

Upaya Peningkatan Kinerja CPHMA Dengan Modifier Minyak Kemiri Dan Aditif NaCl

Makmur Hutapea¹, Lila Khamelda², Sunik³

^{1,2,3}Prodi Teknik Sipil - Universitas Katolik Widya Karya Malang, Indonesia

Alamat: Universitas Katolik Widya Karya Malang – Jl. Bondowoso No 2 Malang

*Korespondensi penulis: 202232008@widyakarya.ac.id

Abstract. *The performance of Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) still needs improvement because this mixture often shows low stability and has not fully met technical requirements. This study was conducted to evaluate the effect of adding kemiri oil as a modifier and sodium chloride (NaCl) as an additive on the performance of CPHMA. The objective of this research was to assess the effectiveness of combining these two materials through three laboratory test methods: the centrifuge test to examine bitumen extraction ability, the Liquid-Liquid Extraction (LLE) test to measure extraction efficiency, and the Marshall test to evaluate the mechanical characteristics of the mixture. The study used NaCl variations of 1%, 3%, and 5% of the total modifier content. The centrifuge test results showed that the extracted liquid weight ranged from 386 to 447 grams, with the highest value obtained at 1% NaCl. In the LLE test, extraction efficiency ranged from 68.92% to 86.73%, also with the highest value at 1% NaCl. The Marshall test results showed stability values ranging from 1118 to 1673 kg, with the highest value at 3% NaCl, and all variations met the minimum CPHMA stability requirement. Other Marshall parameters such as flow, VIM, VFB, and VMA were within the allowable specification limits. Overall, the addition of kemiri oil and NaCl improved the performance of CPHMA. The 1% NaCl variation produced the best extraction performance, while the 3% NaCl variation provided the highest mechanical performance in the Marshall test. This combination shows potential as an alternative additive that can improve Asbuton mixtures.*

Keywords: CPHMA, Asbuton, Kemiri oil, NaCl, Marshall test

Abstrak. Aspal CPHMA (Cold Paving Hot Mix Asbuton) merupakan jenis campuran aspal yang dapat Kinerja Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) masih perlu ditingkatkan karena campuran ini sering menunjukkan stabilitas yang rendah dan belum sepenuhnya memenuhi persyaratan teknis. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan minyak kemiri sebagai modifier dan Natrium Klorida (NaCl) sebagai aditif terhadap kinerja CPHMA. Tujuan penelitian adalah menilai efektivitas kombinasi kedua bahan tersebut melalui tiga metode pengujian laboratorium, yaitu uji centrifuge untuk melihat kemampuan ekstraksi bitumen, uji Liquid-Liquid Extraction (LLE) untuk mengukur efisiensi ekstraksi, serta uji Marshall untuk menilai karakteristik mekanik campuran. Penelitian menggunakan variasi NaCl sebesar 1%, 3%, dan 5% terhadap total modifier. Hasil uji centrifuge menunjukkan bahwa berat cairan hasil ekstraksi berada pada kisaran 386–447 gram, dengan nilai tertinggi pada variasi 1% NaCl. Pada uji LLE, efisiensi ekstraksi berada pada rentang 68,92–86,73%, juga tertinggi pada variasi 1%. Hasil uji Marshall menunjukkan nilai stabilitas sebesar 1118–1673 kg, dengan puncak pada variasi 3% NaCl, dan seluruh variasi memenuhi persyaratan stabilitas minimum CPHMA. Parameter Marshall lain seperti flow, VIM, VFB, dan VMA berada dalam batas spesifikasi yang diizinkan. Secara keseluruhan, penambahan minyak kemiri dan NaCl memberikan peningkatan terhadap performa CPHMA. Variasi 1% NaCl menunjukkan hasil terbaik dalam proses ekstraksi, sedangkan variasi 3% NaCl memberikan performa mekanik tertinggi pada uji Marshall. Kombinasi ini menunjukkan potensi sebagai alternatif bahan tambahan yang dapat meningkatkan campuran Asbuton..

Kata kunci: CPHMA, Asbuton, Minyak Kemiri, NaCl, Uji Marshall

1. LATAR BELAKANG

Infrastruktur jalan berperan penting dalam mendukung mobilitas dan ekonomi nasional. Namun, banyak perkerasan di Indonesia rusak sebelum umur rencana akibat beban lalu lintas dan pengaruh cuaca (Sukirman, 2010). Salah satu material yang sering dipakai dalam pekerjaan perkerasan jalan adalah *Cold Paving Hot Mix Asbuton* (CPHMA). Campuran ini pada dasarnya dibuat dengan metode pencampuran dingin, tetapi hasilnya memiliki sifat yang hampir sama dengan campuran aspal panas. CPHMA dikenal memiliki beberapa kelebihan, antara lain lebih

hemat energi, ramah lingkungan, serta mudah diaplikasikan meskipun pada suhu rendah (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018). Walaupun begitu, CPHMA tetap mempunyai batasan, khususnya terkait dengan stabilitas struktural dan daya tahan jangka panjang. Penambahan bahan modifikasi (*modifier*) dianggap sebagai salah satu metode yang efektif untuk memperbaiki kinerjanya (Huang, 2004). Minyak nabati, terutama minyak kemiri, adalah pilihan yang menjanjikan karena mengandung lemak tak jenuh yang berperan sebagai plastisizer alami, sehingga mampu meningkatkan fleksibilitas dan adhesi antar partikel dalam campuran (Tanti, M., & Suryadi, 2017). Penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh (Djakfar et al., 2022), mengindikasikan bahwa minyak kemiri dapat mengekstrak bitumen Asbuton hingga 99,32%, tetapi kinerja mekanik yang diperoleh masih rendah, dengan nilai stabilitas Marshall hanya sekitar 29,38% dari standar empiris produksi CPHMA (Baisa, 2022).

Rendahnya efektivitas pemanfaatan minyak kemiri tersebut mengindikasikan adanya peluang pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan kinerja CPHMA yang telah dimodifikasi. Salah satu metode yang terkait adalah penambahan aditif guna meningkatkan interaksi kimia dan ikatan antara komponen dalam campuran. Natrium klorida (NaCl) menjadi pilihan yang menjanjikan karena karakteristik higroskopisnya mampu memperbaiki adhesi antara aspal dan agregat serta mengurangi kelembapan yang menyebabkan stripping (Priyanto, S., & Handayani, 2020). Dengan begitu, kombinasi minyak kemiri dan NaCl diperkirakan dapat meningkatkan stabilitas serta ketahanan campuran terhadap keadaan lingkungan.

Studi ini bertujuan untuk menilai dampak kombinasi minyak kemiri sebagai modifikasi dan NaCl sebagai aditif terhadap kinerja CPHMA melalui rangkaian pengujian laboratorium, yaitu uji sentrifugasi, *Liquid-Liquid Extraction* (LLE), dan Marshall. Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis keefektifan gabungan kedua bahan dalam memperbaiki efisiensi ekstraksi bitumen serta sifat mekanik campuran aspal. Melalui metode eksperimental ini, diharapkan dapat diperoleh wawasan mendalam tentang fungsi NaCl dalam meningkatkan efektivitas minyak kemiri sebagai bahan modifikasi CPHMA.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Asbuton

Aspal Buton (Asbuton) adalah material alami yang berasal dari Pulau Buton, Sulawesi Tenggara, dan mengandung bitumen alami sebesar 10–35% tergantung pada lokasi dan jenis endapannya. Komponen utama Asbuton terdiri dari bitumen dan mineral karbonat, biasanya batu kapur, yang terintegrasi dalam struktur butiran padat (Setiowati & Putra, 2023). Asbuton memiliki kapasitas signifikan sebagai pengganti aspal minyak karena keberadaannya yang

melimpah, tetapi pemisahan kandungan bitumennya dari mineral pendorongnya sangat sulit. Akibatnya, diperlukan pelarut atau bahan modifikasi yang dapat mengekstrak bitumen secara efisien untuk menghasilkan campuran aspal yang berkualitas tinggi. Beberapa penelitian mengindikasikan bahwa Asbuton dapat digunakan dalam bentuk padat maupun granular (Erdawaty et al., 2020), di mana memiliki karakteristik fisik seperti ketahanan tekan, daya dukung, dan ketahanan terhadap deformasi yang menjanjikan untuk penggunaan dalam perkerasan jalan.

2.2 Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA)

Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) adalah campuran aspal panas berbasis Asbuton yang dapat disebar dan dipadatkan pada suhu ruangan tanpa perlu pemanasan ekstra di lokasi (Thanaya & Sparsa, 2017). Teknologi ini dirancang untuk mengurangi konsumsi energi dan biaya produksi, serta ideal untuk lokasi dengan akses terbatas ke pabrik aspal. Menurut standar Kementerian PUPR (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2022), CPHMA memiliki indikator kinerja seperti stabilitas minimal 500 kg dan VIM (*Void in Mix*) dalam rentang 4–10%. Keunggulan utama CPHMA ada pada efisiensi produksi, kemudahan penggunaan, dan karakteristik ramah lingkungan, tetapi tantangan utama tetap berkaitan dengan peningkatan stabilitas struktural dan ketahanan jangka panjang. Sebagai hasilnya, penggabungan minyak kemiri sebagai modifikator alami dan NaCl sebagai aditif diharapkan mampu menghasilkan campuran CPHMA dengan peningkatan kinerja mekanik serta ketahanan lingkungan. Penelitian tentang peningkatan kinerja campuran berbasis Asbuton telah dilakukan oleh sejumlah peneliti dengan pendekatan yang bervariasi.

