

Pengaruh Kuantitas Minyak Kemiri Sebagai Pelarut Asbuton Terhadap Kinerja CPHMA

Reynard Yurino¹, Benedictus Sonny Yoedono², Lila Khamelda³

^{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: sonny_ft@widyakarya.ac.id

Abstract. Road pavement construction needs in Indonesia continue to increase from time to time along with technological advancement. Recorded asphalt needs in Indonesia for each year are 1.2 million tons and Indonesia has asphalt supply from Buton that can support construction in Indonesia up to 135 years (Department of Public Works, 2006). Buton Asphalt (Asbuton) is an alternative for road pavement construction in Indonesia, therefore this local technology from Indonesia must be developed for mutual progress. The deficiency of asbuton regarding solvent needs, until now remains a constraint in the road material supplier industry. Until now, the solvents commonly used are petroleum-based which are certainly not sustainable. Kemiri oil has potential as a sustainable asbuton mixture solvent because it is vegetable-based. This study aims to determine the effect of the quantity of kemiri oil added to the Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) mixture. It is expected that later kemiri oil will not only be a solvent, but also as a modifier for compounds in asbuton so that it can become a rejuvenator during CPHMA spreading. The results obtained through this study are that the three variations of solvent quantity, namely 10%, 30%, and 40%, provide Marshall parameter values that meet CPHMA regulations.

Keywords: Asbuton, Kemiri oil, Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA), Asbuton solvent, Marshall stability

Abstrak. Kebutuhan pembangunan jalan beraspal di Indonesia terus meningkat dari waktu ke waktu seiring dengan kemajuan teknologi. Tercatat kebutuhan aspal di Indonesia untuk setiap tahunnya adalah sebesar 1,2 juta ton dan Indonesia mempunyai pasokan aspal dari Buton yang dapat menyokong pembangunan di Indonesia sampai dengan 135 tahun (Departemen Pekerjaan Umum, 2006). Aspal Buton (Asbuton) merupakan alternatif untuk pembangunan jalan beraspal di Indonesia, oleh karena itu teknologi lokal dari Indonesia ini harus dikembangkan demi kemajuan bersama. Kekurangan asbuton terhadap kebutuhan pelarut, hingga kini masih menjadi kendala dalam industri pemasok material jalan. Hingga saat ini, pelarut yang umum digunakan yaitu berbasis minyak bumi yang tentunya tidak sustainable. Minyak kemiri berpotensi sebagai pelarut campuran asbuton yang sustainable karena berbasis nabati. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari kuantitas minyak kemiri yang ditambahkan pada campuran Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA). Diharapkan nantinya minyak kemiri tidak hanya sebagai pelarut, tetapi juga sebagai modifier terhadap senyawa dalam asbuton sehingga dapat menjadi peremaja pada saat penghamparan CPHMA. Hasil yang diperoleh melalui penelitian ini yaitu ketiga variasi kuantitas pelarut yaitu 10%, 30% dan 40% memberikan nilai parameter marshall yang memenuhi ketentuan CPHMA.

Kata kunci: Asbuton, Minyak kemiri, Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA), Pelarut asbuton, Parameter marshall

1. LATAR BELAKANG

Dewasa ini pembangunan infrastruktur di Indonesia sedang mengalami peningkatan di bawah kepemimpinan Presiden Jokowi. Hal ini tentu saja berpengaruh dengan berkembangnya semua bidang pembangunan khususnya pembangunan jalan. Kemenko Perekonomian telah mencatat bahwa pembangunan jalan Tol yang telah diselesaikan pemerintah dari tahun 2016 sampai 2020 mencapai sepanjang 1.309 km, tertinggi dari masa kepemimpinan presiden-presiden sebelumnya (Yanwardhana, 2021).

Staf Ahli Menteri PUPR Bidang Teknologi, Industri, dan Lingkungan Endra S. Atmawidjaja, mengatakan bahwa hingga April 2021 tercatat panjang ruas tol yang sudah

beroperasi mencapai 2.391 Km terbagi dalam 62 ruas yang dikelola oleh Badan Usaha Jalan Tol (BUJT). Total tersebut merupakan akumulasi dari ruas tol yang tuntas dan dioperasikan pada periode 1978-2014 sepanjang 795 km, dilanjutkan periode 2015-2019 (1.298 km), kemudian ditambah 246 km pada tahun 2020, dan 54,69 km dari Januari hingga April 2021. Staf Ahli Menteri PUPR Bidang Teknologi, Industri, dan Lingkungan Endra S. Atmawidjaja, mengatakan bahwa hingga April 2021 tercatat panjang ruas tol yang sudah beroperasi mencapai 2.391 km terbagi dalam 62 ruas yang dikelola oleh Badan Usaha Jalan Tol (BUJT). Total tersebut merupakan akumulasi dari ruas tol yang tuntas dan dioperasikan pada periode 1978-2014 sepanjang 795 km, dilanjutkan periode 2015-2019 (1.298 km), kemudian ditambah 246 km pada tahun 2020, dan 54,69 km dari Januari hingga April 2021 (Yanwardhana, 2021).

Penggunaan Asbuton merupakan alternatif yang sangat baik bagi pembangunan jalan beraspal. Selain karena keunggulan bahan ini dibandingkan dengan bahan untuk jalan beraspal lainnya, ketersediaan asbuton tercatat sebanyak 662 juta ton, dimana kadar aspal yang terkandung dari asbuton padat ini sekitar 25%, sehingga mampu untuk mengakomodasikan kebutuhan jalan beraspal di Indonesia untuk 135 tahun. Kebutuhan aspal selama 135 tahun ini bisa didapat dari kebutuhan aspal terhadap pengembangan jalan nasional sebesar 1,2 juta ton per tahunnya (Departemen Pekerjaan Umum, 2006).



Gambar 1. Penambangan Aspal Buton
Sumber: Sultra (2020)

Teknologi Asbuton merupakan teknologi lokal Indonesia yang ditemukan dan terus dikembangkan baik dari sisi jaminan kualitas dan teknik penghamparan oleh Badan Penelitian dan Pengembangan (Balitbang) Kementerian PUPR diantaranya adalah campuran beraspal dengan Asbuton, *Cold Paving Hot Mix Asbuton* (CPHMA), Lapis Penetrasi Macadam Asbuton (LPMA), *Butur Seal*, *Cape Buton Seal* dan Asbuton Campuran Aspal Emulsi.

CPHMA merupakan produk campuran beraspal instan atau siap pakai. Pencampuran CPHMA dilakukan secara pabrikasi yang kemudian didistribusikan dalam bentuk kemasan dan selanjutnya dihampar dan dipadatkan secara dingin (pada temperatur udara). Teknologi CPHMA ini bermanfaat untuk pembangunan jalan di daerah terpencil dan pulau-pulau kecil

yang tidak memiliki akses ke alat pencampur aspal (Asphalt Mixing Plan, AMP). CPHMA memiliki keunggulan jika dibandingkan dengan campuran sejenis lainnya. Dalam teknologi CPHMA ini, konstruksi perkerasan lebih merata dan homogen sehingga menyebabkan kerataan permukaan yang lebih baik dari teknologi aspal dan sejenis lainnya.

