

Pengaruh Penambahan Zat Aditif Natrium Hipoklorit (NaOCl) Terhadap Karakteristik Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) Dengan Modifier Minyak Kemiri

Ginaris Bagus Yoga Baskara¹, 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: 201732009@widyakarya.ac.id

Abstract. Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) is an asphalt mixture that can be applied at low temperatures, making it more efficient and environmentally friendly than conventional asphalt. However, CPHMA mixtures still have shortcomings in terms of stability and resistance to environmental conditions. This study aims to investigate the effect of adding kemiri oil and sodium hypochlorite (NaOCl) additive on the characteristics of CPHMA asphalt mixtures. The research method used was a laboratory experiment by preparing several CPHMA mixture variations using kemiri oil and NaOCl. The tested characteristics included Marshall stability, flow, Marshall Quotient (MQ), Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), and Void Filled with Bitumen (VFB). The test results were analyzed and compared with technical specifications based on Bina Marga standards. The results show that the addition of kemiri oil can improve mixture flexibility, while NaOCl functions to enhance bonding between particles in the mixture. The combination of both additives was proven to improve all test parameters. In the centrifuge test, an additive content of 1% produced the highest extract volume, indicating that the dissolution process was the most effective. In the liquid-liquid extraction test, the highest extraction efficiency was also achieved at 1% additive content, with a value of 85.27%. In the Marshall test, an additive content of 3% produced the highest stability value, indicating the best load-bearing capacity. Overall, this study successfully determined the optimum content of kemiri oil and NaOCl to produce a mixture with the best Marshall characteristics and in compliance with the applicable technical requirements.

Keywords: CPHMA asphalt, Kemiri oil, NaOCl, Marshall stability, Asphalt modification

Abstrak. Aspal CPHMA (Cold Paving Hot Mix Asbuton) merupakan jenis campuran aspal yang dapat diaplikasikan pada suhu rendah, sehingga lebih efisien dan ramah lingkungan dibandingkan aspal konvensional. Meskipun demikian, campuran CPHMA masih memiliki kekurangan dalam hal stabilitas dan daya tahan terhadap kondisi lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan minyak kemiri dan zat aditif Natrium Hipoklorit (NaOCl) terhadap karakteristik campuran aspal CPHMA. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan membuat variasi campuran aspal CPHMA menggunakan minyak kemiri dan NaOCl. Karakteristik yang diuji meliputi nilai stabilitas Marshall, flow, Marshall Quotient (MQ), Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), dan Void Filled with Bitumen (VFB). Hasil pengujian dianalisis dan dibandingkan dengan spesifikasi teknis berdasarkan standar Bina Marga. Hasil penelitian menunjukkan penambahan minyak kemiri dapat meningkatkan fleksibilitas campuran, sedangkan NaOCl berfungsi meningkatkan ikatan antar partikel dalam campuran. Kombinasi kedua bahan aditif tersebut terbukti memberikan peningkatan pada seluruh pengujian. Uji Centrifuge, kuantitas aditif 1% menghasilkan volume ekstrak tertinggi sehingga proses pelarutan berlangsung paling efektif. Uji Liquid-Liquid Extraction, efisiensi ekstraksi tertinggi juga dicapai pada kuantitas aditif 1% dengan nilai 85,27%. Uji Marshall, kuantitas aditif 3% menghasilkan nilai stabilitas tertinggi sehingga menunjukkan kemampuan terbaik dalam menahan beban. Penelitian ini secara keseluruhan berhasil menentukan kadar optimum minyak kemiri dan NaOCl yang mampu menghasilkan campuran dengan karakteristik Marshall yang paling baik serta memenuhi persyaratan teknis yang berlaku.

Kata kunci: Aspal CPHMA, Minyak Kemiri, NaOCl, Stabilitas Marshall, Modifikasi Aspal

1. LATAR BELAKANG

Aspal merupakan bahan pengikat pada konstruksi perkerasan jalan yang berasal dari sisa penyulingan minyak bumi. Karena minyak bumi merupakan sumber daya alam tak terbarukan, cadangannya semakin menipis dan hal ini memengaruhi ketersediaan aspal. Kebutuhan aspal untuk pembangunan serta pemeliharaan jalan terus meningkat seiring bertambahnya jumlah

penduduk dan berkembangnya perekonomian. Jika ketersediaan aspal tidak mencukupi jumlah permintaan, maka pada tahun-tahun yang akan datang akan terjadi kelangkaan aspal (Durman, Hanna Patty and Khamelda, 2023).

Asbuton merupakan alternatif pengganti aspal minyak. Hingga saat ini, asbuton digunakan secara luas sebagai material untuk memperbaiki kualitas aspal, terutama dalam meningkatkan fungsi aspal sebagai perekat dan pelindung. Asbuton merupakan sumber daya lokal yang depositnya sangat berlimpah, tersebar di pulau Buton (Durman, Hanna Patty and Khamelda, 2023).

Deposit asbuton yang hingga tahun 2011 terdata sejumlah 662 juta ton (Puslitbang, 2018), jika kebutuhan aspal terhadap pengembangan jalan nasional sebesar 1,2 juta ton/tahun dengan ketersediaan, sedangkan rata-rata kadar aspal dalam asbuton sebesar 25% (Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga, 2006) maka kebutuhan jalan nasional dapat diakomodasi oleh asbuton untuk 135 tahun. Pemerintah kembali menginstruksikan penggunaan asbuton sebagai material dan teknologi pada pembangunan jalan nasional melalui Direktorat Bina Marga, sebagai respons terhadap potensi yang dimiliki asbuton (Permen PUPR No. 18/PRT/M/2018, 2018).

Salah satu teknologi asbuton adalah *Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA)*. Keunggulan CPHMA sebagai teknologi asbuton dapat diaplikasikan langsung di lapangan (*cold paving*) tanpa menggunakan *Asphalt Mixing Plant (AMP)*. CPHMA juga dapat diaplikasikan di lapangan dengan dihangatkan panas maupun hangat jika dipasarkan dalam bentuk kemasan, CPHMA juga dapat digunakan juga dalam pekerjaan preventif dan pemeliharaan jalan (sebagai komponen tambahan) (Sandi, 2013).

Pengaplikasian asbuton di lapangan, dibutuhkan material tambahan berupa pelarut untuk mengeluarkan aspal dari asbuton. Kebutuhan pelarut disebabkan oleh kurangnya mineral yang tidak homogen, dan mudah pecah akibat rendahnya penetrasi dan daktilitas dari asbuton, sehingga memerlukan pelarut untuk meningkatkan kinerja Asbuton sebagai pengikat (Sandi, 2013).

Potensi asbuton sebagai alternatif pengganti aspal minyak semakin diperhatikan oleh pemerintah. Hal ini diperkuat dengan dikeluarkannya beberapa peraturan pemerintah pusat yang mensyaratkan penggunaan asbuton sebagai bagian dari material jalan nasional. Tidak dipungkiri, kekurangan asbuton terhadap kebutuhan akan pelarut serta ketidakstabilan kandungan aspalnya menjadi bumerang bagi para praktisi konstruksi jalan yang menyebabkan hingga saat ini penggunaan asbuton masih belum maksimal. Penelitian sebagai bagian dari kemajuan teknologi, dapat berperan serta dalam upaya pemaksimalan penggunaan asbuton,

salah satunya adalah dengan mengupayakan solusi terhadap kendala yang dihadapi dalam teknologi asbuton. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan alternatif material pelarut asbuton yang berbasis minyak kemiri untuk diaplikasikan pada perkerasan *Cold Paving Hot Mix Asbuton* (CPHMA). Penemuan alternatif pelarut tersebut maka akan meningkatkan mutu asbuton sebagai material perkerasan jalan dan meningkatkan kepercayaan praktisi dan konsumen terhadap penggunaan asbuton (Durman, Hanna Patty and Khamelda, 2023).

Potensi minyak kemiri sebagai pelarut asbuton pada perkerasan CPHMA telah terbukti melalui uji mekanis yang menunjukkan daya tahannya terhadap beban. Analisis mekanisme reaksi selama tahap pelarutan dilakukan untuk memahami proses tersebut. Pemahaman mendalam mengenai mekanisme serta interaksi antara bitumen dan surfaktan menjadi kunci dalam menentukan hasil reaksi, mengingat struktur asfalten yang rumit dan bervariasi. Hal ini juga membuka peluang pemilihan aditif yang lebih tepat guna meningkatkan produksi serta ketahanan asfalten yang terbentuk (Khamelda, Djakfar and Wisnumurti, 2024).