Tabel 1. Persyaratan CPHMA

Karakteristik campuran	Metode pengujian	Persyaratan	Satuan
Rongga diantara mineral agregat (VMA)	AASHTO 323-12	Minimum 16	%
Rongga dalam campuran (VIM)		4-10	%
Rongga terisi aspal (VFB)		Minimum 60	%
Stabilitas marshall, pada temperatur 25°C	ASTM 6927-06	Minimum 500	Kg
Pelelehan marshall		3-5	mm
Stabilitas sisa setelah direndam selama 2 x 24 jam pada temperatur 25°C		Minimum 60	%

Sumber: Kementerian PUPR Dirjen Bina Marga (2016)

2.3 Campuran CPHMA

2.3.1 Agregat

Agregat merupakan komponen utama dalam campuran aspal CPHMA (*Cold Paving Hot Mix Asbuton*) yang berperan penting dalam menentukan kualitas dan karakteristik campuran (Asidin, 2019). Jenis agregat yang digunakan:

1. Agregat Kasar

Agregat kasar merupakan agregat yang memiliki ukuran butiran lebih besar dari 2,36 mm (tertahan saringan No.8). Dalam campuran CPHMA, agregat kasar berperan memberikan kekuatan dan stabilitas pada struktur perkerasan.

2. Agregat Halus

Agregat halus adalah agregat yang memiliki ukuran butiran lebih kecil dari 2,36 mm (lolos saringan No.8). Agregat halus berfungsi mengisi rongga antara agregat kasar dan memberikan kepadatan pada campuran (Haddadian et al., 2022)



Gambar 1. Agregat Kasar dan Agregat Halus

2.3.2 Minyak Kemiri

Minyak kemiri, berasal dari biji tanaman kemiri (*Aleurites moluccana L.*), kaya akan asam lemak tak jenuh dengan karakteristik khas. Berwarna kuning, licin, dan memiliki bau tertentu, minyak ini cair pada suhu kamar dengan massa jenis sekitar 1,03 g/mL dan kandungan air rendah (0,01%). Sebagai pelarut campuran asbuton, minyak kemiri ramah lingkungan dan mengatasi keterbatasan minyak bumi, serta berfungsi sebagai *modifier* pada adukan CPHMA (Rizqullah, Rahim, dan Febrina, 2023).



Gambar 2. Minyak Kemiri

2.3.3 Natrium Klorida

NaCl adalah senyawa kimia yang banyak digunakan sebagai zat aditif dalam berbagai aplikasi, termasuk campuran CPHMA. Senyawa ini meningkatkan adhesi antara aspal dan agregat serta memperbaiki ketahanan campuran terhadap udara (Susanto, 2016). NaCl juga

dicantumkan dalam Pedoman Pelaksanaan CPHMA sebagai bahan tambahan untuk meningkatkan kualitas campuran dan sering digunakan sebagai akselerator dalam campuran beton (Keria et al., 2015). Dalam penelitian ini, NaCl dipilih karena efektivitasnya dalam meningkatkan adhesi serta ketahanan campuran terhadap air dan kelembaban (Susanto, 2016).



Gambar 3. Adiktif NaCl

2.3.4 Teknik Evaluasi Kinerja CPHMA

1. Uji *Centrifuge*

Uji *centrifuge* digunakan untuk menilai kestabilan emulsi atau campuran polimer–aspal melalui pemutaran sampel dengan kecepatan tinggi. Tujuan utama pengujian ini adalah memastikan campuran tetap homogen dan tidak mengalami pemisahan fase (Suryanto, E., & Prasetyo, 2020).

2. Uji *Liquid-Liquid Extraction (LLE)*

Uji ini mengacu pada (ASTM D4318-17, 2017) dan (Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2008). Teori uji LLE didasarkan pada prinsip bahwa tanah akan mengalami perubahan perilaku dari kondisi plastis ke cair pada kadar air tertentu. Pengujian ini pada campuran beraspal dapat dimodifikasi untuk mengevaluasi sifat rheologi material modifier (Chen, X.; Liu, Y.; Wang, 2022).

3. Uji Marshall

Uji Marshall mengacu pada ASTM D6927-15 dan SNI 06-2489-1991, yang merupakan metode standar untuk mengevaluasi kinerja campuran beraspal panas. Dikembangkan oleh Bruce Marshall, pengujian ini melibatkan pengujian spesimen berbentuk silinder dengan beban hingga keruntuhan. Hasil pengujian mengukur stabilitas (kekuatan) dan flow (deformasi), yang menjadi indikator kinerja dalam menahan beban lalu lintas dan deformasi plastis. Uji Marshall digunakan untuk mengevaluasi kualitas campuran beraspal melalui stabilitas dan kelelahan, dimana benda uji silinder dikenakan beban tekan untuk menentukan kemampuan campuran menahan beban dan tingkat deformasi plastis. Kinerja CPHMA melalui Uji Marshall akan teramati melalui parameter Marshall berupa:

- a. Stabilitas yaitu kemampuan maksimum campuran beraspal dalam menahan beban hingga terjadi keruntuhan. Secara teori, stabilitas dipengaruhi oleh ikatan antar agregat, kekuatan agregat, dan sifat pengikat aspal. Nilai stabilitas yang tinggi menunjukkan kemampuan campuran yang baik dalam menahan deformasi akibat beban lalu lintas (Asadi, B., Goli, A., & Hesami, 2021).
- b. Flow yaitu besarnya deformasi plastis yang terjadi pada campuran beraspal saat dibebani hingga mencapai beban maksimum. Secara teori, *flow* mengindikasikan fleksibilitas campuran. Nilai *flow* yang sesuai menunjukkan bahwa campuran memiliki kemampuan untuk mengalami deformasi tanpa mengalami keretakan, sehingga dapat menyesuaikan dengan perubahan beban (Wang, S.; Huang, W.; Lin, 2020). Nilai flow juga menggambarkan kapasitas kinerja dan fleksibilitas campuran aspal (Juli-Gándara, L., Vega-Zamanillo, Á., Calzada-Pérez, M. Á., & Teijón-López-Zuazo, 2020).
- c. *Marshall Quotient* yaitu rasio antara stabilitas terhadap *flow* yang mengindikasikan kekakuan campuran. Secara teori, nilai *Marshall Quotient* yang tinggi menunjukkan campuran yang lebih kaku dan resisten terhadap deformasi, sedangkan nilai yang rendah menunjukkan campuran yang lebih fleksibel. Parameter ini penting untuk mengevaluasi performa campuran terhadap beban repetitif (Zhang, J.; Wang, H.; Li, 2020).
- d. *Void in Mixture* (VIM) yaitu persentase rongga udara di antara partikel agregat dalam campuran beraspal. Secara teori, VIM yang optimal diperlukan untuk memberikan ruang bagi aspal agar tidak terjadi *bleeding*, sekaligus memungkinkan drainase air yang terperangkap. VIM yang terlalu tinggi dapat menyebabkan oksidasi aspal lebih cepat, sedangkan VIM terlalu rendah dapat menyebabkan deformasi plastis (Rahman, M. T.; Mohajerani, A.; Giustozzi, 2021).
- e. *Void Filled Bitumen* (VFB) yaitu persentase volume rongga dalam campuran yang terisi oleh aspal. Secara teori, VFB mengindikasikan kecukupan kandungan aspal dalam mengisi rongga antara agregat. Nilai VFB yang optimal menjamin durabilitas campuran dengan melindungi agregat dari air dan oksidasi, sekaligus memberikan stabilitas yang cukup (Santagata, E.; Baglieri, O.; Tsantilis, 2019).
- f. *Void in Mineral Aggregate* (VMA) yaitu persentase rongga antara partikel agregat dalam kondisi terpadatkan yang tidak terisi oleh aspal. Secara teori, VMA yang memadai diperlukan untuk menyediakan ruang yang cukup bagi aspal untuk melapisi agregat dan memberikan durability pada campuran. VMA dipengaruhi oleh gradasi agregat dan kadar aspal.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Obyek Penelitian

Obyek penelitian yaitu kinerja aditif (NaCl) dari modifier (minyak kemiri) untuk pelarutan aspal Asbuton.

3.2 Pengumpulan Data

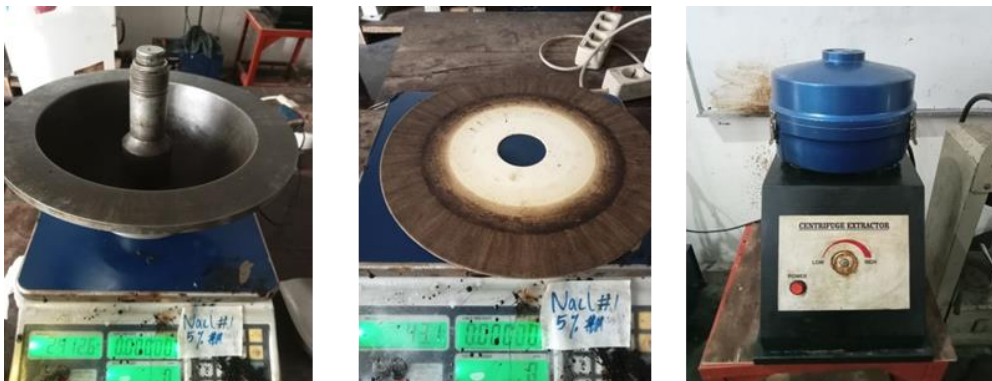
Data dikumpulkan melalui tiga tahap pengujian utama.

