

JURNAL KONSTRUKSI DAN INFRASTRUKTUR

Teknik Sipil dan Perencanaan

ANALISIS KINERJA MARSHALL DAN VOLUMETRIK CAMPURAN AC-BC DENGAN AGREGAT BUATAN BERBASIS GEOPOLIMER

Yayan Adi Saputro^{1*}

^{1)} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Nahdlatul Ulama Jepara.
Email Penulis Korespondensi : yayan@unisnu.ac.id
Nomor HP Penulis Korespondensi : 085713209805*

ABSTRACT

This study evaluates the performance of asphalt concrete binder course (AC-BC) mixtures incorporating artificial coarse aggregates at replacement levels of 0%, 50%, and 100% using the Marshall method. The artificial coarse aggregate exhibited a Los Angeles abrasion value of 40% and an absorption of 6.69%, while the natural aggregate showed an abrasion value of 21.34% and an absorption of 5.33%. The 60/70 penetration asphalt binder used in this study had a penetration value of 64.6 dmm, ductility of 120 cm, specific gravity of 1.036, and a softening point of 38.5 °C. Marshall testing was conducted at a designed asphalt content of 5%. The results indicate that all mixtures achieved acceptable stability, flow, voids in mineral aggregate (VMA), and Marshall quotient values. However, all mixtures exhibited high voids in the mix (VIM) and low voids filled with asphalt (VFA), indicating insufficient effective asphalt content. This behavior is mainly attributed to the high absorption capacity of the artificial aggregates and the relatively low softening point of the asphalt binder. The mixture is not yet volumetrically feasible at 5% asphalt content, so it requires optimization of asphalt content or pre-treatment of artificial aggregates. The findings suggest that artificial aggregates may be utilized in AC-BC mixtures with appropriate adjustments to asphalt content and material properties.

Keyword: *Geopolymer artificial aggregate, AC-BC, Marshall characteristics, volumetric properties, asphalt mixture*

1. PENDAHULUAN

Perkerasan jalan memainkan peran penting dalam mendukung transportasi darat dan mobilitas ekonomi [1]. Di Indonesia, perkerasan lentur merupakan sistem dominan yang digunakan pada jaringan jalan nasional dan regional [2]. Campuran beton aspal biasanya terdiri dari pengikat aspal dan agregat alami, di mana agregat merupakan 92–96% dari total berat. Namun, ketersediaan agregat berkualitas tinggi semakin berkurang karena penambangan yang berlebihan dan peraturan lingkungan [3,4]. Oleh sebab itu, ada kebutuhan dasar yang mendesak untuk mengidentifikasi material agregat alternatif yang berkelanjutan, tahan lama, dan layak secara teknis untuk aplikasi perkerasan aspal. Beberapa penelitian telah memperkenalkan agregat buatan sebagai pengganti agregat alami untuk mengurangi ketergantungan pada material tambang. Agregat buatan atau hasil manufaktur dapat diproduksi dari bahan limbah seperti abu terbang, abu dasar, beton daur ulang, atau produk sampingan industri [5,6]. Penelitian tentang beton aspal menggunakan agregat beton daur ulang (RCA) telah menunjukkan kinerja yang layak dalam hal stabilitas, kekakuan, dan karakteristik Marshall [7,8]. Studi lain melaporkan bahwa substitusi parsial ($\leq 25\%$) agregat buatan dapat mempertahankan sifat volumetrik dan mekanik yang dapat diterima, meskipun tingkat penggantian yang lebih tinggi dapat

meningkatkan rongga udara dan mengurangi stabilitas [9].

Dalam beberapa tahun terakhir, agregat buatan berbasis geopolimer telah mendapatkan perhatian yang signifikan karena sifat mekaniknya yang unggul, jejak karbon yang rendah, dan potensi untuk menggunakan kembali bahan limbah industri [10,11]. Agregat geopolimer yang berasal dari abu terbang menunjukkan kekuatan tekan yang lebih baik, penyerapan air yang lebih rendah, dan ketahanan yang lebih tinggi terhadap siklus beku-cair dibandingkan dengan banyak agregat alami [12,13]. Geopolimer berbahan dasar abu terbang telah banyak dipelajari dalam aplikasi beton, menunjukkan peningkatan daya tahan dan kinerja mikrostruktur [14,15].

