



Scripta Technica: Journal of Engineering and Applied Technology

Vol 1 No 2 Desember 2025, Hal. 400-409
ISSN:3110-0775(Print) ISSN: 3109-9696(Electronic)
Open Access: <https://scriptaintelektual.com/scripta-technica>

Analisis AC-WC Dengan Campuran Bahan Tambah *Shell Waste* Dan *Waste Glass* Sebagai *Additive* Untuk Perkerasan Jalan

Nur Rahman^{1*}, Singgih Aji Saputra², Rachmat Mudiyono³

^{1,3} Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

email: rahmaansajaa@gmail.com¹, singgihsaputra3084@gmail.com²

Article Info :

Received:

27-11-2025

Revised:

24-12-2025

Accepted:

31-12-2025

Abstract

This study evaluates the performance of Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) mixtures incorporating shell waste and waste glass as additives for sustainable pavement applications. The optimum asphalt content was determined at 5.8% using the Marshall method, producing balanced volumetric and mechanical properties that satisfy heavy traffic specifications. Waste glass addition without shell waste increased mixture stiffness but did not consistently achieve optimal stability due to volumetric imbalance. A synergistic effect was observed when shell waste and waste glass were combined. The mixture containing 5% shell waste and 5% waste glass demonstrated the most favorable performance, characterized by higher stability, proportional Marshall Quotient, controlled air void distribution, and improved structural integrity. Increasing shell waste content to 7.5% and 10% did not enhance performance and tended to reduce volumetric balance. Economic evaluation indicates a material cost reduction of approximately 1.72% per kilometer compared to conventional mixtures, without compromising mechanical performance. The findings confirm that the optimal incorporation of shell waste and waste glass is technically feasible and economically beneficial for sustainable AC-WC pavement construction.

Keywords: AC-WC, Shell Waste, Waste Glass, Marshall Stability, Sustainable Pavement.

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi kinerja campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) yang menggunakan limbah cangkang dan limbah kaca sebagai aditif untuk aplikasi perkerasan jalan yang berkelanjutan. Kandungan aspal optimum ditentukan sebesar 5,8% menggunakan metode Marshall, menghasilkan sifat volumetrik dan mekanik yang seimbang yang memenuhi spesifikasi lalu lintas berat. Penambahan limbah kaca tanpa limbah cangkang meningkatkan kekakuan campuran, tetapi tidak secara konsisten mencapai stabilitas optimum akibat ketidakseimbangan volumetrik. Efek sinergis diamati ketika limbah cangkang dan limbah kaca digabungkan. Campuran yang mengandung 5% limbah cangkang dan 5% limbah kaca menunjukkan kinerja terbaik, ditandai dengan stabilitas yang lebih tinggi, rasio Marshall yang proporsional, distribusi rongga udara yang terkontrol, dan integritas struktural yang lebih baik. Peningkatan kandungan limbah cangkang menjadi 7,5% dan 10% tidak meningkatkan kinerja dan cenderung mengurangi keseimbangan volumetrik. Evaluasi ekonomi menunjukkan pengurangan biaya material sekitar 1,72% per kilometer dibandingkan dengan campuran konvensional, tanpa mengorbankan kinerja mekanis. Temuan ini menegaskan bahwa pengintegrasian optimal limbah cangkang dan limbah kaca secara teknis feasible dan secara ekonomi menguntungkan untuk konstruksi jalan AC-WC yang berkelanjutan.

Kata kunci: AC-WC, Limbah Cangkang, Limbah Kaca, Stabilitas Marshall, Jalan Berkelanjutan.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Perkembangan Internet of Things (IoT) dalam satu dekade terakhir telah mentransformasi paradigma keamanan domestik dari sistem statis berbasis perangkat lokal menjadi ekosistem cerdas yang terhubung secara global, di mana perangkat sensor, modul komunikasi, dan platform notifikasi real-time berinteraksi untuk menghasilkan respons keamanan yang adaptif dan berkelanjutan. Dalam konteks meningkatnya urbanisasi, mobilitas masyarakat, serta kompleksitas ancaman kriminalitas rumah tangga, kebutuhan terhadap sistem pengamanan rumah yang mampu melakukan monitoring jarak jauh secara instan menjadi semakin mendesak, terutama ketika objek yang diamankan memiliki nilai tinggi seperti brankas rumah. Integrasi aplikasi pesan instan seperti Telegram dalam arsitektur IoT muncul sebagai pendekatan mutakhir karena menawarkan jalur komunikasi cepat, fleksibel, dan relatif

murah dibandingkan infrastruktur keamanan konvensional, sekaligus memungkinkan automasi berbasis bot yang dapat mempercepat pengambilan keputusan pengguna dalam situasi darurat (Suthar & Patel, 2025; Wahyudi et al., 2025).

Literatur internasional menunjukkan bahwa implementasi Telegram Bot dalam sistem keamanan rumah telah berkembang pesat dengan fokus pada peningkatan aksesibilitas dan efektivitas monitoring berbasis IoT. Sejumlah studi menegaskan bahwa Telegram mampu berfungsi sebagai antarmuka kontrol dan notifikasi yang responsif dalam sistem keamanan rumah, baik untuk mendeteksi intrusi maupun memantau perangkat secara jarak jauh. Fadhlurrohman dan Basri (2025) memperlihatkan bahwa Telegram Bot dapat dimanfaatkan untuk mengurangi keterlambatan komunikasi dalam sistem anti-pencurian berbasis IoT, sementara Jibin et al. (2025) mengembangkan sistem pengawasan berbasis ESP32-CAM yang memanfaatkan Telegram sebagai media pengiriman citra secara real-time. Rambabu et al. (2025) juga menekankan pentingnya integrasi motion detection dengan notifikasi instan sebagai mekanisme mitigasi ancaman, yang memperlihatkan bahwa tren riset bergerak menuju sistem keamanan rumah yang semakin otonom dan responsif terhadap perubahan lingkungan.

