP sebesar 125.21 dan 143.06 kg 1.4-DB eq / 6.986 kg sampel aspal (persentase emisi sebesar 1792% dan 2048%), serta dampak POP sebesar 0.00061 kg dan 0.00069 kg C₂H₄ eq (persentase emisi sebesar 0.009% dan 0.01%). Hal ini juga dominan disebabkan oleh selisih dari suhu produksi, yang telah diperlihatkan pada bagian sebelumnya. Pengaruh penurunan suhu produksi terhadap penurunan nilai dampak HTP dan POP juga dilaporkan dari kajian lain terhadap seluruh daur hidup struktur jalan di Perancis yang mencapai 5% dan 8.5%, lebih kecil dari hasil kajian ini (Santos et al. 2018). Pengaruh temperatur yang lebih rendah ini juga dapat dilihat dari hasil kajian yang membandingkan dampak dari produksi campuran aspal hangat dengan temperatur produksi 20 – 30°C lebih rendah dari campuran aspal panas standar, dengan reduksi dampak hingga 25% pada studi kasus di Korea Selatan (Martinez-Soto et al. 2023; Mazumder et al. 2016). Lebih jauh lagi, untuk ketiga jenis dampak terakhir (FAETP, HTP, dan POP), kontribusi dari produksi campuran aspal menjadi faktor penyumbang dampak terbesar berdasarkan hasil kajian menggunakan campuran aspal daur ulang dan karet bekas dengan temperatur kerja yang lebih rendah (Bressi et al. 2021).

Dari keempat jenis dampak lingkungan yang dianalisis pada studi ini, terlihat jelas bahwa aplikasi bitumen modifikasi polimer atau PMB membutuhkan suhu pencampuran yang lebih tinggi sehingga menghasilkan

dampak lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan polimer yang dicampurkan langsung pada saat produksi campuran aspal berlangsung, yang dikenal dengan metode campuran kering (*dry mix*). Hanya saja, perlu diperhatikan bahwa penggunaan material ekstra sebagai bahan baku menghasilkan tingkat dampak yang cukup berpengaruh untuk analisis keseluruhan, serta transportasi material bahan baku ke lokasi produksi pun menyumbang kontribusi signifikan ke total dampak GWP, sehingga perlu diperhatikan lebih lanjut ke depannya.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Life Cycle Assessment (LCA) digunakan untuk mengkaji dampak lingkungan dari produksi campuran aspal panas (*Hot Mix Asphalt* – HMA) modifikasi polimer EVA dengan dosis 5% dan 6% berat bitumen dengan HMA yang menggunakan PMB sebagai binder pada skala laboratorium, dengan juga membandingkan sifat volumetrik dan mekanismenya. Unit fungsi pada kajian ini adalah dampak lingkungan dari proses produksi 5 sampel aspal dengan tiga bahan berbeda seperti yang dijelaskan sebelumnya.

Scope kajian LCA adalah *cradle-to-gate*, dengan data dampak lingkungan merupakan kombinasi *database* Ecoinvent dan Eurobitume untuk produksi bahan baku, serta pengukuran emisi pada proses produksi sampel aspal di Laboratorium Aspal Universitas Pelita Harapan. Emisi yang tercatat adalah CO₂, dimana penggunaan PMB mencatat hasil 0.195 kg/ 5 sampel, 21.78 – 38.3% lebih tinggi dari campuran aspal menggunakan polimer EVA dengan metode pencampuran kering (*dry mix*), Volatile Organic Compound (VOC) dengan penggunaan PMB mencatat hasil 0.0764 kg/ 5 sampel yang 16.69 – 28.93% lebih besar dibandingkan campuran aspal yang menggunakan polimer EVA, dimana kontribusi terbesar untuk keduanya berasal dari pemanasan oven. Emisi formaldehida (HCHO) untuk sampel dengan PMB tercatat 0.025 kg/ 5 sampel yang 14.6 – 20.17% lebih besar dari sampel yang menggunakan polimer EVA, dan emisi partikulat (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁), dimana penggunaan PMB menghasilkan emisi sebesar 0.0082 kg PM₁₀, 0.0069 kg PM_{2.5}, dan 0.0042

kg PM₁ untuk 5 sampel, 7 – 37% lebih tinggi dari sampel yang menggunakan polimer EVA, dan kedua tipe emisi ini mayoritas berasal dari proses pencampuran di mixer.

Beberapa kategori dampak hasil analisis LCA yakni *Global Warming Potential* (GWP), dimana penggunaan PMB menghasilkan nilai 2.8kg CO₂-eq / 5 sampel atau 1.1 – 4.1% lebih tinggi dari campuran dengan polimer EVA akibat faktor transportasi bahan baku yang dominan, *Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential* (FAETP) dimana hasil dari aplikasi PMB sebesar 0.32 kg 1.4-DB eq/ 5 sampel, 9.15 – 12.33% lebih besar dari campuran dengan polimer EVA, kemudian *Human Toxicity Potential* (HTP) dan *Photochemical Oxidation Potential* (POP) dengan hasil dari aplikasi PMB sebesar 167 kg 1.4-DB eq dan 0.00081 kg C₂H₄ eq / 5 sampel, atau 14.35 – 25% lebih tinggi dari campuran dengan modifikasi polimer EVA, yang dominan dipengaruhi faktor kenaikan suhu produksi dan pencampuran sampel.

Hasil rata-rata analisis LCA menunjukkan penurunan dampak lingkungan yang dihasilkan oleh pencampuran EVA dengan metode kering (*dry mix*) sebesar 20 – 34% dibandingkan dengan penggunaan PMB. Adapun sifat volumetrik (berat isi, rongga udara dan VMA) menunjukkan nilai yang relatif setara, dan sampel aspal yang dicampurkan polimer EVA secara metode kering menunjukkan tingkat kekakuan (*Marshall Quotient*) yang lebih tinggi hingga 67.7% dan stabilitas Marshall yang sedikit lebih rendah ($\leq 15\%$) dibandingkan campuran aspal yang menggunakan PMB. Sehingga dapat disimpulkan metode aplikasi polimer ke campuran aspal dengan cara pencampuran kering (*dry mix*) dapat menjadi alternatif penggunaan PMB dengan menimbang dampak lingkungan yang dapat direduksi.

Saran

Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan bekerja sama dengan pihak praktisi untuk mengukur dan mengevaluasi dampak aplikasi polimer dengan metode *dry mix* ini dalam lingkup daur hidup yang lebih luas, hingga akhir masa hidup perkerasan jalan. Pendekatan LCA dapat dilanjutkan untuk menghasilkan bank data untuk keperluan evaluasi dampak lingkungan dengan data lokal untuk evaluasi dampak lingkungan yang lebih akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Pelita Harapan atas hibah pembiayaan penelitian nomor 413/LPPM-UPH/XII/2021, serta kepada PT. Enceha Pacific yang menunjang penelitian ini melalui penyediaan material bahan baku.

DAFTAR PUSTAKA

- Ain, Thayyibah Nazlatul, Shinfi Wazna Auvaria, dan Dyah Ratri Nurmaningsih. 2022. "Perkiraan Potensi Pemanasan Global Pada Skenario Pengelolaan Sampah Domestik Di Kota Sukabumi." *Jurnal Teknologi Lingkungan* 23 (2): 214–21.
- Apostolidis, Panos, Xueyan Liu, C.G. Daniel, Sandra Erkens, and Tom Scarpas. 2020. "Effect of Synthetic Fibres on Fracture Performance of Asphalt Mortar." *Road Materials and Pavement Design* 21 (7): 1918–1931.
- Araujo, Daniela L.Vega, Joao Santos, and Gilberto Martinez-Arguelles. 2022. "Environmental Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt with Recycled Concrete Aggregate for Road Pavements." *International Journal of Pavement Engineering*.
- Bressi, Sara, Joao Santos, Marko Orešković, and Massimo Losa. 2021. "A Comparative Environmental Impact Analysis of Asphalt Mixtures Containing Crumb Rubber and Reclaimed Asphalt Pavement Using Life Cycle Assessment." *International Journal of Pavement Engineering* 22 (4): 524–38.
- Bueno, M., R. Haag, N. Heeb, P. Mikhailenko, L. Boesiger, and L. D. Poulikakos. 2021. "Functional and Environmental Performance of Plant-Produced Crumb Rubber Asphalt Mixtures Using the Dry Process." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 54 (5).
- Centre for Ecotoxicology, European, and Toxicology of Chemicals. 2016. "TR127: Freshwater Ecotoxicity as an Impact Category in Life Cycle Assessment." Brussels.
- Daniel, C.G., Xueyan Liu, Panos Apostolidis, S.M.J.G. Erkens, and A. Scarpas. 2021. "Low-Temperature Fracture Behaviour of Synthetic Polymer-Fibre Reinforced Warm Mix Asphalt." In *Green and Intelligent Technologies for Sustainable and Smart Asphalt Pavements*, 1st ed., 1:358–62. Taylor & Francis.
- Daniel, C.G., J. Widjajakusuma, I. Otto, and C. Saputan. 2022. "The Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Synthetic Polymer Modified Hot and Warm Mix Asphalt." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1117 (1): 012002.
- Desidery, Luca, Michele Lanotte, and Sheila Devasahayam. 2021. "Effect of Waste Polyethylene and Wax-Based Additives on Bitumen Performance."
- Fistcar, Wawarisa Alnu. 2020. "Implementasi Life Cycle Assessment (LCA) Pada Pemilihan Perkerasan Kaku Dan Lentur Kontruksi Jalan Tol Balikpapan-Samarinda." *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil* 18 (2): 307–14.
- Giustozzi, Filippo, Marie Enfrin, Dai Lu Xuan, Yeong Jia Boom, Hassan Masood, Rebecca Aud, and Michael Swaney. 2022a. *Use of Road-Grade Recycled Plastics for Sustainable Asphalt Pavements: Final Performance and Environmental Assessment Part A*. www.austroads.com.au.
- Giustozzi, Filippo, Marie Enfrin, Dai Lu Xuan, Yeong Jia Boom, Michael Swaney, Rebecca Audy, and Hassan Masood. 2022b. *Use of Road-Grade Recycled Plastics for Sustainable Asphalt Pavements: Final Performance and Environmental Assessment Part B*. www.austroads.com.au.
- Hakami, Ferial, Alokesh Pramanik, Animesh, and Kumar Basak. 2022. *Tribology of Elastomers*. Springer: Berlin.
- Hashim, Azanam Shah, and Siew Kooi Ong. 2016. "Natural Rubber and Its Derivatives." In *Elastomers*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69661>.
- Hertwich, Edgar G, Sarah F Mateles, William S Pease, and Thomas E Mckone. 2001. "Life-Cycle Assessment Human Toxicity Potentials For Life-Cycle Assessment And Toxics Release Inventory Risk Screening." *Environmental Toxicology and Chemistry*. 20(4): 928-939.
- Iterchimica. n.d. "Superplast Polymeric Compound For Bituminous Mixes Modification." www.iterchimica.it.
- Jahnke, James A. 2022. *Continuous Emission Monitoring*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc: Hoboken.
- Landi, Daniele, Marco Marconi, Edoardo Bocci, and Michele Germani. 2020. "Comparative Life Cycle Assessment of Standard, Cellulose-Reinforced and End of Life Tires Fiber-Reinforced Hot Mix Asphalt Mixtures." *Journal of Cleaner Production* 248 (March).
- Life Cycle Association of New Zealand. 2019. "Impact Category. Photochemical Oxidation Potential." https://lcanz.org.nz/wp/wp-content/uploads/2019/06/photochemical_oxidation_lcanz.pdf.

- Martin, Hugener, Zeyer Kerstin, and Mohn Joachim. 2019. "Reduced Emissions of Warm Mix Asphalt during Construction." *Road Materials and Pavement Design* 20 (sup2): S568–77.
- Martinez-Soto, Aner, Alejandra Calabi-Floody, Gonzalo Valdes-Vidal, Andrea Hucke, and Camila Martinez-Toledo. 2023. "Life Cycle Assessment of Natural Zeolite-Based Warm Mix Asphalt and Reclaimed Asphalt Pavement." *Sustainability* 15 (2): 1003.
- Mazumder, Mithil, Vedaraman Sriraman, Hyun Hwan Kim, and Soon Jae Lee. 2016. "Quantifying the Environmental Burdens of the Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements and the Production of Warm Mix Asphalt (WMA)." *International Journal of Pavement Research and Technology* 9 (3): 190–201.
- Mckone, T. E., and E G Hertwich. 2001. "LBNL-48254 The Human Toxicity Potential and a Strategy for Evaluating Model Performance in Life-Cycle Impact Assessment." Ernest Orolado Lawrence Berkeley National Laboratory: Berkeley
- McNally, T., and P. Pötschke. 2011. *Polymer Modified Bitumen: Properties and Characterisation*. Woodhead Pub.
- Milad, Abdalrhman, Ali Mohammed Babalghaith, Abdulnaser M. Al-Sabaeei, Anmar Dulaimi, Abdualmtalab Ali, Sajjala Sreedhar Reddy, Munder Bilema, and Nur Izzi Md Yusoff. 2022. "A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 22(11).
- Montanelli, Eng. Filippo, and Iterchimica srl. 2013. "Fiber/Polymeric Compound for High Modulus Polymer Modified Asphalt (PMA)." *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 104 (December): 39–48.
- Movilla-Quesada, Diana, Manuel Lagos-Varas, Aitor C. Raposeiras, Osvaldo Muñoz-Cáceres, Valerio C. Andrés-Valeri, and Carla Aguilar-Vidal. 2021. "Analysis of Greenhouse Gas Emissions and the Environmental Impact of the Production of Asphalt Mixes Modified with Recycled Materials." *Sustainability (Switzerland)* 13 (14).
- Nizamuddin, Sabzoi, Yeong Jia Boom, and Filippo Giustozzi. 2021. "Sustainable Polymers from Recycled Waste Plastics and Their Virgin Counterparts as Bitumen Modifiers: A Comprehensive Review." *Polymers* 13(19):3242.
- Okhotnikova, E. S., I. N. Frolov, Yu M. Ganeeva, A. A. Firsin, and T. N. Yusupova. 2019. "Rheological Behavior of Recycled Polyethylene Modified Bitumens." *Petroleum Science and Technology* 37 (10): 1136–1142.
- Oreto, Cristina, Francesca Russo, Rosa Veropalumbo, Nunzio Viscione, Salvatore Antonio Biancardo, and Gianluca Dell'acqua. 2021. "Life Cycle Assessment of Sustainable Asphalt Pavement Solutions Involving Recycled Aggregates and Polymers." *Materials* 14 (14).
- Santos, João, Sarah Bressi, Veronique Cerezo, Michel Dauvergne, and Davide Lo Presti. 2018. "Life Cycle Assessment of Low Temperature Asphalt Mixtures for Road Pavement Surfaces: A Comparative Analysis" 138: 283–297.
- Sarasputri, Dwi Ajeng. 2022. "Life Cycle Assessment Perkerasan Jalan Beraspal Dengan Reclaimed Asphalt Pavement Di Ruas Jalan Nasional Provinsi Jawa Barat." *Jurnal Jalan-Jembatan* 39 (2): 137–149.
- Sharma, Sonu, Sitansh Sharma, and Niraj Upadhyay. 2019. "Composition Based Physicochemical Analysis of Modified Bitumen by HDPE/LDPE." *Oriental Journal of Chemistry* 35 (3): 1167–73.
- Silva, José de Arimateia Almeida e., John Kennedy Guedes Rodrigues, Maria Wilma de Carvalho, Lêda Christiane de Figueredo Lopes Lucena, and Erinaldo Hilário Cavalcante. 2018. "Mechanical Performance of Asphalt Mixtures Using Polymer-Micronized PET-Modified Binder." *Road Materials and Pavement Design* 19 (4): 1001–1009.
- Lima, Mayara Sarisariyama Siverio, Christina Makoundou, Cesare Sangiorgi, and Florian Gschösser. 2022. "Life Cycle Assessment of Innovative Asphalt Mixtures Made with Crumb Rubber for Impact-Absorbing Pavements." *Sustainability (Switzerland)* 14 (22).
- Sousa, Fabiula Danielli Bastos de. 2017. "Devulcanization of Elastomers and Applications." In *Elastomers*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68585>.
- Suksiripattanapong, Cherdsak, Khanet Uraikhot, Sermsak Tiyasangthong, Nattiya Wonglakorn, Wisitsak Tabyang, Sajjakaj Jomnonkwao, and Chayakrit Phetchuay. 2022. "Performance of Asphalt Concrete Pavement Reinforced with High-Density Polyethylene Plastic Waste." *Infrastructures* 7 (5).
- Tang, Ning, Kai kai Yang, Yazan Alrefaei, Jian Guo Dai, Li Mei Wu, and Qing Wang. 2020. "Reduce VOCs and PM Emissions of Warm-Mix Asphalt Using Geopolymer Additives." *Construction and Building Materials* 244 (May).

- Tarannum, Nafisa, Banhee Shikha Roy Brishti, Sadia Siddika Dima, and Kawnish Kirtania. 2021. "Life-Cycle Impact Assessment of Fossil Power Plants with and without Co2 Capture Evaluating the Possibility of Co2 Utilization." *Chemical Engineering Research Bulletin*, June, 88–93.
- Tiwary, Abhishek, and Jeremy Colls. 2010. *Air Pollution: Measurement, Modelling and Mitigation, Third Edition*. 3rd ed.
- Vega, Daniela L., Martinez A. Gilberto, and Joao M.O. Dos Santos. 2019. "Life Cycle Assessment of Warm Mix Asphalt with Recycled Concrete Aggregate." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 603. Institute of Physics Publishing.
- Wirahadikusumah, Reini D., and Hengki Putra Sahana. 2012. "Estimasi Konsumsi Energi Dan Emisi Gas Rumah Kaca Pekerjaan Pengaspalan Jalan." *Jurnal Teknik Sipil* 19 (1): 25–36.
- Xiu, Meng, Xianyu Wang, Lidia Morawska, David Pass, Andrew Beecroft, Jochen F. Mueller, and Phong Thai. 2020. "Emissions of Particulate Matters, Volatile Organic Compounds and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Warm and Hot Asphalt Mixes." *Journal of Cleaner Production* 275 (December).

KINERJA PERKERASAN ASPAL BERPORI DENGAN CAMPURAN LIMBAH PLASTIK DAN KARET (THE PERFORMANCE OF POROUS ASPHALT PAVEMENT USING RUBBER AND PLASTIC WASTE)

Hery Awan Susanto¹⁾, Bagyo Mulyono²⁾, Arnie Widyaningrum³⁾, Widhiatmoko Herry Purnomo⁴⁾

^{1),2),3),4)}Universitas Jenderal Soedirman

^{1),2),3),4)}Jl. Raya Mayjen Sungkono No. KM 5, Dusun 2, Blater, Jawa Tengah 53371

¹⁾hery.susanto@unsoed.ac.id, ²⁾bagyo.mulyono@unsoed.ac.id, ³⁾arnie.widyaningrumi@unsoed.ac.id,

⁴⁾widhiatmoko.purnomo@unsoed.ac.id

Diterima: 10 Januari 2023 ; direvisi: 31 Maret 2023; disetujui: 14 April 2023.

ABSTRAK

Salah satu upaya penanganan dampak perubahan iklim adalah penerapan konstruksi campuran aspal berpori pada perkerasan jalan. Penggunaan campuran aspal berpori masih terbatas karena kinerjanya yang masih rendah dibandingkan konstruksi campuran aspal pada umumnya. Kajian secara komprehensif untuk meningkatkan kinerja campuran agar optimal dilakukan dalam rangka penggunaan yang lebih luas. Penelitian bertujuan untuk mengetahui kinerja campuran aspal berpori dengan menggunakan limbah plastik dan ban bekas yang dicampur ke dalam aspal melalui pengujian laboratorium (baik dalam kondisi kering dan basah) sesuai dengan AAPA 2004, Indirect Tensile Strength (ITS) (dalam kondisi kering dan basah), ravelling, dan permeabilitas diperoleh dengan variasi kadar limbah plastik dan ban bekas 1-3%. Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa terjadi peningkatan kinerja Marshall, ketahanan terhadap retak, ravelling (berdasarkan uji abrasi) pada campuran aspal berpori dengan limbah plastik dan ban bekas. Campuran aspal berpori dengan limbah plastik dan ban bekas 2% menunjukkan tingkat durabilitas yang baik yang ditunjukkan oleh nilai Indeks Kekuatan Sisa (IKS) sedangkan tingkat keawetan yang baik yang diperoleh dari nilai Tensile Strength Ratio (TSR) pada semua kadar limbah plastik dan ban bekas. Dari nilai porositas dan ketahanan terhadap kelembaban, hasil menunjukkan penurunan tingkat porositas dan ketahanan kelembaban. Penurunan yang terjadi tersebut pada kadar limbah plastik dan ban bekas 2% tidak terlalu tinggi antara sampel kondisi kering dan basah. Hasil penelitian ini merekomendasikan penambahan limbah plastik dan ban bekas sebesar 2% dapat menghasilkan campuran aspal pori yang berkualitas baik.

Kata Kunci: campuran aspal berpori, limbah, Marshall, ITS, ravelling, permeabilitas.

ABSTRACT

One of the measures to mitigate climate change is to apply a porous asphalt mixture in pavement construction. The use of porous asphalt mixture is still limited, because of low performance compared to some other asphalt mixtures. A comprehensive study to improve the optimal performance necessary to problems improve the application. This research aims to determine the performance of porous asphalt using plastic and used tires waste mixed into asphalts by using some laboratory testings (both in dry and in wet conditions) according to AAPA 2004. Indirect Tensile Strength (ITS) (both in dry and wet conditions), ravelling, and permeability are obtained with variations plastic and used tires waste levels of 1-3%. There is an increase in Marshall performance, resistance to cracking, ravelling (based on abrasion test) on porous asphalt mixtures with plastic and used tires waste. A porous asphalt mixture with 2% of plastic and used tires waste has produced a good level of durability indicated by the Residual Strength Index (IKS) value and from the Tensile Strength Ratio (TSR) value at all levels of plastic and used tires waste. From the value of porosity and moisture resistance, a decrease in the level of porosity and moisture resistance are shown. The decrease that occurred at 2% plastic and used tires waste level was not too high between dry and wet condition samples. The results of this study recommend that the addition of plastic and used tires waste at 2% can produce a good quality of porous asphalt mixture.

Key words: permeable asphalt mixture, waste, Marshall, ITS, ravelling, permeability.

PENDAHULUAN

Teknologi konstruksi jalan terus berkembang untuk memberikan solusi terhadap beberapa tantangan yang dapat berakibat terhadap penurunan kinerja jalan. Beberapa tantangan tersebut dapat muncul yang diakibatkan oleh kondisi cuaca, beban kendaraan, dan ketersediaan material alam yang digunakan untuk pembuatan konstruksi jalan. Di sisi yang lain tuntutan kondisi jalan harus dapat terpenuhi yaitu konstruksi jalan yang kuat, aman, nyaman, dan ekonomis untuk menjamin pergerakan kendaraan. Sementara itu kondisi jalan yang tergenang air, tingkat kekesatan rendah dan memberikan efek kebisingan masih sering kita jumpai di Indonesia. Kondisi jalan yang tergenang air, tingkat kekesatan dan kebisingan yang tinggi dapat mengganggu kenyamanan dan berbahaya untuk keselamatan pengemudi. Salah satu jenis teknologi konstruksi jalan yang dapat mengurangi masalah tersebut adalah konstruksi perkerasan berpori (Ramadhan dan Purwo 2016).

Perkerasan berpori adalah konstruksi jalan dengan dominansi agregat kasar dan sedikit agregat halus sehingga didapatkan rongga yang cukup tinggi. Kadar rongga yang tinggi berhubungan dengan nilai permeabilitas campuran aspal berpori yang tinggi pula. Kemampuan permeabilitas yang tinggi dapat dimanfaatkan sebagai sistem saluran drainase bawah permukaan (*subsurface drain*) (Sarwono dan Wardhani 2007). Dari susunan agregat yang digunakan campuran aspal berpori termasuk ke dalam jenis gradasi terbuka (*open graded*) sehingga memiliki kekakuan struktur yang tidak terlalu tinggi. Kelebihan yang dimiliki oleh campuran aspal berpori diantaranya adalah mampu meningkatkan keselamatan kendaraan akibat terjadinya *aquaplaning* dan dapat menurunkan tingkat kebisingan (Ali dkk. 2013). Menurut beberapa penelitian terdahulu campuran aspal berpori memiliki nilai stabilitas *Marshall* yang lebih kecil jika dibandingkan campuran aspal bergradasi rapat (Martina, Hasan dan Setiawan 2019). Beberapa upaya perlu dilakukan dalam rangka mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya material alami, meningkatkan kekuatan mekanis, dan ekonomis campuran aspal berpori. Salah satunya adalah penggunaan material limbah secara bersamaan dalam campuran aspal berpori.

Dalam penelitian ini digunakan limbah yang terdiri dari kombinasi limbah plastik dan ban bekas. Pemilihan limbah tersebut dikarenakan potensi limbah plastik dan ban bekas yang cukup banyak di Indonesia. Proses penguraian kedua limbah tersebut juga sulit jika dibiarkan bertumpuk di atas tanah. Sementara itu jika dilakukan pembakaran limbah plastik dan ban bekas berdampak pada polusi udara. Oleh sebab itu perlu upaya untuk menggunakan limbah plastik dan ban bekas sebagai material aditif campuran beraspal dalam rangka mencari solusi terhadap keterbatasan material alami, upaya peningkatan kualitas campuran, dan ekonomis serta penyelesaian masalah lingkungan.

Beberapa penelitian tentang pemanfaatan limbah dalam konstruksi jalan dapat dikategorikan ke dalam dua kelompok. Kelompok pertama meneliti tentang penggunaan limbah plastik dalam campuran aspal berpori (Ramadhan 2016; Nashir 2013; Supriyadi, Rahardjo dan Pranoto 2018; Ismayalomi dkk. 2019; Erita Guswandi dan Lizar 2019) dan kedua adalah limbah ban bekas dalam campuran aspal berpori (Martina, Hasan dan Setiawan 2019; Anam dan Pratikno 2018).