Penerapan agregat geopolimer berbasis abu terbang dalam campuran aspal menjadi arah penelitian yang sedang berkembang. Studi melaporkan bahwa pengisi dan agregat geopolimer dapat meningkatkan stabilitas aspal, meningkatkan adhesi antara pengikat dan agregat, dan mengoptimalkan ketahanan terhadap kelembaban [16,17]. Agregat geopolimer hidrofobik juga menunjukkan daya tahan yang lebih baik ketika digunakan dalam campuran aspal, mengurangi potensi pengelupasan dan meningkatkan stabilitas Marshall [18]. Selain itu, optimasi rasio aktivator alkali ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) telah terbukti secara signifikan mempengaruhi kekuatan dan mikrostruktur agregat geopolimer [18,19].

Mengingat semakin banyaknya ketersediaan abu terbang dari pembangkit listrik tenaga batubara di Indonesia, agregat buatan berbasis geopolimer menawarkan alternatif yang menjanjikan dibandingkan agregat alami. Penggunaannya sejalan dengan inisiatif perkerasan berkelanjutan, mengurangi dampak lingkungan, meminimalkan limbah industri, dan meningkatkan kinerja jangka panjang campuran aspal. Oleh karena itu, pengembangan campuran aspal AC-BC yang menggabungkan agregat geopolimer merupakan langkah strategis menuju pencapaian infrastruktur perkerasan jalan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja Marshall dan parameter volumetrik campuran AC-BC dengan substitusi agregat kasar buatan berbasis geopolimer sebesar 0%, 50%, dan 100% pada kadar aspal 5%, guna menilai kelayakan teknis penggunaannya sebagai alternatif agregat alami

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk mengevaluasi kinerja campuran Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC) dengan penggunaan agregat buatan berbasis geopolimer sebagai substitusi agregat konvensional. Fly ash tidak dicampurkan langsung ke dalam aspal, melainkan digunakan sebagai bahan utama pembuatan agregat buatan.

1. Bahan dan Karakteristik Material : Material yang digunakan meliputi aspal penetrasi 60/70, agregat alami, agregat buatan geopolimer, filler (lolos ayakan No. 200), serta aktivator berupa NaOH dan Na_2SiO_3 . Pengujian material dilakukan sesuai standar SNI/ASTM, meliputi analisis saringan, berat jenis, penyerapan agregat, dan karakteristik aspal.
2. Pembuatan Agregat Buatan Geopolimer : Agregat buatan dibuat dari campuran fly ash : pasir (2 : 2,5) dengan aktivator Na_2SiO_3 : NaOH (± 2 : 1) dan konsentrasi NaOH (misal 8–10 M). Campuran diaduk hingga homogen, dicetak, kemudian dicuring (suhu ruang 7–28 hari). Setelah itu dihancurkan dan diayak sesuai ukuran agregat AC-BC.
3. Rancangan Gradasi AC-BC : Gradasi campuran mengacu pada spesifikasi Bina Marga untuk AC-BC, dengan proporsi agregat kasar, halus, dan filler. Agregat buatan digunakan sebagai substitusi sebagian/seluruh agregat sesuai variasi.
4. Variasi Campuran : Variasi penelitian berupa persentase agregat buatan terhadap total agregat (0%, 50%, 100%). Kadar aspal ditetapkan sebesar 5% (nilai tengah spesifikasi Bina Marga) sebagai studi awal, tanpa penentuan KAO.
5. Pembuatan Benda Uji Marshall : Benda uji dibuat sesuai SNI 06-2489-1991, dengan pemadatan 75 tumbukan per sisi. Setiap variasi dibuat minimal 3 benda uji.
6. Standar Pengujian : Pengujian dilakukan berdasarkan SNI 06-2489-1991 atau ASTM D6927 (Metode Marshall).
7. Parameter Evaluasi : Parameter yang dianalisis meliputi stabilitas, flow, VIM, VMA, VFA, dan Marshall Quotient (MQ). Selain itu, dilakukan uji kuat tekan pada agregat geopolimer untuk mengevaluasi kekuatan material sebelum digunakan dalam campuran.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengujian Bahan