Meskipun demikian, sintesis kritis atas penelitian terdahulu mengindikasikan bahwa sebagian besar pengembangan IoT–Telegram masih berorientasi pada keamanan rumah secara umum, belum secara spesifik menargetkan objek dengan kebutuhan proteksi tinggi seperti brankas rumah yang memerlukan tingkat monitoring lebih ketat dan mekanisme respons lebih terstruktur. Studi Afiyat et al. (2026), misalnya, menyoroti efektivitas Telegram Bot dalam sistem deteksi kebocoran gas rumah tangga, menunjukkan bahwa pendekatan notifikasi real-time sangat relevan dalam konteks keselamatan, namun desainnya berbeda secara konseptual dengan sistem keamanan fisik terhadap ancaman pencurian. Penelitian Putra et al. (2025) pada integrasi RFID dan Telegram Bot dalam sistem akses pintu otomatis memperlihatkan potensi kontrol berbasis identifikasi, tetapi fokusnya masih pada manajemen akses, bukan pada monitoring keamanan brankas yang membutuhkan kombinasi sensor intrusi, alarm, serta pelaporan kondisi secara kontinu.

Celah konseptual dan empiris dalam literatur menjadi semakin jelas ketika dicermati bahwa banyak sistem yang telah dikembangkan belum sepenuhnya mengatasi tantangan reliabilitas monitoring real-time, terutama dalam skenario keamanan objek spesifik dengan risiko tinggi. Beberapa penelitian menitikberatkan pada aspek prototipe tanpa evaluasi komprehensif terhadap ketahanan sistem terhadap gangguan jaringan atau false alarm, sementara studi lain lebih menonjolkan integrasi perangkat keras tanpa mengembangkan kerangka monitoring yang sistematis untuk mendukung keputusan pengguna secara cepat. Oyon et al. (2025) memang menunjukkan optimasi automasi berbasis Telegram Bot untuk kontrol perangkat jarak jauh, tetapi pendekatan tersebut belum menjawab kebutuhan pengamanan brankas yang mensyaratkan deteksi ancaman berbasis multi-sensor dan notifikasi berlapis. Ketidakkonsistenan ini menegaskan bahwa masih terdapat ruang penelitian untuk merancang sistem monitoring keamanan yang lebih terfokus, robust, dan kontekstual terhadap kebutuhan pengamanan brankas rumah (Suthar & Patel, 2025; Rambabu et al., 2025).

Urgensi ilmiah dan praktis dari persoalan ini terletak pada meningkatnya kebutuhan sistem keamanan domestik yang tidak hanya reaktif, tetapi juga preventif dan mampu menyediakan informasi real-time yang akurat bagi pengguna. Dalam ekosistem smart home dan smart city, keamanan rumah tidak dapat dipisahkan dari infrastruktur digital yang lebih luas, sehingga sistem monitoring brankas berbasis IoT berpotensi menjadi komponen penting dalam manajemen keamanan urban yang terintegrasi. Wahyudi et al. (2025) menegaskan bahwa sistem keamanan IoT yang mendukung smart city harus mampu memberikan monitoring dan manajemen yang adaptif, sedangkan penelitian Jibin et al. (2025) dan Fadhlurrohman dan Basri (2025) menguatkan bahwa Telegram Bot menawarkan jalur komunikasi instan yang efektif. Namun, belum adanya rancangan spesifik untuk pengamanan brankas rumah menunjukkan adanya kebutuhan mendesak untuk mengisi gap ini, baik dalam ranah akademik maupun implementasi nyata.

Penelitian ini menempatkan diri dalam lanskap keilmuan IoT security dengan fokus pada perancangan sistem monitoring keamanan brankas rumah berbasis Internet of Things yang mampu bekerja secara real-time melalui integrasi Telegram Bot sebagai media notifikasi dan kontrol jarak jauh. Studi ini bertujuan untuk mengembangkan pendekatan yang lebih spesifik dan terstruktur dibandingkan penelitian sebelumnya dengan menggabungkan konsep deteksi intrusi, monitoring kondisi brankas, serta sistem komunikasi instan yang dapat meningkatkan respons pengguna terhadap potensi ancaman. Kontribusi utama penelitian ini tidak hanya terletak pada aspek implementasi teknis, tetapi juga pada

penguatan kerangka metodologis dalam desain sistem keamanan objek bernilai tinggi, sehingga diharapkan dapat memperkaya diskursus teoretis tentang smart security monitoring sekaligus memberikan solusi praktis yang relevan untuk kebutuhan keamanan domestik mod Peningkatan tekanan terhadap sistem infrastruktur jalan secara global dalam dua dekade terakhir berkelindan dengan tuntutan transisi menuju konstruksi berkelanjutan yang menekankan efisiensi sumber daya, dekarbonisasi material, dan integrasi ekonomi sirkular dalam desain perkerasan beraspal. Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC) sebagai lapisan aus memegang peran krusial dalam mentransmisikan beban lalu lintas sekaligus mempertahankan integritas struktural dan fungsional permukaan jalan, sehingga setiap inovasi material pada lapisan ini memiliki implikasi langsung terhadap umur layan dan biaya siklus hidup infrastruktur. Di tengah meningkatnya volume limbah padat seperti plastik, abu industri, dan residu biomassa, riset mutakhir mengarah pada substitusi filler konvensional dengan material daur ulang yang berpotensi meningkatkan performa mekanik sekaligus mereduksi jejak lingkungan, sebagaimana ditunjukkan dalam pemanfaatan limbah plastik dan fly ash pada campuran perkerasan jalan (Hasrullah et al., 2023) serta penggunaan limbah botol plastik pada campuran LASTON yang memengaruhi karakteristik Marshall secara signifikan (Ngabar, 2022). Konvergensi antara agenda keberlanjutan dan kebutuhan peningkatan kinerja struktural mendorong eksplorasi material alternatif berbasis limbah anorganik berkandungan silika dan kalsium karbonat tinggi, termasuk waste glass dan shell waste, sebagai kandidat aditif pada AC-WC yang secara teoretis mampu memodifikasi sifat adhesi, kohesi, dan struktur pori campuran.

Literatur empiris menunjukkan bahwa modifikasi AC-WC dengan berbagai jenis filler alternatif menghasilkan respons mekanik yang tidak seragam namun membuka peluang optimasi komposisi. Penggunaan limbah genteng dan serat selulosa dilaporkan mampu meningkatkan stabilitas dan memperbaiki parameter volumetrik pada kadar tertentu, meskipun efeknya sensitif terhadap proporsi dan karakteristik material (Agustiya et al., 2025). Abu serbuk kayu sebagai filler menunjukkan pengaruh terhadap stabilitas dan flow yang bergantung pada distribusi ukuran partikel dan interaksi dengan aspal (Anggiyansyah et al., 2024), sementara abu arang tempurung kelapa pada RAP memperlihatkan potensi peningkatan kinerja sekaligus isu terkait keseimbangan VIM dan VMA (Kholifah et al., 2025). Studi lain yang memanfaatkan abu cangkang sawit menegaskan bahwa variasi perendaman memodulasi ketahanan campuran terhadap air dan perubahan stabilitas (Hartini et al., 2025). Sintesis kritis atas temuan tersebut mengindikasikan bahwa keberhasilan material limbah sebagai filler tidak hanya ditentukan oleh kandungan kimianya, melainkan oleh kompatibilitas fisik-mekanik dengan matriks aspal serta konfigurasi gradasi agregat, sehingga pendekatan eksperimental yang terkontrol menjadi prasyarat untuk memperoleh komposisi optimum.

