

Karakteristik Campuran Beraspal Panas Modifikasi Asbuton dengan Filler Nano Silika

Article History:

Received
11 Juli 2026
Revised
19 Juli 2026
Accepted
20 Juli 2026

NURHAFNI KARINA RESENTIA^{1*}, ETI SULANDARI²

¹Universitas Udayana, Bali, Indonesia

²Universitas Tanjung Pura, Kota Pontianak, Indonesia

*Corresponding email: karina_resentia@unud.ac.id

ABSTRAK

Indonesia masih bergantung pada impor aspal minyak yang memenuhi hampir 80% kebutuhan nasional sebesar 1,2 juta ton per tahun, sedangkan cadangan Asbuton di Pulau Buton diperkirakan mencapai 792,5 juta ton dan baru dimanfaatkan sekitar 1,74%. Penelitian ini mengevaluasi karakteristik Marshall campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) yang dimodifikasi dengan Asbuton butir B50/30 dan nanosilika. Empat variasi campuran diuji, yaitu HMA sebagai kontrol, Pen 60/70, NSP dengan nanosilika, ASB dengan Asbuton 10%, serta NSB dengan Asbuton 10% dan nanosilika 1%. Nilai Kadar Aspal Optimum masing-masing campuran sebesar 5,90%, 5,85%, 6,25%, dan 6,10%. Seluruh campuran memenuhi persyaratan stabilitas, flow, VIM, VFA, dan VMA. Asbuton 10% meningkatkan KAO sebesar 0,35% akibat penyerapan binder, sedangkan nanosilika 1% menurunkan KAO sebesar 0,15% melalui peningkatan efisiensi binder. Campuran NSB menghasilkan VFA tertinggi dan stabilitas lebih konsisten, sehingga layak digunakan sebagai lapis as AC-WC yang efisien serta mendukung pemanfaatan aspal domestik untuk mengurangi ketergantungan nasional terhadap impor.

Kata kunci: asbuton, marshall, nano silika, rongga

ABSTRACT

Indonesia remains dependent on imported petroleum asphalt, which supplies nearly 80% of the national demand of 1.2 million tons annually, whereas Asbuton reserves on Buton Island are estimated at 792.5 million tons, and only approximately 1.74% have been utilized. This study evaluates the Marshall characteristics of Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC) mixtures modified with B50/30 granular Asbuton and nanosilica. Four mixture variations were tested: HMA as the control using 60/70 penetration-grade asphalt, NSP containing nanosilica, ASB containing 10% Asbuton, and NSB containing 10% Asbuton and 1% nanosilica. The optimum asphalt contents were 5.90%, 5.85%, 6.25%, and 6.10%, respectively. All mixtures satisfied the requirements for stability, flow, VIM, VFA, and VMA. The addition of 10% Asbuton increased the optimum asphalt content by 0.35% because of binder absorption, whereas 1% nanosilica reduced it by 0.15% by improving binder efficiency. The NSB mixture produced the highest VFA and more consistent stability, indicating its suitability as an efficient AC-WC surface course while supporting the utilization of domestic asphalt resources to reduce national dependence on imports.

Keywords: asbuton, marshall, nano silica, void

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



PENDAHULUAN

Berdasarkan data dari Kementerian Pekerjaan Umum (2026), kebutuhan aspal di Indonesia mencapai sekitar 1,2 juta ton per tahun, yang mana hingga saat ini hampir 80% masih mengandalkan impor aspal minyak. Ketergantungan penggunaan aspal minyak yang cukup tinggi tidak hanya menguras devisa negara, tetapi juga menempatkan ketersediaan material strategis pada gejolak harga dan pasokan global. Berangkat dari hal tersebut, Kementerian Pekerjaan Umum menargetkan peningkatan penggunaan asbuton dalam konstruksi jalan nasional hingga minimum 30% dengan potensi pengematan mencapai 4 triliun dan tambahan penerimaan pajak 2 triliun. Asbuton sendiri merupakan aspal alam yang berasal dari Pulau Buton, Sulawesi Tenggara diperkirakan memiliki cadangan mencapai 792,5 juta ton yang mana penggunaan asbuton sendiri hanya terserap sebesar 1,74% [1].