Kinerja minyak kemiri sebagai *modifier* telah diuji dengan uji ekstraksi cairan (*Liquid Liquid Extraction* (LLE)) yang menunjukkan kemampuan ekstraksi sebesar 99,32 serta uji mekanik (uji Marshall) dengan nilai stabilitas Marshall sebesar 264,43 kilogram (Djakfar, Wisnumurti and Khamelda, 2022). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa hasil uji LLE dan uji Marshall linier terlebih lagi dengan adanya pembuktian secara kimia terhadap kinerja minyak kemiri sebagai modifier CPHMA pada penelitian Khamelda, Djakfar and Wisnumurti (2024).

Kondisi di atas dianalisis sebagai berikut, penggunaan asbuton LGA 50/30, dimana nilai penetrasi 50 dan Persentase kandungan aspal 30, maka berdasarkan uji LLE, jika digunakan 238,9 gram asbuton, idealnya akan didapatkan $99,32\% \times 30\% \times 238,9 \text{ gram} = 71,18 \text{ gram}$ aspal. Realisasi kuantitas aspal yang digunakan atau diekstrak pada CPHMA didapatkan secara empiris, berdasarkan referensi dari produsen CPHMA. Nilai Marshall dari produsen CPHMA mencapai 900 kilogram (Baisa, 2022), maka secara empiris kinerja mekanik CPHMA dengan modifier minyak kemiri hanya sebesar $100\% (264,43 / 900) = 29,38\%$. Persentase kinerja mekanik ini diasumsikan linier dengan realisasi kuantitas aspal yang digunakan atau diekstrak pada CPHMA yaitu sebesar $29,38\% \times 71,18 \text{ gram} = 20,91 \text{ gram}$. Hal ini menunjukkan bahwa dalam kinerja minyak kemiri belum maksimal, diasumsikan dibutuhkan tambahan material sebagai aditif untuk minyak kemiri.

Zat aditif yang ditambahkan berupa senyawa Klorin (Cl₂) yaitu NaOCl yang diperoleh dari reaksi NaOH dengan excess Cl₂ pada reaksi pembentukan monomer vinil klorida (Ratnawati, Yoshi and Wibawa, 2018). NaOCl mampu meningkatkan performa aspal karet

telah dibuktikan oleh Zhang et al. (2023) yang meneliti aktivasi serbuk karet menggunakan Natrium Hipoklorit (NaOCl). Perlakuan ini mengubah struktur permukaan karet sehingga lebih reaktif dan mudah berikatan dengan aspal, menghasilkan campuran yang lebih stabil dan memiliki sifat reologi lebih baik, khususnya dalam ketahanan terhadap deformasi permanen dan retak lelah. Dampak penuaan pada aspal karet teraktivasi lebih ringan dibanding campuran biasa, karena adanya ikatan kimia tambahan yang memperlambat proses oksidasi. Penelitian ini menunjukkan teknologi aktivasi NaOCl berpotensi memperpanjang umur layanan perkerasan jalan.

2. KAJIAN TEORITIS

Asbuton merupakan aspal alam yang terdapat di pulau Buton, Sulawesi Tenggara. Asbuton atau Aspal batu Buton ini pada umumnya berbentuk padat yang terbentuk secara alami akibat proses geologi. Proses terbentuknya asbuton berasal dari minyak bumi yang terdorong muncul ke permukaan menyusup di antara batuan yang porous Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga (2006). Deposit asbuton yang hingga 2010 terdata sejumlah 650 juta ton, dengan kadar aspal bervariasi antara 10-35%, atau setara dengan 170 juta ton aspal minyak, dimana jumlah ini setara dengan kebutuhan aspal untuk ± 170 tahun mendatang (Puslitbang, 2018). Produk teknologi asbuton diklasifikasikan berdasarkan bentuk material asbuton, salah satunya adalah asbuton butir. Asbuton butir merupakan hasil pengolahan dari Asbuton berbentuk padat yang dipecah dengan alat pemecah batu (*crusher*) atau alat pemecah lainnya yang sesuai sehingga memiliki ukuran butir tertentu Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga (2006).

CPHMA atau campuran beraspal panas asbuton hampar dingin adalah produk campuran beraspal yang menggunakan Asbuton sebagai bahan pengikatnya dan dikemas dalam kantong serta siap dihamparkan, baik untuk lapis overlay, lapis perata, lapis perkerasan pada bahu jalan, atau sebagai bahan tambahan (*patching*) (Hermadi & Yohanes, 2022).

Minyak kemiri merupakan material yang digunakan sebagai pelarut asbuton. Bahan pelarut ini dibedakan dari titik didih dan indeks kelarutannya, makin tinggi indeks kelarutannya, diprediksi akan semakin tinggi daya larutnya, semakin rendah titik didihnya, diprediksi semakin rendah temperatur yang dibutuhkan untuk proses pemulihan (Kurniadji, 2014). Aspal yang merupakan ikatan senyawa hidrokarbon non polar, membutuhkan pelarut dengan sifat yang sama yaitu non polar yang dikenal dengan istilah "*like dissolves like*", adapun minyak nabati merupakan senyawa *non polar* (Sastrohamidjojo, 2018) maka semestinya mampu menjadi pelarut untuk asbuton.

NaOCl banyak digunakan sebagai komponen utama pembersih dan memiliki efek pemutihan dan sterilisasi yang sangat baik di lingkungan rumah tangga dan medis. NaOCl juga digunakan untuk desinfektan selain sebagai pemutih, karena dapat melepaskan klorin sehingga dapat menjadi bahan antimikroba yang mampu membunuh mikroorganisme (Fukuzaki, 2006).

Kadar aspal optimum campuran aspal dalam penelitian ini, dievaluasi dengan menggunakan alat *centrifuge extractor*, yaitu alat yang berfungsi mengekstraksi campuran aspal, sehingga agregat aspal, dan filler menjadi terpisah-pisah (Amelia & Farizal, 2022). Pengujian ini mengacu pada SNI 03-6894-2002 (2002).

Uji *Liquid-Liquid Extraction* (LLE) pada aspal adalah metode laboratorium yang digunakan untuk memisahkan dan menganalisis komponen kimia dalam aspal, seperti *saturates, aromatics, resins, dan asphaltnes* (SARA). Metode ini melibatkan penggunaan dua pelarut cair yang tidak saling bercampur untuk mengekstraksi fraksi-fraksi tersebut dari sampel aspal (Sun, 2022). Pengujian ini mengacu pada penelitian Bendebane, Bouziane and Ismail (2013).

Marshall Test atau pengujian Marshall merupakan metode yang bertujuan untuk mendapatkan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) dengan menggunakan *Marshall Test Machine*. Kadar Aspal Optimum adalah persen aspal yang memenuhi kriteria campuran untuk prosedur perancangan stabilitas Marshall. Alat Marshall merupakan alat tekan yang dilengkapi dengan cincin penguji (*proving ring*) berkapasitas 22,2 KN (=5000 lbf) dan *flowmeter* (Sukirman, 2016). Pengujian ini mengacu pada SNI-M-01-2003 (2003).

Kinerja aspal padat ditentukan melalui pengujian benda uji yang meliputi:

- A. Stabilitas Marshall
- B. Kelelehan (*flow*)
- C. Volume Rongga (*Void in Mixture* (VIM), *Void in Mineral Agregate* (VMA), *Void Filled with Bitumen* (VFB)).
- D. *Marshall Quotient* (MQ)

3. METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini adalah penelitian eksperimen kuantitatif di laboratorium yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan zat aditif Natrium Hipoklorit (NaOCl) terhadap karakteristik campuran *Cold Paving Hot Mix Asbuton* (CPHMA) dengan penambahan minyak kemiri sebagai *modifier*.

3.2 Pengumpulan Data

Penelitian ini untuk mengetahui pengaruh penambahan minyak kemiri dan zat aditif terhadap karakteristik campuran CPHMA berbasis asbuton. Peneliti menggunakan beberapa alat dan bahan dalam pelaksanaan penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Saringan

Saringan ini berfungsi untuk menyaring agregat yang lolos nomor $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", 4, 8, 50, dan 200.