1. Uji *Centrifuge*

Pengujian ini dilakukan untuk menilai kemampuan ekstraksi bitumen dari campuran Asbuton-minyak kemiri-NaCl pada variasi 1%,3%, dan 5% dengan memanfaatkan gaya sentrifugal untuk memisahkan fase cair dan padat.

a. Alat

- *Centrifuge Extractor* untuk memisahkan aspal dari campuran beraspal atau mengekstraksi bahan terlarut dengan gaya sentrifugal. Gaya sentrifugal dari rotor berkecepatan tinggi mendorong material berat ke dinding tabung, memisahkan larutan pelarut yang mengalir keluar melalui saluran khusus.



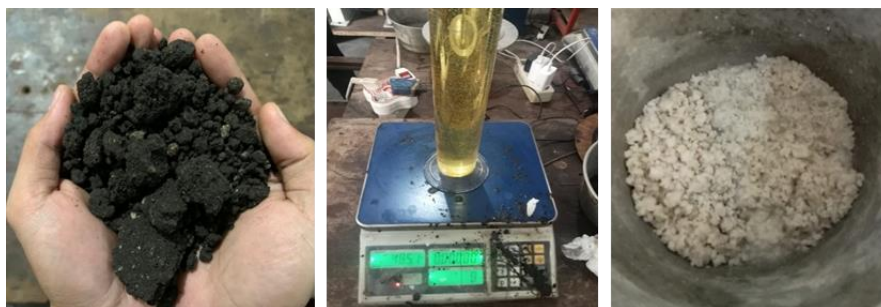
Gambar 4. Alat *Centrifuge* (a) Chamber, (b) Saringan, (c) *Centrifuge*

- Timbangan digital berfungsi untuk menimbang bahan-bahan yang akan digunakan



Gambar 5. Timbangan Digital

- Material yang digunakan yaitu Asbuton, Minyak Kemiri, dan NaCl.



Gambar 6. Material Uji *Centrifuge* Asbuton (a) Asbuton, (b) Minyak Kemiri, (c) NaCl

b. Penimbangan Awal

Penimbangan ini dilakukan di awal pengujian untuk menetapkan berat dari material dan peralatan yang digunakan.

Tabel 2. Perbandingan Material Ekstraksi *Centrifuge*

Variasi	Asbuton (gr)	Minyak Kemiri (gr)	NaCl (gr)
1%	300	495	5
3%	300	485	15
5%	300	475	25



Gambar 7. Penimbangan Awal (a) Asbuton+Chamber, (b) Minyak Kemiri, (c) NaCl

c. Pencampuran

Proses ini terdiri atas tiga tahapan. Tahap pertama dilakukan dengan mengekstrak 20% minyak kemiri selama 20 menit. Tahap kedua mengikuti prosedur yang sama seperti tahap pertama. Pada tahap ketiga, proses ekstraksi dilakukan dengan konsentrasi 10% minyak kemiri dan waktu yang sama, yaitu 20 menit (Khamelda et al., 2024).



Gambar 8. (a) Pencampuran Minyak Kemiri, NaCl dan Asbuton, (b) Material dalam *Chamber*

d. Penimbangan Akhir

Penimbangan akhir dilakukan setelah tahap sentrifugasi untuk menentukan massa akhir sampel yang diperoleh dari proses ekstraksi.



Gambar 9. Penimbangan Akhir (a) Padatan, (b) Bitumen, (c) Saringan

2. Uji *Liquid-Liquid Extraction* (LLE)

Uji Liquid Liquid Extraction (LLE) dilakukan dengan mencampurkan metanol dan dimetil sulfoksida (DMSO) dengan perbandingan 1:1, serta 50 gram bitumen hasil proses sentrifugasi. Proses ekstraksi ini berlangsung selama 24 jam. Setelah itu, diperoleh dua fraksi, yaitu residu yang berada pada bagian bawah corong pemisah dan fraksi awal (initial) yang berada pada bagian atas corong.

a. Alat

- Corong Pemisah digunakan untuk memisahkan fase cair hasil uji LLE, sehingga terbentuk lapisan residu di bawah dan lapisan initial di atas
- Gelas Ukur berfungsi sebagai wadah untuk menampung cairan residu yang keluar dari corong pemisah selama 24 jam.



Gambar 10. Corong Pemisah dan Gelas Ukur

b. Material

- Cairan Bitumen+Modifier

Cairan Bitumen+Modifier yang digunakan dalam pengujian Liquid Liquid Extraction (LLE) merupakan hasil dari proses ekstraksi menggunakan metode sentrifugasi. Pada tahap ini, sebanyak 50 gram bitumen diekstraksi untuk memperoleh sampel cairan yang kemudian digunakan dalam uji LLE.

– Metanol dan MSO

Metanol (CH_3OH) adalah cairan tidak berwarna, mudah terbakar, dan beracun, digunakan sebagai pelarut dan bahan baku industri. DMSO ($((\text{CH}_3)_2\text{SO})$) adalah senyawa organosulfur cair yang berfungsi sebagai pelarut polar aprotik, dapat melarutkan senyawa polar dan non-polar serta dapat bercampur dengan banyak pelarut organik dan air.



Gambar 11. Material Uji LLE (a) Cairan Bitumen+Modifier, (b) Metanol dan DMSO

c. Penimbangan Awal

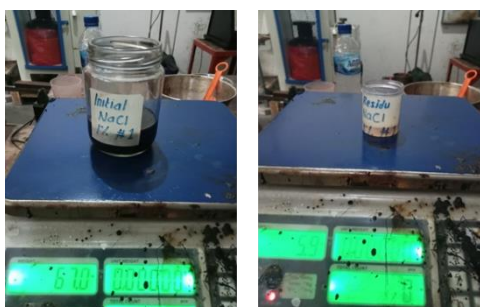
Tahap penimbangan awal dilakukan dengan menimbang cairan Bitumen 50 (gr), DMSO 10 (gr) dan Metanol 10 (gr).



Gambar 12. Penimbangan Awal untuk Uji LLE (a) Bitumen+Modifier, b) DMSO, (c) Metanol

d. Penimbangan Akhir

Frakasi hasil pemisahan ditimbang untuk menentukan massa aktual residu dan initial.



Gambar 13. Penimbangan Akhir Hasil Uji LLE (a) Initial, (b) Residu

3. Uji Marshall

Tahap ini difokuskan pada campuran CPHMA dengan penambahan zat aditif pada variasi kadar 1%, 3%, dan 5%. Untuk setiap variasi kadar aditif, disiapkan 6 sampel briket yang kemudian diuji menggunakan metode Marshall guna memperoleh nilai stabilitas dan *flow*. Data

hasil pengujian tersebut selanjutnya diolah untuk menentukan parameter kinerja campuran, yaitu *Marshall Quotient* (MQ), *Void in Mix* (VIM), *Void Filled with Bitumen* (VFB), dan *Void in Mineral Aggregate* (VMA).

a. Alat

– Saringan Agregat

Saringan agregat digunakan untuk memisahkan butiran agregat berdasarkan ukuran tertentu. Pada penelitian ini digunakan saringan dengan ukuran nomor 3/4", 1/2", 4, 8, 50, dan 200 untuk memperoleh fraksi agregat yang lolos sesuai kebutuhan (Djakfar et al., 2022).

– Timbangan Digital

– Oven, digunakan untuk memanaskan sampel CPHMA pada suhu 170 °C dengan waktu 120 menit.

– *Gun Termometer*, digunakan untuk mengukur suhu sampel yang telah dikeluarkan dari oven. Pengukuran dilakukan untuk memastikan suhu sampel mencapai 50°C sebelum dilakukan proses pemadatan (*compacting*).