Salah satu produk asbuton adalah asbuton butir B50/30 yang telah distandardisasi untuk penggunaan campuran beraspal panas. Asbuton B50/30 merupakan asbuton yang berbentuk butiran yang terdiri dari bitumen dan mineral agregat yang digunakan sebagai bahan tambah campuran beraspal lapis aus. Beberapa penelitian terkait asbuton menyatakan bahwa penggunaan *filler* asbuton dapat meningkatkan *flexural stiffness*, selain itu juga dapat meningkatkan kekakuan dari campuran seiring dengan penambahan kadar asbuton yang digunakan pada campuran [2]. Terjadinya peningkatan kinerja pada campuran beraspal tersebut akibat pengaruh asbuton terhadap properties dari aspal *base* yang mempengaruhi senyawa asfaltene dan resine, yang mana dapat menurunkan nilai penetrasi dan daktilitas dari aspal [3].

Hingga saat ini telah banyak dilakukan penelitian menggunakan nano partikel sebagai bahan aditif untuk memodifikasi aspal maupun sebagai *filler* pada campuran aspal [4], [5]. Yao (2013) melakukan penelitian mengenai sifat reologi dan ikatan kimia pada aspal modifikasi nanosilika dengan kadar 4% dan 6% dari berat bitumen. Nano silika yang digunakan pada penelitian tersebut berbentuk quartz dan cubic polymorph [6]. Peneliti lainnya melakukan penelitian dengan memodifikasi aspal batu dengan nanosilika. Material aspal batu yang digunakan pada penelitian tersebut

merupakan aspal alam yang berasal dari Qingchuan dan diproduksi oleh Shuitian Mining Technology Research and Development, China [7], [8]. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, penambahan nanosilika pada modifikasi aspal dengan aspal batu memberikan efek yang cukup signifikan terhadap sifat reologi pada aspal. Perubahan tersebut diantaranya adalah terjadi peningkatan ketahanan terhadap rutting khususnya pada temperatur tinggi dengan kadar yang direkomendasikan sebesar 6% aspal batu dan 1% nanosilika [7]. Selain itu, modifikasi aspal batu dengan nanosilika dapat memberikan efek yang cukup baik terhadap campuran beraspal. Hal tersebut dihasilkan dari perbandingan antara campuran modifikasi aspal batu, modifikasi nanosilika dan campuran dengan penggabungan keduanya yaitu modifikasi aspal batu dan nanosilika [8]. Dari beberapa hasil penelitian tersebut terlihat bahwa penggabungan aspal batu dan nanosilika menghasilkan ketahanan terhadap rutting dan umur *fatigue* yang cukup baik pada campuran beraspal.

Berdasarkan beberapa hal tersebut, diperlukan pengembangan lebih lanjut terkait pemanfaatan asbuton, khususnya asbuton butir. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik campuran beraspal panas dengan menggunakan material asbuton yang dimodifikasi oleh *filler* nanosilika.

MATERIAL DAN METODOLOGI

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah aspal pen 60/70 produksi Pertamina, asbuton butir B50/30, agregat yang berasal dari PT. Kadi, Jawa Barat dan nano silika yang merupakan hasil *milling* dari Balai Besar Keramik Bandung, Kementerian Perindustrian [9]. Setiap material selanjutnya diuji untuk diketahui karakteristik tiap material yang digunakan pada campuran.

Berdasarkan hasil pengujian properti dari asbuton B50/30, diketahui bahwa kadar aspal yang terdapat pada asbuton tersebut sebesar 25,6% dengan gradasi agregat yang didominasi oleh agregat halus. Karakteristik lainnya dapat dilihat pada Error! Reference source not found.. Selain pemeriksaan material asbuton, juga dilakukan pemeriksaan material nanosilika yang digunakan. Hasil pengujian material nano silika dapat dilihat pada Error! Reference source not found..