Penggunaan plastik dalam campuran aspal berpori dapat meningkatkan stabilitas 7,4 % dan MQ 61,2%, sedangkan *flow* dan permeabilitas mengalami penurunan (Ramadhan, 2017). Dalam penelitian yang lain menyatakan bahwa penambahan limbah serat plastik dapat menghasilkan campuran yang memenuhi kriteria campuran aspal berpori (Nashir, 2013). Peneliti yang lain juga melaporkan bahwa stabilitas campuran aspal berpori mengalami peningkatan dan *flow* juga meningkat namun VIM dan permeabilitas menurun (Supriyadi, Rahardjo dan Pranoto 2018). Pada penelitian yang lain menyampaikan bahwa terpenuhinya syarat-syarat *Marshall* dalam penambahan limbah plastik (stabilitas, *flow* dan VIM) dan ketahanan abrasi meningkat namun permeabilitas mengalami penurunan (Ismayalomi dkk., 2019). Dan menurut penelitian yang lain juga disampaikan bahwa stabilitas dan MQ meningkat tetapi VIM dan *flow* menurun akibat penggunaan limbah plastik dalam aspal berpori (Ismayalomi, Rahardjo, dan Pranoto 2019). Apabila limbah plastik dicampur dengan aspal, maka dapat memberikan dampak yang positif kepada sifat-sifat properti aspal. Untuk pengaruh terhadap campuran beraspal penggunaan limbah plastik dapat meningkatkan

stabilitas dan menurunkan *flow* (Heydari dkk., 2021).

Pada kelompok kedua meneliti tentang limbah ban bekas dalam campuran aspal berpori. Dalam penelitian ini ditemukan bahwa penambahan limbah ban bekas ke dalam aspal memenuhi spesifikasi sebagai campuran aspal berpori. Sementara itu nilai kekesatan yang memenuhi dicapai pada persentase 6% limbah ban bekas dalam campuran aspal berpori (Martina, Hasan dan Setiawan 2019). Dalam studi yang lain menunjukkan bahwa hasil campuran aspal berpori dengan limbah ban bekas memberikan hasil yang sesuai dan memenuhi kriteria campuran aspal berpori dalam Bina Marga 2018 (Anam dan Pratikno 2018). Limbah ban bekas juga merupakan material bahan tambah yang efisien karena dapat menghasilkan peningkatan kekuatan dan kekakuan campuran beraspal (Alakhali dkk., 2021).

Studi tentang pemanfaatan limbah plastik dan karet dalam campuran beraspal masih sangat terbatas jumlahnya. Bahkan aplikasinya dalam limbah campuran aspal berpori belum pernah dilakukan. Beberapa peneliti masih fokus pada pengaruh satu jenis limbah dalam campuran aspal berpori, dan belum menggunakan pengujian secara lengkap yang dapat digunakan sebagai acuan dalam menentukan mutu campuran aspal berpori secara komprehensif. Pengujian secara menyeluruh dapat dijadikan pertimbangan dalam menentukan usulan *mix design* campuran aspal berpori dari bahan limbah. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi solusi dalam upaya peningkatan mutu campuran dan rancangan *mix design* aspal berpori.

HIPOTESIS

Hipotesis dari penelitian ini yaitu dengan penambahan limbah plastik dan ban bekas dalam campuran aspal berpori akan meningkatkan kinerja mekanis campuran yang meliputi *Marshall*, *ITS*, *ravelling*, permeabilitas, durabilitas dan ketahanan terhadap kelembaban.

METODOLOGI

Penelitian ini termasuk jenis eksperimental dengan skala model di laboratorium. Pengujian dilaksanakan di Laboratorium Transportasi Fakultas Teknik Universitas Jenderal Soedirman. Beberapa

tahapan dalam penelitian ini meliputi tahap pemilihan dan pengadaan material campuran aspal modifikasi, pengujian karakteristik material, perencanaan campuran (*mix design*), pembuatan benda uji, dan pengujian benda uji yang meliputi: *Marshall*, *ITS*, *ravelling*, dan permeabilitas. Tahap selanjutnya adalah pengolahan dan analisis data, pembahasan dan kesimpulan.

Limbah Plastik dan Karet

Limbah yang digunakan dalam penelitian ini merupakan campuran plastik jenis *polyethylene terephthalate* (PET) dan ban dalam bekas kendaraan. Potensi limbah plastik dan ban bekas yang tinggi menjadi masalah lingkungan apabila tidak tertangani dengan baik. Peningkatan limbah plastik diakibatkan ketergantungan terhadap plastik yang masih tinggi. Limbah ban bekas juga tinggi yang diakibatkan peningkatan jumlah kendaraan, sehingga kebutuhan ban kendaraan juga akan mengalami peningkatan. Limbah plastik dan karet yang digunakan dalam campuran beraspal harus bersih, kering, dan memiliki tekstur yang baik. Limbah plastik dan ban bekas dipotong dan dibentuk dalam ukuran 1 cm, kemudian limbah plastik dan ban bekas ini dicampur kedalam aspal penetrasi 60/70 yang sudah dipanaskan pada temperatur 170 °C, dan dilakukan pengadukan selama 30 menit untuk memastikan campuran yang terbentuk menjadi homogen dan menyatu dengan aspal. Gambar 1 menunjukkan bentuk limbah plastik dan ban bekas.



Gambar 1. Limbah plastik dan ban bekas

Pengujian Karakteristik Material

Pengujian karakteristik material yang dilakukan meliputi agregat kasar, agregat halus, bahan pengisi (*filler*), dan aspal. Hasil pengujian karakteristik material akan menentukan pemilihan material yang bisa digunakan dalam *mix design*. Karakteristik material yang memenuhi spesifikasi dapat digunakan dalam *mix design*, sedangkan yang tidak memenuhi diganti dengan material lain. Pemenuhan karakteristik material terhadap spesifikasi akan

menentukan kualitas campuran beraspal, meliputi: kekuatan, keawetan, dan kedap air.

Mix Design

Campuran aspal berpori yang digunakan dalam penelitian ini adalah untuk lapisan *Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)*. Tahapan *mix design* I adalah pembuatan benda uji *Marshall* untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO). Penentuan KAO dilakukan melalui dua tahap, yaitu perhitungan KAO perkiraan dengan rumus empiris dan KAO riil yang diperoleh dari hasil pengujian *Marshall* tahap I. Pada tahapan penentuan KAO aspal yang digunakan adalah aspal pen 60/70 tanpa limbah. Tahap *mix design* II adalah pembuatan benda uji untuk pengujian karakteristik *Marshall*, ITS, *ravelling*, dan permeabilitas. Dalam tahapan ini aspal pen 60/70 dicampur dengan limbah plastik dan karet.

Variasi persentase kadar limbah plastik dan karet yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1%, 2%, 3% terhadap kadar aspal dalam campuran. Dalam variasi persentase tersebut kontribusi komposisi limbah plastik dan karet masing-masing 50%. Penentuan rentang variasi kadar limbah plastik dan karet dilakukan dengan cara trial and error dengan melihat pemenuhan spesifikasi hasil pengujian aspal polimer. Pencampuran limbah plastik dan karet ke dalam campuran aspal berpori dilakukan dengan metode basah, yaitu dengan mencampur limbah plastik dan karet ke dalam aspal panas sampai campuran terlihat menyatu secara visual. Metode ini dipilih agar campuran aspal berpori modifikasi yang dihasilkan memiliki kualitas campuran yang baik.

Campuran Aspal Berpori

Campuran aspal berpori merupakan salah satu jenis campuran aspal yang dikembangkan untuk menurunkan temperatur permukaan jalan dan kemampuan untuk mengurangi genangan air dipermukaan jalan. Campuran aspal berpori menggunakan tipe gradasi terbuka, sehingga memiliki pori yang tinggi. Dengan pori yang tinggi, maka campuran aspal berpori memiliki tingkat permeabilitas yang tinggi pula yang berfungsi untuk mengalirkan air limpasan permukaan ke dalam sistem saluran drainase.

Aplikasi campuran aspal berpori sebagai lapisan permukaan jalan jenis AC-WC biasanya untuk melayani beban lalu lintas rendah dan sedang. Kemampuan campuran aspal berpori untuk menahan beban lalu lintas

tinggi masih perlu dilakukan kajian lebih mendalam. Salah satu upaya yang bisa dilakukan adalah melakukan modifikasi campuran aspal berpori dengan bahan polimer. Untuk meningkatkan nilai ekonomis pemilihan bahan polimer bisa menggunakan limbah plastik dan ban bekas secara bersama-sama. Persentase limbah terdiri dari 50% limbah plastik dan 50% limbah ban bekas.

AC-WC adalah Hot Mix Asphalt (HMA) yang proses pencampuran materialnya dilakukan pada suhu 145-155°C. (Sukirman, 2016). AC-WC merupakan lapisan perkerasan lentur yang paling atas dan bersentuhan langsung dengan beban kendaraan dan lingkungan jalan. Oleh karena itu AC-WC selain harus kuat menahan beban dan aus juga harus kedap air serta tidak cepat rusak akibat faktor cuaca panas dan curah hujan.

Perencanaan campuran aspal berpori meliputi perencanaan gradasi agregat sesuai dengan standar yang dipakai yaitu gradasi aspal berpori menurut NCHRP 49 (1987) dalam Tabel 1 dan spesifikasi karakteristik campuran aspal berpori menurut AAPA di dalam Tabel 2.

Tabel 1. Gradasi NCHRP 49

Ukuran Ayakan	Persen Lolos
1/2 in. (12,5 mm)	100
3/8 in. (9,5 mm)	95-100
No. 4 (4,75 mm)	30-50
No. 8 (2,36 mm)	5-15
No. 200 (75 µm)	2-5

Tabel 2. Spesifikasi Campuran Aspal Berpori

No.	Kriteria Perencanaan	Nilai
1	Stabilitas <i>Marshall</i> (kg)	Min. 500
2	Kelelehan <i>Marshall</i> (mm)	2 – 6
3	Kekakuan <i>Marshall</i> (MQ kg/mm)	Maks. 400
4	Kadar Rongga Udara (VIM %)	18 – 25
5	Jumlah Tumbukan Perbidang	50
6	Permeabilitas (cm/detik)	Min. 0,1

Sumber: (Australian Asphalt Pavement Association, 2004)

Pengujian Marshall

Untuk menentukan kemampuan dalam menerima beban (daya dukung), deformasi, dan kadar rongga campuran aspal berpori dilakukan melalui pengujian *Marshall*. SNI 06-2489-1991. Pengujian Marshall menggunakan prinsip pembebanan vertikal yang dilengkapi dengan proving ring berkapasitas 22,2 KN untuk

mengukur stabilitas dan *flowmeter* untuk mengukur nilai *flow*. Sedangkan kadar rongga ditentukan melalui perhitungan volumetrik sampel *Marshall* yang berbentuk silinder dengan diameter 10,2 cm dan tinggi 7,6 cm. Gambar 2 menunjukkan alat pengujian *Marshall*.



Gambar 2. Alat pengujian *Marshall*.

Nilai stabilitas yang diperoleh dari pengujian *Marshall* menunjukkan kemampuan campuran aspal berpori dalam menerima beban kendaraan. Semakin tinggi nilai stabilitas maka campuran aspal berpori yang dibuat semakin baik mutunya. Nilai *flow* menunjukkan deformasi vertikal yang dapat dikategorikan jika nilai *flow* kecil mampu meredam lendutan, sebaliknya jika *flow* besar berarti lendutanya semakin tinggi. Lendutan yang kecil menunjukkan mutu campuran aspal berpori yang semakin baik, demikian pula sebaliknya. Untuk kadar rongga harus memenuhi syarat ketentuan sebagai campuran aspal berpori yaitu berkisar antar 18-25% (AAPA 2004).

Untuk melihat pengaruh kelembaban akibat faktor air dalam lapisan campuran aspal berpori, maka selain dilakukan pengujian *Marshall* pada sampel dalam keadaan kering juga terhadap sampel keadaan basah. Sesuai dengan standar pengujian *Marshall* untuk pengujian sampel kering dan terendam temperatur yang digunakan adalah 60 °C. Pengujian rendaman pada penelitian ini dilakukan untuk periode pendek, yaitu selama 24 jam. Campuran aspal berpori yang baik tentu memiliki ketahanan terhadap kelembaban yang tinggi.

Dalam pengujian *Marshall* dengan rendaman dilakukan analisis stabilitas untuk mengetahui durabilitas/keawetan campuran dengan menentukan Indeks Kekuatan Sisa (IKS). IKS dapat dihitung dengan Persamaan 1 sebagai berikut:

$$IKS = \frac{Sw_1}{Sw_2} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

dengan:

- IKS = indeks kekuatan sisa
- Sw₁ = stabilitas rata-rata sampel terendam selama 30 menit
- Sw₂ = stabilitas rata-rata sampel terendam selama 24 jam
- IKS yang disyaratkan harus ≥ 75% sebagai batas kerusakan yang ditimbulkan oleh air.

Pengujian ITS

Campuran aspal juga rentan terhadap kerusakan retak (*cracking*). Untuk mengetahui seberapa besar potensi retak yang terjadi pada campuran aspal berpori dilakukan dengan pengujian *indirect tensile strength* (ITS). Prinsip pengujian ITS adalah pembebanan tekan yang menciptakan tegangan tarik pada benda uji silinder. Pengujian ITS menggunakan alat *Marshall* dengan modifikasi pada proving ring untuk pengujian sampel silinder.

Perhitungan nilai kuat tarik tidak langsung menggunakan Persamaan 2 sebagai berikut:

$$ITS = \frac{2 \times p}{\pi \times d \times h} \dots \dots \dots (2)$$

dengan:

- ITS = kuat tarik tidak langsung (N/mm²)
- p = stabilitas (N)
- h = tinggi sampel (mm)
- d = diameter sampel (mm)

campuran dengan nilai kuat tarik tinggi menunjukkan kemampuan menahan retakan, sehingga campuran aspal berpori memiliki mutu yang baik.

Dalam pengujian ITS juga dilakukan analisis *tensile strength ratio* (TSR), yaitu perbandingan nilai kuat tarik sampel kondisi kering dan basah. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh rendaman terhadap kekuatan tarik. Nilai TSR diperoleh melalui persamaan 3 sebagai berikut:

$$TSR = \frac{ITS_d}{ITS_w} \times 100 \dots \dots \dots (3)$$

dengan:

- TSR = indeks kuat tarik tidak langsung
- ITS_d = kuat tarik kondisi kering (kg/cm²)
- ITS_w = kuat tarik kondisi basah (kg/cm²)
- Asphalt institute mensyaratkan nilai TSR ≥ 80%.

Pengujian *Ravelling*

Kerusakan *ravelling* sering disebabkan akibatnya lepasnya butiran pada lapisan perkerasan jalan. Beberapa penyebab terjadinya *ravelling* karena gesekan laju roda kendaraan yang terjadi secara berulang, lemahnya ikatan material penyusun campuran beraspal, dan perubahan cuaca. Perlu dilakukan pengujian yang tepat untuk bisa memperkirakan terjadinya *ravelling* di laboratorium. Beberapa peneliti

menggunakan metode cantabro untuk menguji abrasi di laboratorium (Winayati, Hendri dan Alfian 2018).

Pemodelan yang tepat dalam pengujian akan memberikan hasil yang mendekati dengan fenomena di lapangan. Pengujian dengan alat abrasi modifikasi perkerasan jalan memodelkan ketahanan perkerasan aspal menahan gesekan antara roda kendaraan dengan permukaan jalan. Dalam alat ini beban berputar dengan kecepatan tertentu dan kondisi perlakuan terhadap beban dalam kondisi kering dan terendam air. Dalam pengujian *ravelling* ini perlu dipertimbangkan beberapa variabel beban roda, waktu putaran, dan kecepatan mesin pemutarnya (Susanto, Yang and Chou 2019). Gambar 3 menunjukkan alat abrasi modifikasi perkerasan jalan yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3. Alat uji *ravelling*.

Selanjutnya nilai abrasi hasil pengujian dapat ditentukan melalui Persamaan 4 sebagai berikut:

$$\text{Nilai keausan} = \frac{A-B}{L} \dots\dots\dots (4)$$

dengan:

- A : berat benda uji semula (gr)
- B : berat benda uji setelah di uji (gr)
- L : luas area (Cm²)

Pengujian Permeabilitas

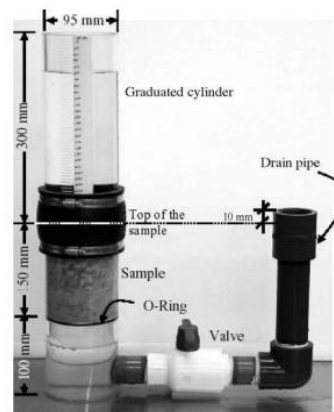
Permeabilitas perkerasan jalan adalah kemampuan lapisan perkerasan dalam meloloskan air. Untuk bisa dikatakan sebagai konstruksi perkerasan berpori, maka harus dipenuhi syarat nilai permeabilitas sesuai dengan spesifikasi. Permeabilitas perkerasan jalan dapat diukur menggunakan alat falling head. Gambar 4 menunjukkan bentuk alat uji permeabilitas falling head. Nilai koefisien

permeabilitas umumnya dinyatakan dengan notasi k. Untuk menghitung koefisien permeabilitas dapat digunakan Persamaan 5 sebagai berikut.

$$K = 2,303 \times \frac{a \times L}{A \times t} \times \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

dengan:

- K = koefisien permeabilitas (cm/s)
- a = luas potongan melintang tabung (cm²)
- L = tebal spesimen (cm)
- A = luas potongan spesimen (cm²)
- T = waktu yang dibutuhkan untuk mengalirkan air dari h₁ ke h₂ (s)
- h₁ = tinggi batas air paling atas pada tabung (cm)
- h₂ = tinggi batas air paling bawah pada tabung (cm)



Gambar 4. Alat Uji Permeabilitas

HASIL DAN ANALISIS

Hasil Pengujian Material

A. Agregat

Hasil dari pengujian material yang terdiri dari pengujian agregat halus, agregat kasar, filler dapat dilihat pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5.

Tabel 3. Hasil pengujian agregat kasar

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
Abrasi dengan mesin Los Angeles (%)	100 Putaran	3 Maks. 8
Berat jenis bulk (gr/cc)	2,8	>2,5
Berat jenis SSD (gr/cc)	2,84	>2,5
Berat jenis apparent (gr/cc)	2,92	>2,5
Penyerapan (%)	1,49	<3
Kelekatan agregat terhadap aspal (%)	100	Min. 95

Tabel 4. Hasil pengujian agregat halus

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
Berat jenis bulk (gr/cc)	2,61	>2,5
Berat jenis SSD (gr/cc)	2,64	>2,5
Berat jenis apparent (gr/cc)	2,69	>2,5
Penyerapan (%)	1,13	<3
Material lolos ayakan no.200 (%)	8,91	Maks. 10%

Tabel 5. Hasil pengujian filler

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
Berat jenis	2,40	2,25-2,7
Filler lolos ayakan No.200	81,30	>75%

Terlihat bahwa seluruh persyaratan fisik agregat yang akan digunakan dalam campuran aspal berpori telah memenuhi spesifikasi yang ditentukan.

B. Aspal

Aspal yang digunakan dalam penelitian ini yaitu aspal penetrasi 60/70. Hasil pengujian karakteristik aspal dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pengujian aspal

Pemeriksaan aspal	Hasil	Syarat
Penetrasi pada 25° (0,1 mm)	68,7	60-70
Titik Lembek (°C)	56,5	≥ 48
Daktilitas pada 25°C (cm)	117,2	≥ 100
Titik Nyala (°C)	240,6	≥ 232
Viskositas Kinematis (cSt)	1302,7	≥ 300
Berat Jenis	1,144	≥ 1,0

Dari hasil pengujian sifat fisik aspal maka didapatkan bahwa aspal pen 60/70 memenuhi spesifikasi yang ada, sehingga dapat digunakan dalam campuran aspal berpori.

Hasil pengujian kadar aspal optimum (KAO)

Penentuan KAO dimulai dari perhitungan KAO perkiraan. Dari perhitungan diperoleh Pbe 5,5%. Selanjutnya dibuat sampel dengan variasi kadar aspal menggunakan rentang 4,5%; 5%; 5,5%; 6%; dan 6,5%. Masing-masing variasi kadar aspal dibuat 3 sampel *Marshall*. Penentuan KAO yang sebenarnya atau KAO riil dilakukan dengan menganalisis parameter *Marshall* untuk masing-masing variasi kadar aspal. Hasil analisis penentuan Pbr terlihat dalam Tabel 7.

Tabel 7. Hasil pengujian *Marshall* untuk KAO

Paramete r <i>Marshall</i>	Syarat	Kadar aspal				
		4%	4,5%	5%	5,5%	6%
Stabilitas	> 500	447	477	492	551	541
Flow	2-6	4,5	4,0	3,6	3,3	3,4
MQ	< 400	100	123	139	168	162
VIM	18-25	22	21	20	19	17
VMA	-	28,3	28,4	28,7	28,9	29,2
VFA	-	24	27	30	33	35
Density	-	1,942	1,949	1,952	1,956	1,959
KAO	-	5,5 %				

Satuan: stabilitas (kg); flow(mm); MQ (kg/mm); VIM, VMA, VFA (%); density (g/cm³)

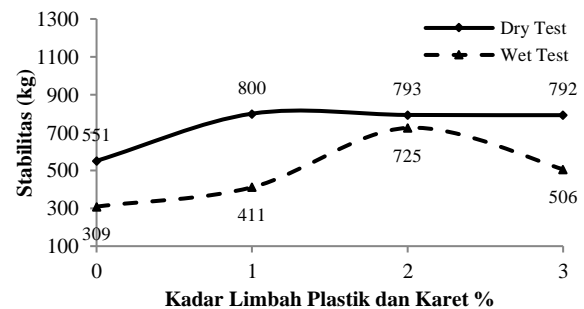
Dari Tabel 7 terlihat bahwa yang memenuhi syarat parameter *Marshall* secara keseluruhan hanya pada kadar aspal 5,5%. Sehingga diambil KAO untuk pengujian *Marshall* tahap II sebesar 5,5%.

Hasil pengujian *Marshall*

Hasil pengujian *Marshall* menggambarkan perbandingan benda uji dalam kondisi kering dan basah. Proses perendaman selama 24 jam dilakukan untuk mengetahui tingkat kerusakan yang diakibatkan oleh air pada perkerasan jalan.

A. Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan suatu perkerasan dalam menerima beban sampai terjadinya kelelahan. Nilai stabilitas yang didapatkan dalam setiap kadar limbah plastik dan karet dalam aspal dapat dilihat pada Gambar 5.

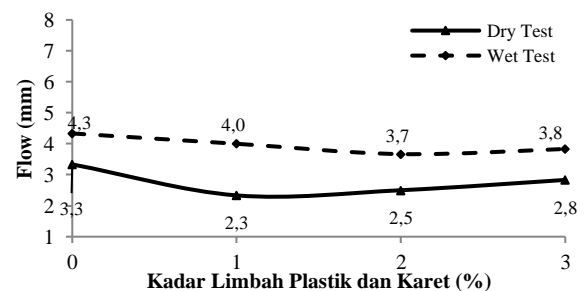


Gambar 5. Grafik stabilitas pada variasi kadar limbah plastik dan karet

Berdasarkan Spesifikasi AAPA 2004, persyaratan untuk nilai stabilitas pada campuran laston (AC) aspal berpori minimum 500 kg. Dalam kondisi kering baik campuran aspal berpori non dan limbah plastik dan karet memenuhi persyaratan nilai stabilitas, namun pada kondisi basah yang memenuhi nilai stabilitas hanya pada kadar 2-3% limbah plastik dan karet.

B. Flow

Flow menunjukkan besarnya deformasi pada lapisan perkerasan akibat pembebanan vertikal. Flow diperoleh dari pembacaan arloji pada saat pengujian *Marshall*. Nilai flow dapat dilihat pada Gambar 6.

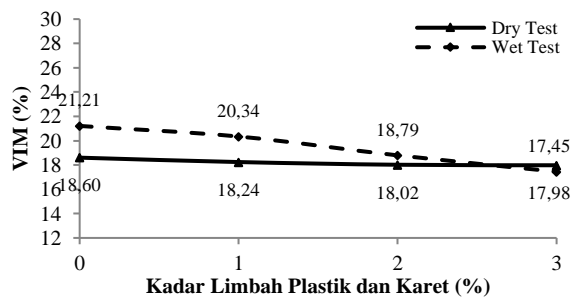


Gambar 6. Grafik flow pada variasi kadar limbah plastik dan karet

Nilai *flow* yang disyaratkan dalam AAPA 2004 untuk campuran aspal berpori yaitu 2-6 mm, sehingga semua campuran aspal berpori baik dalam kondisi kering maupun basah telah memenuhi spesifikasi.

C. VIM (Void in the Mix)

Nilai VIM merupakan persentase banyaknya rongga dalam campuran aspal. Nilai VIM mempengaruhi nilai durabilitas, semakin besar nilai VIM maka campuran aspal bersifat keropos dan menyebabkan udara dan air mudah masuk kedalam lapis perkerasan. Nilai VIM dapat dilihat pada Gambar 7.

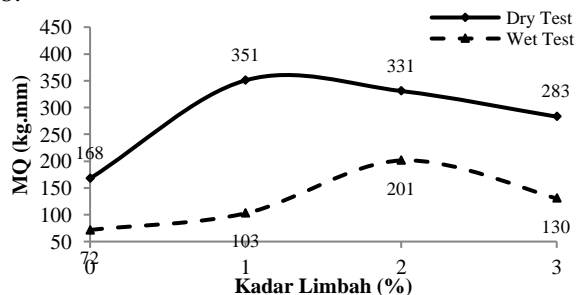


Gambar 7. Grafik VIM pada variasi kadar limbah plastik dan karet

Syarat untuk nilai VIM menurut AAPA 2004 untuk aspal berpori berkisar antara 18-25% sehingga campuran ini memenuhi spesifikasi. Hasil pengujian menunjukkan semua campuran aspal berpori baik dalam kondisi kering maupun basah telah memenuhi spesifikasi.

D. MQ (Marshall Quotient)

Nilai MQ merupakan rasio dari stabilitas terhadap *flow*. Nilai MQ akan memberikan nilai fleksibilitas suatu campuran. Semakin besar nilai MQ maka campuran semakin kaku, sebaliknya jika nilai MQ semakin kecil maka resiko kerusakan yang terjadi adalah retak permukaan dan pergerakan horizontal pada arah perjalanan. Nilai MQ dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik MQ pada variasi kadar limbah plastik dan karet

Pada Gambar 8 terlihat bahwa semua campuran dengan berbagai variasi penggunaan limbah plastik dan karet memenuhi syarat spesifikasi yaitu kurang dari 400 kg/mm.