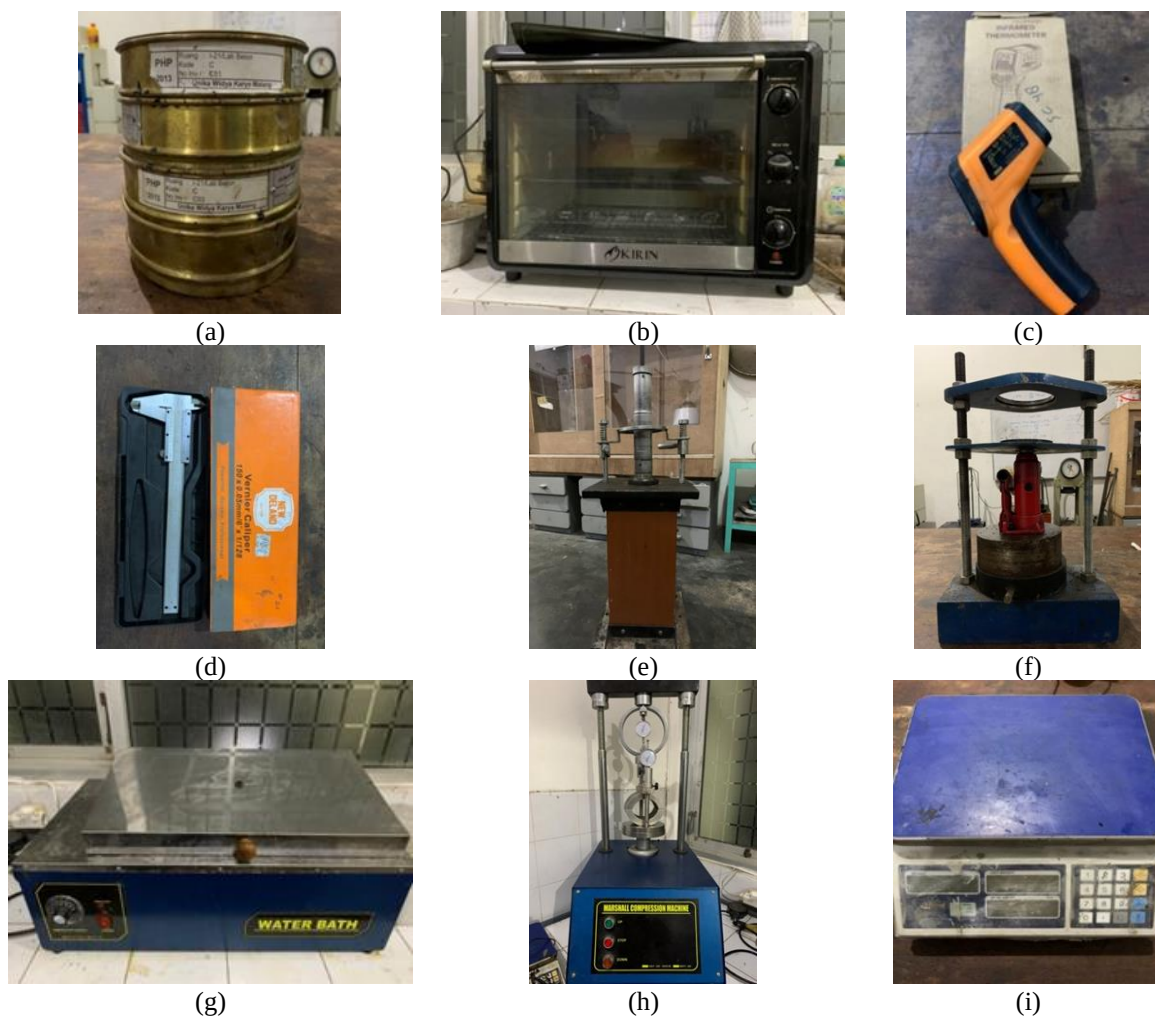
– *Caliper*, digunakan untuk pengukuran ketebalan sampel. Alat ini dipilih karena mampu memberikan hasil pengukuran yang presisi, sehingga ketebalan sampel dapat ditentukan secara akurat sebelum proses pengujian selanjutnya dilakukan.

– *Compactor*, digunakan untuk proses pemadatan campuran aspal. Alat ini memberikan tumbukan sebanyak 75 kali pada sisi atas dan bawah secara bergantian, sehingga dihasilkan benda uji dengan tingkat kepadatan yang sesuai dengan standar pengujian Marshall (ASTM International, 2015).

– *Extruder*, digunakan untuk mengeluarkan benda uji aspal dari cetakan silinder setelah proses pemadatan. Proses ini bertujuan menjaga keutuhan bentuk sampel sehingga dapat digunakan dalam pengujian Marshall sesuai standar (ASTM International, 2015).

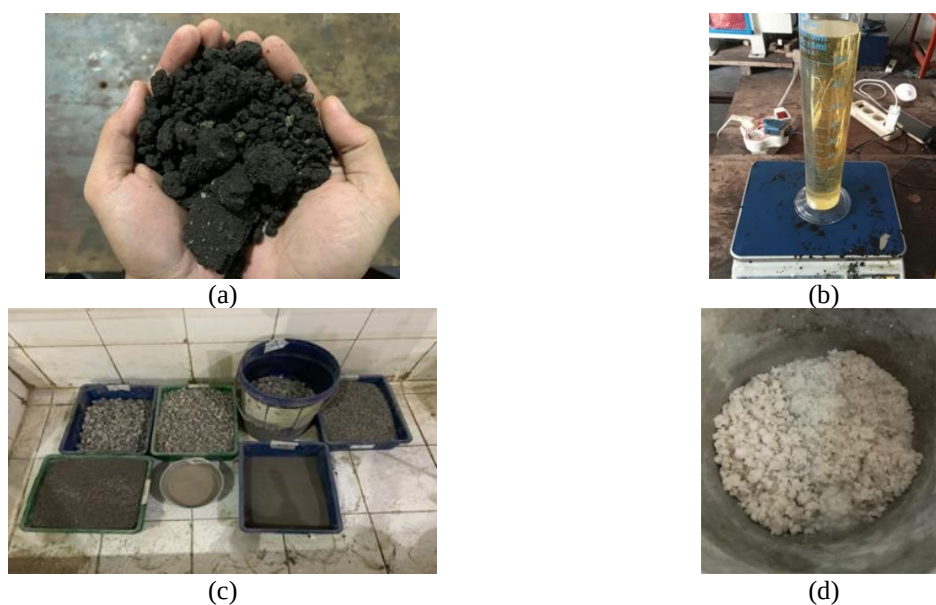
– *Water Bath*, digunakan untuk merendam benda uji pada suhu 60°C selama 30 menit sebelum dilakukan pengujian Marshall. Proses ini bertujuan menstabilkan suhu benda uji (ASTM International, 2015).

– *Marshall Apparatus*, digunakan untuk mengetahui nilai stabilitas dan flow campuran aspal. Pengujian dilakukan dengan memberi beban pada benda uji silinder yang telah dipadatkan hingga mencapai beban maksimum. Nilai stabilitas diperoleh dari beban maksimum yang ditahan benda uji, sedangkan nilai flow menunjukkan besarnya deformasi plastis pada saat beban maksimum tercapai (ASTM International, 2015).



Gambar 14. Peralatan Uji Marshall (a) Saringan Agregat, (b) Oven, (c) Termometer, (d) Kaliper, (e) Compactor, (f) Extruder, (g) Waterbath, (h) Marshall Test (i) Timbangan Digital

b. Material yang digunakan yaitu Asbuton, Minyak Kemiri, Agregat, dan NaCl



Gambar 15. Material Uji Marshall (a) Asbuton, (b) Minyak Kemiri, (c) Agregat, (d) NaCl

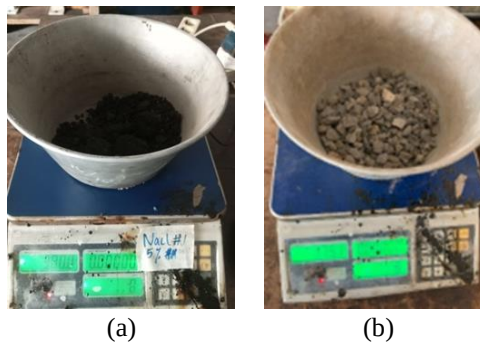
c. Prosedur

- Penyaringan Agregat
- Agregat yang digunakan dalam penelitian ini adalah agregat yang lolos dari saringan berukuran 3/4", 1/2", No. 4, No. 8, No. 50, dan No. 200.



Gambar 16. Penyaringan Agregat

- Penimbangan Awal
- Agregat ditimbang sesuai dengan proporsi yang ditetapkan dalam *Job Mix Formula* (JMF) dengan mengacu pada hasil penelitian terdahulu (Khamelda, Djakfar and Wisnumurti, 2024), dengan takaran:
 - 1/2" = 50 gr
 - 4 = 375 gr
 - 8 = 160 gr
 - 50 = 198,3 gr
 - 200 = 22,1 gr
 - Pan = 15,7 gr
 - Asbuton = 178,9 gr



Gambar 17. Penimbangan (a) Asbuton, (b) Agregat

Tabel 3. Pencampuran Material

Variasi (%)	Asbuton (gr)	Agregat (gr)	Adiktif NaCl (gr)	Minyak Kemiri (gr)
1%	178,9	821,1	0,5	47,3
3%	178,9	821,1	1,4	46,3
5%	178,9	821,1	2,4	45,4



Gambar 18. Pencampuran Asbuton, Minyak Kemiri, Agregat dan NaCl

– Pemanasan

Material dipanaskan di dalam oven selama 120 menit dengan suhu 170°C untuk memastikan kadar air berkurang dan kondisi material sesuai dengan standar pengujian.



Gambar 19. Proses Pemanasan

– Pemadatan

Proses pemadatan dilakukan dengan menggunakan Marshall compactor untuk menghasilkan benda uji berbentuk silinder. Material Setiap sampel dipadatkan dengan 75 kali tumbukan pada masing-masing sisi secara bolak-balik.



Gambar 20. Proses Pemadatan

– Pendiaman

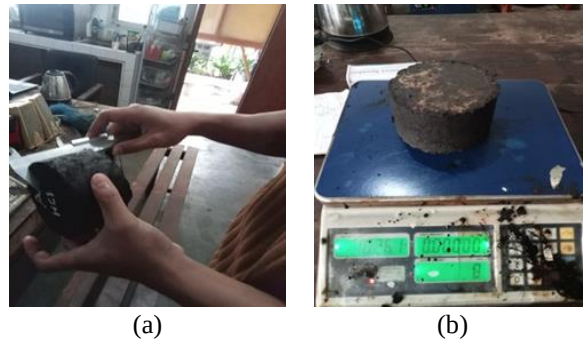
Setelah proses pemadatan, benda uji didiamkan pada suhu ruang selama 24 jam agar mencapai kondisi stabil. Tahap pendiaman ini bertujuan untuk memastikan sampel tidak mengalami deformasi awal sebelum dilakukan perendaman.



Gambar 21. Pendiaman Hasil Proses Pemadatan

– Pengukuran

Pengukuran dilakukan dengan menggunakan alat kaliper untuk mengukur diameter dan tinggi briket sebelum melanjutkan proses perendaman selama 24 jam.