Campuran asbuton membutuhkan zat pelarut yang berguna untuk melarutkan aspal dalam asbuton dimana aspal tersebut merupakan pengikat agregat dan bahan-bahan lainnya dalam campuran asbuton. Selain itu pelarut juga akan berfungsi sebagai modifier senyawa asbuton agar dapat menjadi peremaja pada perkerasan CPHMA. Pelarut yang baik juga berpotensi meningkatkan kuat tekan CPHMA dalam uji marshall sehingga dapat berpengaruh terhadap kualitas performanya. Penelitian ini merupakan penelitian lanjutan dari Djakfar, Wisnumurti and Khamelda (2020a) dimana dari 13 minyak nabati yang diuji kualitasnya sebagai pelarut asbuton yaitu 1) Minyak Biji Matahari (BM), 2) Minyak Jagung (JG), 3) Minyak Jarak (J), 4) Minyak Kemiri (K), 5) Minyak Zaitun (Z), 6) Minyak Kanola (KNL), 7) Minyak Kedelai (KDL), 8) Minyak Kelapa (KLP), 9) Minyak Biji Wijen (W), 10) Minyak Biji Anggur (BA), 11) Rice Bran oil (P), 12) Minyak Kacang Tanah (KT) dan 13) Minyak Kelapa Sawit (S), ditemukan bahwa minyak kemiri menunjukkan potensi tertinggi berdasarkan uji Marshall dan Liquid Liquid Extraction (LLE). Minyak Kemiri juga memiliki banyak manfaat bagi kehidupan manusia. Umumnya minyak kemiri bermanfaat dalam bidang kesehatan, namun berdasarkan penelitian Djakfar, Wisnumurti and Khamelda (2020a) ditemukan bahwa minyak kemiri ini juga dapat memberikan pengaruh terhadap kinerja CPHMA (*Cold Paving Hot Mix Asbuton*).

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Aspal Buton (Asbuton)

Aspal Buton (Asbuton) merupakan bahan lokal Indonesia yang memiliki kelebihan dibandingkan bahan lain sejenis dalam hal pembangunan jalan beraspal. Penggunaan asbuton sebagai bahan dasar jalan beraspal sudah mulai dikembangkan oleh pemerintah. Asbuton pertama kali di temukan di pulau Buton, yang pada umumnya berbentuk padatan yang terbentuk secara alami melalui proses geologi. Proses terbentuknya asbuton ini terjadi karena minyak bumi yang terdorong ke permukaan yang kemudian menyusup di antara batuan yang porous (Departemen Pekerjaan Umum, 2006). Aspal alam yang tersedia di pulau Buton ini merupakan deposit aspal terbesar di dunia dengan jumlah persediaan yang sangat besar. Pada Tabel 1. menjelaskan perkiraan jumlah ketersediaan asbuton di daerah Lawele dan sekitarnya.

Tabel 1. Ketersediaan Asbuton di Lawele dan Sekitarnya

No.	Lokasi	Luas (m ²)	Tebal (m)	Kadar aspal (%)	Deposit (juta ton)
1.	Batuawu	550.000	76,1	20 – 40	60,69
2.	Mempenga	280.000	72	20 – 30	29,232
3.	Langunturu	420.000	61	20 – 25	37,149
4.	Kabukubuku	570.000	50	20 – 35	41,325
5.	Wangkaburu	460.000	62,8	20 – 35	41,888
6.	Siantopina	5000.000	25	Belum diketahui	181,25
7.	Ulala	1.500.000	21,65	Belum diketahui	47,089

Sumber: Departemen Pekerjaan Umum (2006)

Hasil eksplorasi menunjukkan bahwa asbuton yang ditemukan ini memiliki karakteristik yang lunak dan dapat ditemukan 0 m sampai 4,9 m di bawah permukaan tanah. Dengan teknologi pengembangan yang dilakukan dengan tepat maka akan didapatkan aspal dengan mutu yang tinggi (Departemen Pekerjaan Umum, 2006). Asbuton memiliki dua unsur utama yaitu bitumen (aspal) dan mineral. Karakteristik asbuton secara umum terbagi menjadi karakteristik fisik dan karakteristik kimia, berikut adalah karakteristik fisik dan kimia asbuton dari daerah Kabungka dan Lawele serta senyawa penyusun mineralnya.

Tabel 2. Sifat Fisik Aspal Asbuton

Jenis pengujian	Hasil pengujian	
	Asbuton padat dari Kabungka	Asbuton padat dari Lawele
Kadar aspal, %	20	30,08
Penetrasi, 25°C, 100 gr, 5 detik, 0,1 m	4	36
Titik lembek, °C	101	59
Daktilitas, 25°C, 5cm/menit, cm	< 140	< 140
Kelarutan dalam C ₂ H ₅ Cl ₃ , %	-	99,6
Titik Nyala, °C	-	198
Berat Jenis	1,046	1,037
Penurunan berat (TFOT), 163°C, 5 jam	-	0,31
Penetrasi setelah TFOT, % asli	-	94
Titik Lembek setelah TFOT, °C	-	62
Daktilitas setelah TFOT, cm	-	>140

Sumber: Departemen Pekerjaan Umum (2006)

Tabel 3. Sifat Kimia Aspal Asbuton

Jenis pengujian	Jenis pengujian	
	Asbuton padat dari Kabungka	Asbuton padat dari Lawele
Nitrogen (N), %	29,04	30,08
Acidafins (A1), %	9,33	6,60
Acidafins (A2),	12,98	8,43
Parafin (P), %	11,23	8,86
Parameter Maltene	1,50	2,06
Nitrogen/Parafin, N/P	2,41	3,28
Kandungan Asphaltene, %	39,45	46,92

Sumber: Departemen Pekerjaan Umum (2006)

Tabel 4. Komposisi kimia mineral AsButon

Senyawa	Hasil Pengujian	
	Asbuton dari kabungka	Asbuton dari Lawele
CaCO_3	86,66	72,90
MgCO_3	1,43	1,28
CaSO_4	1,11	1,94
CaS	0,36	0,52
H_2O	0,99	2,94
SiO_2	5,64	17,06
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	1,52	2,31
Residu	0,96	1,05