E. IKS

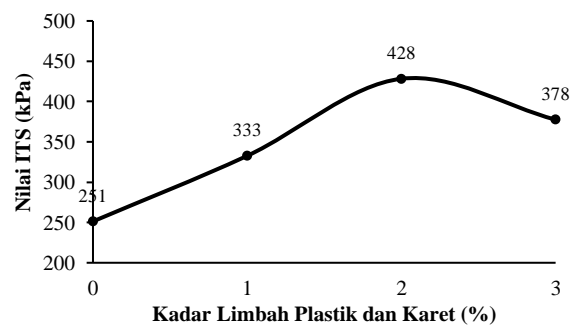
Nilai IKS terlihat dalam Tabel 8. Dalam Tabel 8 nilai IKS yang memenuhi syarat yaitu pada kadar limbah plastik dan karet 2% sebesar 91,39%. Sedangkan pada kadar limbah plastik dan karet 0%, 1%, dan 3% nilainya dibawah 75%, sehingga tidak memenuhi syarat spesifikasi yang ada.

Tabel 8. Nilai IKS pada berbagai variasi limbah plastik dan karet

Kadar Limbah plastik dan karet (%)	Stabilitas (Kg)		IRS (%)
	0,5 jam (<i>kering</i>)	24 jam (<i>basah</i>)	
0%	550,74	308,93	56,09
1%	799,73	411,18	51,42
2%	793,02	724,76	91,39
3%	791,88	506,05	63,91

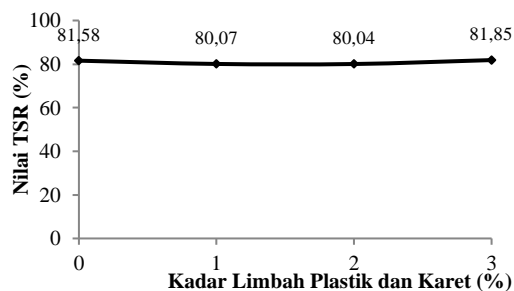
Hasil Pengujian ITS

Pada Gambar 9 menjelaskan hasil pengujian kuat tarik campuran aspal berpori non dan limbah plastik dan karet. Pada kadar limbah plastik dan karet 2% terlihat kuat tarik sebesar 428 kPa (tertinggi) lebih tinggi dari kadar plastik dan karet 1% dan 3% dan campuran nonlimbah.



Gambar 9. Grafik ITS pada variasi kadar limbah plastik dan karet

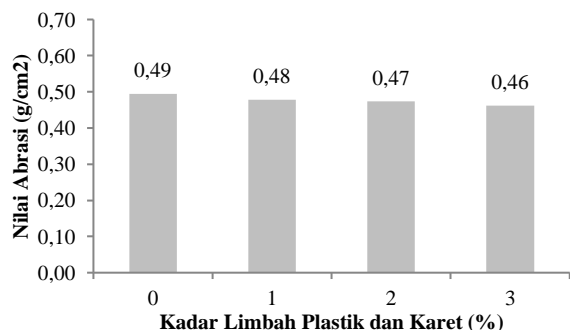
Kemudian dari hasil pengujian pengaruh rendaman terhadap kekuatan tarik campuran aspal berpori dapat diketahui bahwa baik campuran non maupun dengan limbah plastik dan karet nilai TSR $\geq 80\%$, sehingga telah memenuhi spesifikasi. Gambar 10 menunjukkan grafik TSR dengan kadar limbah plastik dan karet.



Gambar 10. Grafik IDT pada variasi kadar limbah plastik dan karet

Hasil pengujian *ravelling*

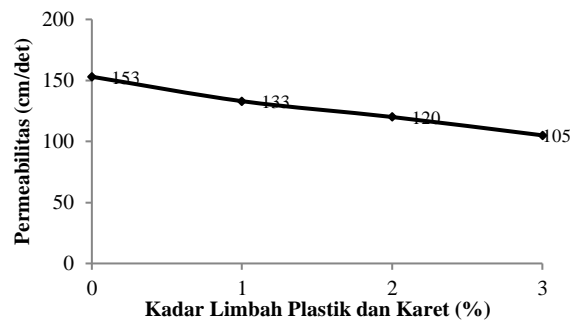
Untuk hasil pengujian *ravelling* dapat diperoleh gambaran bahwa nilai abrasi akan menurun seiring dengan penambahan kadar limbah plastik dan karet dalam campuran aspal berpori. Nilai abrasi terkecil pada kadar 3% limbah plastik dan karet ($0,46 \text{ gr/cm}^2$), sedangkan nilai terbesar pada kadar 0% atau tanpa limbah ($0,49 \text{ gr/cm}^2$). Gambar 11 menunjukkan nilai abrasi pada berbagai kadar limbah plastik dan karet.



Gambar 11. Grafik abrasi pada variasi kadar limbah plastik dan karet

Hasil Pengujian Permeabilitas

Gambar 12 menunjukkan grafik hubungan kadar limbah plastik dan karet dengan permeabilitas. Dapat diketahui bahwa permeabilitas akan menurun seiring dengan penambahan kadar limbah plastik dan karet dalam campuran aspal berpori. Nilai permeabilitas terkecil pada kadar limbah plastik dan karet 3% (105 cm/det), sedangkan nilai tertinggi pada kadar limbah 0% atau tanpa limbah (153 cm/det).



Gambar 12. Grafik permeabilitas pada variasi kadar limbah plastik dan karet.

PEMBAHASAN

Dari hasil pengujian dan analisis data yang dilakukan mengenai pengaruh penambahan limbah plastik dan karet terhadap kinerja aspal berpori menggunakan pendekatan kekuatan, deformasi, ketahanan retak, abrasi, durabilitas, kelembaban, dan kedekatan air maka dapat disampaikan pembahasan sebagai berikut ini.

Karakteristik Material

Dari hasil analisis data dapat disimpulkan bahwa semua material yang digunakan telah memenuhi spesifikasi Bina Marga. Agregat yang digunakan memiliki kekuatan yang baik, sehingga tidak mudah lapuk dan pecah. Nilai berat jenis agregat kasar, halus, dan filler juga memenuhi syarat spesifikasi yaitu tidak berongga, padat, dan kerapatan yang baik sehingga tidak membutuhkan aspal yang terlalu banyak. Jika dilihat dari nilai penyerapan air agregat yang dipakai memiliki kemampuan menyerap air yang kecil, sehingga dapat diikat oleh aspal dengan baik. Hasil ini didukung pula oleh hasil uji kelekatan agregat dengan aspal yang tinggi.

Kemudian hasil pengujian karakteristik aspal pen 60/70 menunjukkan bahwa aspal yang digunakan telah memiliki karakteristik yang baik sesuai dengan spesifikasi aspal 60/70. Kekuatan aspal pen 60/70 masih dalam rentang yang ada, sehingga masih memiliki kekuatan menahan beban yang ada. Dari nilai titik lembek menunjukkan pula bahwa nilainya diatas persyaratan, sehingga tidak mudah meleleh akibat suhu di lapangan yang dapat berakibat merusak struktur lapisan jalan. Sementara dari nilai daktilitas terlihat bahwa aspal pen 60/70 memiliki daya lekat yang baik. Sehingga akan memberikan ikatan dengan agregat yang cukup kuat. Demikian pula dengan titik nyala yang diperoleh menunjukkan temperatur yang aman

pada saat proses pencampuran. Terkait dengan nilai viskositas juga menunjukkan bahwa pada saat pencampuran dan pemadatan tingkat kekentalannya cukup baik, sehingga mudah diaduk dan dicampur dengan agregat. Untuk hasil berat jenis aspal pen 60/70 telah menunjukkan aspal memiliki berat jenis yang ideal dan tidak berongga sehingga tidak mudah terjadi oksidasi.

Dengan demikian dari hasil uji agregat dan aspal dapat disimpulkan bahwa kedua material tersebut memiliki karakteristik yang baik sehingga dapat menghasilkan campuran aspal berpori yang ideal.

Karakteristik Marshall

Hasil dari analisis data dapat dilihat penggunaan limbah plastik dan karet dapat meningkatkan stabilitas campuran aspal berpori baik pada sampel kering maupun terendam. Pada penelitian terdahulu dijelaskan bahwa pada penggunaan plastik dan ban bekas secara parsial dalam campuran beraspal telah mampu memenuhi kriteria *Marshall*. Stabilitas akan meningkat akibat penggunaan limbah plastik dalam campuran beraspal (Ramdhan 2017; Supriyadi, Rahardjo dan Pranoto 2018). Pada penelitian ini nilai stabilitas kemudian menurun jika kadar limbah plastik dan karet bertambah. Hal tersebut dikarenakan terjadinya peningkatan rongga akibat penambahan limbah plastik dan karet dalam campuran aspal berpori. Peningkatan nilai stabilitas akibat penggunaan limbah plastik dan karet menunjukkan kemampuan campuran dalam menahan beban meningkat dengan baik. Hasil tersebut didukung pula oleh nilai *flow*, dimana pada nilai *flow* terlihat bahwa *flow* campuran aspal berpori dengan limbah hybrid lebih kecil dibandingkan yang non limbah baik pada sampel kering dan terendam. Nilai *flow* kemudian akan naik jika kadar limbah plastik dan karet bertambah. Penurunan nilai *flow* menunjukkan kemampuan perkerasan berpori dengan limbah plastik dan karet untuk tetap dan tidak mengalami deformasi vertikal yang tinggi. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya bahwa penggunaan limbah plastik dapat menurunkan nilai *flow* (Ramdhan 2017).

Selanjutnya dapat diketahui bahwa VIM campuran aspal berpori dengan limbah plastik dan karet lebih kecil dibandingkan non limbah baik pada kondisi kering maupun basah. Pada kadar limbah plastik dan karet 3% nilai VIM tidak memenuhi syarat spesifikasi. Limbah

plastik dan karet dalam campuran aspal berpori menyebabkan rongga campuran mengecil, dikarenakan aspal menjadi lebih *flowable*. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya tentang penggunaan limbah plastik yang dapat menurunkan nilai VIM (Rusyda 2018). Pengaruh rendaman air menyebabkan VIM meningkat pada kadar limbah plastik dan karet 0% dan 1%. Hal ini dikarenakan air masuk dan melemahkan ikatan agregat dan aspal. Sementara itu jika dilihat dari nilai MQ terlihat bahwa fleksibilitas campuran aspal berpori dengan limbah plastik dan karet lebih rendah dibandingkan dengan non limbah baik untuk sampel kering maupun basah. Fleksibilitas yang kecil menunjukkan bahwa campuran aspal berpori lebih kaku, sehingga mampu menahan perubahan bentuk akibat intervensi beban luar.

Dari karakteristik *Marshall* dapat disimpulkan bahwa kinerja perkerasan berpori dengan limbah plastik dan karet mengalami peningkatan berdasarkan parameter stabilitas, *flow*, VIM dan MQ.

Ketahanan Terhadap Retak

Dari hasil analisis terlihat bahwa penambahan limbah plastik dan karet dalam campuran aspal berpori telah mampu meningkatkan ketahanan terhadap retak. Ketahanan terhadap retak akan naik dari 1% sampai kadar limbah plastik dan karet 2% dan menurun pada kadar 3%. Kadar 2% terlihat menunjukkan hasil yang optimum terkait ketahanan terhadap retak campuran aspal berpori. Dari hasil ini dapat diduga bahwa limbah *hybrid* dapat meningkatkan kemampuan ikatan yang cukup baik dalam campuran aspal berpori.

Kemudian dari hasil analisis terhadap TSR menunjukkan bahwa campuran aspal berpori dengan dan tanpa limbah memiliki ketahanan terhadap retak akibat pengaruh air cukup baik. Ada kecenderungan ketahanan terhadap retak dalam lingkungan yang lembab/berair masih cukup tinggi jika kadar limbah dalam campuran bertambah.

Ketahanan Terhadap Ravelling

Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin bertambahnya kadar limbah plastik dan karet dalam perkerasan berpori menyebabkan nilai abrasi semakin kecil. Hal ini dikarenakan semakin bertambahnya kadar limbah plastik dan karet, maka daya ikat antar agregat dalam campuran semakin baik sehingga pemisahan

antara agregat dengan aspal saat dilakukan pengujian abrasi semakin kecil.

Jika dihubungkan antara nilai VIM dan abrasi dapat disimpulkan bahwa VIM besar abrasi meningkat dan VIM kecil abrasi menurun. Hal ini disebabkan karena semakin banyaknya rongga dalam campuran aspal maka air dan udara akan lebih mudah masuk yang berdampak pada melemahnya ikatan aspal dan agregat, sehingga nilai abrasi yang terjadi juga akan semakin besar. (Arifin dan Wijanarko 2001).

Durabilitas

Dari analisis perhitungan IKS dapat diketahui bahwa hanya pada kadar limbah plastik dan karet 2% yang memiliki keawetan yang cukup tinggi. Pada campuran non dan limbah plastik dan karet 1% dan 3% tidak menghasilkan campuran yang awet terhadap faktor cuaca. Hal ini menunjukkan kadar 2% merupakan persentase yang cukup ideal untuk menghasilkan campuran aspal berpori yang baik dalam menerima beban dengan adanya perubahan faktor cuaca.

Namun jika dilihat dari hasil perhitungan TSR terjadi sebaliknya. Campuran aspal berpori baik non limbah maupun dengan limbah plastik dan karet memiliki ketahanan retak yang baik, walaupun terendam dalam air.

Ketahanan Terhadap Kelembaban

Dari hasil perbandingan sampel kering dan terendam dapat diketahui bahwa air berpengaruh terhadap penurunan stabilitas, kenaikan *flow* dan VIM, serta penurunan MQ. Dari parameter *Marshall* tersebut dapat disimpulkan bahwa kinerja *Marshall* campuran aspal berpori akan menurun akibat faktor destruktif air baik untuk non limbah maupun dengan limbah plastik dan karet. Ketika terendam air, maka ada fenomena melemahnya ikatan antar aspal dan agregat, sehingga menyebabkan penurunan kinerja secara menyeluruh pada campuran aspal berpori.

Porositas lapisan

Sifat porositas campuran aspal berpori akan menurun seiring bertambahnya kadar limbah plastik dan karet dalam campuran. Limbah plastik dan karet membuat aspal menjadi *flowable* sehingga mampu mengisi rongga-rongga campuran aspal berpori. Hal ini berdampak pada menurunnya rongga pada campuran, sehingga tingkat porositasnya

menurun. Hasil ini sesuai dengan pengujian VIM, dimana nilai VIM akan menurun seiring dengan penambahan kadar limbah plastik dan karet dalam campuran.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil pengujian, analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan mengenai pengaruh penambahan limbah plastik dan karet terhadap kinerja perkerasan aspal berpori dapat diambil kesimpulan bahwa hasil uji agregat dan aspal memiliki karakteristik yang baik sehingga dapat menghasilkan campuran aspal berpori yang ideal.

Dari karakteristik *Marshall* dapat disimpulkan bahwa terjadi peningkatan kinerja aspal berpori dengan limbah plastik dan karet berdasarkan parameter stabilitas, *flow*, VIM dan MQ.

Ketahanan terhadap retak campuran aspal berpori dengan limbah plastik dan karet mengalami peningkatan. Ketahanan terhadap abrasi campuran aspal berpori meningkat akibat penambahan kadar limbah plastik dan karet.

Keawetan campuran aspal berpori tercapai pada kadar limbah plastik dan karet 2%.

Ketahanan terhadap kelembaban campuran aspal berpori akan menurun baik pada non limbah dan dengan limbah plastik dan karet.

Kekedapan perkerasan aspal berpori meningkat akibat penambahan limbah plastik dan karet.

Dengan demikian dari hasil penelitian ini dapat diusulkan persentase rancangan kadar limbah plastik dan karet dalam campuran aspal berpori yang ideal adalah sebesar 2%.

Saran

Adapun saran yang dapat diberikan sebagai rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah dengan pengujian mikroskopik untuk melihat seberapa besar proses pencampuran antara limbah plastik dan karet dengan aspal. Pengaruh variasi temperatur pencampuran dan temperatur pengujian perlu dilakukan untuk mengetahui sensitifitas terhadap campuran aspal berpori. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan pengujian abrasi dengan menggunakan alat lain seperti alat uji Los Angeles dan *Stone Crusher*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alakhali, A. K., Fadzil Mat Yahaya, and M. A. Almalik. 2021. "Effects of Crumb Rubber at Different Sizes in Asphalt Mixtures on Mechanical Properties." *IOP Conference Series* 682 (1): 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/682/1/012028>.
- Ali, N., Arfan, H., Patanduk, J., & Hustim, M. 2013. "Studi Permeabilitas Aspal Modifikasi." *Prosiding Seminar Nasional III Teknik Sipil*. 239–245. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Anam, S., dan Pratikno, H. 2018. "Pengujian Perkerasan Aspal Porus dengan Penambahan Tread Ban Bekas Pada Uji Marshall." *U KaRsT* 2(2): 154-163.
- Arifin, B., dan Wijanarko, D. 2001. "Pengaruh Penggunaan Abu Sekam Padi sebagai Filler terhadap Karakteristik Campuran HRS". Skripsi. Universitas Islam Indonesia.
- Australian Asphalt Pavement Association (AAPA). 2004. *National Asphalt Specification*. April.
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). 2003. Metode pengujian campuran aspal dengan alat Marshall RSNI-M-01-2003. Jakarta: BSN.
- Erita, I. A., Guswandi dan Lizar. 2019. "Pengaruh Pencampuran Limbah Plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*) Terhadap Nilai Marshall Aspal Pori". *Jurnal Inovtek Seri Teknik Sipil dan Aplikasi* 1(1):1-8.
- Heydari, S., Hajimohammadi, A., Javadi, N.H.S., dan Khalili, N. 2021. "The Use of Plastic Waste in Asphalt: A Critical Review on Asphalt Mix Design and Marshall Properties". *Journal of Construction and Building Materials*, Vol.309, 125185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125185>.
- Ismayalomi, S., Rahardjo, B., dan Pranoto. 2019. "Kajian Eksperimental Penambahan Plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*) dan Asbuton LGA (Lawele Granular Asphalt) pada Campuran Aspal Porus". *Jurnal Bangunan* 24(1):1-14
- Martina, N., Hasan, M. F. R., dan Setiawan, Y. 2019. "Pengaruh Serbuk Ban Bekas Sebagai Campuran Agregat Halus Pada Campuran Aspal Porous". *Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil* 24(2): 144-152.
- Nashir, T. Muh. 2013. "Studi Eksperimental Campuran Aspal Berpori menggunakan Aspal Polimer Modifikasi (*Polimer Modified Binder*) dengan Stabilisasi Serat Polypropylene". *Prosiding Seminar Nasional III Teknik Sipil UMS*. Surakarta: UMS
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). 1987. *Synthesis of Highway Practice 49, Open-Graded Friction Course for Highways*. Washington DC: Transportation Research Board.
- Ramadhan, Rizky dan Purwo Mahardi. 2016. "Pengaruh Penambahan Limbah Plastik (PET) Terhadap Karakteristik Marshall dan Permeabilitas Pada Aspal Berpori". *Rekayasa Teknik Sipil*. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/rekayasa-teknik-sipil/article/view/17675/16093>.
- Supriyadi, I.R.D., Rahardjo, B., dan Pranoto. 2018. "Kajian Eksperimental Campuran Aspal Porus dengan Bahan Tambahan Plastik HDPE (*High Density Poly Ethylene*)". *Jurnal Bangunan* 23(2): 19-28.
- Sarwono, D., dan Wardhani, A. K. 2007. "Pengukuran Sifat Permeabilitas Campuran Porous Asphalt". *Media Teknik Sipil Universitas Kristen Petra*, 7(2), 131–138.
- Sukirman, S. 2016. *Beton Aspal Campuran Panas*. Edisi Ketiga, Cetakan Keempat. ISBN: 978-979-96088-9-5. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Susanto, H.A., Yang, S.H., and Chou, H.H., 2019. "Mechanical Properties of Thin Surface Treatment for Pavement Maintenance." *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 14(2).
- Winayati, Hendri Rahmat, dan Alfian Saleh .2018. "Analisis Penggunaan Abu Tandan Kelapa Sawit sebagai Filler ditinjau dari Nilai Keausan Perkerasan (Cantabro Test) ". *INA-Rxiv*. <https://osf.io/preprints/inarxiv/y7su9/> (Diakses 15 Juli 2021).



PENGARUH PERBEDAAN KUALITAS LIMBAH KERAMIK TERHADAP SIFAT MEKANIS BLOK PERKERASAN (THE EFFECT OF DIFFERENT QUALITY OF CERAMIC WASTE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PAVING BLOCK)

Irfan Prasetia¹, Rholly Akhrizani Akhbar²

^{1,2}Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat

^{1,2}Jl. Brigjen Hasan Basri, Pangeran, Kec. Banjarmasin Utara, Kota Banjarmasin

¹ipras Setia@ulm.ac.id, ²rhollyakhrizaniakhbar@gmail.com

Diterima: 10 Februari 2023 ; direvisi: 4 April 2023; disetujui: 28 April 2023.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perbedaan limbah keramik (jenis BIa dan BI Ib) yang digunakan sebagai pengganti pasir sebesar 15%, terhadap sifat mekanis blok perkerasan dan pemanfaatannya pada industri konstruksi. Pada penelitian menggunakan dua jenis sampel yaitu mortar (50x50x50 mm) dan blok perkerasan (210x110x60 mm). Pada sampel mortar digunakan kombinasi limbah keramik 25% BIa dan 75% BI Ib (M1), 50% BIa dan 50% BI Ib (M2), 75% BIa dan 25% BI Ib (M3), 100% BIa (M4) dan 100% BI Ib (M5). Sedangkan untuk blok perkerasan digunakan variasi 50% BIa dan 50% BI Ib (BB1), 75% BIa dan 25% BI Ib (BB2) serta 100% BIa (BB3). Sifat mekanis dianalisis berdasarkan pengujian kuat tekan untuk kedua sampel dan juga penyerapan air untuk sampel blok perkerasan. Dari hasil penelitian diketahui bahwa perbedaan kualitas limbah keramik berpengaruh terhadap nilai kuat tekan, yang dikonfirmasi dengan pengujian kuat tekan dan pengujian ANOVA. Sampel M4 memiliki kuat tekan tertinggi untuk sampel mortar yaitu 16 MPa, sedangkan sampel BB3 memiliki kuat tekan tertinggi untuk sampel blok perkerasan sebesar 25 MPa. Namun, hasil kuat tekan dan penyerapan sampel BB2 dan BB3 dapat dikategorikan ke dalam mutu yang sama yaitu mutu B berdasarkan SNI 03-0691-1996. Sehingga variasi BB2 lebih direkomendasikan untuk diaplikasikan sebagai material pembuatan lahan parkir. Hal ini terutama karena jumlah keramik jenis BIa relatif lebih sedikit bila dibandingkan dengan keramik jenis BI Ib. Adapun sebagai material pembuatan jalur pejalan kaki dapat menggunakan variasi BB1.

Kata Kunci: limbah keramik BIa dan BI Ib, kuat tekan, penyerapan air, blok perkerasan, mortar

ABSTRACT

This study aims to determine the effect of ceramic waste differences (types BIa and BI Ib) as substitute for sand by 15% on the mechanical properties of paving block and their utilization in construction industry. Two types of samples were used: mortar (50x50x50 mm) and paving block (210x110x60 mm). The mortar sample variations were 25% BIa and 75% BI Ib (M1), 50% BIa and 50% BI Ib (M2), 75% BIa and 25% BI Ib (M3), 100% BIa (M4) and 100% BI Ib (M5). The paving block sample variations were 50% BIa and 50% BI Ib (BB1), 75% BIa and 25% BI Ib (BB2), and 100% BIa (BB3). Mechanical properties were analyzed according to the compressive strength test for both samples and also water absorption for paving block samples. The difference in the quality of ceramic waste affects the compressive strength, which was confirmed by compressive strength test and ANOVA test. The M4 had the highest compressive strength (16 MPa) for mortar sample, while BB3 had the highest compressive strength (25 MPa) for paving block sample. However, based on BB2 and BB3 compressive strength and absorption tests, the two samples can be categorized into the same quality (B quality) based on SNI 03-0691-1996. Thus, BB2 variation is recommended to be applied as material for making parking lots. This is due to the number of BIa-type ceramics being relatively less when compared to BI Ib. For pedestrian paths, variation of BB1 is proposed.

Keywords: ceramic waste BIa and BI Ib, compressive strength, water absorption, paving block, mortar

PENDAHULUAN

Berdasarkan laporan dari Kelompok Kerja II pada *6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), dalam waktu dekat pemanasan global akan mengakibatkan peningkatan suhu bumi hingga lebih dari 1,5°C (IPCC 2022). Indonesia juga tidak luput dari pengaruh perubahan iklim global. Seperti yang dilaporkan oleh Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), periode 2011 sd 2021 terdapat peningkatan bencana alam di Indonesia yang diakibatkan oleh perubahan iklim (The Ministry of Environmental and Forestry Republic of Indonesia 2022).

Salah satu sektor yang berkontribusi terhadap pemanasan global adalah industri konstruksi. Berdasarkan laporan dari United Nations Environment Programme (UNEP), peningkatan kebutuhan energi terkait pembangunan di tahun 2021 meningkat sangat pesat dibandingkan 10 tahun terakhir (UNEP 2022). Selain penggunaan energi yang besar, industri konstruksi juga berperan dalam eksploitasi sumber daya alam, yang pada akhirnya dapat merusak ekosistem. *Organization for Economic Co-operation and Development* (OECD) telah memprediksi bahwa hingga 2060 konsumsi global terkait material mentah untuk konstruksi (seperti pasir, kerikil, kapur, dll.) akan meningkat sangat signifikan (OECD 2019). Untuk menanggulangi hal tersebut, perlu dilakukan strategi efisiensi penggunaan material konstruksi (Hertwich, Lifset, dan Heeren 2020). Hal ini penting dilakukan agar ekosistem terjaga dengan baik sehingga dapat mengurangi efek pemanasan global.