Tabel 1. Hasil Pengujian Karakteristik Asbuton B50/30

Pengujian	Standar	Hasil Uji
Lolos Saringan 3/8" (9,5 mm); %	SNI 03-1969-1990	100
Kadar Bitumen Asbuton; %	SNI 03-3640-1994	25,6
Kadar Air Asbuton %	SNI 2490:2008	0,83
Penetrasi 25°C, 100 gr, 5 sec; 0,1 mm	SNI 06-2456-2011	48,1
Titik Lembek; °C	SNI 06-2434-2011	58,5
Daktalitas, 25°C, 5 cm/menit; cm	SNI 06-2432-2011	>100
Titik Nyala; °C	SNI 06-2433-2011	238
Berat Jenis	SNI 03-2441-2011	1,054
Kehilangan Berat; %berat	SNI 06-2440-1991	0,273
Penetrasi Setelah Kehilangan Berat; %awal	SNI 06-2456-2011	38,9

Tabel 2. Hasil Pengujian Karakteristik Nano Silika

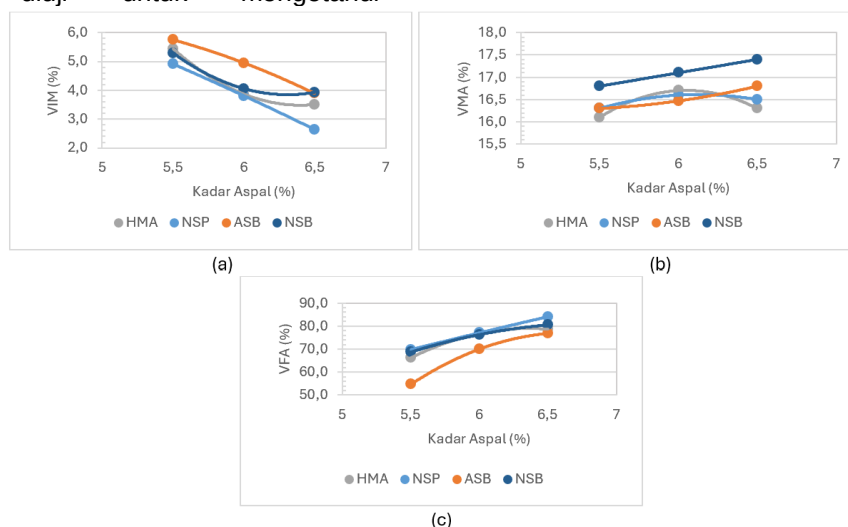
Pengujian	Hasil
Particle Size Analyzer	250 – 2900 nm
Scanning Electron Microscope	300 – 2800 nm
Senyawa SiO ₂	90,82%

Jika semua material yang akan digunakan pada campuran telah memenuhi syarat spesifikasi yang dikeluarkan oleh Bina Marga, maka dilakukan perencanaan campuran. Jenis campuran yang digunakan pada penelitian ini adalah campuran beraspal panas lapis aus (AC-WC). Nanosilika pada campuran ini memiliki peran sebagai substitusi *filler* abu batu yang kerap digunakan pada campuran beraspal. Kadar asbuton yang digunakan pada penelitian ini adalah sebesar 10% dari berat campuran. Variasi ini dipilih berdasarkan tinjauan penelitian-penelitian terdahulu terkait kadar penggunaan asbuton pada campuran beraspal. Benda uji yang telah dibuat selanjutnya diuji untuk mengetahui

karakteristik campuran tersebut berdasarkan tinjauan parameter Marshall. Variasi sampel pada penelitian yaitu campuran kontrol (HMA), campuran AC-WC dengan 1% nanosilika (NSP), campuran dengan penambahan 10% asbuton B50/30 (ASB) dan campuran dengan penambahan 10% asbuton B50/30 serta 1% nanosilika (NSB).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui karakteristik campuran beraspal, dilakukan pengujian Marshall. Variasi kadar aspal yang ditinjau pada artikel ini adalah sebanyak 3 variasi kadar aspal, yaitu 5,5%, 6% dan 6,5%. Tinjauan parameter yang dibahas hanya parameter rongga, stabilitas, dan juga *flow* pada masing-masing variasi campuran. Hasil dari penentuan persen rongga yang dihasilkan pada tiap variasi benda uji disajikan dalam bentuk grafik pada Error! Reference source not found..