Hasil pengujian terhadap agregat kasar alami, agregat kasar buatan, agregat halus, serta aspal yang digunakan dalam penelitian ini disajikan sebagai berikut :

Tabel 1. Hasil Uji Agregat

Jenis Pengujian	Spesifikasi	Agregat Alami	Agregat Buatan	Agregat Halus
Los Angeles	≤ 40	21,34%	40%	-
Berat jenis bulk	-	2,40	2,04	2,58
Berat jenis kering	-	2,53	2,18	2,71
Berat jenis semu	-	2,76	2,36	2,97
Penyerapan	-	5,33%	6,69%	5,09%

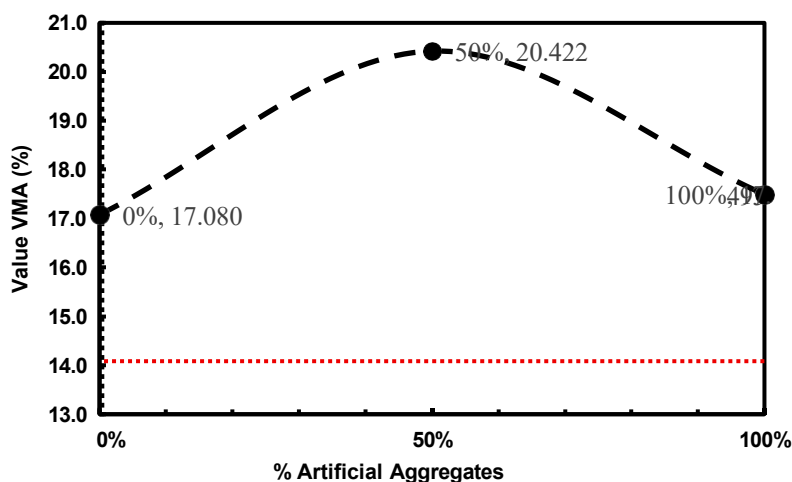
Source: Hasil Analisis, 2025

Tabel 2. Hasil Uji Aspal

Jenis Pengujian	Spesifikasi Aspal Pen 60/70	Hasil Uji Aspal	
Penetrasi	60-70	64,6	√
Daktilitas	≥ 100	120	√
Titik Lembek	≥ 48	38,5	x
Berat jenis	≥ 1,0	1,036	√

3.2. Pengujian Marshall

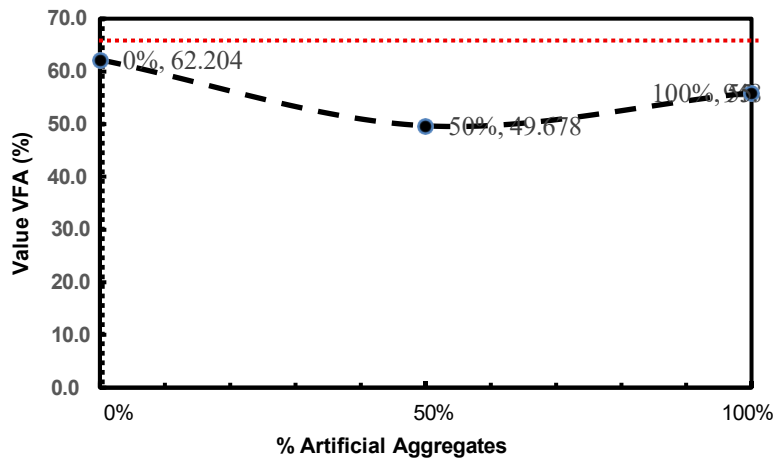
Pengujian Marshall menggunakan 3 jenis campuran yang berbeda. Campuran pertama menggunakan 100% agregat kasar alami, campuran kedua menggunakan 50% agregat kasar alami dan 50% agregat kasar buatan, dan campuran ketiga menggunakan 100% agregat buatan. Hasil pengujian Marshall yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 1. Grafik VMA