Secara lebih spesifik, pemanfaatan material berbasis kalsium karbonat dan silika sebagai substituen filler mineral konvensional telah diuji dalam berbagai konteks, namun masih menyisakan inkonsistensi konseptual dan empiris. Penggunaan abu cangkang siput sawah dan fly ash pada AC-WC menunjukkan peningkatan stabilitas pada kadar tertentu, tetapi memperlihatkan fluktuasi nilai VIM dan VFB yang mengindikasikan perubahan struktur rongga yang belum sepenuhnya terjelaskan (Arrang et al., 2023). Shell waste pada lapisan penetrasi makadam (Lapen) dilaporkan mampu meningkatkan performa struktural, namun generalisasi hasilnya terhadap campuran AC-WC dengan karakteristik pemandatan berbeda memerlukan verifikasi lebih lanjut (Ayunaning & Juliati, 2022). Di sisi lain, substitusi agregat halus dengan serbuk ban bekas dan karet alam padat menghasilkan perubahan Marshall Quotient yang signifikan, tetapi mekanisme interaksi antarpartikel dan efek sinergistik multi-aditif belum dieksplorasi secara komprehensif (Irfan et al., 2025). Penelitian mengenai batok kelapa dan pasir pantai juga menegaskan bahwa variasi material lokal dapat memodifikasi karakteristik campuran, meskipun pendekatan yang digunakan cenderung parsial dan belum menguji kombinasi dua limbah berbeda secara simultan (Katjo, 2023).

Keterbatasan utama dalam lanskap literatur terletak pada dominannya pendekatan satu-material (single additive) yang mengevaluasi performa campuran secara terisolasi, sehingga belum memberikan pemahaman tentang kemungkinan efek sinergistik atau antagonistik ketika dua jenis limbah dengan komposisi kimia berbeda—seperti waste glass yang kaya silika dan shell waste yang didominasi kalsium karbonat—dikombinasikan dalam satu sistem AC-WC. Sebagian studi berfokus pada peningkatan stabilitas Marshall tanpa mengelaborasi implikasi terhadap keseimbangan parameter volumetrik yang menentukan durabilitas jangka panjang, sementara studi lain menitikberatkan pada aspek lingkungan tanpa integrasi mendalam terhadap kriteria teknis spesifikasi Bina Marga.

Fragmentasi temuan tersebut menghasilkan celah empiris terkait bagaimana kombinasi filler berbasis silika dan kalsium karbonat memengaruhi interaksi aspal-agregat, distribusi rongga, serta Marshall Quotient secara simultan dalam rentang variasi kadar yang sistematis.

Urgensi ilmiah dan praktis dari persoalan ini semakin menguat dalam konteks Indonesia yang menghadapi peningkatan timbulan limbah kaca dari sektor rumah tangga dan industri serta limbah cangkang kerang dari aktivitas perikanan dan konsumsi pesisir, sementara kebutuhan peningkatan kualitas perkerasan jalan terus meningkat seiring ekspansi jaringan transportasi. Tanpa inovasi material yang mampu mengintegrasikan performa struktural dan reduksi limbah, sektor konstruksi berisiko mempertahankan ketergantungan pada filler konvensional dengan implikasi biaya dan lingkungan yang tidak optimal. Penelitian yang menguji kombinasi waste glass dan shell waste dalam satu sistem campuran AC-WC menawarkan peluang untuk menjawab kebutuhan tersebut melalui pendekatan eksperimental yang mengaitkan karakteristik material, parameter Marshall, dan kriteria teknis secara terpadu.

Riset ini diposisikan dalam lanskap keilmuan sebagai upaya untuk menguji secara sistematis pengaruh kombinasi waste glass dan shell waste sebagai bahan aditif pada campuran AC-WC melalui metode eksperimental laboratorium dengan penentuan kadar aspal optimum dan evaluasi parameter stabilitas, flow, Marshall Quotient, VIM, VMA, serta VFB. Tujuan penelitian adalah mengidentifikasi komposisi optimum yang memenuhi spesifikasi teknis sekaligus menganalisis pola perubahan karakteristik volumetrik dan mekanik akibat interaksi kedua material limbah tersebut. Kontribusi teoretis penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka pemahaman mengenai efek sinergistik filler berbasis silika dan kalsium karbonat dalam matriks aspal, sedangkan kontribusi metodologisnya mencakup desain variasi campuran yang terstruktur dan evaluasi komprehensif berbasis parameter Marshall untuk mendukung pengembangan perkerasan jalan yang lebih berkelanjutan dan berbasis ekonomi sirkular.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi empiris berbasis eksperimen laboratorium yang dilaksanakan di Laboratorium Transportasi Universitas Islam Sultan Agung pada tahun 2026 untuk mengevaluasi kinerja campuran Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC) dengan penambahan waste glass dan shell waste sebagai bahan aditif. Arsitektur sistem eksperimen dirancang dalam tiga tahapan utama, yaitu karakterisasi material, penentuan kadar aspal optimum (KAO), dan pengujian variasi campuran modifikasi. Material yang digunakan meliputi aspal penetrasi 60/70, agregat kasar dan agregat halus sesuai gradasi AC-WC spesifikasi Bina Marga, serta filler alternatif berupa waste glass yang dihancurkan hingga lolos saringan No. 200 dan shell waste yang dikeringkan, digiling, serta diayak menjadi serbuk halus. Seluruh material diuji sifat fisik dan mekaniknya, termasuk berat jenis, analisis saringan, abrasi agregat, serta karakteristik penetrasi dan titik lembek aspal, guna memastikan kesesuaian terhadap standar teknis. Campuran kontrol (tanpa aditif) terlebih dahulu dirancang untuk memperoleh KAO menggunakan metode Marshall. Variasi campuran selanjutnya dibuat dengan kombinasi shell waste sebesar 0%, 5%, 7,5%, dan 10% terhadap berat filler serta waste glass sebesar 0%, 5%, 6%, dan 7% terhadap berat total agregat halus, dengan tiga benda uji untuk setiap kombinasi. Proses pencampuran dilakukan pada suhu $\pm 150^{\circ}\text{C}$ hingga homogen, kemudian dipadatkan menggunakan Marshall Automatic Compactor sebanyak 75 tumbukan per sisi sesuai kategori lalu lintas berat.