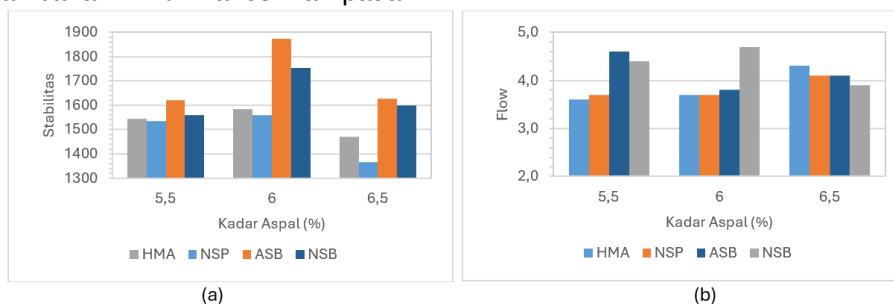

Gambar 1. Grafik Parameter; (a) VIM; (b) VMA; (c) VFA

Berdasarkan nilai VIM yang dihasilkan (**Gambar 1.a**) terlihat bahwa terjadi penurunan, seiring dengan peningkatan kadar aspal pada tiap variasi campuran. Campuran dengan penambahan 1% nanosilika (NSP) menunjukkan penurunan nilai VIM yang cukup signifikan. Hal tersebut sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa nano silika menunjukkan peran densitas nano material dalam mengontrol karakteristik campuran ketika dipadatkan, yang mana nano silika akan mengisi rongga secara agresif dibandingkan nano material lain pada kadar aspal yang sama [9], [10]. Sebaliknya, ketika nanosilika ditambahkan pada campuran dengan 10% asbuton B50/30, nilai VIM berada pada rentang 3 – 5%. Hal tersebut terjadi karena matriks mineral asbuton yang bersifat keras menambah fraksi padatan yang dapat mengontrol jumlah rongga pada campuran. Selain itu, karena bitumen pada asbuton merupakan aspal keras yang lebih kaku dibanding aspal pen 60/70, menyebabkan kecenderungan campuran lebih getas dan mampu mengontrol rongga pada level yang lebih stabil [11].

Berdasarkan nilai VMA (**Gambar 1.b**), terlihat bahwa ketika campuran asbuton ditambahkan dengan nanosilika (NSB), terjadi peningkatan nilai VMA jika dibandingkan dengan variasi campuran lainnya. VMA sendiri merepresentasikan total rongga antarpartikel agregat yang tersedia untuk diisi oleh bitumen dan udara. Dengan terjadinya peningkatan nilai VMA maka mengindikasikan tersedianya ruang yang cukup bagi bitumen untuk melapisi permukaan agregat secara optimal dan membentuk *film binder* yang *continue* [12]. Jika dibandingkan dengan campuran asbuton biasa (ASB) dan campuran asbuton dengan nanosilika (NSB), terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai VMA ketika ditambahkan nanosilika. Hal tersebut mengindikasikan bahwa penambahan 1% nanosilika pada

campuran asbuton berkontribusi terhadap struktur fraksi halus yang terdapat pada campuran. Partikel nano silika yang terdispersi dalam campuran akan mengisi celah mikro antarpartikel *filler* yang mengubah distribusi rongga pada skala submikron dan secara makro memberikan pengaruh pada nilai VMA yang dihasilkan. Hal ini sejalan hasil penelitian terdahulu yang mengkonfirmasi bahwa nano material meningkatkan adhesi *binder*-agregat dan mengurangi *void* mikrostruktural yang mana dapat meningkatkan VMA [13].

Berdasarkan nilai VFA (**Gambar 1.c**) yang dihasilkan, terlihat bahwa terjadi peningkatan yang konsisten seiring dengan penambahan kadar aspal. Nilai VFA sendiri menggambarkan besaran rongga agregat yang terisi aspal yang dapat berpengaruh terhadap kekedapan air dan durabilitas campuran [14]. Ketika nanosilika ditambahkan pada campuran tanpa asbuton, partikel nanosilika memperbesar luas permukaan efektif pada agregat, sehingga membutuhkan kadar bitumen yang sesuai untuk mencapai target nilai VFA yang disyaratkan. Material nano silika sendiri memiliki luas permukaan besar, kemurnian kimia tinggi dan kemampuan dispersi yang efektif dalam binder aspal, yang mana mempengaruhi secara langsung bagaimana mendistribusikan diri dalam rongga campuran [13]. Ketika nanosilika ditambahkan pada campuran dengan asbuton, nilai VFA yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan variasi lainnya. Hal tersebut diduga akibat interaksi partikel nano silika dengan molekul asfalten dalam *binder* yang meningkatkan kemampuan difusi dan distribusi *binder* dalam rongga campuran [15]. Terjadinya peningkatan nilai VFA pada campuran NSB juga mengindikasikan bahwa campuran ini memiliki kekedapan air dan potensi durabilitas terbaik di antara variasi lainnya [14].