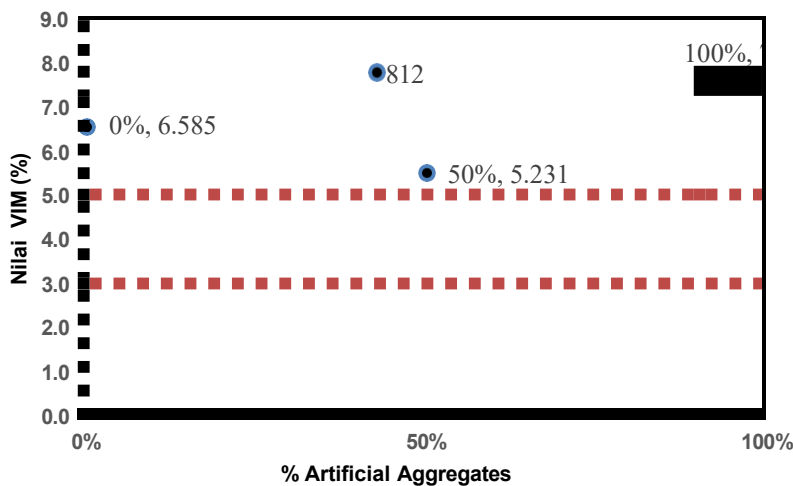
Berdasarkan gambar grafik di atas, terlihat bahwa penggunaan agregat buatan sebesar 0%, 50%, dan

100% menunjukkan bahwa rongga agregat dalam beton aspal padat dapat menampung jumlah kandungan aspal, sehingga menyebabkan kepadatan antar butiran agregat menjadi lebih baik, menghasilkan ikatan agregat yang lebih baik oleh aspal. Nilai VMA pada grafik menunjukkan bahwa campuran aspal memenuhi spesifikasi standar yang ditentukan, yaitu di atas 14%.



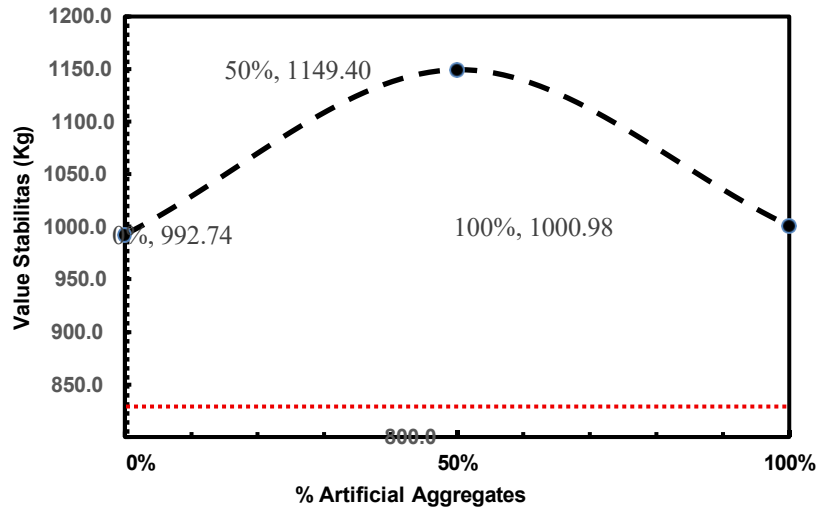
Gambar 2. Grafik VFA

Berdasarkan gambar di atas, terlihat bahwa penggunaan agregat buatan sebesar 0%, 50%, dan 100% menunjukkan bahwa rongga antara agregat yang diisi aspal tidak terisi dengan baik, hal ini menyebabkan kedapatan campuran air dan udara menurun. Nilai VFA pada grafik tidak memenuhi spesifikasi yang ditentukan, yaitu di atas 65%.