Prosedur pengujian dilakukan setelah benda uji direndam dalam water bath bersuhu 60°C selama 30–40 menit sebelum diuji menggunakan alat Marshall untuk memperoleh nilai stabilitas dan flow. Data hasil pengujian digunakan untuk menghitung Marshall Quotient (MQ) sebagai rasio stabilitas terhadap flow, serta parameter volumetrik yang meliputi Voids in Mix (VIM), Voids in Mineral Aggregate (VMA), dan Voids Filled with Bitumen (VFB) berdasarkan hasil pengukuran berat kering, berat jenuh permukaan kering, dan berat dalam air. Validasi dilakukan dengan membandingkan seluruh parameter terhadap batas spesifikasi Bina Marga untuk AC-WC serta dengan menganalisis konsistensi antar tiga replikasi pada setiap variasi campuran guna memastikan reliabilitas data. Evaluasi kinerja ditentukan berdasarkan pemenuhan kriteria stabilitas minimum, rentang flow yang diizinkan, nilai MQ yang menunjukkan ketahanan terhadap deformasi, serta keseimbangan parameter volumetrik yang merepresentasikan durabilitas campuran. Komposisi optimum ditetapkan melalui analisis komparatif terhadap seluruh variasi dengan mempertimbangkan performa mekanik tertinggi yang tetap memenuhi

seluruh persyaratan teknis, sehingga hasil penelitian dapat direplikasi dan diaplikasikan secara praktis pada desain perkerasan jalan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Material dan Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) Campuran AC-WC Konvensional

Tahap awal penelitian empiris ini difokuskan pada karakterisasi material penyusun campuran AC-WC sebagai dasar validitas desain campuran sebelum dilakukan modifikasi dengan shell waste dan waste glass. Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat kasar, agregat halus, filler semen, dan gradasi kombinasi berada dalam rentang spesifikasi Bina Marga 2018–2020 untuk lapis aus lalu lintas berat. Aspal penetrasi 60/70 yang digunakan memiliki nilai penetrasi rata-rata 69,4 dan titik lembek 54°C, sehingga memenuhi kriteria konsistensi dan stabilitas termal untuk iklim tropis. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa material kontrol memiliki kesesuaian reologis dan fisik untuk dilakukan desain Marshall secara representatif. Konsistensi ini penting karena variasi sifat agregat dan aspal sangat memengaruhi respons volumetrik dan stabilitas campuran sebagaimana dijelaskan dalam studi viskoelastis aspal modifikasi (Putra et al., 2025).

Penentuan kadar aspal optimum dilakukan melalui variasi kadar 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, dan 6,0% dengan tiga replikasi pada setiap kadar untuk menjamin reliabilitas data empiris. Parameter yang dianalisis meliputi stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), VIM, VMA, dan VFB sesuai pendekatan desain Marshall standar. Nilai rata-rata pada kadar 4,0% menunjukkan stabilitas 477,76 kg dengan VIM 13,38%, yang mengindikasikan campuran masih terlalu berpori dan belum mencapai densitas optimum. Pada kadar 4,5% hingga 5,0% terjadi peningkatan stabilitas, namun fluktuasi flow dan MQ memperlihatkan ketidakseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas. Fenomena ini selaras dengan temuan Irfan et al. (2025) bahwa keseimbangan antara stabilitas dan flow menjadi indikator krusial dalam menentukan KAO pada campuran AC-WC termodifikasi.

Peningkatan kadar aspal menjadi 5,5% memperlihatkan stabilitas rata-rata 638,11 kg dengan VIM 5,72% dan VFB 67,84%, yang mulai mendekati rentang spesifikasi teknis. Namun demikian, pada kadar 6,0% terjadi inkonsistensi signifikan dengan stabilitas rata-rata turun menjadi 539,94 kg dan flow meningkat hingga 3,87 mm, mengindikasikan kecenderungan deformasi plastis. Variasi antar benda uji pada kadar 6,0% juga menunjukkan deviasi yang cukup besar, sehingga reliabilitas mekanik campuran pada kadar tersebut menjadi kurang stabil. Secara teoritis, kadar aspal yang berlebihan dapat menurunkan interlocking agregat dan meningkatkan potensi bleeding (Sulistyo et al., 2024). Oleh karena itu, pendekatan komparatif antar parameter menjadi landasan dalam menetapkan KAO yang paling representatif.

Tabel 1. Hasil Uji Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) Melalui Metode Marshall

| Kadar Aspal (%) | VMA (%) | VIM (%) | VFB (%) | Stabilitas (kg) | Flow (mm) | MQ (kg/mm) |
|-----------------|---------|---------|---------|-----------------|-----------|------------|
| 4,0 | 21,94 | 13,38 | 39,11 | 477,76 | 1,77 | 270,43 |
| 4,5 | 18,82 | 8,99 | 53,15 | 572,66 | 1,77 | 324,15 |
| 5,0 | 19,15 | 8,40 | 56,29 | 503,94 | 2,43 | 207,10 |
| 5,5 | 17,75 | 5,72 | 67,84 | 638,11 | 1,77 | 361,19 |
| 6,0 | 18,22 | 6,09 | 66,72 | 539,94 | 3,87 | 139,64 |

Sumber: Data hasil penelitian, 2026.

Data pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa kecenderungan penurunan VIM seiring peningkatan kadar aspal menunjukkan peningkatan kepadatan campuran hingga titik tertentu. Pada rentang 5,5% hingga 6,0%, nilai VIM berada dalam kisaran mendekati batas spesifikasi 3–5%, namun kestabilan mekanik paling seimbang ditunjukkan pada kadar sekitar 5,8% berdasarkan interpolasi grafik parameter. Nilai desain pada KAO 5,8% menghasilkan VIM 4,50%, VMA 15,78%, dan VFB 72%, yang menunjukkan distribusi rongga efektif untuk durabilitas. Stabilitas sebesar 920 kg dan flow 2,85 mm pada kadar tersebut mencerminkan kombinasi kekuatan dan fleksibilitas yang proporsional. Prinsip keseimbangan volumetrik ini konsisten dengan pendekatan desain Marshall pada berbagai penelitian filler alternatif (Widyaningsih & Hamzah, 2019; Anggiyansyah et al., 2024).