Bahan bangunan yang sering dimanfaatkan dalam pembangunan adalah blok perkerasan (*Paving block*). Blok perkerasan digunakan sebagai penutup lapisan permukaan khususnya pada pembuatan jalan di kawasan pemukiman. Kemudahan dalam pembuatan dan pengaplikasian di lapangan serta pemanfaatan yang sangat luas menjadikan blok perkerasan sangat diminati untuk pembuatan jalan. Sangat sedikit batasan terkait pemanfaatan blok perkerasan. Tidak hanya untuk pembuatan jalan tetapi juga dapat digunakan untuk pembuatan trotoar, taman, halaman rumah dan tempat parkir.

Inovasi terkait blok perkerasan telah banyak diteliti. Penelitian tidak hanya terkait komposisi material pembuatan blok perkerasan (Multazzam dan Saelan 2015), tetapi terkait inovasi alat pembuatan blok perkerasan (Deshariyanto dan Akbar 2020), hingga alternatif material yang digunakan dalam produksi blok perkerasan (Firmanti dkk. 2012; Kumar dan Kumar 2013; Fathi 2014; Aini S 2014; Witarso dan Lasino 2015; Prasetya dan Krasna 2016; Nath 2020; Prasetya, Syauqi, dan Aini 2021). Adapun alternatif material yang dapat digunakan seperti material dari limbah industri maupun dari daur ulang material konstruksi.

Dari hasil penelitian sebelumnya, dapat diketahui bahwa pemanfaatan alternatif material tersebut dapat mengurangi penggunaan material dari alam. Selain itu, juga dapat memberikan nilai kuat tekan yang lebih tinggi (Ulubeyli, Bilir, and Artir 2016; Rashad 2016; Prasetya 2017; Prasetya dan Maulana 2019; Prasetya dan Rizani 2019; Prasetya 2019; Patil dan Sathe 2020; Muthusamy et al. 2020; Prasetya, Putera, dan Pratiwi 2022; Solouki, Tataranni, dan Sangiorgi 2022). Sehingga, penggunaan alternatif material ini dapat memberikan dampak yang baik terhadap lingkungan dan kualitas produk.

Salah satu alternatif material pembuatan blok perkerasan yang dapat digunakan yaitu limbah keramik. Sekitar 100 juta ton keramik diproduksi setiap tahunnya di seluruh dunia, dan kurang lebih 15% sd 30% menjadi limbah yang tidak terpakai (Awoyera et al. 2021). Di Indonesia limbah keramik juga sangat banyak ditemukan (Putri dan Imastuti 2017; Rifai, Armandha, dan Rakhmawati 2019). Terdapat dua macam limbah keramik, yaitu limbah cair dari proses penghalusan permukaan keramik saat produksi, dan limbah padat yang berasal dari cacat produksi maupun dari hasil kegiatan konstruksi (Septiandini dan Sofiah 2006). Kedua macam limbah ini dapat digunakan sebagai alternatif material baik sebagai campuran blok perkerasan maupun beton (Penteado, Viviani de Carvalho, dan Lintz 2016; Li et al. 2020).

Pada campuran pembuatan blok perkerasan, limbah keramik dapat digunakan sebagai bahan tambah atau sebagai bahan pengganti semen dan pasir. Hal ini karena limbah keramik memiliki kandungan silika

(SiO₂) yang tinggi sehingga berpotensi untuk digunakan sebagai material pozzolan yang memiliki sifat penyemenan (Ray et al. 2021). Sehingga blok perkerasan dengan campuran limbah keramik memiliki nilai kuat tekan yang lebih tinggi. Bahkan, dapat digunakan untuk pembuatan jalan yang dilalui kendaraan berat (Dubale et al. 2022).

Penambahan 15% sd 20% limbah keramik dalam campuran blok perkerasan maupun mortar dapat memberikan peningkatan kuat tekan yang signifikan dari campuran normal (Putri dan Imastuti 2017; Rubio de Hita dkk. 2017). Adapun sebagai bahan pengganti, penggantian maksimal 5% semen dengan limbah keramik dapat memberikan peningkatan kekuatan blok perkerasan, sedangkan penggantian hingga 30% pasir dengan limbah keramik dapat memberikan peningkatan yang lebih signifikan (Penteado, Viviani de Carvalho, and Lintz 2016). Hasil penelitian lain menunjukkan bahwa penggantian semen dengan limbah keramik dapat dilakukan hingga 15% (Septiandini dan Sofiah 2006). Sedangkan penggantian pasir dengan limbah keramik dapat dilakukan hingga 50% (Rifai, Arnandha, dan Rakhmawati 2019). Perbedaan hasil beberapa penelitian ini dapat disebabkan karena perbedaan mutu dan kandungan kimia dari limbah tersebut.

Meskipun telah banyak penelitian yang dilakukan dengan menggunakan campuran limbah keramik, tetapi belum ada penelitian terkait pengaruh kombinasi limbah keramik dengan kualitas yang berbeda terhadap sifat mekanis blok perkerasan yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan sifat mekanis blok perkerasan dengan menggunakan limbah keramik dari 2 (dua) sumber keramik yang berbeda yaitu keramik jenis B1a dan B1b berdasarkan pengelompokan Keramik dari SNI ISO 13006:2010 (BSN 2010). Dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi pemanfaatan keramik dengan kualitas yang berbeda. Selain itu, penelitian ini juga dimaksudkan untuk mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs).

HIPOTESIS

Kualitas limbah keramik yang digunakan dalam pembuatan blok perkerasan akan

memberikan pengaruh terhadap kualitas blok perkerasan yang dihasilkan. Pengaruh terhadap kualitas blok perkerasan lebih kepada sifat mekanis blok perkerasan khususnya terkait kuat tekan dan penyerapan air (Rifai, Arnandha, dan Rakhmawati 2019). Semakin baik mutu limbah keramik yang digunakan akan membuat sifat mekanis blok perkerasan semakin meningkat.

METODOLOGI

Material

Pada penelitian ini jenis semen yang digunakan yaitu *portland composite cement* (PCC). Adapun untuk agregat halus digunakan pasir dari Sungai Barito, Kalimantan Selatan. Limbah keramik yang digunakan berasal dari dua jenis keramik yang berbeda yaitu B1a dan B1b berdasarkan pengelompokan SNI ISO 13006:2010 (BSN 2010). Keramik B1a dan B1b dibuat dengan metode ubin yang dipres-kering. Limbah keramik dikumpulkan dari beberapa perumahan di Kota Banjarbaru, Kalimantan Selatan. Limbah didapatkan dalam bentuk pecahan atau potongan, sehingga harus dihaluskan dengan mesin *Los Angeles* kemudian disaring dengan saringan No. 4 agar masuk kategori agregat halus. Syarat mutu ubin keramik B1a dan B1b dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Syarat mutu ubin keramik pres-kering

No	Persyaratan	Jenis Keramik	
		B1a	B1b
1	Mutu Permukaan	Minimum 95 % dari ubin harus tanpa cacat	
2	Penyerapan air	≤ 0,5 %	6 % < E ≤ 10 %
3	Kuat patah, dalam N		
	a) Ketebalan ≥ 7,5 mm	1300	800
	b) Ketebalan < 7,5 mm	700	500
4	Modulus lentur, dalam N/mm ²	35	18

Sumber: SNI ISO 13006:2010

Metode

Penelitian dilakukan dalam 2 (dua) tahap. Tahap pertama penelitian dilakukan dengan sampel mortar (M) dengan bentuk kubus dimensi 50 x 50 x 50 mm. Tahap kedua penelitian dengan sampel blok perkerasan (BB) dengan dimensi 210 x 110 x 60 mm. Perbedaan jenis sampel ini dilakukan untuk mendapatkan

perbandingan antara pengaruh campuran limbah keramik dengan bentuk sampel yang berbeda.

Pada sampel mortar dan blok perkerasan, digunakan rasio perbandingan semen dan pasir 1:3 dengan faktor air semen (fas) 0.4. Adapun penggantian pasir dengan limbah keramik ditetapkan sama untuk semua sampel sebesar 15%. Untuk perawatan sampel mortar dengan metode perendaman selama 7 dan 28 hari sedangkan sampel blok perkerasan selama 28 hari. Pembuatan sampel mortar berdasarkan SNI 03-6825-2002 (BSN 2002) sedangkan sampel blok perkerasan berdasarkan SNI 03-0691-1996 (BSN 1996).

Sampel mortar dibuat ke dalam 6 variasi yaitu 1 variasi mortar normal (M0) dan 5 variasi campuran dengan limbah keramik, dengan jumlah sampel pada masing-masing variasi sebanyak 5 sampel. Untuk variasi campuran limbah keramik yang digunakan pada sampel mortar yaitu:

1. M0 dengan 0% BIa dan 0% BIb
2. M1 dengan 25% BIa dan 75% BIb
3. M2 dengan 50% BIa dan 50% BIb
4. M3 dengan 75% BIa dan 25% BIb
5. M4 dengan 100% BIa dan 0% BIb
6. M5 dengan 0% BIa dan 100% BIb

Adapun untuk sampel blok perkerasan dibuat ke dalam 3 variasi dengan masing-masing variasi berjumlah 10 sampel. Variasi campuran limbah keramik pada sampel blok perkerasan yaitu:

1. BB1 dengan 50% BIa dan 50% BIb
2. BB2 dengan 75% BIa dan 25% BIb
3. BB3 dengan 100% BIa dan 0% BIb

Variasi proporsi limbah keramik dimaksudkan agar dapat mengetahui pengaruh masing-masing limbah keramik dan juga kombinasi keduanya terhadap sifat mekanis mortar dan blok perkerasan. Proporsi campuran mortar dan blok perkerasan dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Proporsi campuran sampel mortar

No	Kode Sampel	Semen (gr)	Pasir (gr)	Limbah Keramik	
				BIa (gr)/persen	BIb (gr)/persen
1	M0		1500	0 (0%)	0 (0%)
2	M1			56,25 (25%)	168,75 (75%)
3	M2	500		112,5 (50%)	112,5 (50%)
4	M3		1275	168,75 (75%)	56,25 (25%)
5	M4			225 (100%)	0 (0%)
6	M5			0 (0%)	225 (100%)

Tabel 3. Proporsi campuran sampel blok perkerasan

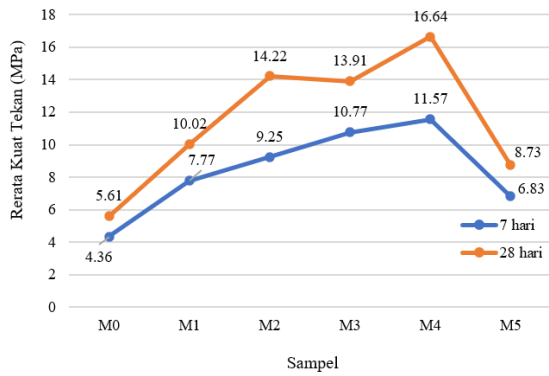
No	Kode Sampel	Semen (gr)	Pasir (gr)	Limbah Keramik	
				BIa (gr)/persen	BIb (gr)/persen
1	BB1			239,625 (50%)	239,625 (50%)
2	BB2	1065	2715,75	359,438 (75%)	119,812 (25%)
3	BB3			479,25 (100%)	0 (0%)

Untuk mengetahui pengaruh limbah keramik terhadap sifat mekanis sampel mortar, dilakukan pengujian kuat tekan berdasarkan SNI 03-6825-2002 (BSN 2002). Adapun terkait sampel blok perkerasan, akan dilakukan dua pengujian yaitu pengujian kuat tekan dan penyerapan air berdasarkan SNI 03-0691-1996 (BSN 1996). Pengujian kuat tekan mortar dilakukan dengan alat *load cell* dan kuat tekan blok perkerasan dengan mesin tekan beton.

HASIL DAN ANALISIS

Pengujian Kuat Tekan Mortar

Hasil pengujian sampel mortar dapat dilihat pada Gambar 1. Adapun persentase peningkatan kuat tekan dapat dilihat pada Tabel 4. Secara umum dapat terlihat adanya peningkatan kuat tekan mortar seiring dengan bertambahnya campuran limbah keramik yang digunakan. Pola tersebut dapat diamati pada semua sampel dengan waktu perawatan 7 dan 28 hari, kecuali untuk sampel M3 pada 28 hari.



Gambar 1. Hasil kuat tekan sampel mortar

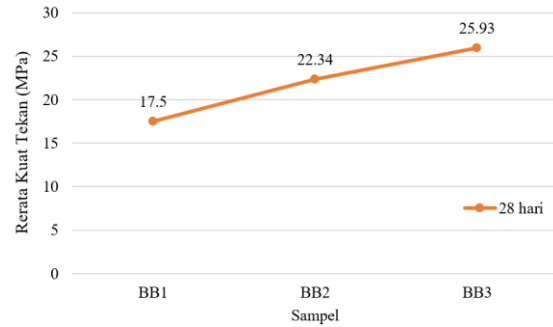
Tabel 4. Peningkatan kuat tekan sampel mortar

No	Kode Sampel	Perawatan Sampel	
		7 hari	28 hari
1	M0	0%	0%
2	M1	78%	79%
3	M2	112%	153%
4	M3	147%	148%
5	M4	165%	197%
6	M5	57%	56%

Dari hasil pengujian ini terlihat bahwa mutu dari sumber limbah keramik berpengaruh terhadap nilai kuat tekan mortar yang dihasilkan. Keramik B1a memiliki nilai penyerapan air yang lebih kecil dan nilai kuat patah yang lebih besar dibandingkan dengan keramik B1b (Tabel 1). Berdasarkan data Tabel 4, Penggunaan 100% campuran limbah B1a (M4) memberikan peningkatan hingga 197%. Sedangkan 100% campuran limbah B1b (M5) memberikan peningkatan sekitar 57%. Adapun untuk kombinasi campuran B1a dan B1b juga menunjukkan hasil yang sama. Semakin besar persentase limbah B1a, maka persentase peningkatan kuat tekan juga semakin tinggi.

Pengujian Kuat Tekan Blok Perkerasan

Sama halnya dengan hasil pengujian kuat tekan mortar, hasil pengujian kuat tekan untuk sampel blok perkerasan juga menunjukkan pengaruh perbedaan mutu sumber limbah keramik terhadap peningkatan kuat tekan blok perkerasan. Semakin besar persentase limbah keramik B1a yang digunakan, maka akan semakin besar pula kuat tekan yang dihasilkan. Hasil pengujian sampel blok perkerasan dapat dilihat pada Gambar 2. Adapun persentase peningkatan kuat tekan dapat dilihat pada Tabel 5.



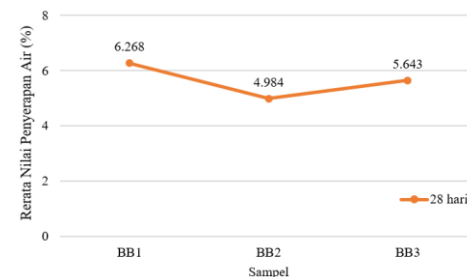
Gambar 2. Hasil kuat tekan sampel blok perkerasan

Tabel 5. Peningkatan kuat tekan sampel blok perkerasan

No	Kode Sampel	Perawatan Sampel
		28 hari
1	BB1	0%
2	BB2	28%
3	BB3	48%

Pengujian Penyerapan Air Blok Perkerasan

Hasil pengujian penyerapan air sampel blok perkerasan dapat dilihat pada Gambar 3. Dari hasil pengujian dapat terlihat bahwa penggunaan limbah keramik dari jenis keramik B1b akan meningkatkan penyerapan air dari blok perkerasan yang dihasilkan. Namun, terlihat bahwa peningkatan ini tidak signifikan. Secara umum penyerapan air dari blok perkerasan dengan limbah keramik berkisar antara 5% sd 6%.



Gambar 3. Hasil Pengujian Penyerapan Air

Pengujian ANOVA

Untuk memastikan adanya pengaruh variasi campuran limbah keramik terhadap kuat tekan mortar dan blok perkerasan, maka perlu untuk dilakukan uji statistik data. Dalam penelitian ini uji statistik dilakukan dengan menggunakan metode uji ANOVA. Pengujian dilakukan terhadap data kuat tekan yang dihasilkan oleh masing-masing sampel pada pengujian mortar dan juga blok perkerasan.

Karena pada pengujian mortar menggunakan 2 (dua) waktu perendaman yaitu 7 dan 28 hari, maka untuk sampel mortar akan dilakukan dengan metode uji ANOVA 2 (dua) arah dengan replikasi. Adapun untuk pengujian data kuat tekan blok perkerasan dilakukan dengan metode uji ANOVA 1 (satu) arah. Sebagai tambahan, pada sampel blok perkerasan juga akan dilakukan uji ANOVA 1 (satu) arah untuk data Penyerapan Air.

Pada metode uji ANOVA digunakan hipotesis sebagai berikut:

H0: Perlakuan tidak berpengaruh signifikan

H1: Perlakuan berpengaruh signifikan

Ada dua data yang akan menjadi rujukan yaitu nilai P-value dan nilai F dari hasil uji ANOVA. Nilai H0 diterima dan H1 ditolak jika nilai P-value > 0.05 dan nilai F hitung < F tabel (F crit). Sedangkan nilai H0 ditolak dan H1 diterima jika nilai P-value < 0.05 dan nilai F hitung > F tabel (F crit). Hasil pengujian ANOVA kuat tekan sampel mortar dapat dilihat pada Tabel 6. Untuk hasil pengujian ANOVA kuat tekan sampel blok perkerasan dapat dilihat pada Tabel 7. Adapun hasil pengujian ANOVA penyerapan air sampel blok perkerasan dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 6. Uji ANOVA kuat tekan mortar

	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Hari	172.83	1	172.83	60.82	0.00	4.00
Variasi Campuran	679.64	5	135.93	47.83	0.00	2.37
Hari vs Variasi Campuran	38.87	5	7.77	2.74	0.03	2.37
Error	170.50	60	2.84			
Total	1061.84	71				

Tabel 7. Uji ANOVA kuat tekan blok perkerasan

	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Variasi Campuran	358.60	2	179.30	58.10	0.00	3.35
Error	83.32	27	3.09			
Total	441.93	29				

Tabel 8. Uji ANOVA penyerapan air blok perkerasan

	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Variasi Campuran	4.12	2	2.06	4.82	0.03	3.89
Error	5.13	12	0.43			
Total	9.25	14				

Berdasarkan Tabel 6 sd Tabel 8 diketahui bahwa hasil pengujian ANOVA pada data kuat tekan sampel mortar didapatkan nilai P-value < 0.05 dan nilai F hitung > F tabel (F crit) sehingga H0 ditolak dan H1 diterima. Hasil pengujian ANOVA untuk data kuat tekan dan penyerapan air pada sampel blok perkerasan juga memberikan hasil yang sama dengan pengujian pada sampel mortar. Sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi campuran berpengaruh terhadap kuat tekan baik sampel mortar dan sampel blok perkerasan. Sebagai tambahan, lama waktu perendaman juga diketahui berpengaruh terhadap kuat tekan mortar.

PEMBAHASAN

Data pengujian sampel kuat tekan mortar menunjukkan bahwa penggantian pasir dengan limbah keramik memberikan efek peningkatan kekuatan yang signifikan. Hal ini sejalan dengan temuan peneliti lain. Seperti yang telah dilakukan oleh Rifai, Arnandha, dan Rakhmawati (2019), penggantian 50% pasir dengan limbah keramik dapat meningkatkan kuat tekan blok perkerasan hingga 40% dan memiliki penyerapan air terkecil sebesar 4%. Selain itu, penelitian dengan lebih dari 1 (satu) jenis keramik dilakukan oleh Penteado, Viviani de Carvalho, and Lintz (2016). Dari hasil penelitian tersebut diketahui bahwa penggantian 30% pasir dengan limbah keramik dapat meningkatkan kuat tekan blok perkerasan hingga 12% khususnya untuk limbah keramik dengan jenis keramik porselen. Akan tetapi dari kedua penelitian tersebut belum diketahui pengaruh kualitas limbah keramik yang digunakan terhadap kuat tekan blok perkerasan.

Hasil penelitian ini (Gambar 1) menunjukkan pengaruh perbedaan kualitas limbah keramik terhadap peningkatan kuat tekan. Pada sampel mortar dengan 100% limbah BIa (M4) dan 100% limbah BIIB (M5) terlihat bahwa mutu keramik yang lebih baik

akan menghasilkan peningkatan yang lebih signifikan. Akan tetapi, bila dibandingkan dengan sampel kontrol (M0) kuat tekan sampel M5 pada waktu perawatan 7 hari bahkan lebih tinggi dibandingkan dengan M0 pada waktu perawatan 28 hari.

Kemudian, dari hasil uji kuat tekan blok perkerasan, penggunaan 100% limbah B1a (BB3) memberikan nilai kuat tekan yang paling tinggi. Sekali lagi pengaruh kualitas limbah yang digunakan dapat terlihat jelas. Namun, yang perlu diperhatikan juga adalah terkait ketersediaan limbah keramik B1a. Penggunaan keramik jenis B1a relatif lebih sedikit bila dibandingkan dengan keramik jenis B1b. Hal ini tentu akan mempengaruhi ketersediaan limbah keramik ini.

Untuk hasil kuat tekan sampel dengan 75% limbah B1a dan 25% limbah B1b (BB2) memberikan nilai kuat tekan yang terbilang cukup tinggi. Berdasarkan mutu blok perkerasan SNI 03-0691-1996 (BSN 1996) sampel BB2 dan BB3 dapat dikategorikan dalam mutu blok perkerasan yang sama yaitu mutu B dengan kuat tekan rata-rata minimal 20 MPa. Blok perkerasan mutu B dapat digunakan untuk pembuatan lahan parkir. Sehingga komposisi sampel BB2 lebih dapat diaplikasikan di lapangan terkait keterbatasan limbah B1a. Adapun untuk sampel BB1 dapat dikategorikan ke dalam mutu C dengan kuat rata-rata minimal 15 MPa. Mutu C dapat digunakan untuk pejalan kaki.

Selain itu, dari hasil pengujian kuat tekan dapat diketahui bahwa pemanfaatan kombinasi dari dua jenis kualitas keramik yang berbeda akan memberikan pengaruh terhadap kuat tekan. Hasil pengujian ini dikonfirmasi oleh hasil pengujian ANOVA yang dilakukan (Tabel 6 dan Tabel 7). Variasi campuran berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan baik untuk sampel mortar dan blok perkerasan. Dari hasil pengujian ANOVA juga mengkonfirmasi bahwa lama waktu perendaman berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan (Tabel 6). Informasi ini dapat dijadikan rujukan untuk penentuan kekuatan blok perkerasan terkait dengan lama waktu penyimpanan di tempat produksi. Walaupun terkait hal ini masih perlu pengujian lanjutan terkait sampel blok perkerasan dengan waktu perawatan yang berbeda.

Dari segi perbedaan bentuk sampel, terlihat bahwa terdapat perbedaan hasil kuat tekan antara bentuk mortar dan juga blok perkerasan. Perbedaan ukuran dari kedua sampel dapat menjadi penyebab munculnya perbedaan kekuatan tersebut. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, diketahui bahwa variasi bentuk dan ukuran blok perkerasan (khususnya ketebalan) dapat memberikan efek perbedaan hasil uji kuat tekan (Putra, Kurniawandy, dan Azhari 2013; Yanita dan Andreas 2017). Selain itu, dari penelitian Barkiah dan Yasin (2020) dapat diketahui bahwa perbedaan ukuran karena metode pengujian yaitu dengan ukuran asli dan ukuran SNI 03-0691-1996 juga dapat menghasilkan perbedaan kekuatan sehingga perlu ditentukan suatu nilai konversi bentuk blok perkerasan asli terhadap kuat tekan pengujian dalam bentuk sampel SNI 03-0691-1996.

Dengan adanya perbedaan ukuran, maka perbedaan perlakuan pemadatan bisa saja terjadi. Ukuran yang lebih kecil cenderung lebih sukar untuk dilakukan pemadatan. Sehingga kuat tekan mortar yang lebih kecil dapat disebabkan oleh kurang padatnya sampel mortar dibandingkan dengan sampel blok perkerasan. Namun, seperti yang disampaikan sebelumnya, pola pengaruh limbah keramik terhadap kuat tekan antara kedua sampel tidak berbeda.

Adapun untuk pengujian penyerapan air blok perkerasan dengan sampel limbah keramik, terlihat bahwa penyerapan blok perkerasan cukup rendah. Untuk sampel BB1 yang tergolong mutu C didapatkan penyerapan air sebesar 6,268% dimana untuk mutu C syarat penyerapan air maksimal adalah 8%. Sedangkan untuk BB1 dan BB2 penyerapan air di bawah 6% dimana maksimal penyerapan air untuk mutu B adalah 6%. Sehingga ke semua sampel memenuhi persyaratan mutu sesuai SNI. Berdasarkan uji ANOVA, penyerapan air juga dipengaruhi oleh variasi campuran. Hal ini berarti penggunaan limbah keramik dengan mutu sumber keramik dengan penyerapan air yang berbeda akan memberikan pengaruh terhadap penyerapan air blok perkerasan yang dihasilkan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perbedaan kualitas limbah keramik terhadap sifat mekanis blok perkerasan khususnya terkait kuat tekan dan penyerapan air. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa perbedaan kualitas mutu limbah keramik yang digunakan dalam campuran berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan blok perkerasan. Semakin tinggi kualitas dari sumber limbah keramik yang digunakan, maka kuat tekan blok perkerasan yang dihasilkan juga akan semakin tinggi.

Untuk kombinasi 2 (dua) limbah keramik yang digunakan juga berpengaruh terhadap kuat tekan. Kombinasi dari dua limbah keramik yang berbeda kualitas akan mengakibatkan penurunan nilai kuat tekan. Namun dari hasil pengujian yang dilakukan kombinasi 75% limbah keramik B1a dengan 25% limbah keramik B1b (BB2) memiliki kategori mutu yang sama dengan penggunaan 100% limbah B1a (BB3) yaitu mutu B yang dapat diaplikasikan untuk lahan parkir. Pemanfaatan kombinasi campuran BB2 juga sebagai solusi lebih sedikitnya limbah keramik jenis B1a dibandingkan dengan jenis keramik B1b.

Adapun pemanfaatan blok perkerasan untuk beban yang lebih ringan, seperti untuk pejalan kaki, penggunaan masing-masing 50% limbah keramik B1a dan B1b (BB1) dapat direkomendasikan. Sebagai kesimpulan akhir, pemanfaatan limbah ini tidak hanya dapat mengurangi kerusakan lingkungan, tetapi juga dapat menjaga kelestarian alam dengan melestarikan sumber daya alam yang ada.