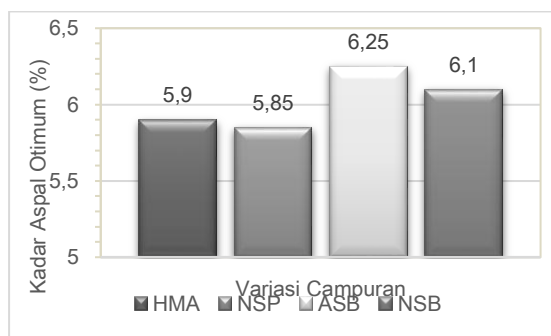
Gambar 2. Grafik nilai; (a) stabilitas; (b) flow

Selain parameter rongga, pada pengujian Marshall juga diketahui nilai stabilitas pada

masing-masing variasi campuran. Nilai stabilitas dan *flow* dapat dilihat pada Error!

Reference source not found.. Stabilitas Marshall menunjukkan kemampuan campuran beraspal dalam menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen, dan ditentukan oleh kualitas *interlocking* agregat serta kohesi pada binder [16]. Berdasarkan nilai stabilitas yang dihasilkan (**Gambar 2.a**), terlihat pada kadar 6,5%, stabilitas campuran asbuton mengalami penurunan jika dibandingkan dengan kadar lainnya. Fenomena ini mengindikasikan bahwa kelebihan dari penambahan 1% nanosilika pada campuran asbuton (NSB) memberikan efek stabilisasi binder yang membatasi pelunakan binder berlebih pada kadar aspal yang lebih tinggi. Hal ini berkaitan dengan peningkatan kekakuan dan viskositas *binder* oleh partikel nano silika melalui interaksi fisik dan kimiawi dengan komponen *asphaltene* [17].

Pada tinjauan parameter *flow* (**Gambar 2.b**) terlihat bahwa pada kadar aspal 5,5%, campuran NSB menunjukkan *flow* tertinggi, sedangkan variasi lain berada di kisaran 3,5–4,0 mm. Pada kadar aspal 6,0%, ASB mencapai *flow* tertinggi, sementara pada kadar aspal 6,5%, seluruh variasi konvergen di rentang 4,0–4,3 mm. Nilai *flow* yang memenuhi batas spesifikasi menunjukkan bahwa campuran memiliki fleksibilitas yang cukup dalam mengakomodasi beban berulang tanpa mengalami retak [18].



Gambar 3. Nilai KAO tiap variasi campuran

Nilai KAO yang dihasilkan dari pengujian Marshall dapat dilihat pada Error! Reference source not found.. Berdasarkan penentuan nilai KAO pada tiap jenis campuran, terlihat bahwa campuran asbuton 10% menghasilkan nilai KAO lebih besar dibandingkan dengan campuran lainnya. Namun, ketika campuran asbuton ditambahkan 1% nanosilika, terjadi penurunan nilai KAO yang dihasilkan. Mineral yang terdapat dalam asbuton sendiri bersifat porus dan memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, sehingga menyerap sebagian

binder selama proses pencampuran dan mengakibatkan kebutuhan total binder yang lebih besar [1]. Nilai KAO pada campuran ASB memperlihatkan bahwa dominannya pengaruh adsorpsi mineral asbuton terhadap kebutuhan binder total campuran, yang sejalan dengan beberapa penelitian terdahulu [19].