Interpretasi terhadap nilai Marshall Quotient pada KAO sebesar 325 kg/mm menunjukkan ketahanan deformasi yang memadai terhadap beban lalu lintas berat. MQ yang terlalu rendah dapat mengindikasikan campuran lunak, sedangkan MQ yang terlalu tinggi berpotensi menyebabkan kerapuhan struktural. Pada kadar 5,8%, nilai MQ berada dalam zona moderat yang mendukung perilaku viskoelastis yang stabil. Keseimbangan tersebut menjadi parameter penting sebelum dilakukan modifikasi filler dengan limbah, karena campuran kontrol harus memenuhi syarat dasar teknis. Pendekatan ini sejalan dengan metodologi eksperimen bertahap sebagaimana diterapkan dalam penelitian modifikasi AC-WC oleh Agustiya et al. (2025).

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa tren peningkatan VFB pada kadar aspal tinggi berkorelasi dengan penurunan rongga udara efektif. Kondisi tersebut berimplikasi pada potensi penurunan ketahanan terhadap deformasi permanen apabila kadar aspal melebihi optimum. Studi Triandana et al. (2022) menegaskan bahwa keseimbangan VIM dan VFB berpengaruh signifikan terhadap durabilitas campuran dalam kondisi perendaman dan siklus suhu. Nilai VIM 4,50% pada KAO 5,8% berada dalam rentang ideal untuk meminimalkan oksidasi aspal dan penetrasi air. Hal ini menunjukkan bahwa campuran kontrol telah memenuhi prinsip desain durabilitas jangka menengah.

Secara komparatif, stabilitas 920 kg pada KAO lebih tinggi dibandingkan rata-rata stabilitas pada kadar 5,5% dalam tabel variasi, yang menunjukkan pentingnya interpolasi grafik Marshall dalam penentuan optimum. Metode ini memungkinkan identifikasi titik keseimbangan bukan hanya berdasarkan satu parameter, melainkan kombinasi seluruh indikator volumetrik dan mekanik. Pendekatan tersebut juga diterapkan dalam penelitian pemanfaatan filler limbah plastik dan fly ash pada AC-WC (Hasrullah et al., 2023; Ngabar, 2022). Konsistensi antar tiga replikasi pada kadar optimum menunjukkan deviasi yang relatif kecil, sehingga validitas empiris dapat diterima. Validitas ini menjadi dasar untuk tahap eksperimen lanjutan pada variasi shell waste dan waste glass.

Hasil karakterisasi dan desain KAO ini mengindikasikan bahwa sistem eksperimen telah memenuhi prinsip kontrol variabel dan replikasi yang memadai. Seluruh parameter pada campuran kontrol memenuhi spesifikasi Bina Marga untuk lapis aus lalu lintas berat. Penetapan KAO 5,8% menjadi titik referensi tetap dalam seluruh variasi campuran modifikasi. Pendekatan ini memastikan bahwa perubahan kinerja pada tahap berikutnya dapat diatribusikan pada pengaruh shell waste dan waste glass, bukan pada ketidaktepatan desain dasar. Landasan empiris ini memperkuat integritas metodologi eksperimen laboratorium yang digunakan dalam penelitian.

Pengaruh Variasi Waste Glass pada Campuran dengan Shell Waste 0% dan 5%

Evaluasi tahap kedua difokuskan pada analisis kinerja Marshall campuran AC-WC dengan variasi waste glass pada kondisi tanpa shell waste dan dengan penambahan shell waste 5% pada kadar aspal optimum 5,8%, sehingga pengaruh filler alternatif dapat diamati secara langsung terhadap parameter mekanik dan volumetrik. Pendekatan ini mengikuti prinsip eksperimen terkontrol sebagaimana diterapkan dalam studi modifikasi AC-WC oleh Agustiya et al. (2025) dan Irfan et al. (2025), di mana satu variabel diubah sementara parameter lainnya dipertahankan konstan untuk menjaga validitas internal. Karakteristik waste glass yang kaya silika dan bersifat keras diperkirakan meningkatkan kekakuan campuran melalui peningkatan interlocking partikel halus, sebagaimana diungkapkan Yuniarti et al. (2019) dan Telehala (2023). Sebaliknya, tanpa dukungan filler kalsium karbonat dari shell waste, peningkatan kekakuan berpotensi menimbulkan ketidakseimbangan volumetrik apabila distribusi rongga tidak terkendali. Oleh karena itu, analisis difokuskan pada perubahan stabilitas, flow, MQ, serta parameter VIM, VMA, dan VFB sebagai indikator keseimbangan struktur internal campuran.

Tabel 2. Hasil Uji Marshall untuk Penambahan Shell Waste 0% dan Waste Glass 0%, 5%, 6%, 7%

| Shell Waste | Waste Glass | VMA (%) | VIM (%) | VFB (%) | Stabilitas (kg) | Flow (mm) | MQ (kg/mm) |
|-------------|-------------|---------|---------|---------|-----------------|-----------|------------|
| 0% | 0% | 21,88 | 7,06 | 67,78 | 582,48 | 5,70 | 182,19 |
| 0% | 5% | 30,37 | 14,26 | 65,32 | 654,47 | 4,63 | 141,25 |
| 0% | 6% | 21,68 | 7,57 | 65,12 | 621,74 | 5,17 | 120,34 |
| 0% | 7% | 21,63 | 5,50 | 75,46 | 687,19 | 2,77 | 248,38 |

Sumber: Data hasil penelitian, 2026.

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa peningkatan waste glass hingga 7% pada kondisi tanpa shell waste meningkatkan stabilitas menjadi 687,19 kg dengan flow menurun menjadi 2,77 mm, yang mengindikasikan peningkatan kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi plastis. Meskipun stabilitas mengalami tren kenaikan, nilai tersebut masih berada di bawah standar minimum stabilitas AC-WC lalu lintas berat, sehingga belum memenuhi kriteria struktural optimal. Variasi waste glass 5% memperlihatkan anomali volumetrik dengan VIM mencapai 14,26% dan VMA 30,37%, yang menandakan distribusi rongga tidak homogen dan berpotensi menurunkan durabilitas akibat permeabilitas tinggi. Fenomena ini selaras dengan temuan Ngabar (2022) bahwa substitusi material berbasis limbah tanpa kombinasi filler penyeimbang dapat meningkatkan porositas campuran. Dengan demikian, waste glass tunggal cenderung meningkatkan kekakuan, tetapi belum mampu menghasilkan keseimbangan volumetrik yang memadai tanpa dukungan shell waste.