Saran

Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan penelitian lanjutan dengan meningkatkan persentase penggantian pasir dengan limbah keramik hingga 50% atau lebih. Penelitian juga dapat dilakukan dengan membandingkan jenis limbah keramik lainnya dengan kualitas mutu yang berbeda. Pengujian dengan SEM-XRD juga patut dilakukan untuk lebih mengetahui mekanisme dari pengaruh limbah keramik terhadap peningkatan kekuatan blok perkerasan. Penelitian terkait pemanfaatan limbah industri perlu terus digalakkan agar

dapat mengurangi kebutuhan dunia konstruksi akan material dari alam. Serta dapat menjaga lingkungan dari akibat buruk penumpukan limbah industri yang tidak termanfaatkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tak terhingga disampaikan kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam kelancaran penelitian hingga penulisan makalah ini. Terutama kepada Kepala Laboratorium Struktur dan Material, Dekan Fakultas Teknik ULM serta Instruktur di Laboratorium Struktur dan Material FT ULM yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Aini S, Nurul. 2014. "Pengaruh Kuat Tekan Paving Block Menggunakan Pasir Sungai dan Pasir Darat (Dalam Kasus Pasir di Gunung Merapi)." *Jurnal Jalan-Jembatan* 31 (3): 174–82.
- Awoyera, Paul O., Oladimeji B. Olalusi, Samuel Ibia, and Krishna Prakash A. 2021. "Water absorption, strength and microscale properties of interlocking concrete blocks made with plastic fibre and ceramic aggregates." *Case Studies in Construction Materials* 15 (September): e00677. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00677>.
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). 1996. *Bata Beton (Paving Block)*, SNI 03-0691-1996. Jakarta: BSN.
- . 2002. *Metode Pengujian Kekuatan Tekan Mortar Semen Portland Untuk Pekerjaan Sipil*, SNI 03-6825-2002. Jakarta: BSN.
- . 2010. *Ubin keramik - Definisi, klasifikasi, karakteristik dan penandaan*, SNI ISO 13006:2010. Jakarta: BSN.
- Barkiah, Ida, dan Muhammad Yasin. 2020. "Nilai Konversi Uji Kuat Tekan Variasi Bentuk Paving Block Terhadap Bentuk Sampel Uji Sni 03-0691-1996." *Jurnal Teknologi Berkelanjutan (Sustainable Technology Journal)* 9 (2): 81–89.
- Deshariyanto, Dwi. dan Moh. Kurnia Akbar. 2020. "Efektifitas dan Konsistensi Alat Penumbuk Terhadap Mutu Paving Block." *Jurnal Ilmiah MITSU* 8 (1): 1–5. <https://doi.org/10.24929/ft.v8i1.920>.
- Dubale, Mandefrot, Gaurav Goel, Ajay Kalamdhad, and Laishram Boeing Singh. 2022. "An investigation of demolished floor and wall ceramic tile waste utilization in fired brick production." *Environmental Technology and Innovation* 25: 102228.

- <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102228>.
- Fathi, Ibtelhal Salem. 2014. "Effect of Using Crushed Limestone in Concrete Mixes as Fine Aggregate on Compressive Strength and Workability." In *International Conference on Civil, Biological and Environmental Engineering*, 40–44.
- Firmanti, Anita, Aventi, Dany Cahyadi, Aan Sugiarto, Bambang Sugiharto, dan Bambang Subiyanto. 2012. "Analisis Pengembangan Unit Produksi Conblock dan Paving Block Pembangunan Rumah Murah." *Jurnal Permukiman* 7 (1): 5–12.
- Hertwich, E., R. Lifset, dan N. Heeren. 2020. *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*. Nairobi: United Nations Environment Programme. <https://www.resourcepanel.org/reports/resource-efficiency-and-climate-change>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Diedit oleh B. Rama (eds.) [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Kumar, Anuj, dan Sanjay Kumar. 2013. "Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization." *Construction and Building Materials* 38: 865–71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.013>.
- Li, L. G., Z. Y. Zhuo, J. Zhu, and A. K.H. Kwan. 2020. "Adding ceramic polishing waste as paste substitute to improve sulphate and shrinkage resistances of mortar." *Powder Technology* 362: 149–56. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.117>.
- Multazzam, Kiagus Aldi, dan Priyanto Saelan. 2015. "Studi Mengenai Perancangan Komposisi Bahan dalam Campuran Mortar untuk Pembuatan Bata Beton (Paving Block)." *Reka Racana* 1 (1): 86–97.
- Muthusamy, Khairunisa, Mohamad Hafizuddin Rasid, Gul Ahmed Jokhio, Ahmed Mokhtar Albshir Budiea, Mohd Warid Hussin, and Jahangir Mirza. 2020. "Coal bottom ash as sand replacement in concrete: A review." *Construction and Building Materials* 236: 117507. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117507>.
- Nath, S. K. 2020. "Fly ash and zinc slag blended geopolymer: Immobilization of hazardous materials and development of paving blocks." *Journal of Hazardous Materials* 387: 121673. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121673>.
- Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD). 2019. *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
- Patil, Ashwini R., and Sheetal B. Sathe. 2020. "Feasibility of sustainable construction materials for concrete paving blocks: A review on waste foundry sand and other materials." *Materials Today: Proceedings* 43 (xxxx): 1552–61. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.402>.
- Penteado, Carmenlucia Santos Giordano, Eduardo Viviani de Carvalho, dan Rosa Cristina Cecche Lintz. 2016. "Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing." *Journal of Cleaner Production* 112: 514–20. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.142>.
- Prasetya, Irfan. 2017. "Aplikasi Fly Ash Sebagai Bahan Campuran Batako Beton." Banjarmasin.
- . 2019. "Kajian Material Paving Hijau untuk Memperbaiki Daerah Tangkapan Air." In *Seminar Nasional Tahunan IV PSMTS ULM*, 89–95. Banjarmasin: LMU Press.
- Prasetya, Irfan, dan Wiku A Krasna. 2016. "Penelitian Teknologi Beton dengan Menggunakan Agregat Lokal Kalimantan Selatan."
- Prasetya, Irfan, dan Achmad Maulana. 2019. "Effects of crushed stone waste as fine aggregate on mortar and concrete properties." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 620: 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/620/1/012040>.
- Prasetya, Irfan, Deny Pratama Putera, dan Ade Yuniati Pratiwi. 2022. "Mechanical Performance of Mortar and Concrete Using Borneo Wood Sawdust as Replacement of Fine Aggregate." In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 999. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/999/1/012001>.
- Prasetya, Irfan, dan M. Fahmi Rizani. 2019. "Analysis of fly ash from PLTU Asam-Asam as a construction material in terms of its physical and mechanical properties." *MATEC Web of Conferences* 280: 04013.

- <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928004013>.
- Prasetya, Irfan, M Syauqi, dan A S Aini. 2021. "Application of Central Kalimantan Coal Ash as a Sustainable Construction Material." In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 758. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/758/1/012011>.
- Putra, Arie, Alex Kurniawandy, dan Azhari. 2013. "Pengaruh Variasi Bentuk Paving Block Terhadap Kuat Tekan." Repository UNSRI, 1–8. <https://repository.unri.ac.id/handle/123456789/3997>.
- Putri, Aulia Zastavia, dan . Imastuti. 2017. "Pengaruh Penambahan Pecahan Keramik Pada Pembuatan Paving Block Ditinjau Dari Nilai Kuat Tekan." G - Smart 1 (1): 23. <https://doi.org/10.24167/g.s.v1i1.925>.
- Rashad, Alaa. 2016. "Cementitious materials and agricultural wastes as natural fine aggregate replacement in conventional mortar and concrete." Journal of Building Engineering 5: 119–41. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.11.011>.
- Ray, Sourav, Mohaiminul Haque, Sakib Ahmed Soumic, Ayesha Ferdous Mita, MD Masnun Rahman, and Bibhas B. Tanmoy. 2021. "Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review." Journal of Building Engineering 43 (April). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102567>.
- Rifai, Ahmad Lukman, Yudhi Arnandha, dan Anis Rakhmawati. 2019. "Pemanfaatan Limbah Keramik Sebagai Campuran Pembuatan Paving Block." Jurnal Rekayasa ... 1 (1).
- Rubio de Hita, P., F. Pérez Gálvez, M.J. Morales Conde, dan C. Rodríguez Liñán. 2017. "Reuse of Ceramic Demolition Waste in the Reconstruction of Planked Timber Floor Slabs." The Open Construction and Building Technology Journal 11 (1): 124–35. <https://doi.org/10.2174/1874836801711010124>.
- Septiandini, Erna, dan Ariana Sofiah. 2006. "Studi Mutu Bata Beton (Paving Block) yang Menggunakan Abu Puing Ubin Keramik Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Semen." MENARA, JURNAL TEKNIK SIPIL 1 (2): 200–212.
- Solouki, Abbas, Piergiorgio Tataranni, and Cesare Sangiorgi. 2022. "Mixture Optimization of Concrete Paving Blocks Containing Waste Silt." Sustainability (Switzerland) 14 (1): 0–15. <https://doi.org/10.3390/su14010451>.
- The Ministry of Environmental and Forestry Republic of Indonesia. 2022. The State of Indonesia 's Forests 2022 Towards FOLU Net Sink 2030. Diedit oleh SITI NURBAYA, Efransjah, Sri Murniningtyas, Erwinsyah, dan Muhammad Zahrul Muttaqin. The Ministry of Environment and Forestry, Republic of Indonesia The.
- Ulubeyli, Gulden Cagin, Turhan Bilir, dan Recep Artir. 2016. "Durability Properties of Concrete Produced by Marble Waste as Aggregate or Mineral Additives." In Procedia Engineering, 161:543–48. The Author(s). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.689>.
- United Nations Environment Programme (UNEP). 2022. 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi. www.globalabc.org.
- Witarso, WS, dan Lasino. 2015. "Pengaruh Penambahan Abu Terbang Pada Paving Block Berbahan Baku Tailing Asbuton." Jurnal Jalan-Jembatan 32 (1): 54–60. http://jurnal.pusjatan.pu.go.id/index.php/jurnal_jalanjembatan/article/view/164.
- Yanita, Rachmi, dan Gufron Andreas. 2017. "Manfaat Faktor Konversi untuk Pengujian Kuat Tekan Paving-Block." Jurnal IPTEK 1 (2): 79–87. <https://doi.org/https://doi.org/10.31543/jii.v1i2.119>.

PENGGUNAAN PASIR DAN KERIKIL SILIKA DARI SISA PENAMBANGAN BATU KAPUR SEBAGAI SUBSTITUSI AGREGAT UNTUK PERKERASAN JALAN KAKU (THE UTILIZATION OF SILICA SAND AND GRAVEL FROM LIMESTONE MINING WASTE AS AGGREGATE SUBSTITUTION FOR RIGID PAVEMENT)

Etri Suhelmidawati¹⁾, Gusri Yaldi²⁾, Zulfira Mirani³⁾, Fahmiza Yufajri⁴⁾, Muhammad Ikhsan⁵⁾

^{1),2),3),4),5)}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Padang
^{1),2),3),4),5)}Jalan Kampus, Limau Manis, Kec.Pauh, Padang 25164, Sumatera Barat

¹⁾etri.sarins@gmail.com, ²⁾gusri.yaldi@gmail.com, ³⁾raninawaf@gmail.com,

⁴⁾fahmiza.y0608@gmail.com, ⁵⁾mhdikhsan1626@gmail.com

Diterima: 28 September 2022; direvisi: 03 Maret 2023; disetujui: 06 April 2023.

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui dampak penggunaan pasir dan kerikil silika terhadap kuat tekan dan kuat lentur pada beton yang dihasilkan sebagai substitusi agregat kasar dan agregat halus dan guna meningkatkan nilai kuat tekan dan kuat lentur pada beton pada perkerasan jalan (rigid pavement). Penelitian ini menerapkan metode eksperimen yang meliputi pengujian bahan, pengujian kuat tekan dan pengujian kuat lentur beton, sesuai dengan American Standard Testing and Material (ASTM). Dari hasil pengujian nilai kuat tekan tertinggi diperoleh dari variasi beton ke-3 dengan campuran beton 100% pasir silika + kerikil alami + sikament NN dengan nilai kuat tekan sebesar 41,14 MPa. Untuk nilai kuat lentur optimum didapat pada campuran beton dengan variasi ke-4 yaitu 100% pasir alami + kerikil silika + sikament NN dengan nilai kuat lentur 1,6 MPa. Berdasarkan hasil tersebut, variasi beton ke-4 dipilih untuk diterapkan dengan dasar nilai kuat lentur optimum dan dengan nilai kuat tekan yang melebihi dari kuat tekan rencana yaitu 32,36 MPa (f_c' rencana 30 MPa). Manual Desain Perkerasan (MDP) 2017 digunakan untuk merencanakan perkerasan kaku pada Jalan Simpang Anak Aia – Fly Over Bandara Internasional Minangkabau STA 22+800 s/d STA 22+800. Perhitungan tebal perkerasan didapatkan tebal perkerasan 27.5 cm. Pasir dan kerikil silika dapat digunakan untuk meningkatkan kuat tekan dari beton normal setelah penambahan material silika, dan berperan dalam menahan retak pada benda uji silinder.

Kata Kunci: pasir silika, kerikil silika, kuat tekan, kuat lentur, perkerasan kaku

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the effects of using silica sand and gravel in concrete as a substitution of coarse aggregates and fine aggregates and to increase the value of compressive strength and flexural strength in concrete for road pavement. This study applied the experimental methods, including material testing, compressive strength and concrete flexural strength testing, referring to the American Standard Testing and Materials (ASTM). From the test results, the highest compressive strength value of concrete was obtained from the 3rd concrete variation with a concrete mixture of 100% silica sand + natural gravel + sikament NN with a compressive strength value of 41.14 MPa. The optimum flexural strength value is obtained from the concrete mix in the 4th variation, namely 100% natural sand + silica gravel + sikament NN with a flexural strength value of 1.6 MPa. Based on these results, the 4th concrete variation was chosen to be applied on the basis of its optimum flexural strength value and compressive strength value that exceeds the design compressive strength, namely 32.36 MPa (f_c' design 30 MPa). Manual Desain Perkerasan (MDP) 2017 is used to design rigid pavement on Aia Anak Simpang Road – Minangkabau International Airport Fly Over STA 22+800 to STA 22+800. The pavement thickness obtained is 27.5 cm. Therefore, silica sand and gravel can increase the compressive strength of normal concrete after the addition of silica material, play a role in resisting cracks in cylindrical specimens.

Keywords: silica sand, silica gravel, compressive strength, flexural strength, rigid pavement

PENDAHULUAN

Penggunaan perkerasan kaku untuk jalan mulai umum diterapkan oleh penyelenggara jalan (Akbar, 2018). Kendalanya adalah struktur beton rentan terhadap retak yang disebabkan sifat bahan yang getas dan lemah terhadap tarikan. Sifat-sifat tersebut dapat mengakibatkan beton hancur atau patah tanpa diawali perubahan bentuk ketika tegangan maksimum telah dicapai (Wicaksana dkk, 2014).

Secara umum beton terdiri atas campuran semen, agregat halus, agregat kasar, pengisi, dan air. Saat ini, campuran beton mengalami perkembangan dengan penggunaan bahan tambahan atau penggantian suatu bahan dalam campuran beton. Penelitian ini menggunakan material pengganti berupa pasir dan kerikil silika. Pemilihan bahan tersebut merupakan upaya untuk memanfaatkan limbah sisa penambangan dari batu kapur dan juga berdasarkan hasil pengujian properties material memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan material alami biasa. Silika adalah senyawa kimia yang dapat diperoleh berbagai sumber antara lain silika mineral, sintesis kristal, dan nabati. Silika mineral merupakan senyawa yang ditemui dalam bahan tambang/galian antara lain granit, pasir kuarsa, dan feldspar dengan kandungan kristal silika. (Adi 2018).

Penggunaan mineral silika seperti pasir silika umumnya digunakan pada industri. Pemanfaatannya beragam antara lain sebagai bahan produksi pembuatan gelas dan keramik, bahan penyaring (filter) produksi air bersih, bahan pengecoran beton, dan pembersih kerak karat besi (sandblasting). Pada pengecoran beton di batching plant, agregat halus atau pasir silika digunakan sebagai unsur utama pembuatan beton segar. Pengecoran turut menggunakan agregat kasar, air, semen, dan bahan tambah berupa aditif. Material pasir silika diperiksa di laboratorium terlebih dahulu agar kualitas dan komposisi campuran diketahui (Nadia dan Fauzi 2011).

Pasir dan kerikil silika yang digunakan disini berasal dari sisa penambangan Bukit Kapur Indarung, berlokasi di Kecamatan Lubuk Kilangan, Padang, Sumatera Barat. Bukit Kapur Indarung ini merupakan daerah tambang PT

Semen Padang yang mengandung beberapa bahan utama yaitu Limestone (batu kapur), Clay, Iron sand dan silika. Silika menjadi salah satu bahan baku pembuatan semen. Namun material Silika dari bukit Karang putih tidak memenuhi Komposisi Standard Silica Stone untuk proses pembuatan semen, hal ini berdampak pada peningkatan konsumsi silika di pabrik (Rijal 2018)

Dikarenakan keterbatasan tersebut diputuskan pasokan silika dari tambang hanya untuk memenuhi kebutuhan pabrik Indarung sedangkan di pabrik pada bulan Oktober 2016 diputuskan untuk menggunakan Pozzolan sebagai pengganti keterbatasan silika dari tambang. Dari data ini bisa disimpulkan pemakaian silika sudah kurang dalam proses pembuatan semen dan menjadi bahan yang tidak terpakai (limbah). Limbah pabrik Indarung memiliki potensi ekonomi. Pada campuran pada beton, bahan silika dapat digunakan sebagai alternatif pengganti agregat sehingga bisa membuka peluang pekerjaan bagi masyarakat dan mampu meningkatkan ekonomi masyarakat.

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian lebih lanjut mengenai dampak penggunaan dari pasir dan kerikil silika terhadap perkerasan kaku. Uji difokuskan pada kuat tekan dan kuat lentur yang dihasilkannya sebagai substitusi agregat kasar dan halus. Hasil pengujian akan menunjukkan adanya peningkatan nilai kuat tekan dan kuat lentur pada beton. Hasil yang optimum dari pengujian dipilih untuk merencanakan tebal perkerasan jalan kaku yang sesuai.

HIPOTESIS

Pasir dan kerikil silika yang digunakan sebagai substitusi agregat pada campuran beton dapat meningkatkan nilai kuat tekan dan kuat lentur beton sehingga dapat diaplikasikan untuk perkerasan jalan kaku (*rigid pavement*).

METODOLOGI

Penelitian ini menerapkan metode eksperimen, yang meliputi pengujian bahan dan pengujian kuat tekan dilakukan di laboratorium bahan jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Padang serta pengujian kuat lentur beton di laboratorium bahan konstruksi Dinas Bina Marga, Cipta Karya dan Tata Ruang Provinsi Sumatera Barat.

Persiapan material dan pengujian dilaksanakan mengacu kepada *American Standard Testing and Material* (ASTM C33/C33M-13 2019; ASTM C125-03 2003; ASTM C31 2010; ASTM C494/C494M-05 2017; ASTM C39/C39M-01 1995) serta beberapa literatur penelitian terdahulu (ASTM C138 / C138M 2019; Statements and Size 1995; ASTM C143 2015) yang telah dilakukan sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan. Penelitian ini dilakukan guna mendapatkan komposisi campuran agregat silika sebagai bahan tambahan pada beton, dimana hasil dari penelitian ini adalah hasil kuat tekan dan kuat lentur beton.

Pada penelitian ini, terdapat lima jenis variasi persentase agregat silika yang akan ditambahkan terhadap campuran beton, dimana kelima variasi tersebut diantaranya, 100 % pasir alami + kalami, 100 % pasir alami + kalami + sikament NN, 100% silika + kerikil alami + sikament NN, 100% Pasir alami + kerikil silika + sikament NN dan 100% psilika + kerikil silika + sikament NN. Material yang digunakan pada penelitian ini, seperti semen adalah semen jenis PCC (Portland Cement Composite) produksi PT. Semen Padang, pasir dan kerikil silika

berasal dari sisa penambangan bukit kapur Indarung, sementara untuk pasir dan kerikil alami berasal dari sungai di daerah Duku, Padang Pariaman, Sumatera Barat. Untuk perencanaan tebal perkerasan kaku, penelitian ini menggunakan metoda Manual Desain Perkerasan (MDP) tahun 2017.

Perencanaan Tebal Perkerasan Kaku

Dalam penelitian ini dilakukan perencanaan tebal perkerasan kaku dengan metode Manual Desain Perkerasan (MDP) Jalan 2017, dengan data-data yang diperlukan sebagai berikut:

1. Jalan terdiri dari 4 lajur 2 arah terbagi (4/2D)
2. Jenis jalan berdasarkan fungsi yaitu jalan Kolektor dengan golongan dan IIA Sekunder.

Menentukan Umur Rencana

Penentuan umur rencana untuk perkerasan jalan pada MDP 2017 tergantung pada jenis perkerasan yang akan digunakan sesuai dengan Umur Rencana Perkerasan, maka umur rencana yaitu 40 tahun (Tabel 1) dengan mulai beroperasi pada tahun 2024.

Tabel 1. Umur rencana

Jenis Perkerasan	Elemen Perkerasan	Umur Rencana
Perkerasan lentur	Lapisan aspal dan lapisan berbutir(2)	20
	Fondasi jalan	
	Semua perkerasan untuk daerah yang tidak dimungkinkan pelapisan ulang (<i>overlay</i>), seperti: jalan perkotaan, <i>underpass</i> , <i>Cement Treated Based (CTB)</i>	
Perkerasan kaku	Lapis fondasi atas, lapis fondasi bawah, lapis beton semen, dan fondasi jalan.	40
Jalan tanpa penutup	Semua elemen (termasuk fondasi jalan)	Minimum 10

Sumber: Manual Desain Perkerasan Jalan 2017

Menentukan Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas (i)

Menentukan faktor pertumbuhan lalu lintas (i) dapat ditentukan berdasarkan tabel

perkerasan kaku untuk jalan dengan beban lalu lintas berat yang ditinjau yaitu jalan perkotaan yang berada pada pulau Sumatera dengan pertumbuhan lalu lintas 4.83% (Tabel 2).

Tabel 2. Faktor laju pertumbuhan lalu lintas (i) (%)

	Jawa	Sumatera	Kalimantan	Rata-rata Indonesia
Arteri dan perkotaan	4,80	4,83	5,14	4,75
Kolektor rural	3,50	3,50	3,50	3,50
Jalan desa	1,00	1,00	1,00	1,00

Sumber: Manual Desain Perkerasan Jalan 2017

Menentukan Faktor Distribusi Arah dan Lajur

Faktor distribusi arah (DD) umumnya digunakan 0,50 kecuali pada lokasi yang jumlah kendaraan niaganya cenderung lebih tinggi pada satu arah

tertentu. Penentuan nilai faktor distribusi lajur dapat ditentukan berdasarkan Tabel Faktor Laju Pertumbuhan Lalu Lintas (*i*) Pada jalan yang ditinjau terdapat 2 lajur perarah dengan distribusi lajur 80% (Tabel 3).

Tabel 3. Faktor Distribusi Lajur (DL)

Jumlah lajur setiap arah	Kendaraan niaga pada lajur desain (% terhadap populasi kendaraan niaga)
1	100
2	80
3	60
4	50

LHR Harian Rata-rata

Perhitungan tebal perkerasan lentur menggunakan data kendaraan pada hari Minggu 20 Februari 2022 pada pukul 17.00-18.00. Sepeda motor dan kendaraan ringan tidak diperhitungkan dalam perencanaan metoda MDP 2017.

Berdasarkan Tabel 9 dapat diketahui jumlah kendaraan yang banyak dilalui pada ruas Jalan Simpang Anak Aia – Fly Over

adalah Mobil Kendaraan dengan jumlah LHR 9583 kendaraan/hari/2arah dan LHR total untuk perkerasan kaku metoda MDP 2017 adalah 12560 kendaraan/hari/2arah. Perhitungan LHR disampaikan pada apendiks. Pada Tabel 4 dijelaskan rekapitulasi perhitungan LHR kendaraan dalam satuan kendaraan/hari/dua arah .

Tabel 4. Rekapitulasi Perhitungan LHR Tiap Jenis Kendaraan

Jenis Kendaraan	Golongan Kendaraan	LHR (kendaraan/hari/2arah)
Mobil Kendaraan	2	9583
Oplet, Mini Bus	3	63
Pick-up	4	1011
Bus Kecil	5a	38
Bus Besar	5b	0
Truk 2 Sumbu 4 Roda	6a	138
Truk 2 Sumbu 6 Roda	6b	1189
Truk 3 Sumbu	7a	525
Truk Gandeng	7b	0
Truk Semi Trailer	7c	13
Total		12560

Menentukan Volume Kelompok Kendaraan Sumbu Niaga

Perhitungan kumulatif beban (ESA5) untuk umur 20 tahun (2024-2044) dengan menggunakan VDF Tabel Faktor Distribusi

Lajur (DL) dan pertumbuhan lalu lintas 4,83%. Perhitungan ESA5 jenis kendaraan 6A diterangkan pada apendiks. Rekapitulasi nilai komulatif kelompok sumbu kendaraan niaga dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi nilai kumulatif kelompok sumbu kendaraan niaga

Jenis Kendaraan	Lintas Harian Rata-Rata (2 Arah) 2022	LHR 2024	LHR 2027	VDF5 Faktual	VDF5 Normal	ESA5 ('24-'26)	ESA5 ('27-'44)
Mobil Penumpang dan kendaraan ringan lainnya	10657	11711	13492	-	-	-	-
5B	38	42	48	1	1	0	0
6A	138	152	175	0,5	0,5	22673	353145
6B	1189	1307	1505	7,4	4,6	2891130	27992612
7A	525	577	665	18,4	7,4	3174177	19883588
7B	0	0	0	-	-	0	0
7C	13	14	16	29,5	9,6	126014	638731
						CESA5 6213993	48868077
						CESA5 2024-2044	55082070

Berdasarkan Tabel 5 nilai kumulatif kelompok sumbu kendaraan niaga 2024-2044 sebesar 55.08E+06 ESAL.