Gambar 22. (a) Pengukuran, (b) Penimbangan

– Perendaman

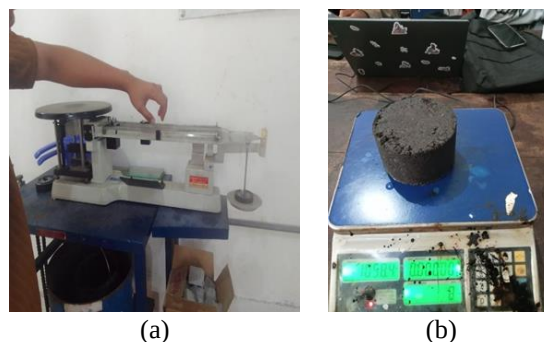
Perendaman dilakukan dengan cara merendam briket ke dalam air selama 24 jam untuk mengetahui daya serap air serta ketahanan briket terhadap pengaruh kelembaban



Gambar 23. Proses Perendaman

– Penimbangan Akhir

Proses penimbangan dilakukan dalam dua tahap, yaitu penimbangan di dalam air untuk memperoleh berat dalam air, serta penimbangan dalam kondisi jenuh permukaan kering (SSD) guna menentukan berat jenuh.



Gambar 24. (a) Penimbangan berat dalam air, (b) Penimbangan berat jenuh

– *Water Bath*

Proses *water bath* dilakukan dengan merendam benda uji dalam air pada suhu 60°C selama 30 menit, dengan tujuan menjaga kondisi kelembapan dan kestabilan suhu selama pengujian.



Gambar 25. Prose Water Bath

– *Marshall Test*

Pengujian Marshall dilakukan untuk menentukan stabilitas dan kelelahan (*flow*) sampel. Dalam proses pengujian, briket ditempatkan pada *stability mold* kemudian ditekan oleh piston hingga mencapai deformasi maksimum atau keruntuhan. Keruntuhan tersebut ditandai dengan jarum *flow* yang berbalik arah, sehingga pada saat itu nilai stabilitas dan *flow* dapat dicatat.



Gambar 26. Proses Marshall Test

3.3 Pengolahan Data

Pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yaitu:

1. Uji *Centrifuge*

Pengujian dengan metode *centrifuge* dilakukan untuk mengekstrak bitumen dari sampel. Hasil ekstraksi tersebut selanjutnya ditimbang dengan timbangan digital, sehingga diperoleh nilai kadar bitumen yang terkandung dalam sampel.

2. Uji Liquid Liquid Extraction

Perhitungan LLE menggunakan rumus berikut:

$$E = (1 - q) \times 100\% \quad (1)$$

$$q = V_{aq} / (K D \times V_o + V_{aq}) \quad (2)$$

$$K D = ((N_{eq} / V_o)) / (((n_{initial} - N_{eq}) / V_{aq})) \quad (3)$$

$$n_{initial} = ((P \times V_{initial}) / (R \times T)) \quad (4)$$

$$n_{residu} = ((P \times V_{residu}) / (R \times T)) \quad (5)$$

$$n_{eq} = n_{initial} - n_{residu} \quad (6)$$

Dimana:

E	= Prosentase efisiensi ekstraksi
Q	= Fraksi residu dalam fase larutan pada saat kesetimbangan
KD	= Koefisien distribusi
n	= Jumlah zat (mol)
V _{aq}	= Volume larutan
V _o	= Volume pelarut
M _o	= [A] _o = Molaritas pelarut
M _{aq}	= [A] _{aq} = Molaritas larutan
n _{eq}	= Jumlah zat pada saat setimbang
n _{initial}	= Jumlah aspal + ekstrak (setelah LLE)
n _{residu}	= Jumlah residu (setelah LLE)
P	= 1 atm
R	= Konstanta Rydberg = 0,082 atm.L/K.mol
T	= 27°C + 273 = 298 K

3. Uji Marshall

a. Stabilitas

Nilai stabilitas diperoleh dari pembacaan arloji Marshall:

$$\text{Faktor Kalibrasi (w)} = 0,44482 * 24,916 \text{ lbf/div} = 11,17 \text{ lbf/div}$$

$$\text{Angka Korelasi (x)} = 5,60 \text{ untuk volume } 495 - 507 \text{ cm}^3$$

$$\text{Nilai Stabilitas (p)} = o * w \quad (7)$$

$$\text{Nilai Stabilitas (q)} = p * x \quad (8)$$

dimana:

$$w = \text{Faktor Kalibrasi } 29,03 \text{ lbf/div (ditetapkan berdasarkan kalibrasi alat)}$$

$$o = \text{Pembacaan Arloji Stabilitas}$$

$$0,44482 = \text{angka konversi Lbf ke Kg} \rightarrow \text{Ditetapkan}$$

$$x = \text{Angka Korelasi} = 5,60 \text{ (untuk volume } 495 - 507 \text{ cm}^3)$$

b. Flow

Nilai flow didapat dari pembacaan arloji Marshall

$$\text{Nilai Flow} = r * 0,01 \text{ mm/div} \quad (9)$$

Dimana:

$$r = \text{Pembacaan Arloji Flow}$$

c. Marshall Quotient (MQ)

$$\text{MQ} = S/F \quad (10)$$

dimana:

MQ = *Marshall Quotient* (kg/mm)

S = Nilai stabilitas terkoreksi (kg)

F = Nilai *flow* (mm)

d. *Void in Mixture* (VIM)

$$\text{VIM} = 100\% - \frac{100\% \times g}{h} \quad (11)$$

dimana:

VIM = Rongga udara pada campuran seteah pemadatan (%)

g = c/f

c = berat kering (gr)

f = berat isi (gr) = d – e

d = berat SSD

e = berat briket dalam air

$$\text{Berat Jenis (h)} = 100 / (((t/u) * 100) + ((b/v) * 100)) \quad (12)$$

t = % agregat terhadap campuran

u = berat jenis agregat

b = % aspal terhadap campuran

v = berat jenis aspal (gr/cm³)

e. *Void Filled Bitumen* (VFB)

$$\text{VFB} = 100\% - \frac{i}{j} \quad (13)$$

dimana:

VFB = rongga terisi aspal, persen terhadap VMA

i = (b * g) / v

b = % aspal terhadap campuran

g = c/f

c = berat kering (gr)

f = berat isi (gr) = d – e

d = berat SSD

e = berat briket dalam air

v = berat jenis aspal (gr/cm³)

j = (t * g) / u

t = % agregat terhadap campuran

u = berat jenis agregat

f. *Void in Mineral Aggregate (VMA)*

$$\text{VMA} = 100\% - j \quad (14)$$

dimana:

VMA = Rongga udara pada mineral agregat (%)

$$j = (t * g) / u$$

t = % agregat terhadap campuran

u = berat jenis agregat

g = c/f

c = berat kering (gr)

f = berat isi (gr) = d – e

d = berat SSD

e = berat briket dalam air

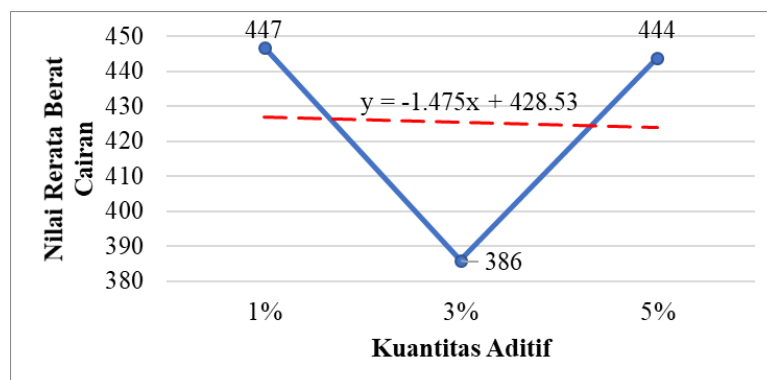
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Uji *Centrifuge*

Data yang didapatkan dari uji *Centrifuge* ditabelkan sebagai berikut.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Uji *Centrifuge*

Aditif	Kode	Berat (gr)				Persentase		Durasi (mnt)
		Cairan		Padatan	Total	Cairan	Padatan	
		Per Sampel	Rerata					
1%	1%#1	428,4	446,85	338,3	766,7	0,559	0,441	80
	1%#2	465,3		318,2	783,5	0,594	0,406	60
3%	3%#1	363,1	386	331,4	694,5	0,523	0,477	180
	3%#2	408,9		310,5	719,4	0,568	0,432	200
5%	5%#1	436,8	443,9	343,1	779,9	0,560	0,440	60
	5%#2	451		136,6	587,6	0,768	0,232	60



Gambar 27. Grafik Nilai Uji *Centrifuge*

Nilai rerata berat cairan berada dalam rentang 386 – 447 gr, puncaknya pada variasi 1% NaCl. Trendline data hasil pengujian menunjukkan rerata berat cairan berbanding terbalik dengan persentase NaCl.

4.2 Uji Liquid Liquid Extraction (LLE)

Data yang didapatkan dari uji LLE dikalkulasi seperti contoh perhitungan berikut.