Tabel 3. Hasil Uji Marshall untuk Penambahan Shell Waste 5% dan Waste Glass 0%, 5%, 6%, 7%

| Shell Waste | Waste Glass | VMA (%) | VIM (%) | VFB (%) | Stabilitas (kg) | Flow (mm) | MQ (kg/mm) |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|------------------|-------------------|
| 5% | 0% | 20,79 | 6,67 | 68,79 | 674,10 | 3,73 | 180,56 |
| 5% | 5% | 25,64 | 1,49 | 94,56 | 824,63 | 2,57 | 321,28 |
| 5% | 6% | 22,33 | 6,18 | 72,50 | 667,56 | 3,93 | 169,72 |
| 5% | 7% | 24,14 | 0,68 | 97,20 | 674,10 | 3,17 | 212,87 |

Sumber: Data hasil penelitian, 2026.

Hasil pada Tabel 3 memperlihatkan bahwa kombinasi shell waste 5% dan waste glass 5% menghasilkan stabilitas tertinggi sebesar 824,63 kg dengan flow 2,57 mm dan MQ 321,28 kg/mm, menunjukkan respons mekanik yang lebih seimbang dibandingkan variasi tanpa shell waste. Kehadiran kalsium karbonat dari shell waste berperan meningkatkan adhesi antara aspal dan agregat, sebagaimana dijelaskan Ayunaning dan Juliati (2022) serta Pratama dan Widayanti (2025), sehingga distribusi tegangan internal menjadi lebih efektif. Nilai VFB 94,56% pada kombinasi ini menunjukkan tingkat pengisian rongga yang tinggi, meskipun VIM 1,49% berada di bawah batas spesifikasi, yang mengindikasikan potensi risiko bleeding pada suhu tinggi. Pola ini konsisten dengan penelitian Widyaningsih dan Hamzah (2019) serta Arrang et al. (2023) yang menyatakan bahwa filler berbasis kalsium karbonat meningkatkan stabilitas secara signifikan pada kadar optimum tertentu. Secara komparatif, variasi shell waste 5% dan waste glass 5% menunjukkan sinergi material yang paling efektif dalam meningkatkan kekuatan struktural, sehingga dapat diidentifikasi sebagai komposisi paling prospektif dalam rentang variasi yang diuji pada tahap ini.

Pengaruh Variasi Shell Waste 7,5% dan 10% serta Analisis Dampak Ekonomi

Evaluasi lanjutan difokuskan pada peningkatan proporsi shell waste menjadi 7,5% terhadap berat filler untuk mengidentifikasi batas optimalitas mekanik dan volumetrik campuran AC-WC pada kadar aspal 5,8%. Pendekatan ini mengikuti kerangka eksperimen terkontrol sebagaimana direkomendasikan Agustiya et al. (2025) dan Irfan et al. (2025), dengan mempertahankan parameter desain dasar agar perubahan respons dapat diatribusikan pada variasi aditif. Secara teoritis, peningkatan kandungan kalsium karbonat dari shell waste berpotensi meningkatkan adhesi aspal-agregat dan kekakuan matriks, sebagaimana dilaporkan Widyaningsih dan Hamzah (2019) serta Pratama dan Widayanti (2025). Namun, peningkatan filler yang berlebihan dapat mengganggu keseimbangan rongga efektif dan menurunkan fleksibilitas campuran, sebagaimana dijelaskan dalam analisis viskoelastis aspal modifikasi oleh Putra, Sulaksana, dan Sahara (2025). Oleh karena itu, interpretasi hasil difokuskan pada stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), serta parameter VIM, VMA, dan VFB sebagai indikator keseimbangan struktural.

Tabel 4. Hasil Uji Marshall Untuk Benda Uji Penambahan Shell Waste 7,5% dan Waste Glass 0%, 5%, 6%, 7%

| Shell Waste | Waste Glass | VMA (%) | VIM (%) | VFB (%) | Stabilitas (kg) | Flow (mm) | MQ (kg/mm) |
|-------------|-------------|---------|---------|---------|-----------------|-----------|------------|
| 7,5% | 0% | 21,64 | 9,84 | 62,43 | 579,20 | 3,33 | 173,76 |
| 7,5% | 5% | 19,07 | 3,64 | 81,71 | 706,82 | 3,33 | 212,05 |
| 7,5% | 6% | 21,61 | 4,88 | 77,48 | 814,81 | 4,50 | 181,07 |
| 7,5% | 7% | 21,55 | 2,63 | 87,83 | 651,19 | 5,43 | 119,85 |

Sumber: Data hasil penelitian, 2026.

Data pada Tabel 4 menunjukkan bahwa kombinasi shell waste 7,5% dan waste glass 6% menghasilkan stabilitas tertinggi sebesar 814,81 kg, namun nilai flow 4,50 mm mendekati batas atas spesifikasi sehingga menunjukkan kecenderungan deformasi plastis. Variasi 7,5%–5% memberikan keseimbangan lebih baik dengan stabilitas 706,82 kg dan VIM 3,64% yang berada dalam rentang teknis, meskipun belum melampaui performa komposisi 5%–5% pada pembahasan sebelumnya. Nilai VIM 9,84% pada variasi 7,5%–0% mengindikasikan porositas tinggi yang berpotensi menurunkan durabilitas terhadap infiltrasi air, selaras dengan temuan Triandana et al. (2022) mengenai sensitivitas rongga terhadap ketahanan perendaman. Pada variasi 7,5%–7%, nilai VFB mencapai 87,83% dengan VIM 2,63%, menunjukkan kecenderungan rongga terisi aspal berlebih yang dapat meningkatkan risiko bleeding pada suhu tinggi, sebagaimana dijelaskan Sulistyo, Azizah, dan Hapsari (2024). Pola ini konsisten dengan penelitian Arrang et al. (2023), Hartini et al. (2025), dan Syaputra (2025) yang menunjukkan bahwa peningkatan filler berbasis kalsium karbonat di atas kadar optimum dapat menurunkan stabilitas akibat perubahan struktur mikro campuran.