Menentukan Struktur Pondasi Jalan

Berdasarkan perhitungan nilai CBR dengan 2 metoda didapatkan hasil dengan metoda grafis 7,2% dan metoda analitis 4,81% maka nilai CBR terkecil yang digunakan dalam perencanaan yaitu metoda analitis 4,81%. Berdasarkan Tabel Faktor Distribusi Lajur didapatkan desain fondasi jalan minimum untuk CBR 4,81%, maka didapatkan kelas kekuatan tanah dasar adalah SG.4 yaitu diperlukan perbaikan tanah dasar dengan tebal minimum perbaikan 200 mm.

HASIL DAN ANALISIS

Hasil dan Analisis Pengujian Saat Pencampuran Beton

Hasil dari pengujian *slump* dan bobot isi dengan pasir dan kerikil silika sebagai substitusi agregat pada campuran beton dengan pada sampel silinder dapat dilihat pada Tabel 6 dan sampel balok dapat dilihat pada Tabel 7. Pasir dan kerikil silika yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1. Dari Gambar 1 terlihat bahwa butiran pasir dan kerikil silika lebih kasar dibandingkan pasir dan kerikil alami biasa (Gambar 2), sehingga menghasilkan berat jenis yang lebih tinggi. Sementara butiran

pasir alami banyak yang halus dan kerikil alami permukaannya cenderung bulat atau lonjong.



Gambar 1. Pasir dan kerikil silika



Gambar 2. Pasir dan kerikil alami

Nilai *slump* memiliki batas *slump* rencana yaitu 80 – 120 mm. Namun, pada pembuatan campurannya terdapat beberapa kondisi yang diakibatkan oleh penambahan zat aditif yaitu sikament NN yang memberikan sifat encer pada beton namun cepat dalam proses *setting* beton, sehingga ketika dilakukan pengujian *slump* beton maka didapatkan beton *slump* beton flow.

Tabel 6. Hasil pengujian *slump* dan bobot isi beton sampel silinder

Benda Uji	H1	H2	H3	Rata-Rata
100% pasir alami + kerikil alami	9	9,5	10	9,5
100% pasir alami + kerikil alami + sika	11	10,5	10	10,5
100% pasir silika + kerikil alami + sika	11,5	11	10	10,8
100% pasir alami + kerikil silika + sika	flow	flow	flow	0,0
100% pasir silika + kerikil silika + sika	8	8	8	8,0

Tabel 7. Hasil pengujian *slump* dan bobot isi beton sampel balok

Benda Uji	H1	H2	H3	Rata-Rata
100% pasir alami + kerikil alami	9,5	10	11	10,2
100% pasir alami + kerikil alami + sika	9	8	12	9,7
100% pasir silika + kerikil alami + sika	9	11,5	10	10,2
100% pasir alami + kerikil silika + sika	flow	flow	flow	0,0
100% pasir silika + kerikil silika + sika	flow	flow	flow	0,0

Hasil dan Analisis Pengujian Kuat Tekan Beton

Beberapa variasi pasir dan kerikil silika sebagai substitusi agregat pada campuran beton untuk pengujian kuat tekan sebagai berikut:

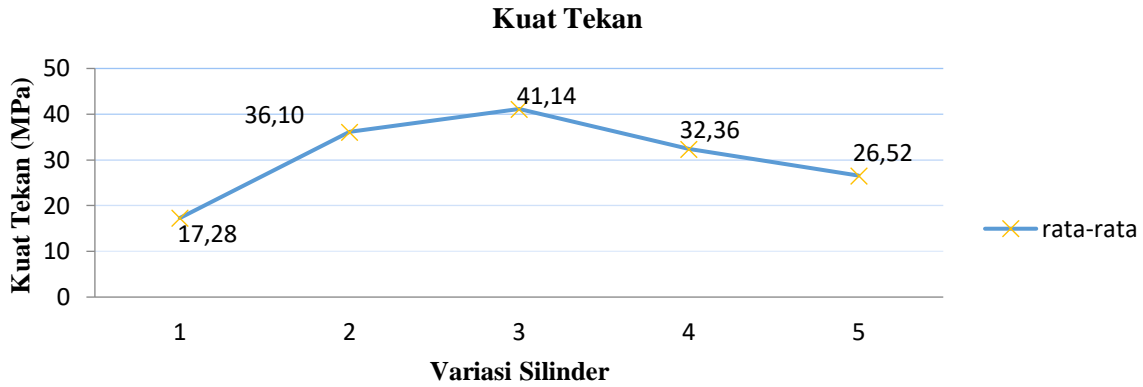
- 1.100 % Pasir alami + Kerikil alami
- 2.100 % Pasir alami + Kerikil alami + Sikament NN
- 3.100% Pasir silika + Kerikil alami + Sikament NN
- 4.100% Pasir alami + Kerikil Silika + Sikament NN
- 5.100% Pasir silika + Kerikil Silika + Sikament NN

Hasil pengujian kuat tekan beton pasir dan kerikil silika sebagai substitusi agregat pada umur 28 hari dapat dilihat pada Tabel 8.

Dari grafik pada Gambar 3 dapat diketahui nilai kuat tekan tertinggi terdapat pada variasi 3 (100% Pasir silika + Kerikil alami + Sikament NN) dengan nilai rata-rata kuat tekan 41,14 Mpa, kemudian beton dengan variasi ke 2 (100 % Pasir alami + Kerikil alami + Sikament NN) dengan kuat tekan 36,10 MPa dan beton variasi ke 4 (100% Pasir alami + Kerikil Silika + Sikament NN) dengan nilai kuat tekan beton 32,36 MPa, sehingga dapat memenuhi kuat tekan rencana dalam penelitian ini yaitu $F_c' 30$ MPa.

Tabel 8. Hasil pengujian kuat tekan 28 hari

Benda Uji	Massa Sampel (kg)	Gaya Tekan (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata
1	12,320	306,59	17,36	17,28
	12,245	299,63	16,96	
	12,545	309,47	17,52	
2	12,41	478,62	39,73	36,10
	12,5	439,68	36,49	
	12,565	386,65	32,09	
3	12,52	483,91	40,16	41,14
	12,50	488,41	40,54	
	12,55	514,76	42,73	
4	12,745	451,88	37,51	32,36
	12,870	374,37	31,07	
	12,885	343,22	28,49	
5	13,255	301,40	25,02	26,52
	12,880	338,48	28,09	
	12,895	318,56	26,44	



Gambar 3. Grafik hasil pengujian kuat tekan beton
Sumber: Hasil pengujian

Hasil dan Analisis Pengujian Kuat Lentur Beton

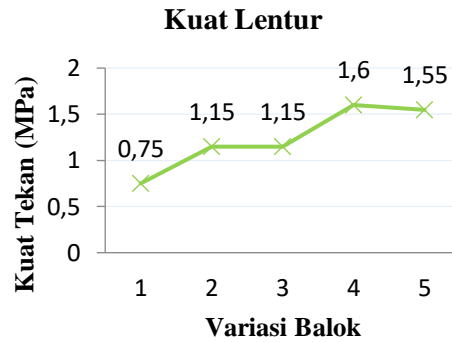
Beberapa variasi pasir dan kerikil silika sebagai substitusi agregat pada campuran beton untuk pengujian kuat lentur sebagai berikut:

1. 100 % Pasir alami + Kerikil alami
2. 100 % Pasir alami + Kerikil alami + Sikament NN
3. 100% Pasir silika + Kerikil alami + Sikament NN
4. 100% Pasir alami + Kerikil Silika + Sikament NN
5. 100% Pasir silika + Kerikil Silika + Sikament NN

Hasil pengujian kuat lentur beton pasir dan kerikil silika sebagai substitusi agregat pada umur 28 hari dapat dilihat pada Tabel 9.

Dari grafik pada Gambar 4. dapat diketahui nilai kuat lentur tertinggi terdapat pada variasi 4 (100% Kerikil Silika + Pasir

alami + Sikament NN) dengan nilai rata-rata kuat tekan 1, 6 MPa.



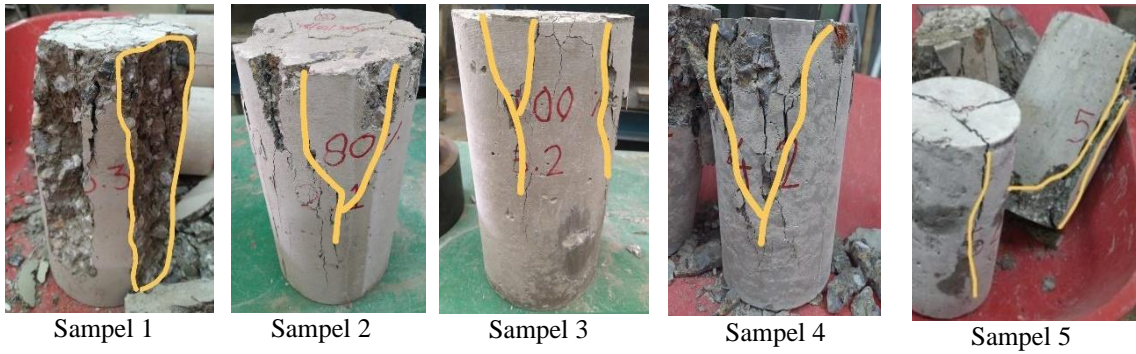
Gambar 4. Grafik hasil pengujian kuat lentur beton
Sumber: Hasil pengujian

Analisis Keretakan pada Benda Uji

Berikut beberapa hasil pola retak benda uji silinder umur 28 hari dapat dilihat pada Gambar 5 dan Tabel 10, dokumentasi lengkap untuk pola retak benda uji 28 hari dapat dilihat pada Apendiks.

Tabel 9. Hasil pengujian kuat lentur 28 hari

Variasi	Massa Sampel (kg)	Notasi (mm)			Gaya Tekan (kN)	Kuat Lentur (MPa)
		l	b	h		
1	31,660	450	150	154	13	0,7
	31,190	450	152	153	14,4	0,8
2	33,065	450	153	153	22,1	1,2
	32,930	450	153	153	21,1	1,1
3	32,915	450	152	153	20,7	1,1
	32,625	450	150	153	21,2	1,2
4	32,905	450	150	150	27,4	1,5
	33,025	450	150	150	28,4	1,6
5	29,215	450	150	150	26,3	1,4
	29,360	450	150	150	32,6	1,8



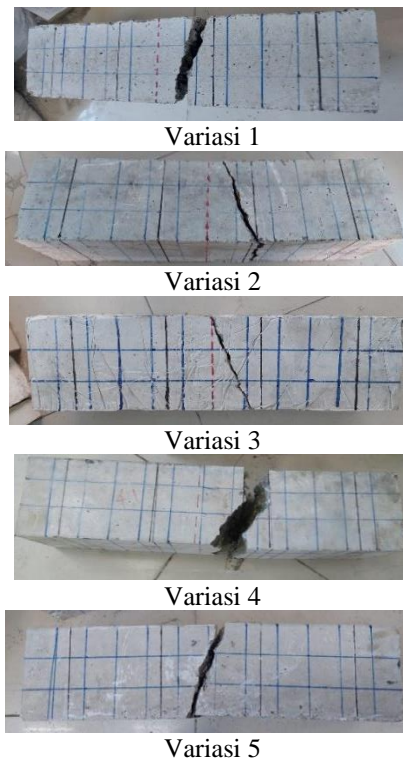
Gambar 5. Contoh pola retak benda uji silinder 28 hari
 Sumber: Hasil pengujian

Tabel 10. Pola retak benda uji silinder umur 28 hari

Variasi	No Sampel	Tipe Pola Retak	Rata-rata
1	1	Tipe 2	Tipe 2
	2	Tipe 2	
	3	Tipe 3	
2	1	Tipe 2	Tipe 2
	2	Tipe 2	
	3	Tipe 2	
3	1	Tipe 3	Tipe 2
	2	Tipe 2	
	3	Tipe 2	
4	1	Tipe 2	Tipe 2
	2	Tipe 2	
	3	Tipe 2	
5	1	Tipe 3	Tipe 3
	2	Tipe 2	
	3	Tipe 3	

Berdasarkan Tabel 10 dapat diketahui bahwa pola retak rata-rata untuk variasi 1 sampai 4 merupakan tipe 2. Tipe pola retak 2 ialah pola retak mulai dari permukaan atas namun tidak sampai permukaan bawah benda uji. Tipe pola retak 1 sampai tipe 5 merupakan pola yang terdefinisi dengan baik dan benda uji sudah mencapai batas kapasitas tekannya (ASTM C33/C33M, 2013).

Pola retak benda uji balok pada saat uji lentur untuk pada variasi 1, 2 dan 3 merupakan tipe 1 yang keretakannya berada di 1/3 bentang tengah, sedangkan pada variasi 2 dan 4 merupakan tipe 2 yang keretakannya berada di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada < 5% dari bentang yang diilustrasikan seperti yang pada Gambar 6. Pola retak untuk tipe 1 dan tipe 2 nilai kuat lenturnya dapat digunakan (ASTM 2002).



Gambar 6. Contoh pola retak benda uji balok
 Sumber: Hasil pengujian

Menentukan Tabel Struktur Lapis Perkerasan

Kumulatif kelompok sumbu kendaraan niaga desain yaitu $55.08E+06$ ESAL, berdasarkan dengan uraian sebagai berikut:

- Umur rencana: 40 tahun (2024 – 2064)
- Tebal pelat beton: 275 mm Lapis beton kurus (LC): 100 mm Lapis
- Pondasi Kelas A: 150 mm

PEMBAHASAN

Pengujian properties material diperoleh, rata-rata berat jenis pasir silika dalam kondisi SSD (Saturated Surface Dry) adalah sebesar 2,84 dan kerikil silika 2,63. Untuk penyerapan, pasir silika 0,73% dan kerikil silika sebesar 1,38%. Kadar air pasir silika sebesar 6,51% dan kerikil silika sebesar 2,04%. Peran pasir dan kerikil silika dapat dilihat dalam meningkatkan kuat tekan dari beton normal setelah penambahan material silika dengan hasil kuat tekan dan kuat tarik lentur optimum diperoleh sebesar 41,14 MPa dan 1,6 MPa. Penambahan pasir dan kerikil silika juga berperan dalam menahan retak pada benda uji silinder dapat dilihat dari bentuk keruntuhan yang semakin mengerucut ke atas seiring dengan penambahan variasi penggunaan material agregat silika.

Hal ini membuktikan bahwa material agregat silika yang ada pada beton menghambat jalur retak yang terjadi dimana semakin besar variasi penambahan material agregat silika maka semakin pendek jalur retak yang dihasilkan. Pada benda uji balok, pola retak adalah retak lentur. Dengan bertambahnya variasi material agregat silika, retak lentur yang dihasilkan akan semakin memanjang.

Kasiati, Wibowo dan Sukaptini (2012) menemukan bahwa kuat tekan tertinggi pada varian 0% adalah sebesar 401,27 kg/cm² yang diperoleh dari campuran pasir silika dengan pasir limbah dari cetakan besi cor dengan komposisi 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% serta abu terbang (fly ash) 20%. Penelitian oleh Antonius, Andhy dan Sutopo (2017), menyatakan bahwa sifat kelecakan, kuat tarik, kuat tekan, kuat lentur, modulus elastisitas dan nilai poisson beton memiliki karakteristik yang kurang lebih sama diperoleh dengan beton K-200 hingga K-300.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan perencanaan yang telah dilakukan diperoleh kesimpulan Pencapaian nilai kuat tekan tertinggi beton didapat pada variasi beton ke 3 dengan campuran beton 100% Pasir silika + Kerikil alami + Sikament NN dengan nilai kuat tekan sebesar 41,14 MPa. Untuk nilai kuat lentur optimum didapat pada campuran beton dengan variasi ke 4 yaitu 100% Pasir alami + Kerikil Silika + Sikament NN dengan nilai kuat lentur 1,6 MPa. Berdasarkan hasil tersebut dalam perencanaan jalan, digunakan variasi beton ke 4 sebagai variasi yang akan diterapkan dengan dasar nilai kuat lentur optimumnya dan juga dengan nilai kuat tekan yang juga melebihi dari kuat tekan rencana yaitu $32,36 \text{ MPa} > F_c' 30 \text{ MPa}$.

Perencanaan perkerasan kaku pada Jalan Simpang Anak Aia – Fly Over Bandara Internasional Minangkabau STA 22+800 s/d STA 22+800 menggunakan metoda MDP2017 didapatkan tebal perkerasan yaitu setebal 27,5 cm. Maka dapat disimpulkan hasil dari penelitian dan perencanaan tebal perkerasan kaku ini dapat digunakan sebagai alternatif pada perkerasan kaku dan juga mengurangi limbah hasil tambang berupa material agregat silika yang ada di lingkungan.

Peran pasir dan kerikil silika dapat dilihat dalam meningkatkan kuat tekan dari beton normal setelah penambahan material silika, juga berperan dalam menahan retak pada benda uji silinder dapat dilihat dari bentuk keruntuhan yang semakin mengerucut ke atas seiring dengan penambahan variasi penggunaan material agregat silika. Hal ini membuktikan bahwasanya material agregat silika yang ada pada beton menghambat jalur retak yang terjadi dimana semakin besar variasi penambahan material agregat silika maka semakin pendek jalur retak yang dihasilkan. Sementara pada benda uji balok pola retak yang dihasilkan merupakan retak lentur, dimana retak lentur yang dihasilkan semakin memanjang seiring dengan penambahan variasi material agregat silika.

Saran

Untuk penelitian selanjutnya disarankan menguji variasi pasir dan kerikil silika yang berbeda seperti komposisi 25%, 50%, dan 75% dan umur pengujian 56 hari dan 91 hari baik untuk pengujian kuat tekan maupun kuat lentur, sehingga bisa dilihat dan dianalisis perbedaan hasilnya. Pemilihan komposisi ini untuk membandingkan hasil uji kuat tekan dan kuat tarik lentur dengan persentase yang berbeda, dikarenakan keterbatasan waktu pada penelitian ini, tidak semua komposisi bisa diuji. Sehingga hasil yang ada bisa lebih disempurnakan untuk perbaikan penelitian ini kedepannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagai wujud penghargaan dalam penyusunan jurnal ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Padang atas dibiayainya penelitian ini dengan Dana DIPA Nomor: 160/PL9.15/PG/2022, tanggal 19 Mei 2022, dan kepada Tim Lapangan yang telah banyak membantu.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, A. Fachri. 2018. Evaluasi Biaya Konsumsi Kendaraan pada Penggunaan Perkerasan Kaku Ruas Jalan Kabupaten. Skripsi. Program Studi Teknik Sipil. Fakultas Teknik. Universitas Sebelas Maret.
- Antonius, Andhy, Djoko Susilo., dan Sutopo, Rochim. 2017. "Efektivitas Pasir Kuarsa Sebagai Agregat Halus pada sifat Mekanik Beton". Prosiding Seminar Nasional, Kebijakan dan Strategi Dalam Pembangunan Infrastruktur dan Pengembangan Wilayah Berbasis Green Technology. 49-55..
- Adi, Ari Sasmoko. 2018. Analisa Penggunaan Pasir Silika Sebagai Pengganti Agregat Halus Pada Campuran Beton. *Jurnal Riset Pembangunan* 1(1): 36-47.
- American Standard Testing and Material (ASTM). 2013. ASTM C33/C33M-13: *Standard Specification for Concrete Aggregates*. Pennsylvania: ASTM
- American Standard Testing and Material (ASTM). 2003. ASTM C125-03: Standard Terminology Relating To Concrete And Concrete Aggregates. Pennsylvania: ASTM.
- American Standard Testing and Material (ASTM). 2010. ASTM C31: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. Pennsylvania: ASTM.
- American Standard Testing and Material (ASTM). 2017. ASTM C494 / C494M-05: *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. Pennsylvania: ASTM.
- American Standard Testing and Material (ASTM). 2019. ASTM C138 / C138M: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete eLearning Course. Pennsylvania: ASTM.
- American Standard Testing and Material (ASTM). 1995. ASTM C117-13: Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No 200) Sieve on Mineral Aggregates by Washing. Pennsylvania: ASTM.
- American Standard Testing and Material (ASTM). 2014. ASTM C39/C39M – 01: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Pennsylvania: ASTM.
- American Standard Testing and Material (ASTM). 2015. ASTM C143: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. Pennsylvania: ASTM.
- Kasti, Endang., Wibowo, Boedi., Sukaptini, Endang Sri. 2012, "Perubahan Kuat Tekan Optimum Beton pada Komposisi Campuran Pasir Silika dengan Pasir Limbah. Prosiding Manajemen dan Rekayasa Struktur". Seminar Nasional, Aplikasi Teknologi Prasarana Wilayah (ATPW), Surabaya.
- Nadia, dan Fauzi, A. 2011. Pengaruh Kadar Silika Pada Agregat Halus Campuran Beton Terhadap Peningkatan Kuat Tekan. *Kontruksia*, 3(1), 35–43.
- Rijal, Syamsur. 2018. "Formulasi Model Optimalisasi Komposisi Bahan Baku untuk Mencapai Standar Kualitas Klinker (Studi Kasus di Indarung IV PT Semen Padang)". Thesis, Universitas Andalas.
- Wicaksana, I. Wayan Krisna., Wijoyo, Taufik Adi., Yolanda, Tricya., Chintami, R. Dian., Dzaki, Tubagus Naufal. 2014. Serat Ampas Tebu untuk Beton sebagai Usaha Meningkatkan Kuat Tarik Beton. Usulan Program Kreativitas Mahasiswa Universitas Diponegoro, Semarang.

APENDIKS

Perhitungan LHR

Tabel 11. Jumlah Kendaraan Desain Fly Over – Simpang Anak Aia

Waktu	Golongan Kendaraan									
	2	3	4	5a	5b	6a	6b	7a	7b	7c
17.00-17.15	104	1	15	0	0	0	18	9	0	0
17.15-17.30	104	0	13	1	0	4	10	4	0	0
17.30-17.45	132	0	12	0	0	2	10	5	0	0
17.45-18.00	90	1	20	2	0	1	13	7	0	1
Total	430	2	60	3	0	7	51	25	0	1

Tabel 12. Jumlah Kendaraan Desain Simpang Anak Aia – Fly Over

Waktu	Golongan Kendaraan									
	2	3	4	5a	5b	6a	6b	7a	7b	7c
17.00-17.15	79	0	6	0	0	2	15	4	0	0
17.15-17.30	77	2	14	0	0	0	5	7	0	0
17.30-17.45	92	1	6	0	0	1	9	4	0	0
17.45-18.00	85	0	5	0	0	1	10	2	0	0
Total	333	3	31	0	0	4	39	17	0	0

1. Penumpang (Golongan 2)

VJP1 = Jumlah kendaraan Fly Over – Simpang Anak Aia
= 430 Kendaraan

VJP2 = Jumlah kendaraan Simpang Anak Aia – Fly Over
= 333 Kendaraan

Faktor D = $VJP \text{ terbesar} / (VJP_{\text{total}}) \times 100\%$
= $430 / (430+333) \times 100\%$
= 56.35%

Nilai k = 8% (**Tabel Nilai Faktor k**)

LHR = $VJP1 / (k \times D)$
= $430 / (8\% \times 56.35\%)$
= 9583 kendaraan/hari/2 arah

2. Opelet dan Mini Bus (Golongan 3)

VJP1 = Jumlah kendaraan Fly Over – Simpang Anak Aia
= 2 Kendaraan

VJP2 = Jumlah kendaraan Simpang Anak Aia – Fly Over
= 3 Kendaraan

Faktor D = $VJP_{\text{terbesar}} / (VJP_{\text{total}}) \times 100\%$
= $3 / (3+2) \times 100\%$
= 60%

Nilai k = 8% (**Tabel Nilai Faktor k**)

LHR = $VJP2 / (k \times D)$
= $3 / (8\% \times 60\%)$
= 63 kendaraan/hari/2 arah

3. Pick-up (Golongan 4)

VJP1 = Jumlah kendaraan Fly Over – Simpang Anak Aia
= 60 Kendaraan

VJP2 = Jumlah kendaraan Simpang Anak Aia – Fly Over
= 31 Kendaraan

- Faktor D = $VJP_{\text{terbesar}} / (VJP_{\text{total}}) \times 100\%$
= $60 / (60+31) \times 100\%$
= 65.93%
- Nilai k = 8% (**Tabel Nilai Faktor k**)
LHR = $VJP1 / (k \times D)$
= $60 / (8\% \times 65.93\%)$
= 1011 kendaraan/hari/2 arah
4. Bus Kecil (Golongan 5a)
VJP1 = Jumlah kendaraan Fly Over – Simpang Anak Aia
= 3 Kendaraan
VJP2 = Jumlah kendaraan Simpang Anak Aia – Fly Over
= 0 Kendaraan
Faktor D = $VJP_{\text{terbesar}} / (VJP_{\text{total}}) \times 100\%$
= $3 / (3+0) \times 100\%$
= 100%
- Nilai k = 8% (**Tabel Nilai Faktor k**)
LHR = $VJP1 / (k \times D)$
= $3 / (8\% \times 100\%)$
= 38 kendaraan/hari/2 arah
5. Truk 2 Sumbu 4 Roda (Golongan 6a)
VJP1 = Jumlah kendaraan Fly Over – Simpang Anak Aia
= 7 Kendaraan
VJP2 = Jumlah kendaraan Simpang Anak Aia – Fly Over
= 4 Kendaraan
Faktor D = $VJP_{\text{terbesar}} / (VJP_{\text{total}}) \times 100\%$
= $7 / (7+4) \times 100\%$
= 63.63%
- Nilai k = 8% (**Tabel Nilai Faktor k**)
LHR = $VJP1 / (k \times D)$
= $7 / (8\% \times 63.63\%)$
= 138 kendaraan/hari/2 arah
6. Truk 2 Sumbu 6 Roda (Golongan 6b)
VJP1 = Jumlah kendaraan Fly Over – Simpang Anak Aia
= 51 kendaraan
VJP2 = Jumlah kendaraan Simpang Anak Aia – Fly Over
= 39 kendaraan
Faktor D = $VJP_{\text{terbesar}} / (VJP_{\text{total}}) \times 100\%$
= $51 / (51+39) \times 100\%$
= 56.6%
- Nilai k = 8% (**Tabel Nilai Faktor k**)
LHR = $VJP1 / (k \times D)$
= $51 / (8\% \times 56.6\%)$
= 1189 kendaraan/hari/2 arah
7. Truk 3 Sumbu (Golongan 7a)
VJP1 = Jumlah kendaraan Fly Over – Simpang Anak Aia
= 25 Kendaraan
VJP2 = Jumlah kendaraan Simpang Anak Aia – Fly Over
= 17 Kendaraan
Faktor D = $VJP_{\text{terbesar}} / (VJP_{\text{total}}) \times 100\%$
= $25 / (25+17) \times 100\%$

$$\begin{aligned}
&= 59.52\% \\
\text{Nilai k} &= 8\% \text{ (Tabel Nilai Faktor k)} \\
\text{LHR} &= \text{VJP1} / (\text{k} \times \text{D}) \\
&= 25 / (8\% \times 59.52\%) \\
&= 525 \text{ kendaraan/hari/2arah} \\
8. \text{ Truk Semi Trailer (Golongan 7c)} \\
\text{VJP1} &= \text{Jumlah kendaraan Fly Over – Simpang Anak Aia} \\
&= 1 \text{ Kendaraan} \\
\text{VJP2} &= \text{Jumlah kendaraan Simpang Anak Aia – Fly Over} \\
&= 0 \text{ Kendaraan} \\
\text{Faktor D} &= \text{VJPterbesar}/(\text{VJPtotal}) \times 100\% \\
&= 1 / (1+0) \times 100\% \\
&= 100\% \\
\text{Nilai k} &= 8\% \text{ (Tabel Nilai Faktor k)} \\
\text{LHR} &= \text{VJP2} / (\text{k} \times \text{D}) \\
&= 1 / (8\% \times 100\%) \\
&= 13 \text{ kendaraan/hari/2 arah}
\end{aligned}$$

Perhitungan ESA5 jenis kendaraan 6A

Berikut merupakan contoh perhitungan ESA5 jenis kendaraan 6A :

- Lintas harian rata-rata 2 arah 2022 = 138
- Pertumbuhan lalu lintas = 4.83%
- Nilai DD = 0.5
- Nilai DL = 0.8
- VDF Faktual = 0.5 (Tabel Faktor Distribusi Lajur (DL))
- VDF Normal = 0.5 (Tabel Faktor Distribusi Lajur (DL))
- R(24-26) = 2.048
- R(27-44) = 27.69
- LHR 2024 = LHR 2 arah 2021 x (1 + 0.0483)³
= 138 x (1 + 0.0483)³
= 152
- LHR 2026 = LHR 2 arah 2021 x (1 + 0.0483)⁵
= 138 x (1 + 0.0483)⁵
= 175
- ESA5(24-26) = LHR 2024 x VDF5 Faktual x 365 x DD x DL
x R
= 152 x 0.5 x 365 x 0.5 x 0.8 x 2.048
= 2.26E+04
- ESA5(27-44) = LHR 2026 x VDF5 Normal x 365 x DD x DL
x R
= 175 x 0.5 x 365 x 0.5 x 0.8 x 27.69
= 3.53E+05

**ANALISIS *BLACKSPOT* DI INDONESIA BERDASARKAN
PERBEDAAN KONDISI JALAN, FATALITAS KECELAKAAN, DAN
ANALISIS RISIKO
(*THE ANALYSIS OF BLACKSPOT IN INDONESIA BASED ON ROAD
CONDITION DIFFERENCE, ACCIDENT FATALITY, AND RISK
ANALYSIS*)**

Anastasia Caroline Sutandi

Universitas Katolik Parahyangan
Jl. Ciumbuleuit 94 Bandung 40141
e-mail: caroline@unpar.ac.id

Diterima: 15 Februari 2023 ; direvisi: 04 April 2023; disetujui: 15 Mei 2023.