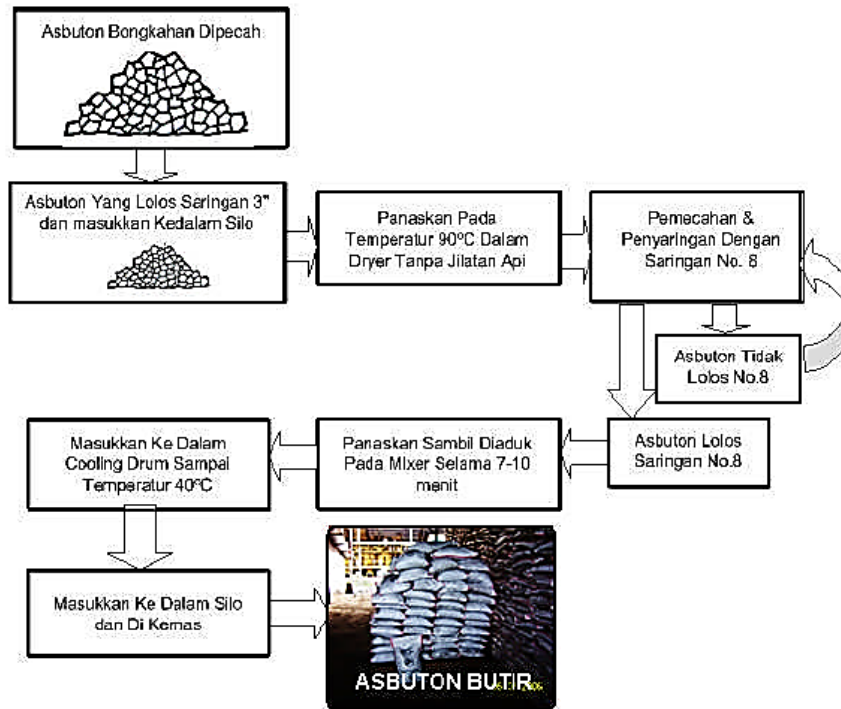
Sumber: Departemen Pekerjaan Umum (2006)

Dari komposisi kimia aspal asbuton dapat diketahui bahwa asbuton dari kedua daerah deposit ini memiliki senyawa Nitrogen base yang tinggi dan parameter malten yang sangat baik, sehingga asbuton memiliki kelekatan yang baik dengan agregat dan tingkat keawetan yang cukup baik.

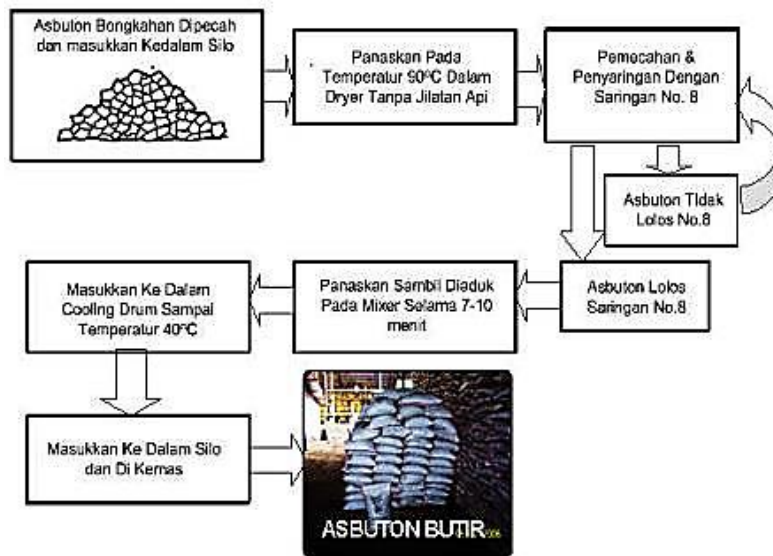
**Gambar 2.** Aspal Buton Lawele

Sumber: Sumantoro (2019)

Proses Pembuatan Asbuton Butir dari asbuton padat dilakukan secara pabrikasi, yang kemudian dikemas dalam karung dan didistribusikan ke seluruh wilayah di Indonesia. Skema pengolahan asbuton sendiri berbeda antara asbuton dengan nilai penetrasi bitumen yang tinggi ($> 10\text{dmm}$) dan yang rendah ($\leq 10\text{dmm}$). Untuk gambaran proses pembuatan asbuton butir dapat dilihat dari skema pengolahan asbuton pada Gambar 3. di bawah.

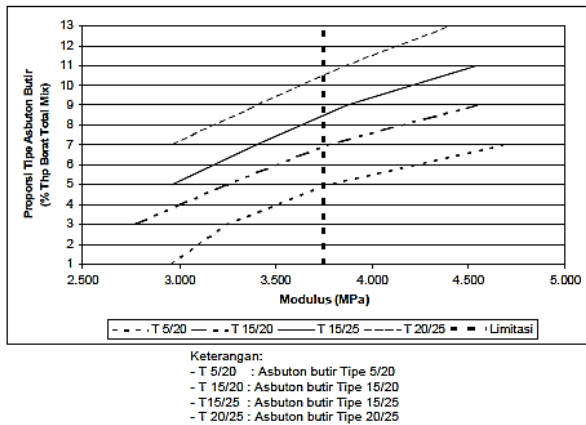


Gambar 3. Proses Penetrasi Bitumen Rendah
(Sumber: Departemen Pekerjaan Umum (2006))



Gambar 4. Proses Penetrasi Bitumen Tinggi
(Sumber: Departemen Pekerjaan Umum (2006))

Penggunaan asbuton untuk campuran beraspal panas memiliki ketahanan terhadap terjadinya alur. Hal ini terlihat jelas dari nilai Stabilitas Dinamis hasil pengujian dengan menggunakan alat *Wheel Tracking Machine* yang besarannya lebih dari 2500 lintasan/mm. Berdasarkan hasil penelitian di laboratorium untuk pembuatan campuran beraspal panas, semakin banyak penambahan asbuton maka Modulus Resilien (MR) campuran beraspal semakin tinggi, terlihat Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Pengaruh Persentase Asbuton terhadap Modulus
Sumber: Departemen Pekerjaan Umum (2006)

2.2 CPHMA

Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) atau campuran beraspal panas asbuton dihampar dingin adalah campuran beraspal yang mengandung asbuten dan bahan tambahan lain (polimer) jika diperlukan. Pencampuran dilakukan secara pabrikasi atau dicampur di pabrik secara panas yang kemudian dipasarkan dalam keadaan siap dihampar dan dipadatkan dalam temperatur udara dingin sebagai perkerasan jalan beraspal. Penggunaan teknologi CPHMA ini dibatasi untuk penggunaan jalan lalu lintas ringan sampai sedang dengan kapasitas maksimal 1000 kendaraan per hari (Litbang PUPR, 2021).

Keunggulan dari CPHMA ini sendiri sudah bisa diproduksi di Sulawesi Tenggara, Jawa Tengah dan Jawa Timur. Selain itu harga produksi campuran beraspal bisa berkurang sampai dengan 25% dan dapat diproduksi di daerah terpencil seluruh wilayah Indonesia yang belum mempunyai unit pencampuran aspal atau *Asphalt Mixing Plant* (AMP) karena dikemas dalam karung (Litbang PUPR, 2021). CPHMA yang merupakan campuran asbuton yang terdiri dari asbuton butir, agregat, peremaja dan bahan tambahan lainnya ini dapat dipadatkan secara dingin sehingga penggunaannya dapat dilakukan di daerah-daerah yang jauh dari lokasi AMP. Namun CPHMA juga memiliki kelemahan di bidang *workability*, dimana campuran yang sudah dingin bersifat lebih kaku sehingga lebih susah juga untuk dipadatkan, kemudian hal ini akan mempengaruhi kinerja campuran (Suroso, 2008).