2. Timbangan Digital

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

3. Alat Uji *Centrifuge*

Pengujian dilakukan dengan melarutkan 300 gram asbuton menggunakan 500 ml minyak kemiri aditif NaOCl dan dikontrol setiap 20 menit melalui penambahan masing-masing 200, 200, dan 100 ml dalam situasi dimana cairan tidak terekstraksi setelah penambahan minyak kemiri. Proses dihentikan setelah semua variasi minyak kemiri telah dimasukkan ke dalam *centrifuge* dan tidak ada cairan yang terlihat terekstraksi melalui selang. Penting untuk dicatat bahwa pengujian dilakukan 6-10 kali untuk setiap campuran.

4. Alat Uji *Liquid-Liquid Extraction* (LLE)

Uji *Liquid-Liquid Extraction* (LLE) digunakan untuk menenukan presentase efisien ekstraksi. Proses ini melibatkan penggunaan pelarut *Dimethyl Sulfoxide* (DMSO) dan Metanol dengan perbandingan 1:1, yang dicampur dengan cairan *centrifuge* selama 24 jam. Hasilnya adalah larutan terpisah yang terdiri campuran naftalen dan pelarut, serta residu minyak kemiri. Efisiensi ekstraksi kemudian dihitung berdasarkan data yang diperoleh dari proses ini.

5. Oven

Oven digunakan untuk memanaskan campuran CPHMA dengan temperatur 170°C.

6. Manual Marshall Compactor

Alat Manual *Marshall Compactor* digunakan untuk memadatkan campuran aspal panas (*Hot Mix Asphalt*) secara manual, dengan tujuan menghasilkan benda uji yang sesuai standar metode *Marshall test*.

7. Timbangan SSD

Pengukuran dilakukan untuk mengetahui berat briket dalam air dan berat *Saturated Surface Dry* (SSD).

8. *Water Bath*

Water Bath digunakan untuk memanaskan briket campuran aspal CPHMA yang sudah dipadatkan secara terkendali pada suhu 60°C dengan cara merendamnya pada air yang telah dipanaskan sebelumnya.

9. Alat Uji Marshall

Marshall Test atau pengujian Marshall bertujuan untuk mendapatkan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO). Kadar Aspal Optimum adalah persen aspal yang memenuhi kriteria campuran untuk prosedur perancangan stabilitas Marshall.

10. Alat Ukur *Venier Caliper*

Alat ukur *Vernier Caliper* digunakan untuk mengukur ketebalan dari briket aspal CPHMA yang telah dipadatkan.

11. Thermometer

Thermometer digunakan untuk mendeteksi dan mengukur suhu aspal CPHMA yang telah dipanaskan.

12. Asbuton

Dalam penelitian ini, asbuton merupakan material yang akan diekstrak untuk memisahkan bitumen dari mineral asbuton.

13. Agregat

Agregat yang digunakan adalah agregat yang lolos saringan nomor $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", 4, 8, 50, 200, dan Pan.

14. Minyak Kemiri

Minyak Kermiri berfungsi sebagai bahan pelarut asbuton untuk menghasilkan bitumen.

15. NaOCl

Zat aditif yang ditambahkan adalah NaOCl dengan variasi 1%, 3%, dan 5%.

16. *Dimethyl Sulfoxide*

Dimethyl Sulfoxide (DMSO) efektif melarutkan komponen polar dalam aspal, terutama resin dan *asphaltene*.

17. Metanol

Metanol membantu memisahkan fraksi resin dan asphaltene secara lebih efisien, karena kemampuan larutnya pada senyawa polar lebih tinggi dibanding pelarut nonpolar.

3.5 Pengolahan Data

Pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang mencakup uji *Centrifuge*, uji *Liquid Liquid Extraction*, dan uji Marshall.

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 + ekstraktan (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 Marshall

Nilai Stabilitas diperoleh dari beban maksimum yang dapat ditahan oleh briket selama pengujian Marshall. Nilai ini terbaca melalui jarum arloji pada alat uji Marshall, kemudian dikonversi dengan mengalihkan hasil bacaan tersebut dengan faktor kalibrasi proving ring. Hasil perhitungan ini menghasilkan nilai stabilitas yang akurat, yang

menunjukkan kemampuan campuran aspal dalam menahan beban sebelum mengalami keruntuhan.

$$S = q \times k \times 0,454 \times C \quad (7)$$

Keterangan:

S = Stabilitas terkoreksi (kg)

q = Pembacaan dial stabilitas (lb)

k = Faktor kalibrasi alat

C = Angka koreksi ketebalan benda uji

0,454 = konversi lb ke kg

b. Kelelehan (*flow*)

Nilai *flow* diperoleh dari besarnya deformasi plastis pada briket selama pengujian Marshall. Nilai ini dibaca langsung melalui jarum arloji yang terhubung pada *dial gauge*, sejak awal pembebanan hingga mencapai beban maksimum. Pergerakan jarum menunjukkan pertambahan deformasi, dan pada saat jarum stabilitas berbalik arah, nilai *flow* yang terukur dicatat sebagai besarnya kelelehan sampel.

c. *Marshall Quotient* (MQ)

Nilai MQ diperoleh melalui perhitungan matematis sederhana yang melibatkan hasil dari dua parameter utama, yaitu stabilitas dan *flow*, yang telah diukur sebelumnya pada alat pengujian.

$$MQ = S/F \quad (8)$$

Keterangan:

MQ = *Marshall Quotient* (kg/mm)

S = Stabilitas terkoreksi (kg)

F = *Flow* (mm)

d. *Void Filled Bitumen* (VFB)

Nilai VFB didapatkan melalui proses perhitungan sederhana yang bergantung pada nilai *Voids in Mineral Aggregate* (VMA, rongga antar butir agregat dalam presentase) dan *Voids in Mixture* (VIM, rongga udara dalam campuran atau *air voids* dalam persentase), yang telah dihitung terlebih dahulu dari pengukuran volume dan berat spesifik sampel.

$$VFB = 100\% - \frac{(b \cdot g) / v}{(t \cdot g) / u} \quad (9)$$

Keterangan:

M = % Rongga terisi Aspal

b = % Aspal terhadap Campuran

g = Berat Isi Benda Uji

t = % Agregat terhadap Campuran

v = BJ Aspal (gr/cm^3)

u = BJ Agregat (gr/cm^3)

e. *Void in Mineral Aggregate (VMA)*

Nilai VMA diperoleh melalui proses perhitungan yang melibatkan pengukuran berat spesifik dan komposisi campuran.

$$\text{VMA} = 100\% - \frac{t \cdot g}{u} \quad (10)$$

Keterangan:

I = % Rongga terhadap Agregat

t = % Agregat terhadap Campuran

g = Berat Isi Benda Uji

u = BJ Agregat (gr/cm^3)

f. *Void in Mixture (VIM)*

Nilai VIM merupakan parameter penting dalam uji Marshall yang mengukur persentase volume rongga kosong di antara agregat dan aspal dalam campuran beraspal, yang memengaruhi daya tahan terhadap kelelahan permeabilitas perkerasan jalan.