ABSTRAK

Blackspot adalah lokasi yang dinyatakan rawan karena jumlah kecelakaan yang tinggi. Terdapat banyak definisi *blackspot*, berdasarkan negara, lokasi, dan tingkat keparahan korban kecelakaan lalu lintas jalan (kecelakaan). Salah satu definisi *blackspot* di Indonesia, yaitu lokasi sepanjang 300 – 500 meter dengan jumlah kecelakaan yang tinggi. *Blackspot* pada umumnya hanya dianalisis berdasarkan jumlah korban dan keparahan korban kecelakaan saja. Dalam studi ini *blackspot* dianalisis berdasarkan 3 kriteria (1) perbedaan kondisi jalan, (2) jumlah korban kecelakaan meninggal dunia, dan (3) analisis risiko dalam satuan waktu tertentu. Perbedaan kondisi jalan ditinjau dari kondisi geometrik jalan, kondisi permukaan perkerasan jalan, dan kondisi perlengkapan jalan. Jumlah korban kecelakaan meninggal diambil dari data Kepolisian Republik Indonesia atau dari Biro Pusat Statistik (BPS). Analisis risiko adalah analisis yang menentukan nilai risiko, kategori risiko, dan rekomendasi aksi untuk mengurangi jumlah kecelakaan dan tingkat keparahan korban kecelakaan yang terjadi. Selanjutnya, dilakukan perbandingan antara penentuan lokasi *blackspot* berdasarkan jumlah dan keparahan korban kecelakaan dengan penentuan lokasi *blackspot* berdasarkan 3 kriteria dalam studi ini. Hasil dari analisis berdasarkan 3 kriteria menunjukkan bahwa penentuan lokasi *blackspot* lebih akurat. Hasil analisis *blackspot* dalam studi ini lebih akurat dan detail serta dapat digunakan di seluruh lokasi di Indonesia dengan menggunakan data kecelakaan yang lengkap, tepat, dan up to date, agar hasilnya sah dan bermanfaat untuk menggambarkan kondisi riil sebenarnya.

Kata Kunci: analisis *blackspot*, perbedaan kondisi jalan, fatalitas kecelakaan, analisis risiko, Indonesia

ABSTRACT

Blackspot is a prone location with a high number of accidents. There are a number of definitions of *blackspot*, i.e. based on country, location, and the severity of road traffic accidents (accidents). One definition of *blackspot* in Indonesia is a location of 300 up to 500 meters long with a high number of accidents. Usually, *blackspot* is only analyzed based on the number of accidents and the severity of accidents. In this study, *blackspot* is analyzed based on 3 criteria i.e. (1) differences in road conditions, (2) the number of accident fatality, and (3) risk analysis in a specific time period. The differences in road conditions in terms of geometric conditions, road pavement surface conditions, and road furniture conditions. The number of accident fatality data can be taken from the National Police of the Republic of Indonesia or from the Central Bureau of Statistics in Indonesia. Risk analysis is an analysis to determine the risk value, risk category, and action recommendation in order to reduce the number of accidents and the fatality of the accident. Furthermore, comparison is carried out between determination of *blackspot* location based on the number and the severity of accident and those based on the three criteria. The results based on the three criteria show that determination of *blackspot* location is more accurate. The results of the study produce a more accurate and detailed *blackspot* analysis and can be used in all locations in Indonesia using complete, accurate, and up-to-date accident data, so that the results are valid and useful for explaining actual real conditions.

Keywords: *blackspot* analysis, road condition difference, accident fatality, risk analysis, Indonesia

PENDAHULUAN

Penentuan lokasi *blackspot* sangat diperlukan untuk meningkatkan keselamatan jalan dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat, terutama jika korban kecelakaan adalah tulang punggung atau kepala keluarga (Sutandi 2022; Korps Lalu Lintas 2019, BPS 2010-2020). Di lokasi ini berbagai *treatment* dilakukan seperti perbaikan manajemen lalu lintas, perbaikan kondisi jalan, pemasangan rambu-rambu lalu lintas, sampai dengan penerapan *Intelligent Transportation Systems - ITS* (HPJI JABAR 2021; Amgalan and Purevdorj 2019; Hsu, Chang and Wen 2019; Sutandi and Santosa 2013) sehingga diharapkan bahwa jumlah fatalitas dan tingkat fatalitas kecelakaan lalu lintas jalan (kecelakaan) di lokasi tersebut dapat berkurang.

Di Indonesia, *blackspot* berarti lokasi rawan kecelakaan dimana terdapat jumlah kejadian yang tinggi dari kecelakaan yang menyebabkan korban meninggal dunia di sepanjang lokasi sepanjang 300 sampai dengan 500 meter. Lokasi *blackspot* dapat terjadi di ruas jalan atau di persimpangan. Istilah lain adalah *blacklink* yang berarti lokasi rawan kecelakaan sepanjang 1 sampai 20 km dimana jumlah kecelakaan yang menyebabkan korban meninggal dunia, tinggi. Sedangkan *blackarea* berarti suatu lokasi rawan kecelakaan yang mencakup area seluas kecamatan bahkan seluas kota atau kabupaten, dimana manajemen lalu lintas perlu diterapkan (Korps Lalu Lintas 2011).

Definisi *blackspot* di berbagai negara juga berbeda-beda. Di Australia *blackspot* didefinisikan sebagai lokasi dimana paling sedikit terjadi tiga korban kecelakaan dalam lima tahun atau terjadi rata-rata 0,2 korban kecelakaan per km per tahun dalam lima tahun (*Department of Infrastructure, Transport, Regional development, Communications, and the Arts, Australian Government, 2021*). Di Norwegia *blackspot* didefinisikan sebagai ruas jalan dengan Panjang maksimum 100 meter dengan minimum 4 kejadian kecelakaan yang menyebabkan korban luka (Alonso et al. 2016).

Studi-studi analisis *blackspot* terdahulu didasarkan atas jumlah korban kecelakaan lalu lintas jalan (kecelakaan) atau tingkat keparahan korban kecelakaan saja, antara lain penentuan

lokasi *blackspot* di jalan tol Purbaleunyi, Jawa Barat (Sutandi and Gosolim 2013), penentuan lokasi *blacksite* di Pantura Jawa (Farida, Santosa and Sutandi 2022), penentuan dan pengkajian *blackspot* menurut Kepolisian Negara Republik Indonesia (Korps Lalu Lintas 2011), dan identifikasi lokasi *blacksite* untuk meningkatkan keselamatan jalan dan mengurangi jumlah kecelakaan (Nguyen, Huy Hu, Taneerananon, Pichai, Koren, Csaba, 2015), dan identifikasi lokasi *blackspot* di jalan raya (Iqbal et al.2020).

Sedangkan dalam studi ini, *blackspot* tidak hanya dikaji berdasarkan jumlah korban kecelakaan saja, dimana analisis *blackspot* adalah berdasarkan tiga kriteria, yaitu perbedaan kondisi jalan (kondisi geometrik jalan, kondisi permukaan perkerasan jalan, dan kondisi perlengkapan jalan), jumlah korban kecelakaan meninggal dunia, dan analisis risiko. Kajian ilmiah ini dianalisis menggunakan data kecelakaan sebenarnya untuk menunjukkan adanya risiko terjadinya kecelakaan berdasarkan tiga kriteria, sebagai pembandingan terhadap penanganan praktis menggunakan jumlah dan keparahan korban kecelakaan saja.

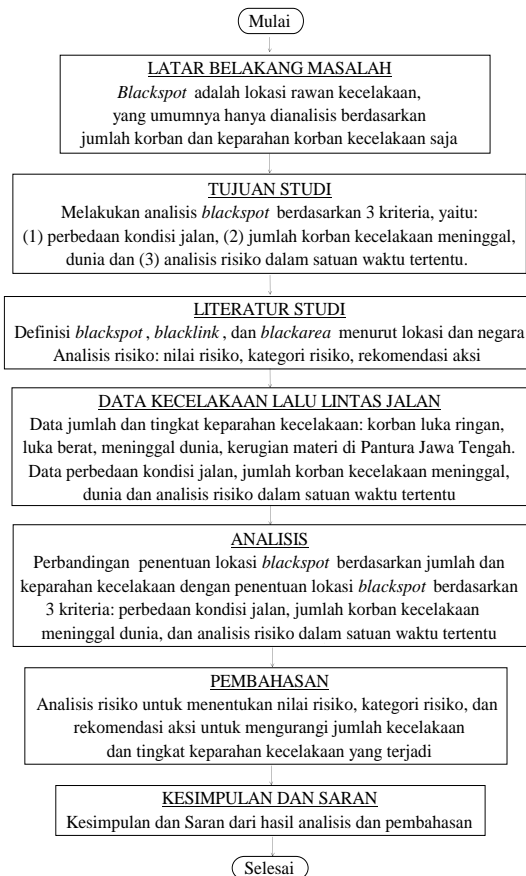
HIPOTESIS

Perbandingan antara penentuan lokasi *blackspot* berdasarkan jumlah dan keparahan kecelakaan saja dan penentuan lokasi *blackspot* berdasarkan 3 kriteria dalam studi ini, yaitu perbedaan kondisi jalan, jumlah korban kecelakaan meninggal dunia, dan analisis risiko dalam satuan waktu tertentu akan menghasilkan bahwa penentuan lokasi *blackspot* berdasarkan 3 kriteria lebih akurat, detail, dan menggambarkan kondisi riil di lapangan.

METODOLOGI

Langkah-langkah Penelitian

Langkah-langkah penelitian dalam studi ini disajikan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Langkah-langkah penelitian

Metode

Metode dalam kedua kondisi dalam studi ini dijelaskan sebagai berikut:

Kondisi 1:

Metode yang digunakan dalam analisis lokasi *blackspot* berdasarkan jumlah dan keparahan korban kecelakaan saja, adalah sesuai dengan modul yang digunakan Korps Lalu Lintas Kepolisian Negara Republik Indonesia dalam penentuan dan pengkajian *blackspot* dengan Nilai Bobot seperti tersaji dalam Tabel 1 (Korps Lalu Lintas 2011). Metode ini yang biasa digunakan dalam penelitian-penelitian terdahulu.

Tabel 1. Nilai bobot dalam kajian lokasi *blackspot* berdasarkan jumlah dan keparahan kecelakaan saja (Korps Lalu Lintas 2011)

Nomor	Kondisi terparah per kejadian kecelakaan	Nilai bobot
1	Luka ringan (LR)	1
2	Luka berat (LB)	5
3	Meninggal dunia (MD)	10

Hasil perhitungan pembobotan menggunakan Nilai Bobot dalam Tabel 1 tersaji dalam persamaan 1.

$$\text{Hasil Pembobotan} = \text{jumlah LR} \times \text{Nilai Bobot}_{\text{LR}} (1) + \text{jumlah LB} \times \text{Nilai Bobot}_{\text{LB}} (5) + \text{jumlah MD} \times \text{Nilai Bobot}_{\text{MD}} (10) \dots\dots\dots (1)$$

Jika hasil pembobotan minimum bernilai tiga puluh (30) maka lokasi tersebut dapat dikatakan sebagai lokasi *blackspot* (Korps Lalu Lintas 2011).

Kondisi 2:

Metode yang digunakan dalam analisis lokasi *blackspot* dalam studi ini adalah berdasarkan 3 kriteria, yaitu perbedaan kondisi jalan dengan standar teknis, jumlah korban kecelakaan meninggal dunia, dan analisis risiko dalam satuan waktu tertentu. Metode ini lebih akurat, detail, dan menggambarkan kondisi riil di lapangan karena tidak hanya berdasarkan jumlah dan keparahan korban kecelakaan saja. Ketiga kriteria dalam analisis yang dilakukan disajikan dalam Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4.

Tabel 2. Probabilitas terjadinya kecelakaan karena perbedaan pengukuran dimensi di lapangan dengan standar teknis

Perbedaan pengukuran dimensi di lapangan dengan standar teknis	Probabilitas jumlah kecelakaan	Nilai 1 kuantitatif
0% – 10%	< 1	1
11% – 25%	1 – 5	2
26% – 50%	6 – 10	3
51% – 75%	11 – 15	4
76% – 100%	>15	5

Tabel 3. Dampak keparahan korban kecelakaan

Keparahan korban kecelakaan	Dampak keparahan Korban kecelakaan	Nilai 2 kuantitatif
Kerusakan <i>property</i> saja	Sangat ringan	2
Luka ringan	Ringan	4
Luka ringan berpotensi menjadi luka berat	Sedang	6
Luka berat	Berat	8
Meninggal dunia	Sangat berat	10

Tabel 4. Analisis risiko dan rekomendasi aksi untuk mengurangi jumlah kecelakaan dan tingkat keparahan korban akibat kecelakaan

Analisis Risiko		Program Aksi
Nilai risiko	Kategori risiko	
0 – 20	Sangat tidak berbahaya (STB)	Pemeliharaan rutin
21 – 40	Tidak berbahaya (TB)	Pemeliharaan preventif
41– 60	Cukup berbahaya (CB)	Pemeliharaan berkala
61 – 80	Berbahaya (B)	Rehabilitasi
81 – >100	Sangat berbahaya (SB)	Rekonstruksi

Tabel 2 menyajikan probabilitas atau kemungkinan terjadinya kecelakaan karena perbedaan pengukuran dimensi di lapangan dengan standar teknis. Pengukuran yang dilakukan di lapangan adalah pengukuran kondisi geometrik jalan, kondisi permukaan perkerasan jalan, dan kondisi perlengkapan jalan. Tabel 3 menyajikan dampak keparahan korban kecelakaan (Sutandi, A. Caroline and Santosa, Wimpy, 2013; Direktorat Jenderal Bina Marga and IndII, 2010; Mulyono, Kushari dan Gunawan 2009), dan Tabel 4 menyajikan analisis risiko dan rekomendasi aksi untuk mengurangi jumlah kecelakaan dan tingkat keparahan korban berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 13/PRT/M/2011 Tentang Tata Cara Pemeliharaan dan Penilikan Jalan. (PUPR, 2011)

Perbedaan pengukuran, nilai 1 kuantitatif, dan nilai 2 kuantitatif dibuat pembagian yang proporsional ordinal/berjenjang seperti skala likert dalam metoda statistika (Ott and Longnecker 2010)

Data Kecelakaan Lalu Lintas

Data jumlah korban luka ringan, luka berat, dan meninggal dunia akibat kecelakaan lalu lintas di jalan (kecelakaan) berasal dari jalan nasional Pantura Jawa Tengah selama setahun. Data ini digunakan karena tercatat dengan lengkap dan akurat dalam setahun, disertai dengan informasi tambahan tentang kondisi pada saat kejadian kecelakaan, seperti kondisi geometrik jalan yang lurus, kondisi permukaan jalan baik, dan kondisi cuaca cerah (Sutandi, A. Caroline and Santosa, Wimpy, 2013). Data ini disajikan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Data jumlah korban kecelakaan di jalan nasional Pantura Jawa Tengah selama setahun

Lokasi Kecelakaan	LR (org)	LB (org)	MD (org)	Jml Kecelakaan
1	0	0	1	8
2	2	1	0	6
3	1	1	1	8
4	1	1	1	7
5	1	1	1	4
6	2	1	1	15
7	0	0	1	5
8	1	1	1	5
9	0	0	1	4
10	0	0	1	4
11	1	1	1	3
12	0	2	1	3
13	1	1	0	5
14	1	0	1	6
15	0	0	1	6
16	0	0	1	3

LR=luka ringan LB=luka berat MD=meninggal dunia

Keterangan Lokasi:

1. Jl. Diponegoro, Wanasari Brebes.
2. Jl. Ciptomangunkusumo, Kaliangsa, Margadana, Tegal.
3. Jl. Raya Pantura. Kedungkelor, Demangharjo, Warurejo, Tegal.
4. Jl. Petarukan, Pemalang km - 128 Semarang – Cirebon.
5. Jl. Raya A. Yani, km 109 Wiradesa, Pekalongan.
6. Jl. Sutomo, Pekalongan.
7. Jl. Raya Jatisari, Suban Batang km - 71 Semarang Cirebon.
8. Jl. Raya Tulis, Tulis Batang km - 82 Semarang Cirebon.
9. Jl. Raya Kandeman, Batang, km - 88 Semarang Cirebon.
10. Jl. Raya Soekarno Hatta, km - 80 Kendal.
11. Jl. Raya Kaligawe, Depan CPU Pakan Ternak Kali Babon Semarang.
12. Jl. Perintis Kemerdekaan, Watugong Semarang.
13. Jl. Raya Karangtowo, Karangtengah, Demak km - 18.700 Semarang – Cirebon.
14. Jl. Kudus -Pati, Desa Gondoharum Jekulo, Kudus.
15. Jl. Pati - Kudus, Desa Sukoharjo Margorejo, Pati.
16. Jl. Raya Pati Juwana, Desa Widoro Kandang Depan SPBU Cangkring, Pati.

Sumber: Kepolisian Daerah Jawa Tengah (2011)

HASIL DAN ANALISIS

Analisis lokasi *blackspot* dilakukan berdasarkan dua kondisi. Pertama, berdasarkan jumlah dan keparahan korban kecelakaan saja, sesuai dengan Modul Penentuan dan

Pengkajian *Blackspot* bagi Kepolisian Negara Republik Indonesia dan Korps Lalu Lintas Kepolisian Negara Republik Indonesia (Korps Lalu Lintas 2011). Kedua, berdasarkan 3 kriteria dalam studi ini, yaitu perbedaan kondisi jalan, jumlah dan keparahan korban kecelakaan, dan analisis risiko. Ketiga kriteria ini menggambarkan kondisi eksisting/ riil di lokasi kejadian kecelakaan tersebut. Lokasi kejadian kecelakaan dalam Tabel 1 dianggap terjadi dalam rentang 300 sampai 500 meter.

Analisis lokasi *Blackspot* berdasarkan jumlah dan keparahan korban kecelakaan saja

Analisis dilakukan berdasarkan data jumlah dan keparahan korban kecelakaan per tahun pada Tabel 5 dan Nilai bobot dalam kajian lokasi *blackspot* berdasarkan jumlah dan keparahan kecelakaan pada Tabel 1.

Hasil analisis disajikan dalam Tabel 6. Hasil pembobotan dalam Tabel 6 diperoleh dari jumlah LR x Nilai Bobot_{LR} (1) + jumlah LB x Nilai Bobot_{LB} (5) + jumlah MD x Nilai Bobot_{MD} (10). Jika hasil pembobotan minimum bernilai tiga puluh (30) maka lokasi tersebut dapat dikatakan sebagai lokasi *blackspot*.

Tabel 6. Penentuan lokasi *blackspot* berdasarkan keparahan korban kecelakaan saja

Lokasi Kecelakaan	LR (org)	LB (org)	MD (org)	Jml Kecelakaan	Hasil Pembobotan
n	(org)			n	n
1	0	0	1	8	10
2	2	1	0	6	7
3	1	1	1	8	16
4	1	1	1	7	16
5	1	1	1	4	16
6	2	1	1	15	17
7	0	0	1	5	10
8	1	1	1	5	16
9	0	0	1	4	10
10	0	0	1	4	10
11	1	1	1	3	16
12	0	2	1	3	20
13	1	1	0	5	6
14	1	0	1	6	11
15	0	0	1	6	10
16	0	0	1	3	10

LR=luka ringan LB=luka berat MD=meninggal dunia

Karena hasil pembobotan dalam Tabel 6 tidak ada yang bernilai minimal 30, maka menurut analisis *blackspot* berdasarkan data jumlah dan keparahan korban kecelakaan saja, tidak ada lokasi yang dapat dinyatakan sebagai lokasi *blackspot*.

Analisis lokasi *Blackspot* berdasarkan 3 kriteria

Analisis dilakukan berdasarkan data jumlah dan keparahan korban kecelakaan per tahun pada Tabel 5, Probabilitas terjadinya kecelakaan karena perbedaan pengukuran dimensi di lapangan dengan standar teknis pada Tabel 2, dampak keparahan korban kecelakaan pada Tabel 3, dan analisis risiko dan rekomendasi aksi pada Tabel 4.

Nilai 2 Kuantitatif pada Tabel 3, dampak keparahan korban kecelakaan, dari sangat ringan sampai dengan sangat berat, disesuaikan dengan Nilai Bobot pada Tabel 1, agar penentuan lokasi *blackspot* dari kedua analisis ini dapat dibandingkan.

Nilai risiko dalam Tabel 4 adalah hasil perkalian antara Nilai 1 Kuantitatif pada Tabel 2 dan Nilai 2 Kuantitatif pada Tabel 3. Penjelasan program aksi, berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 13/PRT/M/2011 Tentang Tata Cara Pemeliharaan Dan Penilikan Jalan, dalam Tabel 4 adalah sebagai berikut (PUPR, 2011):

- Pemeliharaan rutin: merupakan kegiatan merawat dan memperbaiki kerusakan ruas jalan dalam kondisi pelayanan mantap.
- Pemeliharaan preventif: merupakan kegiatan preventif untuk membatasi jenis, tingkat, dan sebaran kerusakan, menunda kerusakan lebih lanjut, mengurangi jumlah kegiatan pemeliharaan rutin, melindungi perkerasan dari pengaruh beban dan lingkungan, dan mempertahankan kondisi jalan dalam tingkatan baik/ sedang sesuai rencana.
- Pemeliharaan berkala: merupakan kegiatan penanganan dan pencegahan kerusakan yang lebih luas, setiap kerusakan yang diperhitungkan dalam desain dapat penurunan kondisi jalan, dikembalikan pada kondisi kemantapan sesuai rencana.
- Rehabilitasi: merupakan kegiatan penanganan pencegahan kerusakan yang luas, setiap kerusakan yang tidak diperhitungkan dalam desain, yang dapat berakibat menurunnya kondisi kemantapan pada bagian/tempat

tertentu dari suatu ruas jalan dalam kondisi rusak ringan, agar penurunan kondisi kemantapan dapat dikembalikan ke kondisi kemantapan sesuai rencana.

- Rekonstruksi: merupakan kegiatan peningkatan struktur, kegiatan penanganan untuk meningkatkan kemampuan bagian ruas jalan dalam kondisi rusak berat agar bagian jalan tersebut mempunyai kondisi mantap sesuai umur rencana.

Dalam analisis ini, lokasi dikatakan sebagai lokasi *blackspot* jika Kategori Risiko dalam Analisis Risiko adalah minimal Berbahaya (B). Selanjutnya, di lokasi ini minimal dilakukan program aksi rehabilitasi.

Hasil analisis dengan simulasi dimana perbedaan antara pengukuran dimensi di lapangan dan standar teknis sebesar 10 persen disajikan dalam Tabel 7a Tabel 7b, dan Tabel 7c untuk lokasi 6 sebagai contoh karena mempunyai jumlah korban LR, LB, dan MD terbanyak. Aspek-aspek dalam pengukuran kondisi jalan di lapangan adalah sesuai dengan Permen PU Nomor : 11 /PRT/M/2010 Tentang Tata Cara Dan Persyaratan Laik Fungsi Jalan, Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2017 Tentang Keselamatan Lalu Lintas dan Angkutan Jalan, Peraturan

Pemerintah Republik Indonesia Nomor 34 Tahun 2006 Tentang Jalan, Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2009 Tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan, Dan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004 Tentang Jalan (PUPR 2010; Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia 2006; Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia 2017; Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia 2009, Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia 2004).