Tabel 5. 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 Minyak Kemiri

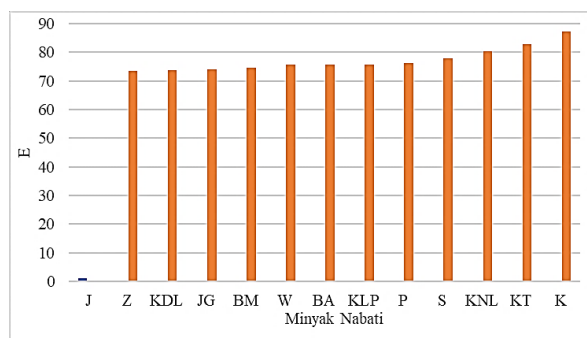
Pelarut dalam CPHMA sendiri adalah zat tambahan yang digunakan ke dalam campuran adonan yang berguna untuk melarutkan adonan tersebut agar tercampur homogen. Zat yang digunakan sebagai pelarut CPHMA memiliki syarat/ standar yang harus dipenuhi. Larutan peremaja yang digunakan harus masuk dalam golongan minyak berat atau minyak berat yang telah dimodifikasi dan memenuhi persyaratan dalam tabel 6. di bawah ini.

Tabel 6. Persyaratan Pelarut *Modifier*

Jenis Pengujian	Metoda Pengujian	Persyaratan PH-1000
Viskositas: - pada 60 °C (cSt) - atau 100 °C, (dtk)	AASHTO T-72	800-1200 80-120
Kelarutan dim TCE, (%)	SNI 06-2438-1991	Min. 99,5
Titik nyala, (°C)	AASHTO T-73	Min. 180
Berat Jenis,	SNI 06-2441-1991	Min. 0,95
Penurunan berat (TFOT), (%) terhadap berat awal)	SNI 06-2440-1991	Maks. 1
Kadar parafin lilin, (%)	SNI 03-3639-94	Maks. 2

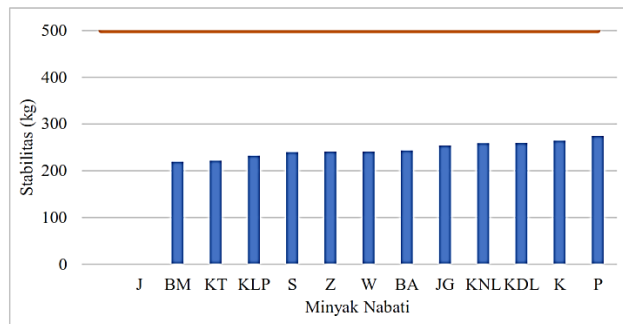
Sumber: Departemen Pekerjaan Umum (2006)

Penelitian ini menggunakan minyak kemiri sebagai pelarut asbuton berdasarkan *The Evaluation of Using Vegetable Oil as Asbuton Solution on The Performance of CPHMA*, dimana minyak kemiri memiliki nilai Persentase Efisiensi Ekstraksi yang paling tinggi dibandingkan dengan 12 jenis minyak nabati lainnya berdasarkan hasil yang didapat dari pengujian *Liquid-Liquid Extraction Test* (LLE test). (Djakfar, Wisnumurti and Khamelda, 2020). LLE test sendiri merupakan pengujian yang dilakukan untuk memisahkan suatu zat cair dengan zat cair lainnya. Pengujian ini biasanya digunakan untuk pengujian bahan ekstraktan untuk melarutkan dan atau mengikat bitumen. Performa minyak kemiri bisa dikatakan lebih baik dibandingkan minyak nabati lainnya telah terbukti dari hasil tes LLE yang dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Hasil LLE Test Minyak Kemiri dan 12 Minyak Nabati Lainnya
Sumber: Djakfar, Wisnumurti and Khamelda (2020)

Hasil LLE test (*Liquid Liquid Extrcation test*) menunjukkan bahwa minyak kemiri memiliki kemampuan paling baik dalam melakukan ekstraksi. Selain dengan uji LLE keunggulan minyak kemiri juga dapat terlihat dari uji marshall, pada gambar 7.



Gambar 7. Hasil Uji Marshall Minyak Kemiri dan 12 Minyak Nabati Lainnya
Sumber: Djakfar, Wisnumurti and Khamelda (2020)

Kandungan minyak kemiri dari daging biji kemiri sekitar 60 %. Minyak kemiri mengandung asam lemak jenuh, antara lain asam palmitat (4,38 %), asam stearat (3,93 %) dan mengandung asam lemak tidak jenuh, seperti asam oleat (26,23 %), asam linoleat (39,62 %), asam linolenat (20,76 %) dan asam arachidat (0,08 %).



Gambar 8. Buah dan Minyak Kemiri
Sumber: Setiawan (2021)

3. METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah kualitatif berdasarkan hasil pengujian di laboratorium. Sebagian besar penelitian kuantitatif dilakukan dengan menggunakan metode statistik yang digunakan untuk mengumpulkan data kuantitatif dari studi penelitian. Dalam penelitian kuantitatif, para peneliti dan ahli statistik menggunakan kerangka kerja matematika dan teori-teori terkait (Syafnidawaty, 2020).

3.2 Obyek Penelitian

Penelitian difokuskan pada proses pencampuran CPHMA, hal ini didasari oleh pemikiran bahwa salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja CPHMA adalah pada proses pencampuran. Proses pencampuran diperkirakan akan dipengaruhi oleh karakteristik campuran, suhu pemanasan dan durasi pemanasan. Berdasarkan pemikiran adanya faktor yang mempengaruhi kinerja CPHMA tersebut, maka pada campuran CPHMA diberikan perlakuan

berupa variasi kuantitas pelarut untuk membuktikan jika kuantitas pelarut memberikan pengaruh terhadap kinerja CPHMA.

Objek penelitian yang digunakan terdiri dari 15 sampel berbentuk briket dan merupakan simulasi dari lapisan perkerasan CPHMA yang terdiri atas agregat (761,1 gr), pelarut (47,8 gr) dan asbuton (238,9 gr). Sampel mendapat variasi perlakuan berupa kuantitas atau jumlah pelarut yang berbeda yaitu 10%, 30% dan 40% dari berat asbuton dalam campuran. Kuantitas minyak kemiri sebagai pelarut merupakan variabel X (tidak tetap), sedangkan sebagai variabel Y (tetap) adalah durasi pemanasan campuran yaitu 40 menit dan suhu pemanasan campuran yaitu 170°C.

Tabel 7. Komposisi Agregat

No.	Lolos Saringan	Tertahan Saringan	Berat (gr)
1	$\frac{3}{4}$ "	$\frac{1}{2}$ "	47,0
2	$\frac{1}{2}$ "	No. 4	352,5
3	No. 4	No. 8	149,5
4	No. 8	No. 50	186,3
5	No. 50	No. 200	13,7
6	No. 200	Pan	12,1
			761,1

Sumber: (Djakfar et al., 2020a)

Tabel 8. Rancangan Penelitian

No.	Variabel X			Variabel Y
	10%	30%	40%	
1	A	A	A	- Suhu Pemanasan = 170°C - Durasi Pemanasan = 40 mnt
2	B	B	B	
3	C	C	C	
4	D	D	D	
5	E	E	E	

3.4 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan dengan pengujian Marshall berdasarkan metode modifikasi dari penelitian (Djakfar, Wisnumurti and Khamelda, 2020b). Proses yang dilakukan selama 4 hari yang dapat dijabarkan sebagai berikut:

Hari ke-1:

1. Penimbangan

Proses penimbangan dilakukan untuk 15 sampel dengan jumlah material yang sama untuk masing-masing sampelnya.