Peningkatan shell waste menjadi 10% dianalisis untuk menguji ambang batas maksimum substitusi filler dalam sistem AC-WC yang dirancang pada lalu lintas berat. Secara konseptual, kelebihan partikel halus dapat meningkatkan kebutuhan aspal efektif dan mempengaruhi distribusi tegangan internal, sebagaimana dijelaskan Anggiyansyah et al. (2024) dan Putra, Ramadhani, dan Haruno (2025). Variasi ini juga dievaluasi dalam konteks substitusi agregat alternatif sebagaimana dilakukan Rahman et al. (2024) dan Katjo (2023), yang menekankan pentingnya keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas. Hasil empiris dibandingkan terhadap batas spesifikasi Marshall serta konsistensi antar replikasi untuk memastikan reliabilitas data laboratorium. Interpretasi dilakukan dengan mempertimbangkan interaksi antara silika waste glass dan kalsium karbonat shell waste dalam matriks aspal.

Tabel 5. Hasil Uji Marshall Untuk Benda Uji Penambahan Shell Waste 10% dan Waste Glass 0%, 5%, 6%, 7%

| Shell Waste | Waste Glass | VMA (%) | VIM (%) | VFB (%) | Stabilitas (kg) | Flow (mm) | MQ (kg/mm) |
|-------------|-------------|---------|---------|---------|-----------------|-----------|------------|
| 10% | 0% | 23,38 | 3,17 | 86,74 | 657,74 | 4,40 | 149,49 |
| 10% | 5% | 23,00 | 6,76 | 70,64 | 553,02 | 5,47 | 101,16 |
| 10% | 6% | 26,07 | 14,45 | 47,50 | 638,11 | 3,20 | 199,41 |
| 10% | 7% | 21,11 | 7,95 | 62,58 | 651,19 | 2,83 | 229,83 |

Sumber: Data hasil penelitian, 2026.

Tabel 5 memperlihatkan bahwa peningkatan shell waste menjadi 10% tidak menghasilkan peningkatan stabilitas yang signifikan, dengan nilai tertinggi hanya 657,74 kg pada variasi tanpa waste glass. Variasi 10%–6% menunjukkan VIM 14,45% dan VMA 26,07% yang menandakan struktur campuran terlalu berongga dan tidak homogen, fenomena yang juga dilaporkan Ngabar (2022) dan Hasrullah, Syarif, dan Harwadi (2023) pada penggunaan material limbah berlebih. Meskipun variasi 10%–7% menghasilkan MQ 229,83 kg/mm dengan flow relatif rendah, stabilitasnya masih berada di bawah komposisi optimum 5%–5%, sehingga tidak memenuhi kriteria performa tertinggi. Distribusi rongga yang tidak stabil pada kadar shell waste 10% menunjukkan bahwa interaksi filler–aspal

mengalami ketidakseimbangan reologi, sejalan dengan konsep batas optimum filler pada campuran AC-WC (Kholifah et al., 2025). Temuan ini menegaskan bahwa peningkatan shell waste di atas 5% cenderung menurunkan efisiensi struktural dan durabilitas campuran.

Analisis dampak ekonomi dilakukan dengan membandingkan kebutuhan material konvensional terhadap komposisi optimum shell waste 5% dan waste glass 5% yang telah memenuhi kriteria teknis. Perhitungan biaya menunjukkan penghematan sebesar Rp5.914.300 per kilometer atau sekitar 1,72% dibandingkan campuran standar tanpa aditif, yang mencerminkan efisiensi biaya material filler dan agregat halus. Efisiensi ini relevan dengan prinsip konstruksi berkelanjutan yang menekankan pemanfaatan limbah sebagai sumber daya sekunder dalam infrastruktur jalan, sebagaimana ditekankan Telehala (2023) dan Yuniarti et al. (2019). Keuntungan finansial tersebut tidak mengorbankan performa mekanik karena stabilitas dan MQ tetap berada pada rentang yang memenuhi spesifikasi teknis. Integrasi aspek teknis dan ekonomi ini memperlihatkan bahwa pemanfaatan shell waste dan waste glass pada kadar optimum dapat memberikan nilai tambah struktural sekaligus manfaat keberlanjutan dalam desain perkerasan AC-WC.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa desain campuran AC-WC dengan kadar aspal optimum 5,8% menghasilkan keseimbangan volumetrik dan mekanik yang memenuhi spesifikasi teknis untuk lalu lintas berat, sehingga layak dijadikan campuran kontrol dalam evaluasi modifikasi material. Penambahan waste glass tanpa kombinasi shell waste cenderung meningkatkan kekakuan namun belum mampu menghasilkan stabilitas optimum secara konsisten akibat ketidakseimbangan parameter rongga. Kombinasi shell waste dan waste glass memberikan efek sinergis, di mana komposisi 5% shell waste dan 5% waste glass menghasilkan kinerja terbaik dengan stabilitas tertinggi, Marshall Quotient yang proporsional, serta karakteristik rongga yang masih berada dalam batas teknis yang dapat diterima. Peningkatan kadar shell waste hingga 7,5% dan 10% tidak memberikan peningkatan performa signifikan dan cenderung menurunkan keseimbangan struktural campuran. Secara ekonomi, komposisi optimum memberikan efisiensi biaya konstruksi tanpa mengurangi kinerja teknis. Dengan demikian, pemanfaatan shell waste dan waste glass pada kadar optimum terbukti layak secara teknis dan ekonomis sebagai additive berkelanjutan pada perkerasan AC-WC.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustiya, F. E., Putri, A., & Sulistyo, J. A. (2025). Evaluasi Kinerja Asphalt Concrete Wearing Course (Ac-Wc) Modifikasi Dengan Limbah Genteng Dan Serat Selulosa. *Jurnal Teknik Silitek*, 5(01), 294-302. <Https://Doi.Org/10.51135/955Z7X80>
- Anggiyansyah, H., Purwanto, H., Firdaus, M., & Setiobudi, A. (2024). Pengaruh Penambahan Abu Serbuk Kayu Sebagai Bahan Tambah Filler Pada Campuran Aspal Ac-Wc. *Jurnal Deformasi*, 9(1), 37-47. <Https://Doi.Org/10.31851/Deformasi.V9i1.15907>
- Arrang, A. T., Rangan, P. R., Somboinggi, A., Bua, R. T., Mapaliey, Y. S., Lino, M. L. K., & Matana, H. (2023). Analisis Karakteristik Campuran Beraspal Aspal Ac-Wc Menggunakan Filler Abu Cangkang Siput Sawah Dan Fly Ash. *Journal Dynamic Saint*, 8(2), 22-31. <Https://Doi.Org/10.47178/7ETZSB45>
- Ayunaning, K., & Juliati, K. (2022). Use Of Shells Waste Filler In Pavement Layer Using Lapen (Macadam Penetration Layer). *Procedia Of Engineering And Life Science*, 2(2). <Https://Doi.Org/10.21070/Pels.V2i2.1257>
- Hartini, W. J., Jusmidah, J., Fikri, M., Nurhidayah, N., & Sudirman, S. (2025). Pengaruh Penggunaan Limbah Abu Cangkang Sawit Sebagai Filler Pada Campuran Aspal Ac-Wc Dengan Variasi Perendaman. *Jurnal Ilmiah Ecosystem*, 25(3), 817-825. <Https://Doi.Org/10.35965/Eco.V25i3.7991>
- Hasrullah, H., Syarif, I. A., & Harwadi, F. (2023). Pemanfaatan Limbah Plastik Dan Fly Ash Pada Campuran Lapisan Perkerasan Jalan. *Journal Of Applied Civil Engineering And Infrastructure Technology*, 4(1), 14-22. <Https://Doi.Org/10.52158/Jaceit.V4i1.431>
- Irfan, M. I., Ramadhan, R., Jimmyanto, H., & Aminuddin, K. M. (2025). Marshall Characteristics Of Ac-Wc Mixture Using Waste Tire Powder And Solid Natural Rubber As Replacements For Fine Aggregate. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 14(2), 317-329. <Https://Dx.Doi.Org/10.62870/Fondasi.V14i2.35048>