Selanjutnya Tabel 8 menyajikan hasil analisis untuk lokasi 6 dengan perbedaan pengukuran dimensi di lapangan dengan standar teknis sebesar 10 persen, 25 persen, 50 persen, 75 persen, dan 100 persen.

Sedangkan hasil analisis dengan simulasi dimana perbedaan pengukuran dimensi di lapangan dengan standar teknis sebesar 10 persen, 25 persen, 50 persen, 75 persen, dan 100 persen di semua lokasi (lokasi 1 sampai dengan lokasi 16) disajikan dalam Tabel 9. Jika Program Aksi yang harus dilakukan adalah minimal Rehabilitasi, dengan Nilai Risiko 61 – 80, dan Kategori Risiko Berbahaya, maka lokasi tersebut dapat dikatakan sebagai lokasi *blackspot*.

Tabel 7a. Analisis *blackspot* berdasarkan perbedaan 10 persen antara kondisi geometrik jalan dan standar teknis serta keparahan korban kecelakaan di lokasi 6

Aspek	Standar Teknis	Perbedaan (%)	Nilai 1 Kuantitatif	LR (org)	LB (org)	MD (org)	Nilai 2 Kuantitatif	Nilai Risiko	Kategori Risiko	Program Aksi
Jarak pandang henti	120m	10	1	2	1	1	$2 \times 4 + 1 \times 8 + 1 \times 10 = 26$	1x26 =26	TB	Pemeliharaan Preventif
Jarak pandang menyiap	550m	10	1	2	1	1	26	26	TB	
Radius putar	210m	10	1	2	1	1	26	26	TB	
Lebar lajur	3,5m	10	1	2	1	1	26	26	TB	
Lebar bahu	2m	10	1	2	1	1	26	26	TB	
Beda elevasi bahu vs badan jalan	< 1m	10	1	2	1	1	26	26	TB	

LR=luka ringan LB=luka berat MD=meninggal dunia
 STB=Sangat Tidak Berbahaya, TB=Tidak Berbahaya, CB=Cukup Berbahaya, B=Berbahaya, SB=Sangat Berbahaya

Tabel 7b. Analisis *blackspot* berdasarkan perbedaan 10 persen antara kondisi permukaan perkerasan jalan dan standar teknis serta keparahan korban kecelakaan di lokasi 6

Aspek	Dimensi Standar Teknis	Perbedaan n (%)	Nilai 1 Kuantitatif	LR (org)	LB (org)	MD (org)	Nilai 2 Kuantitatif	Nilai Risiko	Kategori Risiko	Program Aksi
Pothole (ϕ 25 cm d > 10 cm)	m ² /km	10	1	2	1	1	2x4+1x8+1x10=26	1x26=26	TB	Pemeliharaan Preventif
Rutting	m ² /km	10	1	2	1	1	26	26	TB	
Deformasi d>10 cm	m ² /km	10	1	2	1	1	26	26	TB	
Bleeding (slippery)	m ² /km	10	1	2	1	1	26	26	TB	

LR=luka ringan LB=luka berat MD=meninggal dunia
STB=Sangat Tidak Berbahaya, TB=Tidak Berbahaya, CB=Cukup Berbahaya, B=Berbahaya, SB=Sangat Berbahaya

Tabel 7c. Analisis *blackspot* berdasarkan perbedaan 10 persen antara kondisi perlengkapan jalan dan standar teknis serta keparahan korban kecelakaan di lokasi 6

Aspek	Standar Teknis	Perbedaan n (%)	Nilai 1 Kuantitatif	LR (org)	LB (org)	MD (org)	Nilai 2 Kuantitatif	Nilai Risiko	Kategori Risiko	Program Aksi
Rambu batas kecepatan	Ada	10	1	2	1	1	2x4+1x8+1x10=26	1x26=26	TB	Pemeliharaan Preventif
	Kondisi	10	1	2	1	1	26	26	TB	
Rambu petunjuk	Ada	10	1	2	1	1	26	26	TB	
	Kondisi	10	1	2	1	1	26	26	TB	
Marka jalan	Ada	10	1	2	1	1	26	26	TB	
	Kondisi	10	1	2	1	1	26	26	TB	
PJU	Ada	10	1	2	1	1	26	26	TB	
	Jarak antar PJU <60m	10	1	2	1	1	26	26	TB	
Median	Lebar >2m	10	1	2	1	1	26	26	TB	
	Tinggi >40cm	10	1	2	1	1	26	26	TB	
Guardrail	Panjang >10m	10	1	2	1	1	26	26	TB	
	Lebar >1m	10	1	2	1	1	26	26	TB	

LR=luka ringan LB=luka berat MD=meninggal dunia
STB=Sangat Tidak Berbahaya, TB=Tidak Berbahaya, CB=Cukup Berbahaya, B=Berbahaya, SB=Sangat Berbahaya

Tabel 8. Analisis risiko dan rekomendasi aksi untuk lokasi 6 dengan perbedaan 10 persen, 25 persen, 50 persen, 75 persen, dan 100 persen antara kondisi lapangan dan standar teknis

Perbedaan n Dimensi	Kondisi Geometrik jalan		Kondisi Permukaan Jalan		Kondisi Perlengkapan Jalan		Program Aksi
	Nilai Risiko	Kategori Risiko	Nilai Risiko	Kategori Risiko	Nilai Risiko	Kategori Risiko	
10%	26	TB	26	TB	26	TB	Pemeliharaan Preventif
25%	52	CB	52	CB	52	CB	Pemeliharaan Berkala
50%	78	B	78	B	78	B	Rehabilitasi
75%	104	SB	104	SB	104	SB	Rekonstruksi
100%	130	SB	130	SB	130	SB	Rekonstruksi

STB=Sangat Tidak Berbahaya, TB=Tidak Berbahaya, CB=Cukup Berbahaya, B=Berbahaya, SB=Sangat Berbahaya

Tabel 9. Analisis risiko dan rekomendasi aksi untuk lokasi 1 sampai dengan lokasi 16 dengan perbedaan 10 persen, 25 persen, 50 persen, 75 persen, dan 100 persen antara kondisi lapangan dan standar teknis

Lokasi	Perbedaan dimensi antara kondisi lapangan dan standar teknis (geometrik jalan, permukaan jalan, perlengkapan jalan)					Keterangan
	10%	25%	50%	75%	100%	
	Nilai risiko, Kategori risiko					
1	10, STB	20, STB	30, TB	40, TB	50, CB	
2	16, STB	32, TB	48, CB	64, B	80, SB	
3	22, TB	44, CB	66, B	88, SB	110, SB	
4	22, TB	44, CB	66, B	88, SB	110, SB	
5	22, TB	44, CB	66, B	88, SB	110, SB	
6	26, TB	52, CB	78, B	104, SB	130, SB	
7	10, STB	20, STB	30, TB	40, TB	50, CB	
8	22, TB	44, CB	66, B	88, SB	110, SB	
9	10, STB	20, STB	30, TB	40, TB	50, CB	Lokasi <i>Blackspot</i> dengan Program Aksi Rehabilitasi (61 – 80, Berbahaya) dan Rekonstruksi (81 – >100, Sangat Berbahaya)
10	10, STB	20, STB	30, TB	40, TB	50, CB	
11	22, TB	44, CB	66, B	88, SB	110, SB	
12	26, TB	52, CB	78, B	104, SB	130, SB	
13	12, STB	24, TB	36, TB	48, CB	60, CB	
14	14, STB	28, TB	42, CB	56, CB	70, B	
15	10, STB	20, STB	30, TB	40, TB	50, CB	
16	10, STB	20, STB	30, TB	40, TB	50, CB	

STB= Sangat Tidak Berbahaya
TB = Tidak Berbahaya
CB = Cukup Berbahaya
B = Berbahaya
SB = Sangat Berbahaya

PEMBAHASAN

Pembahasan adalah dengan membandingkan hasil analisis lokasi *blackspot* yang dilakukan berdasarkan jumlah dan keparahan korban kecelakaan saja (Korps Lalu Lintas 2011) dan hasil analisis lokasi *blackspot* berdasarkan 3 kriteria. Lebih lanjut, rekomendasi program aksi berdasarkan analisis lokasi *blackspot* terhadap 3 kriteria harus dilakukan dengan segera, konsisten, dan berkelanjutan.

Perbandingan penentuan lokasi *blackspot* dalam Tabel 6 dan Tabel 9 menunjukkan bahwa tidak ada penetapan lokasi *blackspot* di lokasi kajian 1 sampai dengan lokasi kajian 16, berdasarkan analisis jumlah dan keparahan korban kecelakaan saja, karena nilai hasil pembobotan tiap lokasi tidak ada yang mencapai nilai minimum 30. Sedangkan analisis lokasi *blackspot* menurut 3 kriteria dalam studi ini menghasilkan lokasi *blackspot* dengan minimum Nilai Risiko 61 – 80, Kategori Risiko Berbahaya, dan program aksi Rehabilitasi, yaitu:

- lokasi 2 jika perbedaan dimensi antara kondisi lapangan dan standar teknis sebesar minimum 75%;
- lokasi 3, 4, 5, 6, 8, 11, dan 12 jika perbedaan dimensi antara kondisi lapangan dan standar teknis sebesar minimum 50%; dan

- lokasi 14 jika perbedaan dimensi antara kondisi lapangan dan standar teknis sebesar minimum 100%;

Hasil analisis ini menunjukkan bahwa perbedaan dimensi antara kondisi lapangan dan standar teknis, yaitu geometrik jalan, permukaan jalan, dan perlengkapan jalan sangat mempengaruhi penentuan lokasi *blackspot*, selain jumlah dan keparahan korban kecelakaan.

Lebih lanjut, terlihat dalam Tabel 9 bahwa rekomendasi program aksi pemeliharaan rutin, pemeliharaan preventif, pemeliharaan berkala, rehabilitasi, dan rekonstruksi yang direkomendasikan untuk mengurangi jumlah dan memperkecil keparahan risiko terjadinya kecelakaan, sudah detail, dapat dikatakan relatif lebih akurat, dan sesuai dengan kondisi riil di lapangan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penentuan lokasi *blackspot* dalam bidang transportasi sangat dipengaruhi oleh analisis yang digunakan. Analisis yang lebih detail akan menghasilkan penentuan lokasi *blackspot* yang lebih akurat sesuai eksisting di lapangan. Kajian ilmiah ini adalah sebagai pembanding terhadap

penanganan praktis menggunakan jumlah dan keparahan korban kecelakaan saja.

Hipotesis dalam studi ini terbukti, bahwa perbandingan antara penentuan lokasi *blackspot* berdasarkan jumlah dan keparahan kecelakaan saja dan penentuan lokasi tersebut berdasarkan 3 kriteria dalam studi ini, yaitu perbedaan kondisi jalan ditinjau dari kondisi geometrik jalan, kondisi permukaan perkerasan jalan, dan kondisi perlengkapan jalan, serta jumlah korban kecelakaan meninggal dunia, dan analisis risiko dalam satuan waktu tertentu akan menghasilkan bahwa penentuan lokasi *blackspot* berdasarkan 3 kriteria lebih akurat, detail, dan menggambarkan kondisi riil di lapangan. Penentuan lokasi *blackspot* ini disarankan untuk segera ditindaklanjuti dengan pelaksanaan program aksi yang sesuai rekomendasi, secara konsisten dan berkelanjutan.

Saran

Saran untuk studi lebih lanjut adalah dengan menggunakan langkah-langkah penelitian dalam metodologi studi ini, dengan menggunakan data kecelakaan terkini, data riil perbedaan kondisi jalan, yaitu perbedaan kondisi geometrik jalan, perbedaan kondisi permukaan perkerasan jalan, dan perbedaan kondisi perlengkapan jalan, yang lengkap, akurat, dan *up to date* per lokasi kejadian kecelakaan pada berbagai pengelompokan jalan berdasarkan fungsi jalan, kelas jalan, dan atau status jalan, sehingga program aksi dapat segera dilaksanakan di lokasi *blackspot* sebagai hasil analisis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ditujukan untuk UPT perpustakaan Unpar atas koleksi buku dan jurnal *online* sebagai referensi.

DAFTAR PUSTAKA

Alonso. Francisco, Alonso. Mónica, Esteban. Cristina and Useche, Sergio A. 2016. *Knowledge of the Concepts of "Black Spot", "Grey Spot" and "High Accident Concentration Sections" Among Drivers, American Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 1(4):39-46, doi: 10.11648/j.ajtte.20160104.11. (accessed February 3, 2023).

- Amgalan. Erdenetuya and Purevdorj. Choisuren. 2019. "Road Safety Traffic Campaign in Ulaan Baatar". *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 13: 2154-2162. doi: 10.11175/easts.13.2154. (accessed May 2022).
- Biro Pusat Statistik (BPS), 2010 – 2020, Biro Pusat Statistik Indonesia. (diakses 22 Agustus 2022).
- Department of Infrastructure, Transport, Regional development, Communications, and the Arts, Australian Government. 2021. *Australian Government Blackspot Program*. Australia.gov.au. <https://investment.infrastructure.gov.au/about/local-initiatives/black-spot-program/site-eligibility.aspx>. (accessed September 18, 2022).
- Direktorat Jenderal Bina Marga and IndII. 2010. Making Indonesia's Roads Safer, An Australia-Indonesia Partnership in Road Safety Engineering, Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Republik Indonesia.
- Farida. Ida, Santosa. Wimpy and Sutandi. Anastasia Caroline. 2022. Analysis of The Black Site Locations on Pantura Street, Java Island, Indonesia. *International Journal of Engineering Advanced Research*. 4(1): 85-97. <https://myjms.mohe.gov.my/index.php/ijear/article/view/17704/9318>. (accessed April 11, 2022).
- Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia Jawa Barat (HPJI JABAR) . 2021. WEBINAR Keselamatan Jalan DPD HPJI Jawa Barat, 21-23 September 2021.
- Hsu. Tien-Pen, Chang. Ming-Wei, and Wen. Ku-Lin. 2019. "Survival Analysis of Accident Occurrence After Traffic Violation". *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. Online 13: 2202-2217. J-STAGE. DOI <https://doi.org/10.11175/easts.13.2202> (accessed May 6, 2022).
- Iqbal, Asad, Rehman, Zia ur, Ali, S., Ullah, Kaleem, and Ghani, Usman. 2020. "Road Traffic Accident Analysis and Identification of Black Spot Locations on Highway", *Civil Engineering Journal*, 6(12): 2448-2456. https://www.researchgate.net/publication/347255620_Road_Traffic_Accident_Analysis_and_Identification_of_Black_Spot_Locations_on_Highway, licensee C.E.J, Tehran, Iran. (accessed February 7, 2023).
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). 2011. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor

- 13/PRT/M/2011 Tentang Tata Cara Pemeliharaan Dan Penilikan Jalan. Surat Edaran Menteri. Indonesia.
- Korps Lalu Lintas. 2011. Modul Penentuan dan Pengkajian *Blackspot* bagi Kepolisian Negara Republik Indonesia. Korps Lalu Lintas Kepolisian Negara Republik Indonesia. Jakarta.
- Korps Lalu Lintas. 2019. *Potret Keselamatan Lalu Lintas Indonesia 2019*. Edisi 3, Desember 2019. Direktorat Penegak Hukum. Jakarta. (diakses 4 April 2022).
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). 2010. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor: 11 /Prt/M/2010 Tentang Tata Cara dan Persyaratan Laik Fungsi Jalan. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Jakarta.
- Mulyono, Agus Taufik, Kushari, Berlian dan Gunawan, Hendra edi. 2009. Audit Keselamatan Infrastruktur Jalan, Studi Kasus Jalan Nasional km 78 km 79 Jalan Pantura Jawa, Kabupaten Batang, Jurnal Teknik Sipil, Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil, 16(3), 163-174.
- Nguyen, Huy Hu, Taneerananon, Pichai, and Koren, Csaba. 2015. Identifying Black Spots Based on Safety Potential - A Suitable Approach to Accident Reduction in Developing Countries, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 11(2015):2241-2257. doi : 10.11175/easts.11.2241. Jstage, Japan. (accessed February 7, 2023).
- Ott R. Lyman and Longnecker Michael T., 2010. *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis 6th edition*. United States. Wadsworth Group.
- Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia. 2004. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004 Tentang Jalan.
- Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia. 2006. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 34 Tahun 2006 Tentang Jalan.
- Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia. 2009. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2009 Tentang Lalu Lintas Dan Angkutan Jalan
- Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia. 2017. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2017 Tentang Keselamatan Lalu Lintas Dan Angkutan Jalan.
- Sutandi, A. Caroline. 2022. “*Paparan Risiko Dari Keselamatan Jalan Di Indonesia Berdasarkan Fatalitas Kecelakaan*”. *Jurnal Jalan dan Jembatan*, 39(2):129-136.
- Sutandi, A. Caroline, and Gosalim, Wilson. 2013. “*Blackspot Location and Recommendation to Reduce Number and Severity of Accidents on Purbaleunyi Toll Road*. *Jurnal Transportasi*”. 13(2): 93-104. <http://journal.unpar.ac.id/index.php/journaltransportasi/article/view/529/513> (accessed April 6, 2023).
- Sutandi, A. Caroline and Santosa, Wimpy. 2013. *Road Safety Improvement in Developing Country Case Study on National Road in Indonesia*. Proceeding of Eastern Asia Society for Transportation Studies International Conference X. 9(2013).

KETENTUAN PENULISAN NASKAH

1. Pengelola Jurnal Jalan-Jembatan menerima naskah karya ilmiah bidang jalan dan jembatan dari dalam dan luar lingkungan Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan yang dikirimkan melalui jurnal online Jalan – Jembatan dengan alamat <https://binamarga.pu.go.id/jurnal/>. Reviewer akan mengevaluasi naskah yang masuk dan berhak menolak naskah yang dianggap tidak memenuhi ketentuan.
 2. Naskah berupa hasil penelitian atau kajian yang belum dan tidak akan dipublikasikan dalam media cetak lain.
 3. Naskah ditulis dalam bahasa Indonesia, diserahkan dalam bentuk file elektronik dalam format program Microsoft Word 2010 disertai dua eksemplar cetakan. Jumlah halaman dalam naskah maksimum 15 halaman, termasuk abstrak, gambar, tabel, dan daftar pustaka. Bila lebih dari 15 halaman, Editor berhak untuk menyunting ulang, dan apabila dianggap perlu akan dikonsultasi dengan penulis.
 4. Sistematika penulisan disusun sebagai berikut: Bagian awal terdiri dari judul naskah, nama penulis, abstrak (abstrak dan kata kunci ditulis dalam bahasa Indonesia dan Inggris dengan huruf italic). Bagian utama terdiri dari pendahuluan, hipotesis, metodologi, hasil dan analisis, pembahasan, kesimpulan dan saran, serta ucapan terimakasih. Bagian akhir: keterangan simbol (bila perlu), daftar pustaka minimal 10 referensi (wajib) berupa jurnal terbaru atau buku, dan lampiran (jika ada).
 5. Judul naskah sesingkat mungkin dan harus mencerminkan isi tulisan serta tidak memberikan peluang penafsiran yang beraneka ragam, ditulis dengan huruf kapital posisi tengah, dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris.
 6. Nama penulis ditulis:
 - a) Di bawah judul tanpa gelar diawali huruf kapital, ditulis diposisi tengah dan tidak diawali kata "oleh"; apabila penulis lebih dari satu orang, maka nama-nama tersebut ditulis pada satu baris.
 - b) Nama lengkap disertai keterangan alamat instansi dan kotanya, apabila penulis lebih dari satu orang, semua alamatnya dicantumkan lengkap.
 7. Abstrak memuat permasalahan, tujuan, metodologi, hasil dan kesimpulan (antara 150-250 kata), ditulis dalam satu alinea, dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris. Hindari penggunaan singkatan dalam abstrak. Di bawah abstrak dicantumkan minimal 5 kata kunci.
 8. Teknik penulisan:
 - a) Naskah ditulis pada kertas ukuran A4, ketikan satu spasi dengan 2 kolom, jarak kolom pertama dan kedua 1 cm.
 - b) Batas pengetikan: tepi atas dan tepi bawah 3 cm, sisi kiri dan sisi kanan masing-masing 2,5 cm. Alinea baru diberi inden satu cm dari batas tepi kiri, antara alinea tidak diberi tambahan spasi, antara alinea dengan sub judul diberi jarak 10pt, dari sub-sub judul ke uraian paragraf tidak diberi tambahan spasi.
 - c) Semua tulisan menggunakan Font Times New Roman:
 - Judul, ditulis di tengah halaman, kapital 14 pt, bold.
 - Nama penulis, ditulis di tengah halaman, 11 pt, bold.
 - Nama instansi, ditulis di tengah halaman, 10 pt.
 - Alamat instansi dan e-mail, ditulis ditengah halaman, 9 pt.
 - Sub judul, ditulis di tepi kiri, kapital 11 pt, bold.
 - Isi Abstrak, Kata kunci, 10 pt, Italic.
 - Sub-sub judul, ditulis di tepi kiri, 11 pt, bold.
 - Isi naskah, 11 pt, 1 spasi.
 - Persamaan/Rumus, 10 pt.
 - Keterangan Persamaan/Rumus, 10 pt.
 - Judul Tabel dan Gambar, 10 pt.
 - Tulisan Tabel dan Gambar, 10 pt, bold.
 - Sumber Tabel dan Gambar, 9 pt.
 - Isi daftar pustaka, 10 pt.
 - Nomor halaman menggunakan angka Arab, 11pt.
 - d) Kata asing ditulis dengan huruf italic, apabila sudah ada bahasa Indonesianya, maka kata asing ditulis dalam kurung, untuk selanjutnya istilah yang sama cukup ditulis istilah Indonesianya saja. Bilangan ditulis dengan angka, kecuali pada awal kalimat.
 - e) Ketentuan penyajian tabel dan gambar:
 - Tabel dan gambar harus diberi judul dan keterangan yang jelas. Judul tabel diletakkan di bagian atas tabel, rata kiri dengan tabel; judul gambar diletakkan di bagian bawah gambar, rata kiri dengan gambar.
 - Tabel dan gambar tidak menggunakan garis pinggir, tabel menggunakan jenis "table simple 1".
 - Gambar, foto, dan grafik berwarna.
 - Sumber tabel dan gambar dicantumkan di bawah tabel dan gambar.
 - f) Sumber pustaka (sitasi dalam teks) yang diacu terdiri dari nama penulis dan tahun penerbitan, ditulis dalam kurung. Contoh: (Calvez 2004). Untuk kutipan langsung ditambah nomor halaman (Calvez 2004, 73).
 - g) Daftar pustaka dan sitasi bibliografi menggunakan *Chicago Manual of Style (Author – Date System)*, ditulis dalam urutan abjad nama penulis dan disusun dengan susunan:
 - Untuk buku: pengarang (nama keluarga diikuti nama pertama) dan tahun terbit. *Judul buku*. Kota. Nama penerbit.
 - Untuk jurnal: pengarang (nama keluarga diikuti nama pertama) dan tahun terbit. "Judul artikel". *Judul jurnal* atau *Judul prosiding*. Volume (nomor): halaman.
 - Karya di internet: URL dan tanggal karya tersebut diakses.
 - Jika dalam daftar pustaka ada pencantuman nama seseorang lebih dari 1 kali, nama kedua tidak perlu ditulis kembali, cukup mengganti nama dengan titik-titik.
- Contoh:
- Buku (monograf)
Okuda, Michael, and Denis Okuda. 1993. *Star Trek chronology: The history of the Future*. New York: Pocket Books.
- Buku yang diterbitkan secara elektronik
Kurland, Philip B., and Ralph Lerner, eds. 1987. *The founders' Constitution*. Chicago: University of Chicago Press.
<http://presspubs.uchicago.edu/founders/>.
- Artikel jurnal
Wilcox, Rhonda V. 1991. "Shifting Roles and Synthetic Woman in Star Trek: The Next Generation". *Studies in Popular Culture*. 13: 53-65.
- Artikel jurnal on-line
Hlatky, Mark A., Derek Boothroyd, Eric Vittinghoff, Penny Sharp, and Mary A. Whooley. 2002. "Quality-of-life and depressive symptoms in postmenopausal women after receiving hormone therapy: Results from the Heart and Estrogen/Progestin Replacement Study (HERS) trial". *Journal of the American Medical Association* 287 (5): 1-7, <http://jama.ama-assn.org/issues/v287n5/rfull/joc10108.html#aainfo> (accessed January 7, 2004).
- Terbitan Pemerintah
Pusat Litbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan). 2015. *Teknologi Jalan Beton untuk Lalu Lintas Rendah*. Laporan Internal. Bandung: [s.n].
Indonesia, Kementerian Pekerjaan Umum. 2010. *Pedoman Perencanaan Perkerasan Lentur*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum.
Indonesia, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). 2016. *Penetapan Dan Tata Cara Penggunaan Dana Talangan Badan Usaha untuk Pengadaan Tanah Jalan Tol*. Jakarta: Kementerian PUPR.
Indonesia. 2006. *Peraturan Pemerintah Nomor 34 Tentang Jalan*. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Daftar pustaka tanpa tahun dan tanpa penerbit
Caltrans California Departement of Transportation [s.a]. *Highway Design Manual*. California: D.O.T
Caltrans California Departement of Transportation 1996. *Highway Design Manual*. California: [s.n]
9. Pengelola Jurnal Jalan-Jembatan tidak bertanggung jawab terhadap isi naskah.
 10. Penulis wajib menyertakan alamat korespondensi dengan jelas.
 11. Dewan Redaksi dapat menyesuaikan bahasa dan/atau istilah tanpa mengubah isi dan pengertiannya dengan tidak memberitahukan kepada penulis, dan apabila dianggap perlu akan dikonsultasi dengan penulis.
 12. Naskah yang dimuat dalam jurnal ini menjadi hak milik Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.



**KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT
DIREKTORAT JENDERAL BINA MARGA
DIREKTORAT BINA TEKNIK JALAN DAN JEMBATAN**

ISSN 1907 - 0284