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

Keterangan:

n = % Rongga terhadap Campuran

g = Berat isi benda uji

h = BJ Maksimum

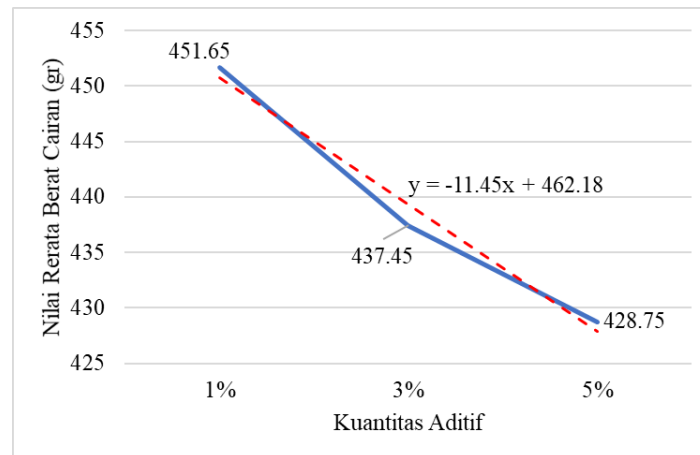
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Uji *Centrifuge*

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

Tabel 1. Hasil Perhitungan Uji *Centrifuge*

Aditif	Kode	Berat (gr)				Persentase		Durasi (mnt)
		Cairan		Padatan	Total	Cairan	Padatan	
		Per Sampel	Rerata					
1%	1%#1	463,4	451,65	351,2	814,6	0,569	0,431	60
	1%#2	439,9		328,3	768,2	0,573	0,427	80
3%	3%#1	457,5	437,45	316,5	774	0,591	0,409	220
	3%#2	417,4		321,7	739,1	0,565	0,435	180
5%	5%#1	428,3	428,75	333,6	761,9	0,562	0,438	60
	5%#2	429,2		315,1	744,3	0,577	0,423	80



Gambar 1. Grafik Nilai Uji *Centrifuge* Variasi 1%, 3%, 5%

Rerata berat cairan berbanding terbalik dengan persentase NaOCl. Hal ini menunjukkan dari data bahwa pada variasi 3% dan 5%, rerata berat cairan menurun menjadi 437,45 gr dan 428,75 gr, sedangkan pada variasi 1%, rerata berat cairan lebih tinggi sebesar 451,65 gr. Konsentrasi sodium hipoklorit (NaOCl) telah menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap struktur jaringan cairan dan kapasitas retensinya, di mana terdapat hubungan non-linear antara konsentrasi tersebut dan efektivitas retensi cairan. Pada konsentrasi NaOCl tertentu, terjadi perubahan aktivitas osmotik yang dapat mempengaruhi struktur jaringan dan hasilnya, mengakibatkan penurunan titik retensi cairan (Ertuğrul et al., 2014).

4.2 Uji Liquid Liquid Extraction (LLE)

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

Kode sampel NaOCl 1% #2

$P = 1 \text{ atm} \rightarrow$ (Ditetapkan)

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

$T = 298 \text{ K} \rightarrow$ (Ditetapkan)

$V_{\text{initial}} = 0,067 \text{ liter} \rightarrow$ (Ditimbang)

$V_{\text{residu}} = 0,0002 \text{ liter} \rightarrow$ (Ditimbang)

$V_o = 0,022 \text{ liter} \rightarrow$ (Berat DMSO + Berat Metanol)

$V_{\text{aq}} = 0,079 \text{ liter} \rightarrow$ (Berat Larutan + V_o)

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

$$n_{\text{residu}} = \frac{PV_{\text{residu}}}{RT} = \frac{1 \text{ atm} \cdot 0,0002 \text{ ltr}}{0,082 \cdot 298} = 0,00000818 \text{ mol}$$

$$n_{\text{eq}} = n_{\text{initial}} - n_{\text{residu}} = 0,003 \text{ mol} - 0,00000818 \text{ mol} = 0,003 \text{ mol}$$

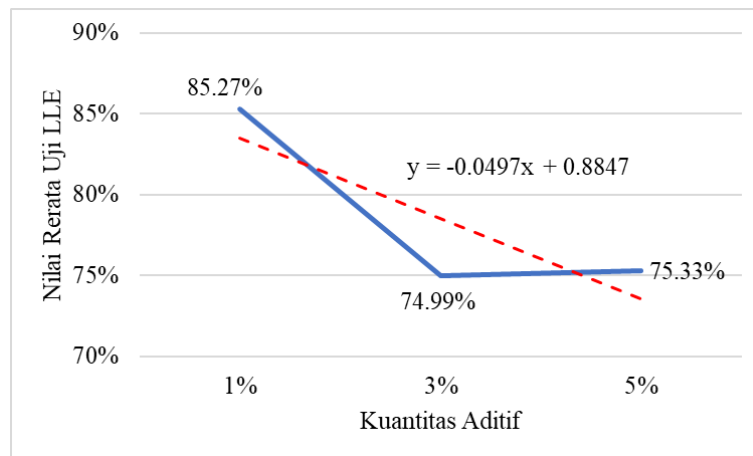
$$K_D = \frac{M_o}{M_{\text{aq}}} = \frac{(n_{\text{eq}} / V_o)}{(n_{\text{initial}} - n_{\text{eq}}) / V_{\text{aq}}} = \frac{(0,003 / 0,022)}{(0,003 - 0,003) / 0,079} = 1217,24$$

$$q = \frac{V_{aq}}{(K_D V_o) + V_{aq}} = \frac{0,079}{(1217,24 \cdot 0,022) + 0,079} = 0,002967$$

$$E = (1 - q) 100\% = (1 - 0,002967) 100\% = 99,70\%$$

Tabel 2. Hasil Perhitungan Uji LLE

Kode	V _{initial}	V _{residu}	n _{initial}	n _{residu}	n _{eq}	KD	q	E	
								Per Sampel	Rerata
1%#1	0,051	0,0149	0,002	0,00060976	0,001	8,8	0,291485	70,84%	85,27%
1%#2	0,067	0,0002	0,003	0,00000818	0,003	1217,24	0,002967	99,70%	
3%#1	0,053	0,0136	0,002	0,00055656	0,002	10,39	0,258555	74,14%	74,99%
3%#2	0,054	0,0131	0,002	0,00053609	0,002	11,37	0,241697	75,83%	
5%#1	0,054	0,0132	0,002	0,00054019	0,002	11,28	0,245353	75,46%	75,33%
5%#2	0,053	0,0132	0,002	0,00054019	0,002	10,98	0,24812	75,19%	

**Gambar 2.** Grafik Nilai Uji LLE Variasi 1%, 3%, 5%

Rerata nilai E berbanding terbalik dengan persentase NaOCL. Rerata nilai E menurun menjadi 74,99%, sedangkan pada variasi 1%, rerata nilai E lebih tinggi sebesar 85,27%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kuantitas aditif NaOCl dalam larutan dapat menurunkan efisiensi proses ekstraksi.

Penelitian Yang, S., Ma, D., & Cui, P., (2017) penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kuantitas aditif sering kali tidak linear dan dapat menyebabkan turunnya efisiensi ekstraksi (Yang, S., Ma, D., & Cui, P., 2017).

4.3 Uji Marshall

4.3.1 Stabilitas Marshall

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

Kode Sampel = NaOCl 1% (F)

Pembacaan Arloji Stabilitas (o) = 30 div (diukur)

Faktor Kalibrasi (w) = 0,44482 . 24,916 lbf/div = 11,17 lbf/div

Angka Korelasi (x) = 5,56 (untuk volume 495 – 507 cm³)

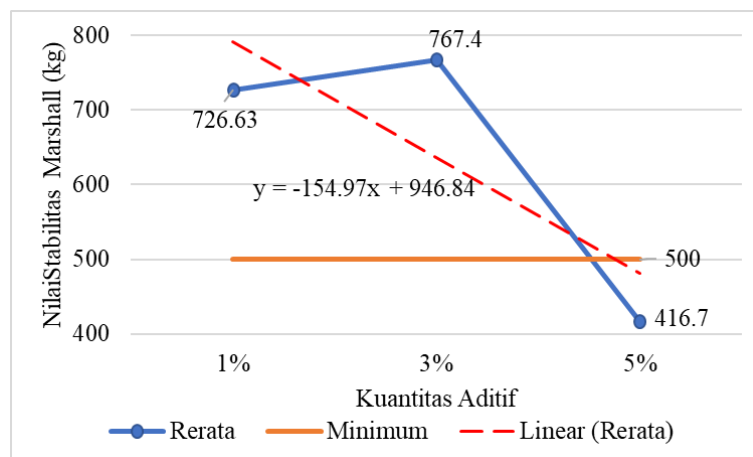
Konversi lbf ke kg (y) = 0,45 kg/lbf

Nilai Stabilitas (p) = o . w = 30 div . 11,17 lbf/div = 335,1 lbf

Nilai Stabilitas (q) = p . y . x = 335,1 lbf . 0,45 kg/lbf . 5,56 = 838,42

Tabel 3. 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%	D	23	5,56	256,91	642,79	726,63
	E	25	5,56	279,25	698,68	
	F	30	5,56	335,1	838,42	
3%	C	27	5,82	301,59	789,48	767,40
	E	22	6,44	245,74	711,92	
	F	26	6,13	290,42	800,80	
5%	C	18	4,55	201,06	411,67	416,70
	D	20	4,17	223,4	419,21	
	E	20	4,17	223,4	419,21	



Gambar 3. Grafik Nilai Stabilitas Marshall Variasi 1%, 3%, 5%

Rerata Nilai Stabilitas untuk variasi 1% dan 3% memenuhi standar CPHMA yaitu diatas Nilai Stabilitas Minimum (500 kg) dengan nilai tertinggi didapatkan dari variasi 3% sebesar 767,4 kg. Nilai Stabilitas semakin tinggi akan menghasilkan perkerasan yang lebih baik, karena menunjukkan beban yang dapat didukung oleh perkerasan semakin besar (Durman, 2021). Penelitian ini menunjukkan rerata nilai Stabilitas berbanding lurus hingga batas tertentu, namun kembali menurun pada variasi 5%.