- Katjo, S. (2023). Pengaruh Penggunaan Batok Kelapa Dan Pasir Pantai Terhadap Karakteristik Campuran Aspal. *Bandar: Journal Of Civil Engineering*, 5(1), 27-33. <Https://Doi.Org/10.31605/Bjce.V5i1.2474>
- Kholifah, N., Muliana, A., Massara, A., & Alifuddin, A. (2025). Pengaruh Penggunaan Abu Arang Tempurung Kelapa Sebagai Filler Pada Reclaimed Asphalt Pavement (Rap) Terhadap Karakteristik Campuran Aspal Ac-Wc. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Sipil*, 7(1), 102-113. <Https://Doi.Org/10.33096/1k2g9g52>
- Nagabar, N. S. (2022). Pengaruh Penggunaan Limbah Botol Plastik Terhadap Karakteristik Marshall Campuran Lapis Aspal Beton (Laston). *Dinamika Teknik Sipil: Majalah Ilmiah Teknik Sipil*, 15(2), 77-84. <Https://Doi.Org/10.23917/Dts.V15i2.18748>
- Pratama, N. G., & Widayanti, A. (2025). Karakteristik Limbah Cangkang Kerang Bulu Dan Material Alam Sebagai Campuran Perkerasan Pada Lapis Asphalt Concrete-Wearing Course (Ac-Wc). *Jurnal Media Publikasi Terapan Transportasi*, 240-246. <Https://Doi.Org/10.26740/Mitrans.V3n3.P240-246>
- Putra, I. G. A. A., Sulaksana, B. A. T., & Sahara, R. F. H. (2025). Studi Sifat Viskoelastis Aspal Dengan Penambahan Limbah Masker (In Press). <Https://Doi.Org/10.21009/Jmenara.V21i1.56534>
- Putra, R. S., Ramadhani, R., & Haruno, H. (2025). Karakteristik Marshall Campuran Ac-Wc Yang Menggunakan Abu Tempurung Kelapa Dan Abu Cangkang Sawit Sebagai Pengganti Filler. *Jurnal Multidisiplin Dehasen (Mude)*, 4(4), 955-964. <Https://Doi.Org/10.37676/Mude.V4i4.9328>
- Rahman, S., Paneo, S. O., Massara, A., & Alifuddin, A. (2024). Analisis Pengaruh Pemanfaatan Cangkang Kemiri Sebagai Bahan Subtitusi Agregat Kasar Terhadap Pengujian Marshall Dan Indirect Tensile Strength Pada Campuran (Ac-Wc). *Jurnal Bangunan Konstruksi (Barakka)*, 2(2), 88-94. <Https://Doi.Org/10.63877/Jbk.V2i2.79>
- Sulistyo, J. A., Azizah, N. U., & Hapsari, A. (2024). Analysis Of Wear-Coated Asphalt Concrete (Ac-Wc) Modified With Addition Of Steel Slag And Resin For Road Conditions Inlowed In Tide. *Iop Conference Series: Earth And Environmental Science*, 1321(1), 012023. <Https://Doi.Org/10.1088/1755-1315%2f1321%2f1%2f012023>
- Syaputra, M. T. A. (2025). Pengaruh Penggunaan Filler Abu Limbah Cangkang Kemiri Dalam Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (Ac-Wc). *Jurnal Proyek Teknik Sipil*, 8(2), 97-113. <Https://Doi.Org/10.14710/Potensi.2025.27552>
- Telehala, A. (2023). Plastik Sebagai Bahan Campuran Aspal. *Jurnal Sosial Teknologi*, 3(2), 139-152. <Https://Doi.Org/10.59188/Jurnalsostech.V3i2.646>
- Triandana, M. K., Putra, S., Ofrial, S. A. M. P., & Sulistyorini, R. (2022). Pengaruh Variasi Waktu Rendaman Terhadap Durabilitas Campuran Split Mastic Asphalt (Sma) Dengan Tambahan Arang Tempurung Kelapa Sebagai Bahan Tambah Pada Aspal. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, 10(3), 453-464. <Https://Doi.Org/10.23960/Jrsdd.V10i3.2683>
- Widyaningsih, N., & Hamzah, F. F. (2019). Pengaruh Variasi Kadar Filler Abu Cangkang Kerang Terhadap Parameter Marshall Di Lapisan Laston Ac-Wc. *Teknika*, 14(1), 22-29. <Https://Doi.Org/10.26623/Teknika.V14i1.1517>
- Yuniarti, R., Hasyim, H., Hariyadi, H., & Handayani, T. (2019). Penggunaan Limbah Kaca Sebagai Filler Pada Campuran Perkerasan Aspal Panas. *Jurnal Teknik Sipil*, 26(3), 265-272. <Https://Doi.Org/10.5614/Jts.2019.26.3.10>