Kode sampel NaCl 1% #1

$$P = 1 \text{ atm}$$

$$R = 0,082 \text{ atm.L/K.mol}$$

$$T = 298 \text{ K}$$

$$V_{\text{initial}} = 0,067 \text{ liter}$$

$$V_{\text{residu}} = 0,0059 \text{ liter}$$

$$V_o = 0,022 \text{ liter}$$

$$V_{\text{aq}} = 0,079 \text{ liter}$$

$$n_{\text{initial}} = \frac{PV_{\text{initial}}}{RT} = \frac{1 \text{ atm} \cdot 0,067 \text{ ltr}}{0,082 \cdot 298} = 0,003 \text{ mol}$$

$$n_{\text{residu}} = \frac{PV_{\text{residu}}}{RT} = \frac{1 \text{ atm} \cdot 0,0059 \text{ ltr}}{0,082 \cdot 298} = 0,000241447 \text{ mol}$$

$$n_{\text{eq}} = n_{\text{initial}} - n_{\text{residu}} = 0,003 \text{ mol} - 0,000241447 \text{ mol} = 0,003 \text{ mol}$$

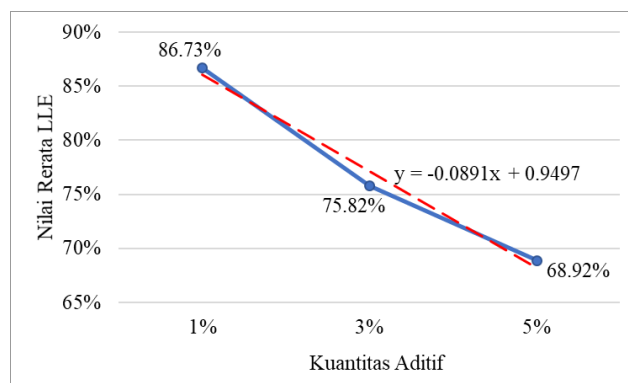
$$K_D = \frac{M_o}{M_{\text{aq}}} = \frac{(n_{\text{eq}} / V_o)}{(n_{\text{initial}} - n_{\text{eq}}) / V_{\text{aq}}} = \frac{(0,003 / 0,022)}{(0,003 - 0,003) / 0,079} = 37,75$$

$$q = \frac{V_{\text{aq}}}{(K_D V_o) + V_{\text{aq}}} = \frac{0,079}{(37,75 \cdot 0,022) + 0,079} = 0,08806$$

$$E = (1 - q) 100\% = (1 - 0,08806) 100\% = 91,19\%$$

Tabel 5. Hasil Perhitungan Uji LLE

Kode	V _{initial}	V _{residu}	n _{initial}	n _{residu}	n _{eq}	KD	q	E	
								Per Sampel	Rerata
1%#1	0,067	0,0059	0,003	0,000241	0,003	37,75	0,09	91,19%	86,73%
1%#2	0,058	0,0102	0,002	0,000417	0,002	16,80	0,18	82,26%	
3%#1	0,054	0,0122	0,002	0,000499	0,002	12,44	0,23	77,45%	75,82%
3%#2	0,053	0,0137	0,002	0,000561	0,002	10,42	0,26	74,20%	
5%#1	0,052	0,0136	0,002	0,000557	0,002	10,18	0,26	73,75%	68,92%
5%#2	0,050	0,0181	0,002	0,000741	0,001	6,46	0,36	64,09%	



Gambar 28. Grafik Nilai Uji LLE

Nilai rerata E berada dalam rentang 68,92% - 86,73%, puncaknya pada variasi 1% NaCl. Trendline data hasil pengujian menunjukkan rerata nilai E berbanding terbalik dengan persentase NaCl.

4.3 Uji Marshall

4.3.1 Stabilitas Marshall

Data yang didapatkan dari uji LLE dikalkulasi seperti contoh perhitungan berikut..

Kode Sampel = NaCl 5% A

Pembacaan Arloji Stabilitas (o) = 37 div □ diukur

Faktor Kalibrasi (w) = $y * 24,916 \text{ lbf/div}$
 $= 0,45 * 24,916 \text{ lbf/div} = 11,17 \text{ lbf/div}$

Angka Korelasi (x) = 4,17 → untuk volume 495 – 507 cm³

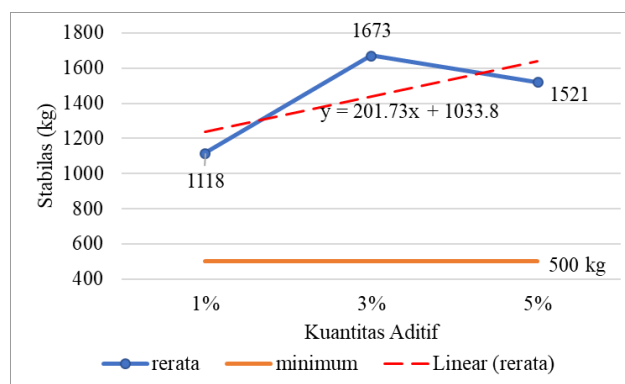
Konversi lbf ke kg (y) = 0,45 kg/lbf

Nilai Stabilitas (p) = $o * w = 37 \text{ div} * 11,17 \text{ lbf/div} = 413,19 \text{ lbf}$

Nilai Stabilitas (q) = $p * x = 413,19 \text{ lbf} * 4,17 = 1723,42 \text{ kg}$

Tabel 6. Hasil Perhitungan Stabilitas Marshall

No.	Kode	Pembacaan Arloji Stabilitas	Angka Korelasi	Nilai Stabilitas	Nilai Stabilitas	Rerata
Satuan		div		lbf	kg	kg
Notasi		(o)	(x)	(p)	(q)	
1%	C	19	4,55	212,23	965,65	1118
	D	25	4,55	279,25	1270,59	
	E	20	5,00	223,4	1117,00	
3%	A	29	5,00	323,93	1619,65	1673
	B	35	4,55	390,95	1778,82	
	D	29	5,00	323,93	1619,65	
5%	A	37	4,17	413,29	1723,42	1521
	C	29	4,55	323,93	1473,88	
	D	22	5,56	245,74	1366,31	



Gambar 29. Grafik Nilai Stabilitas Marshall

Nilai rerata Stabilitas pada rentang 1118 – 1673 kg, puncaknya pada variasi 3% NaCl, nilai rerata memenuhi ketentuan CPHMA yaitu > 500 kg. Trendline data hasil pengujian menunjukkan rerata nilai Stabilitas berbanding lurus dengan persentase NaCl.

4.3.2 Flow

Data yang didapatkan dari uji LLE dikalkulasi seperti contoh perhitungan berikut.

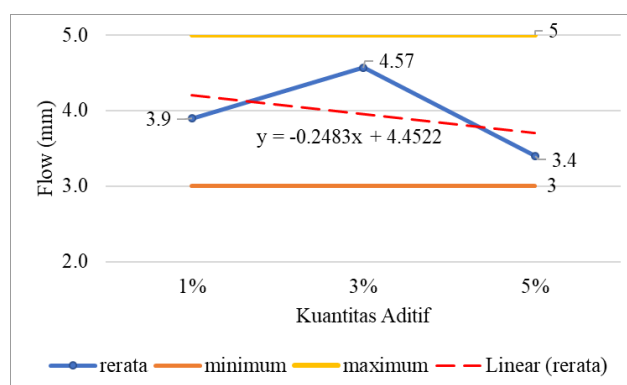
Kode Sampel = NaCl 5% (A)

Pembacaan Arloji *Flow* (r) = 350 div (diukur)

Nilai *Flow* = $r \cdot 0,01 \text{ mm/div} = 350 \text{ div} \cdot 0,01 \text{ mm/div} = 3,5 \text{ mm}$

Tabel 7. Hasil Perhitungan *Flow*

No.	Kode	Pembacaan Arloji Flow	Nilai Flow	Rerata mm
		Div (r)	mm/div	
1%	C	400	4	3,90
	D	449	4,49	
	E	320	3,2	
3%	A	489	4,89	4,57
	B	442	4,42	
	D	440	4,4	
5%	A	350	3,5	3,40
	C	330	3,3	
	D	340	3,4	



Gambar 30. Grafik Nilai *Flow*

Nilai rerata *Flow* pada rentang 3,4 mm – 4,57 mm, puncaknya pada variasi 3%, nilai rerata memenuhi ketentuan CPHMA yaitu 3 – 5 mm. *Trendline* data hasil pengujian menunjukkan rerata nilai *flow* berbanding terbalik dengan persentase NaCl.

4.3.3 Void in Mineral Agregate (VMA)

Data yang didapatkan dari uji LLE dikalkulasi seperti contoh perhitungan berikut.