Dalam konteks ini, rerata nilai stabilitas dari campuran aspal yang divariasikan dengan kuantitas aditif 1% dan 3% menghasilkan nilai yang memenuhi standar CPHMA dengan nilai tertinggi yang diperoleh adalah 767,4 kg pada variasi 3% (Ji et al., 2023). Hal ini didukung

oleh pemahaman bahwa nilai stabilitas yang lebih tinggi berhubungan dengan kinerja perkerasan yang lebih baik, menunjukkan bahwa aspal memiliki kapasitas yang lebih besar dalam mendukung beban (Ji et al., 2023). Namun, terdapat penurunan nilai stabilitas pada variasi 5%, yang menunjukkan bahwa ada batasan optimal dalam penambahan komponen tertentu pada campuran aspal. Hal ini sejalan dengan temuan bahwa pemakaian bahan tambah harus dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari efek negatif (Damayanto, 2020).

4.3.2 Flow

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

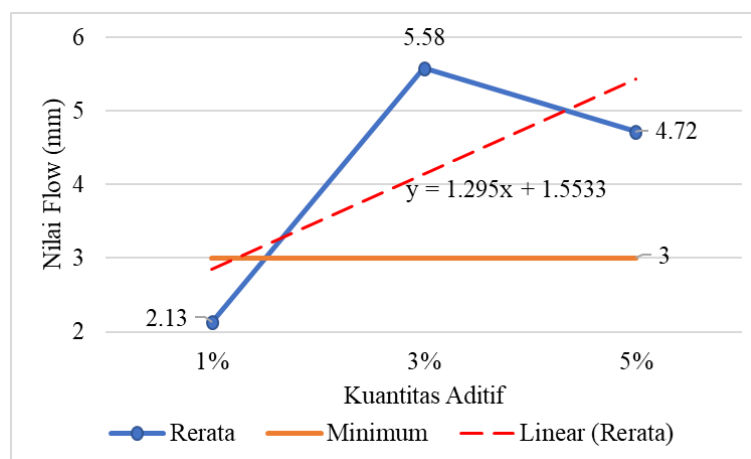
Kode Sampel = NaOCl 1% (F)

Pembacaan Arloji *Flow* (r) = 250 div (diukur)

Nilai *Flow* = $r \cdot 0,01 \text{ mm/div} = 250 \text{ div} \cdot 0,01 \text{ mm/div} = 2,5 \text{ mm}$

Tabel 4. Hasil Perhitungan *Flow*

No.	Kode	Pembacaan Arloji <i>Flow</i>	Nilai <i>Flow</i>	Rerata
		div		mm
		(r)		
1%	D	220	2,2	2,13
	E	170	1,7	
	F	250	2,5	
3%	C	464	4,64	5,58
	E	606	6,06	
	F	605	6,05	
5%	C	410	4,1	4,72
	D	500	5	
	E	505	5,05	



Gambar 4. Grafik Nilai *Flow* Variasi 1%, 3%, 5%

Rerata nilai *flow* untuk variasi 3% dan 5% memenuhi standar CPHMA yaitu diatas nilai minimum (3 mm) dan di bawah nilai maksimum (5 mm) dengan nilai tertinggi didapatkan dari variasi 3% sebesar 5,58 mm. Peningkatan stabilitas Marshall umumnya diiringi dengan penurunan nilai *flow* (Al-Araji et al., 2025). Campuran dengan stabilitas tinggi umumnya

menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi akibat beban dan kondisi lingkungan (Nawir & Mansur, 2021). Penelitian ini menunjukkan rerata nilai flow berbanding lurus hingga batas 3%, namun kembali menurun pada variasi 5%.

Penambahan aditif dalam jumlah yang lebih tinggi cenderung mengurangi viskositas campuran, yang memungkinkan flow meningkat. Penelitian Cheng et al., (2018) menunjukkan bahwa modifikasi aspal menggunakan bahan tambahan seperti basalt fiber dan diatomite mampu meningkatkan karakteristik plastisitas campuran. Penelitian Zhang, D. et al. (2017) menunjukkan aditif yang tepat dapat mengurangi viskositas aspal dan meningkatkan elastisitas, yang berkontribusi pada peningkatan kemampuan material untuk menerima deformasi tanpa menyebabkan retakan.

4.3.3 Void in Mineral Agregate (VMA)

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

Kode Sampel = NaOCl 1% (F)

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

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

Berat Kering Briket (c) = 1097,8 gr (ditimbang)

Berat SSD Briket (d) = 1137,7 gr (ditimbang)

Berat dalam Air Briket (e) = 933,8 gr (ditimbang)

Berat Isi Briket (f) = d - e = 1137,7 gr - 933,8 gr = 203,9 gr

Berat Isi Benda Uji Briket (g) = c / f = 1097,8 gr / 203,9 gr = 5,38 gr

Berat Campuran = 1000 gr (ditimbang)

Berat Aspal = b . Berat Campuran = 6% . 1000 gr = 60 gr

Berat Pelarut = 47,8 gr (ditimbang)

Berat Agregat = Berat Campuran - Berat Aspal - Berat Pelarut
= 1000 gr - 60 gr - 47,8 gr = 892,2 gr

BJ Air = 1 gr/cm³ (ketetapan)

Volume Campuran = (c - e) / BJ Air = 1097,8 gr - 933,8 gr / 1 gr/cm³ = 164 cm³

BJ Aspal (v) = 1,037 gr/cm³ (ketetapan)

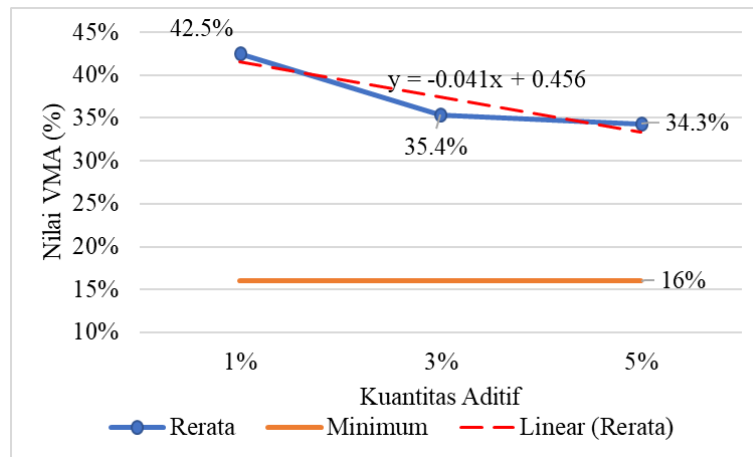
Volume Aspal = (b . c) / v = (6% . 1097,8 gr) / 1,037 gr/cm³ = 63,52 cm³

Volume Agregat = Volume Campuran - Volume Aspal = 164 cm³ - 63,51 cm³ = 100,48 cm³

BJ Agregat (u) = Berat Agregat / Volume Agregat = 892,2 gr / 100,48 cm³ = 8,9 gr/cm³