2. Pencampuran

Proses pencampuran yang dimaksud adalah mencampur agregat, asbuton, dan bahan pelarut berupa minyak kemiri, dimana untuk 5 sampel pertama digunakan minyak

kemiri sebagai pelarut dengan kadar 10% dari asbuton, 5 sampel berikutnya dengan pelarut sebanyak 30%, dan 5 sampel dengan pelarut sebanyak 40%.

3. Pemanasan

Proses pemanasan dilakukan dengan oven dengan suhu tetap 40 derajat celcius untuk masing-masing 15 sampel.

4. Pemadatan

Proses pemadatan dilakukan dengan alat compactor manual. Masing-masing sampel ditumbuk sebanyak 75 kali untuk setiap sisinya, sehingga total tumbukan yang diberikan kepada setiap sampel adalah 150 kali.

5. Pendiaman Pertama

Setelah proses penumbukan, sampel dilepaskan dari cetakan menggunakan dongkrak, dan kemudian didiamkan selama 24 jam.

Hari ke 2:

1. Pengukuran

Setelah melalui proses pendiaman, pada hari kedua akan dilakukan pengukuran terhadap sampel. Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran berat kering sampel (kg), tinggi sampel (cm), dan diameter sampel (cm).

2. Perendaman

Perendaman dilakukan selama 24 jam, dimana semua bagian sampel harus terendam dalam air. Proses perendaman ini menganalogikan keadaan aspal saat tergenang air. Proses ini menjadi salah satu kunci, dimana jika sampel dapat bertahan selama proses perendaman, berarti sampel tersebut layak dilakukan pengujian-pengujian selanjutnya.

Hari ke 3:

1. Pengukuran

Pengukuran terhadap sampel kembali dilakukan. Pengukuran yang dilakukan adalah berat sampel di dalam air (kg), dan berat jenis kering permukaan jenuh (berat SSD) yang merupakan berat sampel dalam keadaan jenuh atau rongga terisi dengan air.

2. Pendiaman Kedua

Pada hari ketiga ini kembali dilakukan pendiaman selama 24 jam.

Hari ke-4:

1. *Waterbath*

Pada hari yang keempat sebelum dilakukan uji marshall, sampel kembali di rendam dalam alat waterbath dengan suhu 60°C selama 30 menit untuk masing-masing sampel.

Proses ini menganalogikan keadaan terburuk aspal saat terendam air dan terpapar panas matahari.

2. Uji Marshall

Uji marshall dilakukan setelah pengujian sampel di dalam *waterbath*. Dengan dilakukan pengujian marshall akan didapatkan hasil stabilitas dan *flow* untuk masing-masing sampel. Uji marshall ini merupakan puncak dari penelitian ini.

3.5 Pengolahan Data

Data yang diperoleh melalui pengujian laboratorium kemudian diolah secara matematis berdasarkan ketentuan pengujian marshall untuk mendapatkan parameter marshall sebagai berikut:

3.5.1 Stabilitas (*Stability*)

Nilai stabilitas sebagai salah satu parameter dalam pengujian marshall, adalah nilai kemampuan maksimum beton aspal padat untuk dapat menerima beban sampai terjadi kelelahan plastis. Nilai stabilitas ini dapat diketahui melalui pengujian marshall menggunakan alat uji marshall.

Nilai stabilitas akan naik seiring dengan bertambahnya kadar aspal hingga mencapai puncaknya pada Kadar Aspal Optimum (KAO). Setelah mencapai KAO, maka penambahan kadar aspal akan menurunkan nilai stabilitas (Laboratorium Rekayasa Jalan ITB, 2001). Untuk pengolahan nilai stabilitas marshall dapat dilihat pada tabel 9. di bawah.

Tabel 9. Pengolahan Nilai Stabilitas Marshall

No.	Data	Pengolahan	Satuan
1	Pembacaan Arloji Stabilitas (o)	diukur	Div
2	Faktor Kalibrasi (w)	29,03 (ditetapkan berdasarkan kalibrasi alat)	lbf/div
3	Angka Korelasi (x)	Berdasarkan tabel koreksi untuk dimensi dan volume	--
4	Konversi lbf ke kg (y)	0,45	kg/lbf
5	Nilai Stabilitas (p)	$o \cdot w$	Lbf
6	Nilai Stabilitas (q)	$p \cdot y \cdot x$	Kg

Tabel 10. Angka Korelasi Tabel Koreksi untuk Dimensi dan Volume

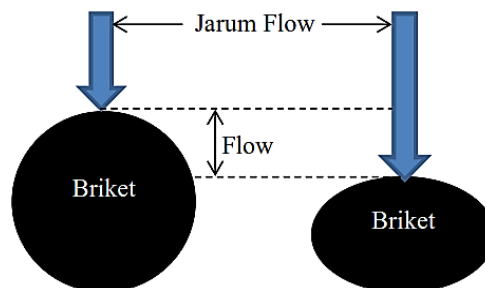
Isi benda uji (cm ³)	Tebal benda uji (mm)	Angka korelasi
200 – 213	25,4	5,55
214 – 225	27,0	5,00
226 – 237	28,6	4,55
238 - 250	30,2	4,17
251 – 264	31,8	3,85
265 – 276	33,3	3,57
277 – 289	34,9	3,33
290 - 301	36,5	3,03
302 – 316	38,1	2,78

Isi benda uji (cm ³)	Tebal benda uji (mm)	Angka korelasi
317 – 328	39,7	2,50
329 – 340	41,3	2,27
341 – 353	42,9	2,08
354 – 367	44,4	1,92
368 – 379	46,0	1,79
380 – 392	47,6	1,67
393 – 405	49,2	1,56
406 – 420	50,8	1,47
421 -431	52,4	1,39
432 – 443	54,0	1,32
444 – 456	55,6	1,25
457 – 470	57,2	1,19
471 – 482	58,7	1,14
483 – 495	60,3	1,09
496 – 508	61,9	1,04
509 – 522	63,5	1,00
523 – 535	65,1	0,96
536 – 546	66,7	0,93
547 – 559	68,3	0,89
560 – 573	69,9	0,86
574 – 585	71,4	0,83
586 – 598	73,0	0,81
599 – 610	74,6	0,78
611 - 625	76,2	0,76

Sumber: Laboratorium Rekayasa Jalan ITB (2001)

3.5.2 Kelelehan (*Flow*)

Pengujian kelelehan atau *flow* sebagai parameter *marshall test* adalah untuk mengetahui besarnya perubahan bentuk plastis dari beton aspal padat akibat adanya beban sampai benda uji mencapai batas keruntuhannya.



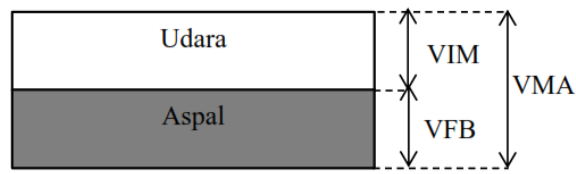
Gambar 9. Ilustrasi Pembaca Nilai *Flow*

Nilai *flow* akan naik sesuai penambahan nilai stabilitas dan kadar aspal (Laboratorium Rekayasa Jalan ITB, 2001). Pengolahan nilai *flow* seperti pada tabel 11.