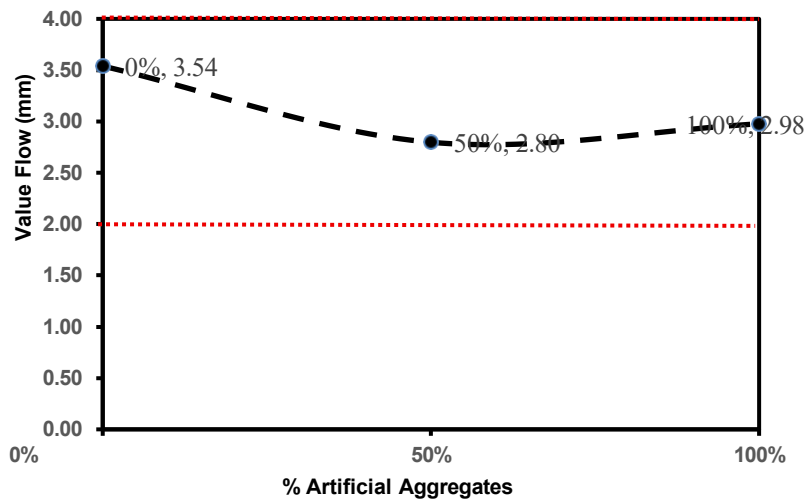
Gambar 3. Grafik VIM

Berdasarkan gambar di atas, terlihat bahwa penggunaan agregat buatan sebesar 0%, 50%, dan 100% menunjukkan bahwa rongga pada beton aspal padat memiliki lubang yang besar, yang dapat menyebabkan campuran menjadi berpori. Hal ini menyebabkan campuran menjadi kurang padat, di mana air dan udara mudah masuk ke dalam rongga pada campuran, menyebabkan campuran mudah teroksidasi, sehingga mengurangi daya tahan. Nilai VIM pada grafik tidak memenuhi spesifikasi, yaitu 3-5%.



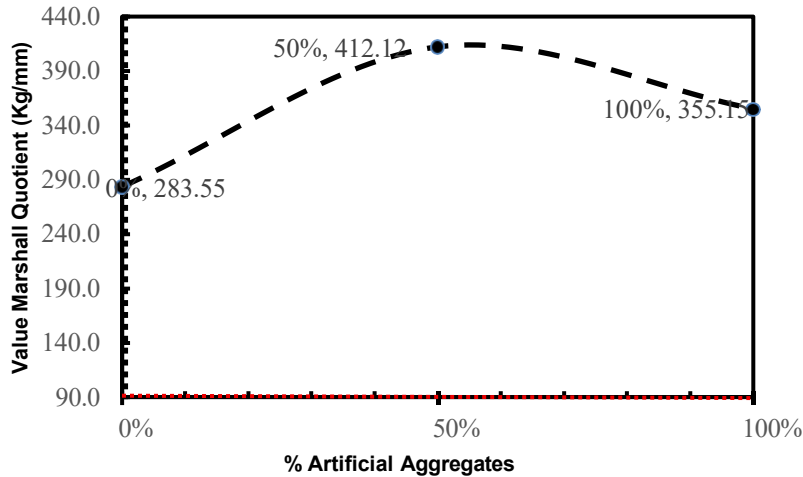
Gambar 4. Grafik Stabilitas

Berdasarkan gambar grafik di atas, terlihat bahwa penggunaan agregat buatan 0% dan 50% menunjukkan peningkatan nilai stabilitas, sedangkan setelah penambahan kandungan agregat buatan hingga 100%, nilai stabilitas menurun. Peningkatan nilai stabilitas disebabkan oleh penyerapan aspal yang merata ke dalam agregat, sementara penurunan nilai stabilitas disebabkan oleh penyerapan agregat yang berlebihan sehingga daya rekat berkurang. Meskipun terjadi peningkatan dan penurunan nilai stabilitas dengan penggunaan agregat buatan 0%, 50%, dan 100%, nilai stabilitas pada grafik memenuhi spesifikasi, yaitu di atas 800 kg.