KESIMPULAN

Dari sisi parameter volumetrik dan stabilitas, campuran NSB menunjukkan keunggulan yang konsisten dibandingkan dengan campuran ASB pada beberapa aspek kritis. Nilai VFA campuran NSB pada KAO merupakan yang tertinggi di antara variasi berbasis Asbuton, mengindikasikan bahwa kombinasi Asbuton dan nanosilika menghasilkan pengisian rongga yang paling efisien dan potensi kekedapan air serta durabilitas campuran yang lebih baik. Nilai VMA campuran NSB yang sedikit lebih tinggi dari ASB pada KAO mencerminkan modifikasi distribusi rongga antaragregat oleh partikel nanosilika yang terdispersi dalam binder, yang secara teori memberikan ruang lebih memadai bagi binder untuk melapisi permukaan agregat secara optimal. Dari aspek stabilitas, campuran NSB menunjukkan profil yang lebih konsisten pada rentang kadar aspal 5,5–6,5% dibandingkan dengan ASB — stabilitas NSB tidak mengalami penurunan setajam ASB pada kadar aspal di atas KAO, yang mengindikasikan bahwa nanosilika 1% memberikan efek stabilisasi binder yang membatasi pelunakan binder berlebih. Nanosilika secara signifikan meningkatkan stabilitas campuran dan mengurangi *flow*, mencerminkan peningkatan resistansi terhadap deformasi permanen.

Perbandingan campuran NSB dengan campuran NSP (nanosilika tanpa asbuton, dari penelitian sebelumnya) mengungkap peran penting asbuton dalam menstabilkan karakteristik campuran nanosilika. VIM campuran NSP mengalami penurunan pada kadar aspal 6,5%. Stabilitas NSB yang dihasilkan lebih tinggi daripada NSP pada kadar aspal 5,5–6,0%. Hasil ini menunjukkan bahwa asbuton dan nanosilika bekerja secara komplementer: mineral asbuton menstabilkan distribusi rongga dan memperkuat skeleton agregat, sementara nanosilika meningkatkan efisiensi reologi *binder* — sehingga kombinasi keduanya menghasilkan campuran yang lebih seimbang dibandingkan dengan penggunaan masing-masing bahan secara terpisah.