Tabel 11. Pengolahan Nilai *Flow*

No.	Data	Pengolahan	Satuan
1	Pembacaan Arloji <i>Flow</i> (r)	diukur	div
2	Nilai <i>Flow</i>	$r \cdot 0,01 \text{ mm/div}$	mm

3.5.3 Rongga dalam Campuran



Gambar 10. Ilustrasi Rongga dalam Campuran

Perhitungan berbagai jenis volume pori dalam betol aspal padat meliputi:

A. Voids In Mix (VIM)

Merupakan Persentase antara rongga udara dengan volume total campuran setelah dipadatkan. Volume udara yang tinggi dibandingkan dengan volume total campuran setelah dipadatkan akan menyebabkan kelelahan yang lebih cepat sehingga kualitasnya lebih buruk. Nilai VIM akan semakin turun sesuai penambahan kadar aspal karena rongga yang tersedia semakin banyak terisi aspal sehingga mengurangi rongga udara (Laboratorium Rekayasa Jalan ITB, 2001).

Nilai VIM di atas batas maksimal mengindikasikan potensi proses penuaan aspal semakin besar sebagai akibat banyaknya pori dalam perkerasan. Banyaknya pori di dalam perkerasan berpotensi mengandung banyak udara (oksigen) yang akan menyebabkan proses oksidasi pada aspal dan mempercepat proses aging (*hardening*) sehingga perkerasan akan mudah retak (Kasan, 2009). Berikut adalah tabel pengolahan nilai VIM.

Tabel 12. Pengolahan Nilai VIM

No.	Data	Pengolahan	Satuan
1	Berat Isi Benda Uji Briket (g)	c / f	gr
2	% Agregat terhadap Campuran (t)	100% - b	%
3	BJ Agregat (u)	Berat Agregat / Volume Agregat	gr/cm ³
4	% Aspal terhadap Campuran	6% (Job Mix Formula)	%
5	BJ Aspal (v)	1,04 (ketetapan)	gr/cm ³
6	BJ Maksimum (h)	$100 / \{[(t / u) 100] + [(b / v) 100]\}$	gr/cm ³
7	Nilai VIM	$100\% - (100\% (g / h))$	%

B. Void In Mineral Agregat (VMA)

Nilai VMA adalah nilai partikel agregat, nilai yang tinggi dengan kadar aspal yang tinggi mengakibatkan lapis perkerasan menjadi lebih fleksibel. Hal ini dapat mempengaruhi ketahanan kelelahan (Fatigue Resistance) yang merupakan ketahanan lapis perkerasan dalam menerima beban berulang tanpa terjadinya alur (rutting) dan keretakan.

Nilai VMA akan turun hingga mencapai suatu nilai minimum kemudian akan naik lagi sesuai penambahan kadar aspal (Laboratorium Rekayasa Jalan ITB, 2001). Agregat yang bergradasi rapat akan memberikan nilai VMA yang kecil dibanding agregat bergradasi senjang. Semakin besar nilai VMA menunjukkan semakin besar ruang yang dapat diselimuti

aspal (Mamangkey et al., 2013) yang akan meningkatkan ikatan agregat dalam perkerasan. VMA merupakan rongga yang terisi oleh udara dan aspal pada campuran yang telah dipadatkan (briket) tetapi tidak termasuk aspal yang terserap oleh agregat. Untuk pengolahan nilai VMA dapat dilihat dari tabel 13. di bawah ini.

Tabel 13. Pengolahan Nilai VMA

No.	Data	Pengolahan	Satuan
1	% Aspal terhadap Campuran	6% (Job Mix Formula)	%
2	% Agregat terhadap Campuran	100% - b	%
3	Berat Kering Briket (c)	ditimbang	gr
4	Berat SSD Briket (d)	ditimbang	gr
5	Berat dalam Air Briket (e)	ditimbang	gr
6	Berat Isi Briket (f)	$d - e$	gr
7	Berat Isi Benda Uji Briket (g)	c / f	gr
8	Berat Campuran	1000 (ketetapan AASHTO)	gr
9	Berat Aspal	$b \cdot c$	gr
10	Berat Pelarut	20% . Berat Asbuton	gr
11	Berat Agregat	Berat Campuran – Berat Aspal – Berat Pelarut	gr
12	BJ Air	1 (ketetapan)	gr/cm ³
13	Volume Campuran	$(c - e) / BJ \text{ Air}$	cm ³
14	BJ Aspal (v)	1,04 (ketetapan)	gr/cm ³
15	Volume Aspal	$(b \cdot c) / v$	cm ³
16	BJ Pelarut	0,92 (ketetapan, BJ Minyak Kemiri)	gr/cm ³
17	Volume Pelarut	Berat Pelarut / BJ Pelarut	cm ³
18	Volume Agregat	Volume Campuran – Volume Aspal – Volume Pelarut	cm ³
19	BJ Agregat (u)	Berat Agregat / Volume Agregat	gr/cm ³
20	j	$(t \cdot g) / u$	--
21	Nilai VMA	100% - j	%

C. Void Filled With Bitumen (VFB)

VFB atau rongga terisi aspal merupakan nilai persentase rongga yang terdapat diantara partikel agregat (VMA) yang terisi oleh aspal, namun tidak termasuk aspal yang diserap oleh agregat. Nilai VFB akan semakin naik sesuai penambahan kadar aspal karena rongga semakin banyak terisi aspal (Laboratorium Rekayasa Jalan ITB, 2001). Berikut adalah tabel pengolahan nilai VFB.

Tabel 14. Pengolahan Nilai VFB

No.	Data	Pengolahan	Satuan
1	% Aspal terhadap Campuran (b)	6% (Job Mix Formula)	%
2	Berat Isi Benda Uji Briket (g)	c / f	gr
3	BJ Aspal (v)	1,04 (ketetapan)	gr/cm ³
4	i	$(b \cdot g) / v$	--
5	j	$(t \cdot g) / u$	--
6	Nilai VFB	100% - (i / j)	%

3.5.4 Marshall Quotient (MQ)

MQ merupakan perbandingan antara nilai stabilitas dengan *flow* yang menunjukkan besarnya beban yang dibutuhkan untuk menyebabkan penurunan tiap mm perkerasan. Kekuatan perkerasan yang ditunjukkan dengan MQ memberikan perbandingan antara variasi campuran untuk beban maksimal yang mampu diterima oleh perkerasan. Semakin tinggi nilai MQ menunjukkan kekuatan perkerasan yang semakin tinggi pula karena dibutuhkan beban yang lebih berat untuk menyebabkan perkerasan hingga mengalami penurunan (deformasi).