Gambar 5. Flow Diagram

Berdasarkan gambar grafik di atas, terlihat bahwa ketika menggunakan agregat buatan 0% dan 50% terjadi penurunan, yang menunjukkan bahwa penambahan agregat mengurangi sifat plastis campuran. Ketika menambahkan agregat buatan pada 100%, aliran mengalami sedikit peningkatan, menunjukkan bahwa aspal masih mampu mengisi rongga di antara agregat sehingga campuran menjadi lebih plastis. Meskipun terjadi penurunan dan peningkatan nilai aliran dengan penggunaan agregat buatan 0%, 50% dan 100%, nilai aliran pada grafik memenuhi spesifikasi, yaitu antara 2-4 mm.



Gambar 6. Marshall Quotient

Berdasarkan gambar grafik di atas, terlihat bahwa ketika menggunakan agregat buatan 0% dan 50% terjadi peningkatan, yang menunjukkan bahwa penambahan agregat menyebabkan perkerasan menjadi lebih kaku atau keras. Sementara itu, ketika menggunakan agregat buatan 100%, terjadi sedikit penurunan, yang menunjukkan bahwa campuran menjadi sedikit lebih fleksibel. Meskipun terjadi peningkatan dan penurunan nilai Marshall Quotient dengan penggunaan agregat buatan 0%, 50% dan 100% sesuai tabel 2.11, nilai Marshall Quotient pada grafik memenuhi spesifikasi, yaitu di atas 90 kg/mm.

	0%	50%	100%
Stabilitas	memenuhi	memenuhi	memenuhi
Flow	memenuhi	memenuhi	memenuhi
VIM	Tidak memenuhi	Tidak memenuhi	Tidak memenuhi
VFA	Tidak memenuhi	Tidak memenuhi	Tidak memenuhi
VMA	memenuhi	memenuhi	memenuhi
MQ	memenuhi	memenuhi	memenuhi
	0%	50%	100%
	Aggregate Content		

Gambar 7. Grafik Nilai Optimum Agregat

Berdasarkan grafik di atas, kadar aspal 5% sesuai dengan kadar aspal yang direncanakan dan nilai optimum untuk kadar agregat buatan dalam campuran aspal AC-BC belum diperoleh. Pada gambar grafik di atas, hampir semua data kinerja campuran berada dalam zona persyaratan kecuali volume rongga yang diisi aspal (VFA) dan volume rongga dalam aspal padat (VIM). Hal ini dapat disebabkan

oleh nilai VMA yang tinggi akibat penyerapan agregat sehingga VFA tidak tertutup dengan baik dan menyebabkan VIM yang besar sehingga dapat mengakibatkan peleburan lebih cepat. Hal ini juga dapat dipengaruhi oleh proses pemadatan yang tidak merata dalam campuran atau persentase berat aspal atau agregat yang menurun selama proses pembuatan objek uji.