Kode Sampel = NaCl 5% (A)

% Aspal terhadap Campuran (b) = 6% → *Job Mix Formula*

% Agregat terhadap Campuran (t) = $100\% - b = 100\% - 6\% = 0,94$

Berat Kering Briket (c) = 1034,30 gr → ditimbang

Berat SSD Briket (d) = 1068,90 gr → ditimbang

Berat dalam Air Briket (e) = 831,80 gr → ditimbang

Berat Isi Briket (f) = $d - e = 1068,90 \text{ gr} - 831,80 \text{ gr} = 237,10 \text{ gr}$

Berat Isi Benda Uji Briket (g) = $c / f = 1034,30 \text{ gr} / 237,10 \text{ gr} = 4,36 \text{ gr}$

Berat Campuran = 1000 gr → ditimbang

Berat Aspal = $b \times \text{Berat Campuran}$

= $6\% \times 1000 \text{ gr} = 60 \text{ gr}$

Berat Agregat = $\% \text{ Agregat terhadap Campuran} \times \text{Berat kering}$

= $0,94 \times 1034,30 = 972,2 \text{ gr}$

BJ Air = $1 \text{ gr/cm}^3 \rightarrow \text{ketetapan}$

Volume Campuran = $(c - e) / \text{BJ Air}$

= $(1034,30 \text{ gr} - 831,80 \text{ gr}) / 1 \text{ gr/cm}^3 = 202,5 \text{ cm}^3$

BJ Aspal (v) = $1,037 \text{ gr/cm}^3 \rightarrow \text{ketetapan}$

Volume Aspal = $(b \times c) / v$

= $(6\% \cdot 1034,30 \text{ gr}) / 1,037 \text{ gr/cm}^3 = 59,8 \text{ cm}^3$

Berat Pelarut = $47,8 \text{ gr} \rightarrow \text{ditimbang}$

Volume Agregat = $\text{Volume Campuran} - \text{Volume Aspal}$

= $202,5 \text{ cm}^3 - 59,8 \text{ cm}^3 = 142,7 \text{ cm}^3$

BJ Agregat (u) = $\text{Berat Agregat} / \text{Volume Agregat}$

= $892,2 \text{ gr} / 142,7 \text{ cm}^3 = 9,8 \text{ gr/cm}^3$

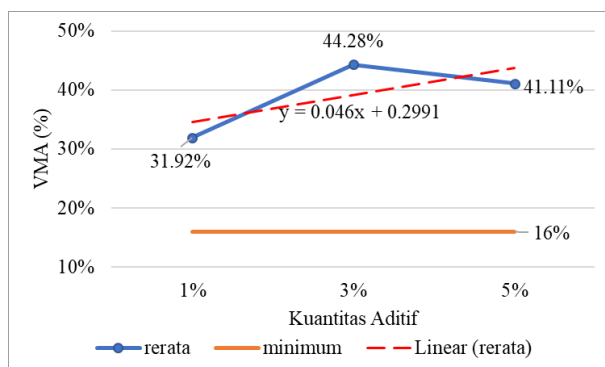
J = $(t \times g) / u = (0,94 \cdot 4,36 \text{ gr}) / 6,82 \text{ gr/cm}^3 = 60,17\%$

VMA = $100\% - j = 100\% - 60,17\% = 0,3983 = 39,83\%$

Tabel 8. Hasil Perhitungan VMA

Var	Kode	% Aspal terhadap Campuran	% Agregat terhadap Campuran	Berat Kering Briket	Berat SSD Briket	Berat dalam Air Briket	Berat Isi Briket	Berat Isi Benda Uji Briket	Berat Campuran	Berat Aspal	Berat Pelarut
		% (b)	% (t)	gr (c)	gr (d)	gr (e)	gr (f)	gr (g)	gr	gr	gr
		6,00%	94,00%	1037,30	1050,10	813,80	236,3	4,39	1000	60	47,8
1%	D	6,00%	94,00%	1031,50	1045,50	812,80	232,7	4,43	1000	60	47,8
	E	6,00%	94,00%	984,00	1001,00	778,80	222,2	4,43	1000	60	47,8
	A	6,00%	94,00%	1010,30	1045,30	831,80	213,5	4,73	1000	60	47,8
3%	B	6,00%	94,00%	1008,90	1057,00	827,80	229,2	4,40	1000	60	47,8
	D	6,00%	94,00%	1019,20	1051,90	836,80	215,1	4,74	1000	60	47,8
	A	6,00%	94,00%	1034,30	1068,90	831,80	237,1	4,36	1000	60	47,8
5%	C	6,00%	94,00%	1013,30	1051,20	819,80	231,4	4,38	1000	60	47,8
	D	6,00%	94,00%	978,40	1008,60	800,80	207,8	4,71	1000	60	47,8

Var	Kode	Berat Agregat	BJ Air	Volume Campuran	BJ Aspal	Volume Aspal	Volume Agregat	BJ Agregat	(j)	VMA	Rerata
		gr	gr/cm3	cm3	gr/cm3 (v)	cm3	cm3	gr/cm3 (u)		%	
		975	1	223,5	1,037	60,02	163,48	6,0		69,18%	
1%	D	970	1	218,7	1,037	59,68	159,02	6,1	68,34%	31,66%	31,92%
	E	925	1	205,2	1,037	56,93	148,27	6,2	66,73%	33,27%	
	A	950	1	178,5	1,037	58,46	120,04	7,9	56,23%	43,77%	
3%	B	948	1	181,1	1,037	58,37	122,73	7,7	53,55%	46,45%	44,28%
	D	958	1	182,4	1,037	58,97	123,43	7,8	57,38%	42,62%	
	A	972	1	202,5	1,037	59,84	142,66	6,8	60,17%	39,83%	
5%	C	953	1	193,5	1,037	58,63	134,87	7,1	58,28%	41,72%	41,11%
	D	920	1	177,6	1,037	56,61	120,99	7,6	58,22%	41,78%	



Gambar 31. Nilai Void in Mineral Agregat (VMA)

Nilai rerata VMA pada rentang 31,92% – 44,28%, dengan nilai maksimum pada variasi 3%, nilai rerata memenuhi ketentuan CPHMA yaitu $> 16\%$. Trendline data hasil pengujian menunjukkan rerata nilai VMA berbanding lurus dengan persentase NaCl.

4.3.4 Void Filled with Bitumen (VFB)

Data yang didapatkan dari uji LLE dikalkulasi seperti contoh perhitungan berikut.

Kode Sampel = NaCl 5% A

b = 6% → dari perhitungan VMA

g = 4,36 gr → dari perhitungan VMA

v = 1,037 gr/cm³ → dari perhitungan VMA

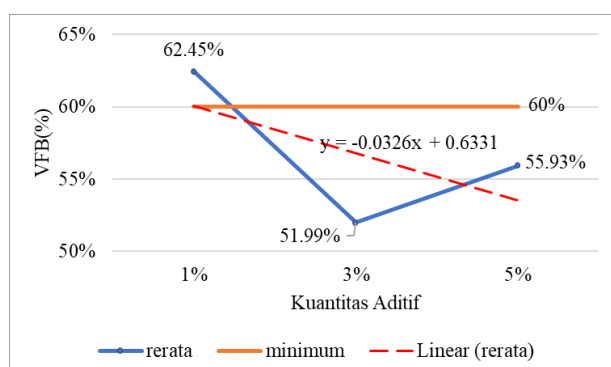
i = $(b * g) / v = (6\% * 4,36) / 1,037 = 0,2524$

j = 0,6017 → dari perhitungan VMA)

VFB = $100\% - (i / j) = 100\% - (0,2524 / 0,6017) = 0,5805 = 58,05\%$

Tabel 9. Hasil Perhitungan VFB

Var.	Kode	% Aspal terhadap Campuran	Berat Isi Benda Uji Briket	BJ Aspal	(i)	(j)	VFB	Rerata
		%	gr	gr/cm ³			%	
		(b)	(g)	(v)				
1%	C	6%	4,39	1,037	0,2540	0,6918	63,29%	62,45%
	D	6%	4,43	1,037	0,2565	0,6834	62,47%	
	E	6%	4,43	1,037	0,2562	0,6673	61,60%	
3%	A	6%	4,73	1,037	0,2738	0,5623	51,31%	51,99%
	B	6%	4,40	1,037	0,2547	0,5355	52,44%	
	D	6%	4,74	1,037	0,2742	0,5738	52,22%	
5%	A	6%	4,36	1,037	0,2524	0,6017	58,05%	55,93%
	C	6%	4,38	1,037	0,2534	0,5828	56,53%	
	D	6%	4,71	1,037	0,2724	0,5822	53,21%	



Gambar 32. Nilai VFB

Nilai rerata VFB pada rentang 51,99% – 62,45%, puncaknya pada variasi 1%, nilai rerata memenuhi ketentuan CPHMA yaitu > 60%. Trendline data hasil pengujian menunjukkan rerata nilai VFB berbanding terbalik dengan persentase NaCl.

4.3.5 Void in Mix (VIM)

Data yang didapatkan dari uji LLE dikalkulasi seperti contoh perhitungan berikut.

Kode Sampel = NaCl 5% A

g = 4,36 gr → dari perhitungan VMA

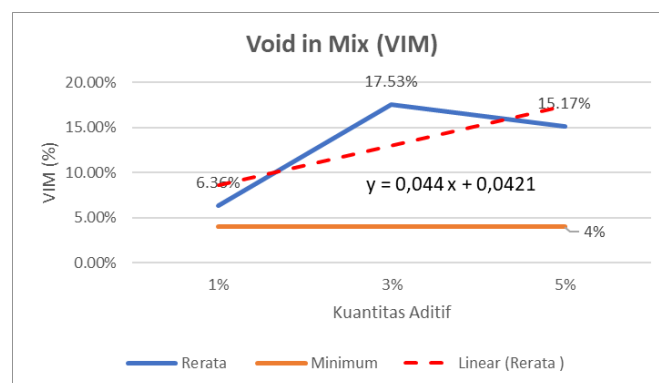
t = 0,94 → dari perhitungan VMA

$$\begin{aligned} \text{BJ Maks (h)} &= 100 / \{[(t / u) 100] + [(b / v) 100]\} \\ &= 100 / \{[(0,94 / 9,8 \text{ gr/cm}^3) 100] + [(6\% / 1,037 \text{ gr/cm}^3) 100]\} = 5,11 \text{ gr/cm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{VIM} = 100\% - (100\% (g / h)) = 100\% - (100\% (4,36 / 5,11)) = 0,1459 = 14,59\%.$$