Tabel 15. Pengolahan Nilai VIM

No.	Data	Pengolahan	Satuan
1	Nilai Stabilitas (q)	$p \cdot y \cdot x$	kg
2	Nilai <i>Flow</i>	$r \cdot 0,01 \text{ mm/div}$	mm
3	MQ	$q / \text{Nilai Flow}$	kg/mm

Perolehan nilai MQ ini menjadi dasar penentuan kinerja CPHMA dalam penelitian ini. Semakin tinggi nilai MQ yang didapatkan maka semakin tinggi pula kemampuan CPHMA dalam menerima beban.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Stabilitas Marshall

Kode Sampel = A-10%

Pembacaan Arloji Stabilitas (o) = 44 div (diukur)

Faktor Kalibrasi (w) = 29,03 lbf/div (ditetapkan berdasarkan kalibrasi alat)

Angka Korelasi (x) = 1,14 (untuk volume 495 – 507 cm³)

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

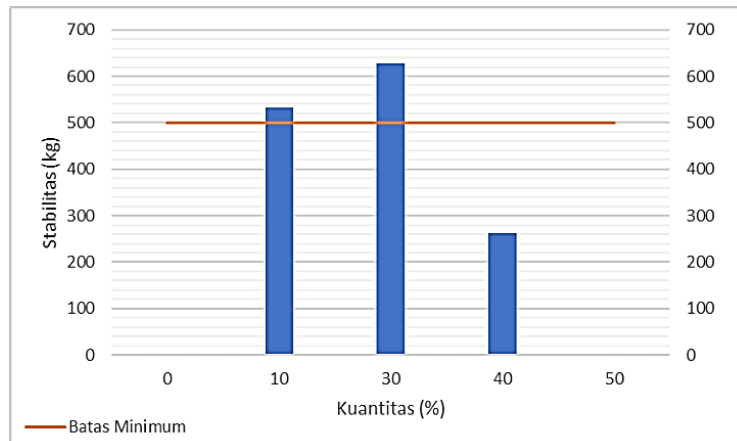
Nilai Stabilitas (p) = $o \cdot w = 46 \text{ div} \cdot 29,03 \text{ lbf/div} = 1335,38 \text{ lbf}$

Nilai Stabilitas (q) = $p \cdot y \cdot x = 1335,38 \text{ lbf} \cdot 0,45 \text{ kg/lbf} \cdot 1,14 = 691,14 \text{ kg}$

Tabel 16. Hasil Perhitungan Stabilitas Marshall

	No.	Kode	Pembacaan Arloji Stabilitas	Faktor Kalibrasi	Angka Korelasi	Konversi lbf ke kg	Nilai Stabilitas	Nilai Stabilitas	Rerata
Satuan			Div	lbf/div		kg/lbf	lbf	kg	kg
Notasi			(o)	(w)	(x)	(y)	(p)	(q)	
	1	A-10%	46	29.03	1,14	0,45	1335,38	691,14	533,38
	2	B-10%	34	29.03	1,14	0,45	987,02	510,84	
	3	C-10%	35	29.03	1,14	0,45	1016,05	525,87	
	4	D-10%	35,5	29.03	1,14	0,45	1030,57	533,38	
	5	E-10%	27	29.03	1,14	0,45	783,81	405,67	
	6	A-30%	55	29.03	1,14	0,45	1596,65	826,36	627,48
	7	B-30%	44	29.03	1,14	0,45	1277,32	661,09	
	8	C-30%	33	29.03	1,09	0,45	957,99	474,07	
	9	D-30%	42	29.03	1,19	0,45	1219,26	658,72	
	10	E-30%	36	29.03	1,09	0,45	1045,08	517,17	

	11	A-40%	18	29.03	1,09	0,45	522,54	258,58	261,22
	12	B-40%	20	29.03	1,14	0,45	580,60	300,50	
	13	C-40%	17	29.03	1,09	0,45	493,51	244,22	
	14	D-40%	14	29.03	1,09	0,45	406,42	201,12	
	15	E-40%	21	29.03	1,09	0,45	609,63	301,68	



Gambar 11. Grafik Perbandingan Stabilitas Vs Kuantitas Pelarut

Berdasarkan nilai stabilitas marshall yang didapatkan dari hasil pengujian, dapat diketahui bahwa kuantitas minyak kemiri sebagai pelarut 10% dan 30% memiliki kemampuan di atas batas minimum uji marshall. Sedangkan untuk sampel dengan kuantitas minyak kemiri 40% tidak dapat memenuhi batas minimum nilai stabilitas. Nilai stabilitas tertinggi didapatkan dari variasi kuantitas pelarut 30% dengan rerata nilai stabilitas sebesar 627,48 kg. Semakin tinggi nilai stabilitas maka akan menghasilkan perkerasan yang lebih baik, karena menunjukkan beban maksimal yang dapat didukung oleh perkerasan.

4.2 Flow

Kode Sampel = A-10%

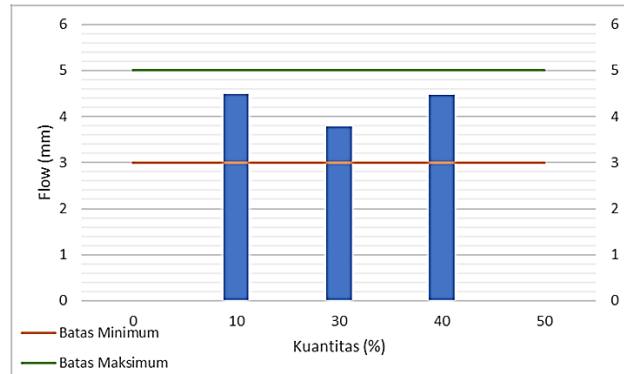
Pembacaan Arloji *Flow* (r) = 158 div (diukur)

Nilai *Flow* = $r \cdot 0,01 \text{ mm/div} = 158 \text{ div} \cdot 0,01 \text{ mm/div} = 1,58 \text{ mm}$

Tabel 17. Hasil Perhitungan Nilai *Flow*

	No.	Kode	Pembacaan	Nilai <i>Flow</i>	Rerata
Satuan			div	mm	mm
Notasi			(r)		
	1	A-10%	158	1,58	4,49
	2	B-10%	300	3,00	
	3	C-10%	400	4,00	
	4	D-10%	498	4,98	
	5	E-10%	450	4,50	
	6	A-30%	89	0,89	3,78
	7	B-30%	399	3,99	
	8	C-30%	358	3,58	
	9	D-30%	89	0,89	
	10	E-30%	32	0,32	

	11	A-40%	6	0,06	4,49
	12	B-40%	281	2,81	
	13	C-40%	28	0,28	
	14	D-40%	595	5,95	
	15	E-40%	469	4,69	



Gambar 12. Grafik Perbandingan *Flow* Vs Kuantitas Pelarut

Nilai *flow* tertinggi didapatkan dari variasi kuantitas pelarut 10% dan 40% dengan rerata nilai *flow* sebesar 4,49 mm. Idealnya, semakin tinggi nilai *flow* maka akan menghasilkan perkerasan yang lebih baik, karena nilai *flow* berbanding lurus dengan nilai stabilitas. Jika nilai *flow* relatif besar maka akan dibutuhkan pembebanan yang besar pula untuk menyebabkan deformasi pada perkerasan. Tetapi dalam penelitian ini ketentuan *flow* tersebut tidak berlaku, yang mengindikasikan bahwa perkerasan dengan nilai stabilitas tertinggi hanya bertahan untuk durasi yang relatif singkat atau dengan kata lain, kekuatan maksimal hanya dapat diberikan pada awal umur perkerasan.