J = (t . g) / u = (0,94 . 5,39 gr) / 6,99 gr/cm³ = 0,57

VMA = 100% - j = 100% - 0,57 = 0,43 = 43%



Gambar 5. Grafik Nilai VMA Variasi 1%, 3%, 5%

Tabel 5. Hasil Perhitungan VMA

No.	Kode	% Aspal terhadap Campuran	% Agregat terhadap Campuran	Berat Kering Briket	Berat SSD dalam Air Briket	Berat dalam Air Briket	Berat Isi Briket	Berat Isi Benda Uji Briket	Berat Campuran	Berat Aspal	Berat Pelarut	Berat Agregat	BJ Air	Volume Campuran	BJ Aspal	Volume Aspal	Berat Pelarut	Volume Agregat	BJ Agregat	VMA	Rerata
		(b)	(t)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	gr	gr	gr	gr	gr/cm ³	cm ³	gr/cm ³	cm ³		cm ³	gr/cm ³	(j)	%
1%	D	6,00%	94,00%	1016,5	1048,9	846,8	202,1	5,03	1000	60	47,8	892,2	1	169,7	1,037	58,81	47,8	110,89	8,0	0,59	41,2%
	E	6,00%	94,00%	997,6	1032,0	831,8	200,2	4,98	1000	60	47,8	892,2	1	165,8	1,037	57,72	47,8	108,08	8,3	0,57	43,3%
	F	6,00%	94,00%	1097,8	1137,7	933,8	203,9	5,38	1000	60	47,8	892,2	1	164	1,037	63,52	47,8	100,48	8,9	0,57	43,0%
3%	C	6,00%	94,00%	1000,7	1025,0	831,8	193,2	5,18	1000	60	47,8	892,2	1	168,9	1,037	57,90	47,8	111,00	8,0	0,61	39,4%
	E	6,00%	94,00%	995,2	1001,2	823,8	177,4	5,61	1000	60	47,8	892,2	1	171,4	1,037	57,58	47,8	113,82	7,8	0,67	32,7%
	F	6,00%	94,00%	1008,3	1020,1	834,8	185,3	5,44	1000	60	47,8	892,2	1	173,5	1,037	58,34	47,8	115,16	7,7	0,66	34,0%
5%	C	6,00%	94,00%	1007,9	1036,9	804,8	232,1	4,34	1000	60	47,8	892,2	1	203,1	1,037	58,32	47,8	144,78	6,2	0,66	33,8%
	D	6,00%	94,00%	1010,0	1049,2	804,8	244,4	4,13	1000	60	47,8	892,2	1	205,2	1,037	58,44	47,8	146,76	6,1	0,64	36,1%
	E	6,00%	94,00%	1024,5	1057,9	813,8	244,1	4,20	1000	60	47,8	892,2	1	210,7	1,037	59,28	47,8	151,42	5,9	0,67	33,0%

Rerata nilai VMA untuk ketiga variasi memenuhi standar CPHMA yaitu diatas nilai VMA minimum (16%) dengan nilai tertinggi didapatkan dari variasi 1% sebesar 42,5%. Nilai VMA yang semakin tinggi maka akan menghasilkan perkerasan yang lebih baik, karena rongga yang tersedia untuk diisi oleh aspal akan semakin besar (Durman, 2021). Penelitian ini menunjukkan rerata nilai VMA berbanding terbalik terhadap kuantitas aditif.

VMA mempengaruhi ketahanan campuran aspal, ketika volume aspal meningkat, ruang kosong yang ada mulai terisi, sehingga menurunkan nilai VMA (Chen & Wang, 2010). Temuan ini didukung oleh Gao, Y. and Cao, R. (2012) yang mencatat bahwa peningkatan konten aspal dalam campuran cenderung mengisi VMA. Penelitian Zhu et al. (2014) menunjukkan bahwa kinerja aspal optimal akan terlihat dalam peningkatan kapasitas flow dan stabilitas. Ini menunjukkan bahwa ada hubungan antara kadar aditif dan daya dukung campuran sebagai parameter penting dalam desain aspal.

4.3.4 Void Filled with Bitumen (VFB)

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

Kode Sampel = NaOC1 1% (F)

b = 6% (dari perhitungan VMA)

g = 5,38 gr (dari perhitungan VMA)

$v = 1,037 \text{ gr/cm}^3$ (dari perhitungan VMA)

$i = (b \cdot g) / v$

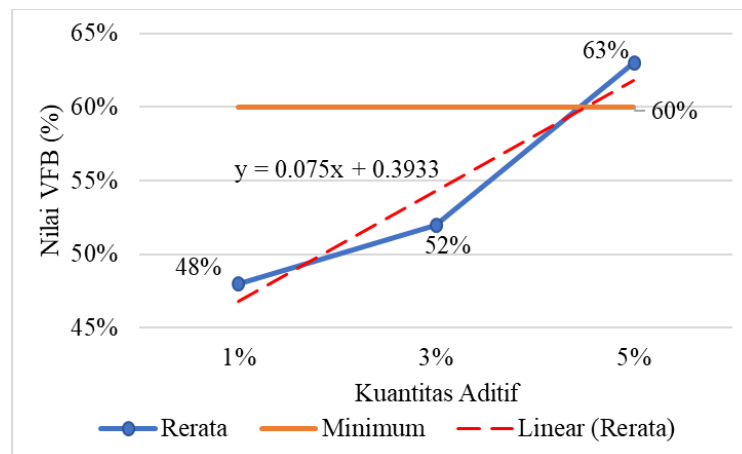
$= (6\% \cdot 5,38) / 1,037 = 0,31$

$J = 0,57$ (dari perhitungan VMA)

$VFB = 100\% - (i / j) = 100\% - (0,31 / 0,57) = 0,45 = 45\%$

Tabel 6. Hasil Perhitungan *Void Filled with Bitumen (VFB)*

No.	Kode	% Aspal terhadap Campuran	Berat Isi Benda Uji Briket	BJ Aspal			VFB	Rerata
Satuan		%	gr	gr/cm ³			%	%
Notasi		(b)	(g)	(v)	(i)	(j)		
1%	D	6%	5,03	1,037	0,29	0,59	50%	48%
	E	6%	4,98	1,037	0,29	0,57	49%	
	F	6%	5,38	1,037	0,31	0,57	45%	
3%	C	6%	5,18	1,037	0,30	0,61	51%	52%
	E	6%	5,61	1,037	0,32	0,67	52%	
	F	6%	5,44	1,037	0,31	0,66	52%	
5%	C	6%	4,34	1,037	0,25	0,66	62%	63%
	D	6%	4,13	1,037	0,24	0,64	63%	
	E	6%	4,20	1,037	0,24	0,67	64%	



Gambar 6. Grafik Nilai VFB Variasi 1%, 3%, 5%

Rerata nilai VFB untuk variasi 5% memenuhi standar CPHMA yaitu diatas nilai VFB minimum (60%) dengan nilai tertinggi didapatkan dari variasi 5% sebesar 63%. Nilai VFB semakin tinggi maka semakin baik perkerasan, karena menandakan semakin banyak kadar aspal yang mengikat agregat tetapi dalam batas kadar aspal yang dibutuhkan oleh perkerasan, jika KAO telah ditentukan (Durman, 2021). Penelitian ini menunjukkan rerata nilai VFB berbanding lurus terhadap kuantitas aditif.

Dari penelitian oleh Khamelda, Djakfar and Wisnumurti, (2023) terungkap bahwa peningkatan kadar binder dalam campuran aspal akan meningkatkan nilai VFB. Khamelda, Djakfar and Wisnumurti, (2023) juga mencatat bahwa penambahan aditif seperti minyak dari

biji kacang dapat meningkatkan kinerja campuran, namun aditif tertentu harus disesuaikan agar tidak mengurangi nilai VFB (Khamelda, Djakfar and Wisnumurti, 2023).