4. KESIMPULAN

Agregat buatan berbasis geopolimer memiliki nilai abrasi Los Angeles sebesar 40% dan penyerapan 6,69%, lebih tinggi dibanding agregat alami (abrasi 21,34% dan penyerapan 5,33%). Pada pengujian Marshall dengan kadar aspal 5%, seluruh variasi campuran (0%, 50%, dan 100% agregat buatan) memenuhi parameter stabilitas, flow, VMA, dan Marshall Quotient, dengan variasi 50% agregat buatan menunjukkan respons stabilitas terbaik. Namun demikian, parameter volumetrik utama belum terpenuhi, ditunjukkan oleh nilai VIM yang melebihi batas dan VFA yang berada di bawah spesifikasi pada semua variasi. Hal ini mengindikasikan rendahnya aspal efektif akibat tingginya daya serap agregat buatan (6,69%), sehingga pada kondisi ini kadar aspal 5% belum optimal. Dengan demikian, agregat buatan berbasis geopolimer berpotensi digunakan pada campuran AC-BC, namun masih memerlukan optimasi lebih lanjut melalui penyesuaian kadar aspal, peningkatan kualitas agregat, dan/atau pra-perlakuan agregat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Shtayat A, Moridpour S, Best B, Shroff A, Raol D. A review of monitoring systems of pavement condition in paved and unpaved roads. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* (English Edition) 2020;7:629–38. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.03.004>.
- [2] Budiyanto A, Muhammadun H, Marleno R. Technical Analysis Of Rigid Pavement And Flexible Pavement Calculations On Teuku Umar Road – Rajawali Road 2024;3:432–43.
- [3] Karakouzian M, Crow M, Vlerin W, Whitton P, Karami M. An Innovative Design of Railroad Crossties. *Designs (Basel)* 2025;9:127. <https://doi.org/10.3390/designs9060127>.
- [4] Qian Z, Ren H, Wei Y. Effect of Aggregate Gradation and Morphology on Porous Asphalt Mixture Performance. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2021;33:4021055. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003655](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003655).
- [5] Kurzekar AS, Waghe U, Ansari K, Dabhade AN, Biswas T, Algburi S, et al. Development and optimization of geopolymer-based artificial angular coarse aggregate using cut-blade mechanism. *Case Studies in Construction Materials* 2024;21:e03826. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03826>.
- [6] Hu K, Zhao G, Lv Y, Li J, Zhang J, Qiao P, et al. Mechanistic and environmental benefits of accelerated carbonation in low-cement recycled concrete powder aggregates for sustainable asphalt pavements. *Constr Build Mater* 2025;493:143117. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143117>.
- [7] Taghipoor M. Laboratory evaluation of treated recycled concrete aggregate in asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology* 2019;12. <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0004-5>.
- [8] Zou G, Sun X, Liu X, Zhang J. Influence factors on using recycled concrete aggregate in foamed asphalt mixtures based on tensile strength and moisture resistance. *Constr Build Mater* 2020;265:120363. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120363>.
- [9] Winardi A, Made ID, Karyawan A, Anshari B. Performance of Artificial Compared to Natural Coarse Aggregates as Road Pavement Materials 2022;8:1841–6. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v8i4.2129>.
- [10] Ago C, Li G, Wu J, Md Yusoff NI. Feasibility Study of Using Hydrophobic Geopolymer-Based as Aggregate Substitution in Asphalt Mixture. *Polymers (Basel)* 2023;15. <https://doi.org/10.3390/polym15143077>.

- [11] Kalinowska-Wichrowska K, Pawluczuk E, Bołtryk M, Nietupski A. Geopolymer Concrete with Lightweight Artificial Aggregates. *Materials* (Basel) 2022;15. <https://doi.org/10.3390/ma15093012>.
- [12] Pacheco-Torgal F, Ding Y, Miraldo S, Abdollahnejad Z, Labrincha JA. Are geopolymers more suitable than Portland cement to produce high volume recycled aggregates HPC? *Constr Build Mater* 2012;36:1048–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.004>.
- [13] Abdollahnejad Z, Pacheco-Torgal F, Aguiar JL, Jesus C. Durability Performance of Fly Ash Based One-Part Geopolymer Mortars. *Key Eng Mater* 2014;634:113–20. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.634.113>.
- [14] Singh B, Rahman MR, Paswan R, Bhattacharyya SK. Effect of activator concentration on the strength, ITZ and drying shrinkage of fly ash/slag geopolymer concrete. *Constr Build Mater* 2016;118:171–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.008>.
- [15] Murali G. Recent research in mechanical properties of geopolymer-based ultra-high-performance concrete: A review. *Defence Technology* 2024;32:67–88. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.07.003>.
- [16] Sarir M, Khan R, Alam M, Khan T, Imran W. Performance Evaluation of Asphalt Concrete Mixtures Using Bagasse Ash as Filler. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering* 2021.
- [17] Karyawan ID, Ahyudanari E, Ekaputri J. Potential Use of Fly Ash Base-Geopolymer as Aggregate Substitution in Asphalt Concrete Mixtures. *Int J Eng Technol* 2017;9:3744–52. <https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i5/170905005>.
- [18] Sarir M, Khan R, Alam M, Khan T, Imran W. Performance Evaluation of Asphalt Concrete Mixtures Using Bagasse Ash as Filler. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering* 2021.
- [19] Karyawan ID, Ahyudanari E, Ekaputri J. Potential Use of Fly Ash Base-Geopolymer as Aggregate Substitution in Asphalt Concrete Mixtures. *Int J Eng Technol* 2017;9:3744–52. <https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i5/170905005>.