Berdasarkan beberapa hal yang disampaikan sebelumnya, penambahan 1% nanosilika pada campuran 10% asbuton terbukti memberikan pengaruh positif terhadap karakteristik campuran beraspal yang memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut dengan berbagai variasi penambahan kadar nanomaterial. Disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan untuk melakukan evaluasi ketahanan terhadap deformasi dan fatigue untuk dapat diketahui kinerja campuran lebih mendalam.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] A. Miswanto *et al.*, "Buton asphalt: prospect and strategy for asphalt import substitution in Indonesia," *Miner. Econ.*, vol. 38, no. 1, pp. 119–130, Mar. 2025, doi: 10.1007/s13563-024-00459-6.
- [2] B. S. Subagio, R. Karsaman, J. Adwang, and I. Fahmi, "Fatigue Performance of HRA (Hot Rolled Asphalt) And Superpave® Mixes Using Indonesian Rock Asphalt (Asbuton) As Fine Aggregates And Filler," *J. East. Asia Soc. Transp. Stud.*, vol. 6, pp. 1207–1216, Jan. 2005.
- [3] S. Lv, X. Fan, H. Yao, L. You, Z. You, and G. Fan, "Analysis of performance and mechanism of Buton rock asphalt modified asphalt," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 136, no. 1, p. 46903, Jan. 2019, doi: 10.1002/app.46903.
- [4] M. Saltan, S. Terzi, and S. Karahancer, "Performance analysis of nano modified bitumen and hot mix asphalt," *Constr. Build. Mater.*, vol. 173, pp. 228–237, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.014.
- [5] J. M. L. Crucho, J. M. C. D. Neves, S. D. Capitão, and L. G. D. Picado-Santos, "Mechanical performance of asphalt concrete modified with nanoparticles: Nanosilica, zero-valent iron and nanoclay," *Constr. Build. Mater.*, vol. 181, pp. 309–318, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.052.
- [6] H. Yao *et al.*, "Rheological Properties and Chemical Bonding of Asphalt Modified with Nanosilica," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 25, no. 11, pp. 1619–1630, Nov. 2013, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000690.
- [7] X. Shi, L. Cai, W. Xu, J. Fan, and X. Wang, "Effects of nano-silica and rock asphalt on rheological properties of modified bitumen," *Constr. Build. Mater.*, vol. 161, pp. 705–714, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.162.
- [8] L. Cai, X. Shi, and J. Xue, "Laboratory evaluation of composed modified asphalt binder and mixture containing nano-silica/rock asphalt/SBS," *Constr. Build. Mater.*, vol. 172, pp. 204–211, May 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.187.
- [9] N. K. Resentia, B. S. Subagio, E. S. Hariyadi, and R. G. K. Pradoto, "Pengaruh Penambahan Nano Silika terhadap Volumetrik dengan Metode Pemadatan Marshall dan Superpave pada Campuran Beraspal Ac-Wc," *J. Tek. Sipil*, vol. 30, no. 1, pp. 71–78, 2023, doi: https://doi.org/10.5614/jts.2022.30.1.9.
- [10] F. S. Atiyah and A. H. Albayati, "Performance-Based Evaluation of Nanomaterials for Enhancing Moisture Damage Resistance in Asphalt Concrete," *J. Compos. Sci.*, vol. 10, no. 6, p. 310, Jun. 2026, doi: 10.3390/jcs10060310.
- [11] A. D. Putra, D. Despa, and T. Septiana, "STUDI EKSPERIMENTAL PERBANDINGAN KARAKTERISTIK MARSHALL CAMPURAN AC-WC DENGAN ASBUTON MURNI FULL EKSTRAKSI DAN ASPAL PEN 60/70," *J. Rekayasa Lampung*, vol. 2, no. 2, Jul. 2025, doi: 10.23960/jrl.v2i2.30.
- [12] H. F. Tambunan, B. C. Marina, and B. H. Sipayung, "Volumetric Performance Analysis and Rutting of PG76 Asphalt Mixture with Fly ash as Filler," *J. Eng. Sci. Res.*, vol. 8, no. 1, pp. 15–19, Jun. 2026.
- [13] G. S. Hamad and A. F. Talabany, "A Review of the Role of Nanomaterials in Asphalt Performance Enhancement," *Zanco J. Pure Appl. Sci.*, vol. 37, no. 3, pp. 14–27, Jun. 2025, doi: 10.21271/ZJPAS.37.3.2.
- [14] Shilvhanie Usman, Yenni Darvina, Leni Aziyus Fitri, and Fandi Oktasendra, "Pengaruh Penambahan Aspal Buton pada Aspal Pen 60/70 terhadap Sifat Mekanik pada Lapisan Permukaan AC-WC," *J. Ris. RUMPUN Mat. DAN ILMU Pengetah. ALAM*, vol. 5, no. 1, pp. 131–148, Apr. 2026, doi: 10.55606/jurrimipa.v5i1.8699.
- [15] Z. Long *et al.*, "Atomistic-scale investigation of self-healing mechanism in Nano-silica modified asphalt through molecular dynamics simulation," *J. Infrastruct. Preserv. Resil.*, vol. 3, no. 1, p. 4, Mar. 2022, doi: 10.1186/s43065-022-00049-2.
- [16] K. Korniejenko, M. Nykiel, M. Choinska, A. Jexembayeva, M. Konkanov, and L. Aruova, "An Overview of Micro- and Nano-Dispersion Additives for Asphalt and Bitumen for Road Construction," *Buildings*, vol. 13, no. 12, p. 2948, Nov. 2023, doi: 10.3390/buildings13122948.

- [17] W. Haroon and N. Ahmad, "Effect of nano silica on the performance of modified crumb rubber bitumen and asphalt mixtures," *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 9, no. 7, p. 280, Jul. 2024, doi: 10.1007/s41062-024-01590-7.
- [18] I. W. Rohma, B. Supriyanto, and B. Rahardjo, "Analisis Kinerja Campuran Perkerasan Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) Menggunakan Bahan Tambah Asbuton B 50/30 Terhadap Parameter Marshall," *J. Media Tek. Sipil*, vol. 21, no. 1, pp. 32–38, Feb. 2023, doi: 10.22219/jmts.v21i1.23836.
- [19] T. Rahman, I. Widyatmoko, A. Rachman, and Z. Nurhidayati, "Buton Rock Asphalt (BRA/ Asbuton): a systematic review of the characteristics, performance, sustainability, and future research directions," *Road Mater. Pavement Des.*, pp. 1–50, Oct. 2025, doi: 10.1080/14680629.2025.2580376.