4.3.5 Void in Mix (VIM)

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

Kode Sampel = NaOCl 1% (F)

$g = 5,38 \text{ gr}$ (dari perhitungan VMA)

$t = 0,94$ (dari perhitungan VMA)

$u = 8,9 \text{ gr/cm}^3$ (dari perhitungan VMA)

$b = 6\%$ (dari perhitungan VMA)

$v = 1,037 \text{ gr/cm}^3$ (dari perhitungan VMA)

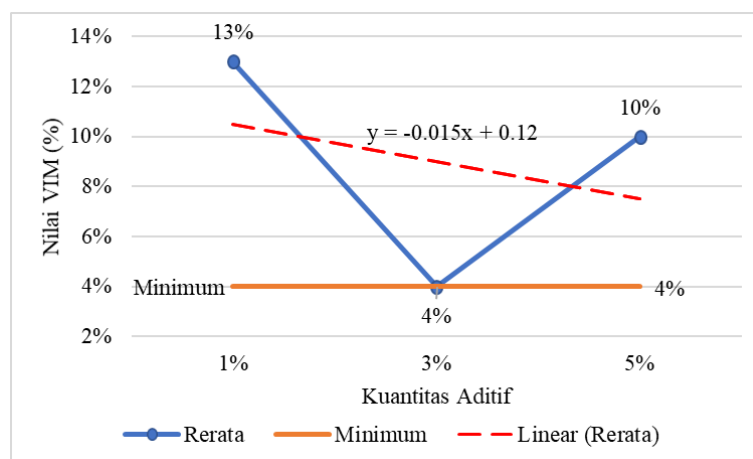
BJ Maksimum (h) = $100 / \{[(t / u) 100] + [(b / v) 100]\}$

$$= 100 / \{[(0,94 / 8,9 \text{ gr/cm}^3) 100] + [(6\% / 1,037 \text{ gr/cm}^3) 100]\} = 6,11 \text{ gr/cm}^3$$

VIM = $100\% - (100\% (g / h)) = 100\% - (100\% (5,38 / 6,11)) = 0,12 = 12\%$.

Tabel 7. Hasil Perhitungan VIM

Variasi	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%	D	5,03	0,94	8,0	6%	1,037	5,72	12%	13%
	E	4,98	0,94	8,3	6%	1,037	5,82	14%	
	F	5,38	0,94	8,9	6%	1,037	6,11	12%	
3%	C	5,18	0,94	8,0	6%	1,037	5,72	9%	4%
	E	5,61	0,94	7,8	6%	1,037	5,63	0%	
	F	5,44	0,94	7,7	6%	1,037	5,58	2%	
5%	C	4,34	0,94	6,2	6%	1,037	4,75	9%	10%
	D	4,13	0,94	6,1	6%	1,037	4,71	12%	
	E	4,20	0,94	5,9	6%	1,037	4,60	9%	



Gambar 7. Grafik Nilai VIM Variasi 1%, 3%, 5%

Rerata nilai VIM untuk ketiga variasi suhu memenuhi standar CPHMA yaitu dalam batas 4 – 10 % dengan nilai tertinggi didapatkan dari variasi 1% sebesar 13%. Nilai VIM diatas batas standar akan menyebabkan perkerasan mudah keropos karena rongga yang terisi udara relatif besar. Nilai VIM dibawah standar akan menyebabkan perkerasan tidak leluasa bersifat elastis sehingga akan mempercepat timbulnya patahan (retakan) (Durman, 2021). Penelitian ini menunjukkan rerata nilai Stabilitas berbanding terbalik hingga batas 4%, namun kembali meningkat pada kuantitas aditif 5%.

Penelitian Mieczkowski, Budziński and Jurczak, (2020) mengindikasikan bahwa kompaksi yang efektif sangat berpengaruh pada struktur internal dari campuran aspal, dimana upaya kompaksi yang baik dapat menurunkan kadar rongga Hal ini mungkin disebabkan oleh peningkatan ikatan antara partikel agregat, yang memberikan kontribusi pada peningkatan daya pengikatan dan mengurangi segregasi.

4.3.6 Marshall Quotient (MQ)

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

Kode Sampel = NaOCl 1% (F)

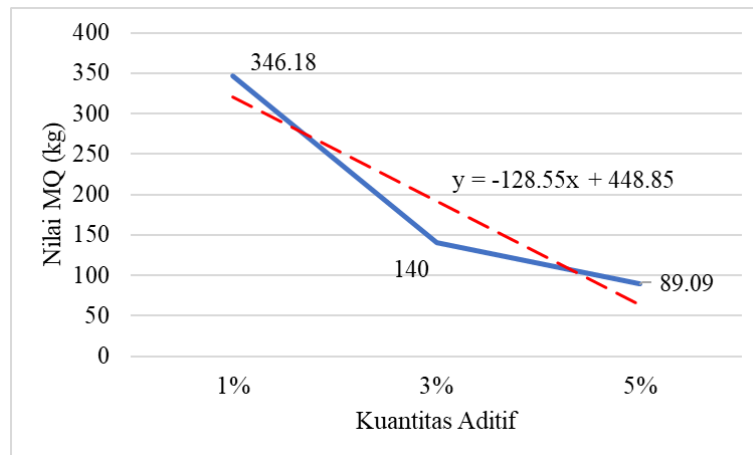
Nilai Stabilitas (q) = 838,42 kg (dari perhitungan stabilitas marshall)

Nilai *Flow* = 2,5 mm (dari perhitungan *flow*)

MQ = q / nilai *flow*
= 838,42 kg / 2,5 mm = 335,37 kg/mm

Tabel 8. Perhitungan *Marshall Quotient* (MQ)

No.	Kode	Nilai Stabilitas	Nilai <i>Flow</i>	MQ	Rerata
		kg	mm	kg/mm	Kg/mm
		(q)			
1%	D	642,79	2,2	292,18	346,18
	E	698,68	1,7	410,99	
	F	838,42	2,5	335,37	
3%	C	789,48	4,64	170,15	140,00
	E	711,92	6,06	117,48	
	F	800,80	6,05	132,36	
5%	C	411,67	4,1	100,41	89,09
	D	419,21	5	83,84	
	E	419,21	5,05	83,01	



Gambar 8. Grafik Nilai Marshall Quotient (MQ) Variasi 1%, 3%, 5%

Rerata nilai MQ tertinggi didapatkan dari variasi 1% sebesar 346,18 kg/mm. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan aditif 1% memberikan kekuatan tertinggi dalam penerimaan beban, dibutuhkan beban yang relatif lebih besar untuk menyebabkan deformasi pada perkerasan per mm-nya. Penelitian ini menunjukkan rerata nilai MQ berbanding terbalik terhadap kuantitas aditif.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari hasil penelitian yang merujuk pada rumusan masalah sebagai berikut:

1. Uji *Centrifuge* menunjukkan penambahan aditif NaOCl berpengaruh terhadap proses ekstraksi bitumen dari asbuton. Kuantitas aditif 1% menghasilkan ekstraksi cairan tertinggi, hal ini mengindikasikan penggunaan NaOCl secara berlebihan dapat mengganggu mekanisme kelarutan minyak kemiri terhadap bitumen.
2. Uji LLE menunjukkan variasi NaOCl 1% memberikan nilai Efisiensi tertinggi, meskipun variasinya cukup besar antar sampel. Nilai Efisiensi rerata 1% lebih tinggi dibanding variasi 3% dan 5%, namun kadar 3% dan 5% memiliki nilai Efisiensi yang relatif homogen. Hal ini memperlihatkan bahwa penambahan aditif yang berlebihan belum tentu meningkatkan efektivitas proses ekstraksi.
3. Uji Marshall menunjukkan penambahan NaOCl mampu meningkatkan karakteristik mekanik campuran CPHMA hingga kadar tertentu. Variasi NaOCl 3% menghasilkan nilai stabilitas Marshall tertinggi, sehingga memberikan kinerja paling optimal dalam menahan beban. Variasi NaOCl 1% juga memberikan stabilitas yang baik, dan lebih tinggi dibanding kadar 5%. Variasi 5% menunjukkan penurunan stabilitas signifikan, sehingga tidak direkomendasikan. Parameter Marshall lainnya (*Flow*, *VMA*, *VIM*, *VFB*, dan *MQ*)

cenderung mengikuti pola bahwa kadar aditif yang terlalu tinggi menurunkan kekakuan dan kestabilan campuran. Karakteristik campuran terlihat paling seimbang pada kadar 3%.