Tabel 10. Hasil Perhitungan VIM

Var.	Kode	Berat Isi Benda Uji Briket	% Agregat terhadap Campuran	BJ Agregat	% Aspal terhadap Campuran	BJ Aspal	BJ Maks	VIM	Rerata
		gr	%	gr/cm ³	%	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%
		(g)	(t)	(u)	(b)	(v)	(h)		
1%	C	4,39	0,94	6,0	6%	1,037	4,64	5,42%	6,36%
	D	4,43	0,94	6,1	6%	1,037	4,72	6,02%	
	E	4,43	0,94	6,2	6%	1,037	4,80	7,65%	
3%	A	4,73	0,94	7,9	6%	1,037	5,66	16,39%	17,53%
	B	4,40	0,94	7,7	6%	1,037	5,57	20,99%	
	D	4,74	0,94	7,8	6%	1,037	5,59	15,20%	
5%	A	4,36	0,94	6,8	6%	1,037	5,11	14,59%	15,17%
	C	4,38	0,94	7,1	6%	1,037	5,24	16,38%	
	D	4,71	0,94	7,6	6%	1,037	5,51	14,53%	



Gambar 33. Nilai VIM

Nilai rerata VIM pada rentang 6,3% – 17,53%, puncaknya pada variasi 3% NaCl. nilai rerata memenuhi ketentuan CPHMA yaitu 4-10%. Trendline data hasil pengujian menunjukkan rerata nilai VIM berbanding lurus dengan persentase NaCl.

4.3.6 Marshall Quotient (MQ)

Data yang didapatkan dari uji LLE dikalkulasi seperti contoh perhitungan berikut.

Kode Sampel = NaCl 5% A

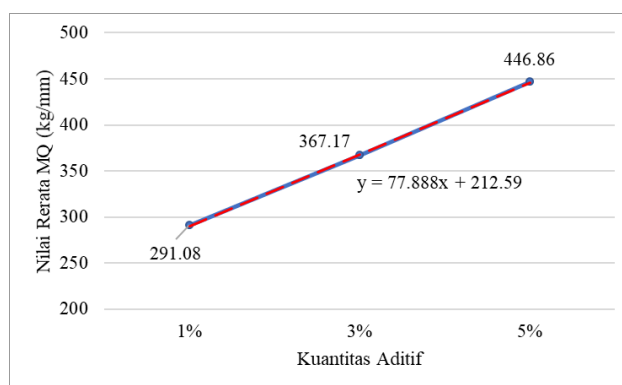
Nilai Stabilitas (q) = 1723,01 kg → dari perhitungan stabilitas marshall

Nilai Flow = 3,5 mm → dari perhitungan *flow*

MQ = $q / \text{nilai flow} = 1723,01 \text{ kg} / 3,5 \text{ mm} = 492,29 \text{ kg/mm}$

Tabel 11. Hasil Perhitungan MQ

Var.	Kode	Nilai Stabilitas	Nilai Flow	MQ	Rerata
		kg (q)	mm	kg/mm	
1%	C	965,42	4	241,35	291,08
	D	1270,29	4,49	282,91	
	E	1116,74	3,2	348,98	
3%	A	1619,27	4,89	331,14	367,17
	B	1778,40	4,42	402,35	
	D	1619,27	4,4	368,01	
5%	A	1723,01	3,5	492,29	446,86
	C	1473,53	3,3	446,52	
	D	1365,99	3,4	401,76	



Gambar 34. Nilai MQ

Rerata nilai MQ pada rentang 291,08 kg/mm – 446,86 kg/mm, puncaknya pada variasi 5%. Trendline data hasil pengujian menunjukkan rerata nilai VIM berbanding lurus dengan persentase NaCl.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini mengindikasikan bahwa penggunaan minyak kemiri sebagai modifier dan Natrium Klorida (NaCl) sebagai aditif menghasilkan peningkatan yang signifikan pada kinerja *Cold Paving Hot Mix Asbuton* (CPHMA). Uji *centrifuge* dan *Liquid-Liquid Extraction* (LLE) menunjukkan bahwa penambahan NaCl meningkatkan efisiensi ekstraksi bitumen dari Asbuton, dengan hasil maksimum pada variasi 1% NaCl. Di sisi lain, uji Marshall menunjukkan bahwa variasi 3% NaCl memberikan nilai stabilitas maksimum sebesar 1673 kg, melebihi standar minimum 500 kg. Parameter lainnya seperti *flow*, VIM, VFB, dan VMA juga tetap dalam batas spesifikasi yang ditentukan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga (2016).

Sebagai hasilnya, penggabungan kedua bahan itu terbukti jitu dalam meningkatkan fleksibilitas, stabilitas, dan daya tahan campuran terhadap kelembapan serta tekanan lalu lintas

5.2 Saran

Penelitian lebih lanjut disarankan untuk mengeksplorasi dengan lebih mendalam mekanisme kimia interaksi antara minyak kemiri dan NaCl pada tingkat molekul dengan pendekatan spektroskopi (FTIR, XRF, atau DSC) untuk memahami perubahan struktur bitumen secara rinci. Selain itu, uji ketahanan jangka panjang (*durability test*) perlu dilakukan terhadap campuran CPHMA yang dimodifikasi ini di lapangan untuk mengevaluasi performanya terhadap variasi suhu, hujan, dan beban lalu lintas yang sesungguhnya.

DAFTAR REFERENSI

- Asadi, B., Goli, A., & Hesami, S. (2021). Evaluation of the effect of vegetable oil-based modifiers on the performance of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 285, 122852. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122852>
- ASTM International. (2015). ASTM D6927-15: Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures. <https://doi.org/10.1520/D6927-15>
- Baisa, H. L. (2022). Interview.
- Chen, X.; Liu, Y.; Wang, Z. (2022). Performance evaluation of asphalt mixtures modified with kemiri nut oil and sodium chloride additive. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1542–1548.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). Spesifikasi umum bina marga untuk pekerjaan jalan dan jembatan. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR).
- Direktorat Jenderal Bina Marga, K. P. (2022). Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA). Balai Geoteknik Terowongan Dan Struktur, Direktorat Jenderal Bina Marga. <https://binamarga.pu.go.id/balai-gts/berita/cold-paving-hot-mix-asbuton-cphma>
- Djakfar, L., Wisnumurti, & Khamelda, L. (2022). Performance of CPHMA Incorporating Vegetable Oil as Asbuton Solution. *Key Engineering Materials*, 912 KEM(March), 1–16. <https://doi.org/10.4028/p-c85t83>
- Erdawaty, Samang, L., Muhiddin, A. B., & Arsyad, A. (2020). Characteristics study of buton granular asphalt as filling material of column. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 419(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/419/1/012042>
- Huang, Y. H. (2004). Pavement analysis and design (2nd editio). Pearson Prentice Hall.
- Juli-Gándara, L., Vega-Zamanillo, Á., Calzada-Pérez, M. Á., & Teijón-López-Zuazo, E. (2020). Effect of sodium chloride on the modulus and fatigue life of bituminous mixtures. *Materials*, 13(9), 2126. <https://doi.org/10.3390/ma13092126>
- Kementerian PUPR Dirjen Bina Marga. (2016). Spesifikasi Interim CPHMA.
- Keria, S., Dan, I., Lahai, P., Jenderal, D., & Marga, B. (2015). Direktorat jenderal. Revisi 2, 19620221.

- Khamelda, L., Djakfar, L., & Wisnumurti. (2024). Mechanism Reaction of Candlenut Oil Modifier in LGA. *Civil Engineering and Architecture*, 12(3A), 2127–2138. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.121314>
- Priyanto, S., & Handayani, W. (2020). Pengaruh penambahan garam NaCl terhadap kekuatan dan ketahanan campuran aspal. *Jurnal Infrastruktur*, 10(1), 55–64.
- Rahman, M. T.; Mohajerani, A.; Giustozzi, F. (2021). Recycling of waste cooking oil in asphalt binders: A comprehensive review. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105455. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105455>
- Santagata, E.; Baglieri, O.; Tsantilis, L. (2019). Effects of Bio-based additives on rheological properties of asphalt binders. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.12.019>
- Setiowati, R., & Putra, M. F. (2023). Struktur Biaya Produksi Aspal Buton Untuk Kebutuhan Infrastruktur Sebagai Substitusi Impor. *Jurnal Teknologi Dan Manajemen*, 21(1), 35–42. <https://doi.org/10.52330/jtm.v21i1.94>
- Sukirman, S. (2010). Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Lentur. In Nova Bandung.
- Susanto, D. (2016). Pengaruh penambahan NaCl pada campuran aspal terhadap ketahanan terhadap udara. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 10(3), 112–119.
- Tanti, M., & Suryadi, E. (2017). Pemanfaatan minyak nabati sebagai aditif pada campuran aspal. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 5(2), 89–96.
- Thanaya, I. N. A., & Sparsa, A. A. A. (2017). Comparison of Characteristics of Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) Cold And Hot Compacted Mixtures. *Journal of Civil Engineering*, 24(3), 247–256. <https://doi.org/10.5614/jts.2017.24.3.8>
- Wang, S.; Huang, W.; Lin, P. (2020). Influence of sodium chloride on moisture susceptibility of asphalt mixtures containing bio-modifier. *Construction and Building Materials*, 253, 119186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119186>
- Zhang, J.; Wang, H.; Li, Y. (2020). Sustainable asphalt modification using bio-oils: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120732. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120732>