Penelitian ini menunjukkan secara umum kombinasi minyak kemiri dan NaOCl mempengaruhi karakteristik campuran CPHMA, namun efektivitasnya sangat bergantung pada kadar aditif. Kadar NaOCl optimum berada pada kisaran 1%, 3%, dan 5% menjadi komposisi terbaik untuk meningkatkan stabilitas tanpa mengurangi performa volumetrik.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran dari hasil penelitian ini diantara lain adalah:

1. Konsentrasi NaOCl 1% direkomendasikan sebagai kadar optimum untuk digunakan sebagai aditif pada campuran CPHMA yang menggunakan minyak kemiri sebagai modifier, karena memberikan hasil terbaik pada seluruh pengujian.
2. Penelitian lanjutan terkait variasi pelarut atau aditif lain yang dapat meningkatkan kemampuan minyak kemiri dalam melarutkan bitumen perlu dilakukan, misalnya penambahan surfaktan, polimer, atau bahan kimia pengaktif lainnya.
3. Pengaruh suhu dan lama pemanasan terhadap stabilitas dan homogenitas campuran CPHMA disarankan untuk diteliti agar kualitas ekstraksi bitumen semakin optimal.
4. Uji lanjutan seperti uji durabilitas, uji rendaman (ITS/Retained Stability), wheel tracking, atau uji penuaan jangka panjang perlu dilakukan untuk mengetahui kinerja campuran dalam kondisi lapangan sesungguhnya.
5. Penelitian ini dilakukan pada skala laboratorium, sehingga perlu adanya uji lapangan (*field test*) untuk memastikan bahwa hasil pengujian laboratorium dapat diaplikasikan secara langsung pada proyek konstruksi dengan kondisi lalu lintas dan lingkungan yang beragam.
6. Pengembangan material lokal seperti minyak kemiri serta zat aditif NaOCl untuk teknologi CPHMA perlu terus dikaji agar dapat menjadi solusi nasional dalam pengurangan ketergantungan terhadap aspal minyak.

DAFTAR REFERENSI

- AASHTO. (2001). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. In American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Al-Araji, N., Kashesh, G., & Dulaimi, A. (2025). Effect of Adding Metakaolin And Dolomite Powder on The Properties of Hot Mix Asphalt. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 1507(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1755-1315/1507/1/012048>
- Amelia, S., & Farizal, B. (2022). Pengujian Kadar Aspal Sampel AC-BC menggunakan Alat Centrifuge Extractordengan Bahan AdditifPeralitesebagai Pelarut. JurnalStatika, 8(1), 1.

- Autodesk. (2018). Autodesk Civil 3D: Comprehensive detailed design and documentation software for civil infrastructure.
- Bendebane, F., Bouziane, L., & Ismail, F. (2013). Liquid-liquid extraction of naphthalene. Application of a mixture design and optimization. *Energy Procedia*, 36(213), 1241–1248. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.140>
- Chen, N., & Wang, M. H. (2010). A Measurement Approach for Critical Voids in Mineral Aggregate Based on AC-20. In *Advanced Materials Research*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.108-111.708>
- Cheng, Y., Yu, D., Gong, Y., Zhu, C., Tao, J., & Wang, W. (2018). Laboratory Evaluation on Performance of Eco-Friendly Basalt Fiber and Diatomite Compound Modified Asphalt Mixture. In *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma11122400>
- Damayanto, A. (2020). Pengaruh Asbuton Lawele Terhadap Stabilitas Perkerasan Lentur Jalan. *Jurnal Teknik Media Pengembangan Ilmu Dan Aplikasi Teknik*, 4(1), 318–323. <https://doi.org/10.26874/jt.vol4no1.245>
- Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga. (2006). Pemanfaatan Asbuton Buku 1 Umum. In *Pedoman Konstruksi dan Bangunan*.
- 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>
- Durman, E. (2021). Pengaruh durasi pemanasan pelarut berbasis minyak kemiri terhadap kinerja cphma.
- Durman, E., Hanna Patty, A., & Khamelda, L. (2023). Pengaruh Durasi Pemanasan Campuran terhadap Kinerja Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) dengan Pelarut Berbasis Minyak Kemiri. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Katolik Widya Karya Malang*, 1(2), 64–82. <https://ejournal.widyakarya.ac.id/index.php/Sipil/article/view/66/68>
- Ertuğrul, İ. F., Maden, M., Orhan, E. O., Özkorucuklu, S. P., & Aglarca, A. V. (2014). Rapid Tissue Dissolution Efficiency of Electrically-Activated Sodium Hypochlorite on Bovine Muscle. In *European Journal of Dentistry*. <https://doi.org/10.4103/1305-7456.143622>
- Fukuzaki, S. (2006). Mechanisms of actions of sodium hypochlorite in cleaning and disinfection processes. *Biocontrol Science*, 11(4), 147–157. <https://doi.org/10.4265/bio.11.147>
- Gao, Y., & Cao, R. (2012). Research on the Design of AR-AC13S Mixtures. In *Journal of Testing and Evaluation*. <https://doi.org/10.1520/jte20120158>
- Google earth pro. (2021). Peta Lokasi.
- Hermadi, M., & Yohanes, R. P. . (2022). CPHMA dalam Pemulihan Ekonomi Nasional Akibat Pandemi Covid-19. Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR. <https://binamarga.pu.go.id/index.php/berita/cphma-dalam-pemulihan-ekonomi-nasional-akibat-pandemi-covid-19>
- Ji, W., Meng, Y., Shang, Y., Zhou, X., & Xu, H. (2023). Investigation of the Relationship Between Permanent Deformation and Dynamic Modulus Performance for Bearing-Layer Asphalt Mixture. In *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma16196409>
- Khamelda, L., Djakfar, L., & Wisnumurti. (2023). Optimization of Lawele Granular Asphalt (Lga) Performance in Cold Paving Hot Mix Asbuton (Cphma) With Candlenut Oil Modifier. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(6(126)), 51–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.292080>

- 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>
- Kurniadji. (2014). Ekstraksi Asbuton dengan Pelarut Berbasis Bahan Organik dan Media Air. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 31(1), 12–23.
- Metode Pengujian Kadar Aspal Dari Campuran Beraspal Dengan Cara Sentrifus, 1 (2002).
- Mieczkowski, P., Budziński, B., & Jurczak, R. (2020). Micro-Structure of Hot Mix Asphalt Containing the 35/50 Bitumen Viewed in Terms of Excess Moisture in the Underlying Course of Pavement. In *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma13102230>
- Nawir, D., & Mansur, A. Z. (2021). The Impact Of Hdpe Plastic Seeds On The Performance Of Asphalt Mixtures. *Civil Engineering Journal*, 7(9), 1569–1581. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091744>
- Permen PUPR No. 18/PRT/M/2018. (2018). Permen PUPR No. 18/PRT/M?2018 (Vol. 3, Issue 32).
- Puslitbang. (2018). Rencana strategis (renstra).
- Ratnawati, R., Yoshi, L. A., & Wibawa, S. A. (2018). Pengaruh pH dan Dosis NaOCl terhadap Penurunan Kadar COD dan Klor Bebas pada Limbah Cair Produksi Monomer Vinyl Klorida. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 13(2), 120–126. <https://doi.org/10.23955/rkl.v13i2.10947>
- Sandi, R. F. (2013). KINERJA CAMPURAN LATASTON (HRS-WC) ASBUTON DENGAN PENAMBAHAN OLI BEKAS TERHADAP PENGUJIAN MARSHALL. *Semantik Scholar*.
- Sastrohamidjojo, H. (2018). *Kimia Dasar*. Gadjah Mada Univeristy Press. Sastrohamidjojo, H. (2018). *Kimia Dasar*. Gadjah Mada University Press.
- SNI-M-01-2003. (2003). Metode Pengujian Campuran Beraspal Panas dengan Alat Marshall (pp. 1–18). Bina Marga.
- Sukirman, S. (2016). *Beton Aspal Campuran Panas*.
- Sun, D. (2022). A Simple Scheme for Extraction of Asphaltenes from Asphalt at Room Temperature. *Coatings*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/coatings12030407>
- Yang, S., Ma, D., & Cui, P. (2017). Liquid–Liquid Equilibrium Data and Correlation for the Quaternary Systems Water + Polyphenol (Hydroquinone, Catechol, and Resorcinol) + Methyl Isobutyl Ketone + Methylbenzene. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 63(1), 63–68. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00598>
- Zhang, D., Chen, M., Wu, S., Jingxiang, L., & Amirkhanian, S. N. (2017). Analysis of the Relationships Between Waste Cooking Oil Qualities and Rejuvenated Asphalt Properties. In *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma10050508>
- Zhang, P., Li, D., Li, B., Wang, Y., Wei, Y., Wang, B., & Zhang, B. (2023). The Properties of Sodium-Hypochlorite-Activated Crumb Rubber and the Influence of Aging on the Rheological Properties of Activated Asphalt Rubber. *Buildings*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/buildings13030712>
- Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges. In *European Polymer Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>