4.3 Void in Mineral Agregat (VMA)

Kode Sampel = A-10%

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

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

Berat Kering Briket (c) = 1000,5 gr (ditimbang)

Berat SSD Briket (d) = 1032,4 gr (ditimbang)

Berat dalam Air Briket (e) = 561 gr (ditimbang)

Berat Isi Briket (f) = $d - e = 1032,4 \text{ gr} - 561 \text{ gr} = 471,40 \text{ gr}$

Berat Isi Benda Uji Briket (g) = $c / f = 1000,5 \text{ gr} / 471,40 \text{ gr} = 2,12 \text{ gr}$

Berat Campuran = 1000 gr (ketetapan AASHTO)

Berat Aspal = $b \cdot c = 6\% \cdot 1000,5 \text{ gr} = 60,03 \text{ gr}$

Berat Pelarut = $10\% \cdot \text{Berat Asbuton} = 10\% \cdot 239 \text{ gr} = 23,9 \text{ gr}$

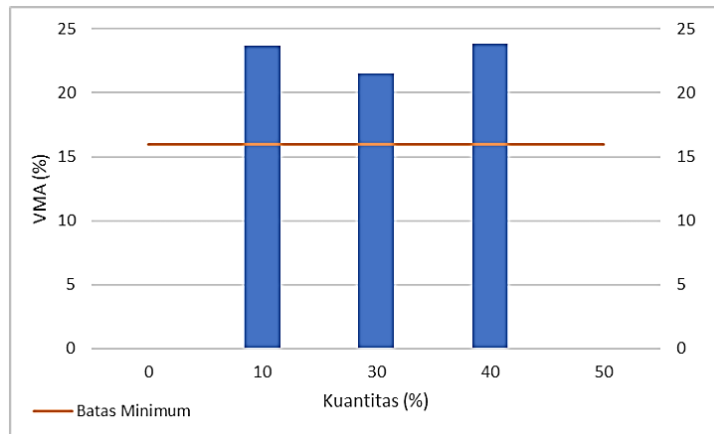
Berat Agregat = $\text{Berat Campuran} - \text{Berat Aspal} - \text{Berat Pelarut}$
 $= 1000 \text{ gr} - 60,03 \text{ gr} - 23,9 \text{ gr} = 916,07 \text{ gr}$

$$\begin{aligned}
 \text{BJ Air} &= 1 \text{ gr/cm}^3 \text{ (ketetapan)} \\
 \text{Volume Campuran} &= (c - e) / \text{BJ Air} \\
 &= (1000,5 \text{ gr} - 561 \text{ gr}) / 1 \text{ gr/cm}^3 = 439,50 \text{ cm}^3 \\
 \text{BJ Aspal (v)} &= 1,04 \text{ gr/cm}^3 \text{ (ketetapan)} \\
 \text{Volume Aspal} &= (b \cdot c) / v = (6\% \cdot 1000,5 \text{ gr}) / 1,04 \text{ gr/cm}^3 = 57,89 \text{ cm}^3 \\
 \text{BJ Pelarut} &= 0,92 \text{ gr/cm}^3 \text{ (ketetapan)} \\
 \text{Volume Pelarut} &= \text{Berat Pelarut} / \text{BJ Pelarut} \\
 &= 23,9 \text{ gr} / 0,92 \text{ gr/cm}^3 = 25,98 \text{ cm}^3 \\
 \text{Volume Agregat} &= \text{Volume Campuran} - \text{Volume Aspal} - \text{Volume Pelarut} \\
 &= 439,50 \text{ cm}^3 - 57,89 \text{ cm}^3 - 25,98 \text{ cm}^3 = 355,63 \text{ cm}^3 \\
 \text{BJ Agregat (u)} &= \text{Berat Agregat} / \text{Volume Agregat} \\
 &= 916,07 \text{ gr} / 355,63 \text{ cm}^3 = 2,58 \text{ gr/cm}^3 \\
 \text{(j)} &= (t \cdot g) / u = (0,94 \cdot 2,12 \text{ gr}) / 2,58 \text{ gr/cm}^3 = 0,77 \\
 \text{VMA} &= 100\% - j = 100\% - 0,77 = 0,23 = 23\%
 \end{aligned}$$

Tabel 18. Hasil Perhitungan VMA

No.	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
1	A-10%	6	0,94	1000,5	1032,4	561	471,40	2,12	1000	60,03	23,9
2	B-10%	6	0,94	984,6	1021,2	551	470,20	2,09	1000	59,08	23,9
3	C-10%	6	0,94	1002,8	1042,5	563	479,50	2,09	1000	60,17	23,9
4	D-10%	6	0,94	994,8	1034,9	559	475,90	2,09	1000	59,69	23,9
5	E-10%	6	0,94	998,8	1035,6	561	474,60	2,10	1000	59,93	23,9
6	A-30%	6	0,94	1023,9	1032,9	562	470,90	2,17	1000	61,43	71,7
7	B-30%	6	0,94	1040	1039,9	568	471,90	2,20	1000	62,40	71,7
8	C-30%	6	0,94	1058,3	1058,1	573	485,10	2,18	1000	63,50	71,7
9	D-30%	6	0,94	1008,2	1023,5	560	463,50	2,18	1000	60,49	71,7
10	E-30%	6	0,94	1043,6	1046,2	560	486,20	2,15	1000	62,62	71,7
11	A-40%	6	0,94	1046,5	1047,5	564	483,50	2,16	1000	62,79	95,6
12	B-40%	6	0,94	1036,4	1036,4	566	470,40	2,20	1000	62,18	95,6
13	C-40%	6	0,94	1055,5	1057,9	567	490,90	2,15	1000	63,33	95,6
14	D-40%	6	0,94	1041,1	1043,7	560	483,70	2,15	1000	62,47	95,6
15	E-40%	6	0,94	1041,1	1050,4	563	487,40	2,14	1000	62,47	95,6

Berat Agregat	BJ Air	Volume Campuran	BJ Aspal	Volume Aspal	BJ Pelarut	Volume Pelarut	Volume Agregat	BJ Agregat		VMA	rerata
gr	gr/cm ³	cm ³	gr/cm ³	cm ³	gr/cm ³	cm ³	cm ³	gr/cm ³		%	%
			(v)					(u)	(j)		
916,07	1	439,50	1,04	57,89	0,92	25,98	355,63	2,58	0,77	23	24
917,02	1	433,60	1,04	56,97	0,92	25,98	350,65	2,62	0,75	25	
915,93	1	439,80	1,04	58,02	0,92	25,98	355,80	2,57	0,76	24	
916,41	1	435,80	1,04	57,56	0,92	25,98	352,26	2,60	0,76	24	
916,17	1	437,80	1,04	57,79	0,92	25,98	354,03	2,59	0,76	24	
866,87	1	461,90	1,04	59,24	0,92	77,93	324,72	2,67	0,77	23	21,6
865,90	1	472,00	1,04	60,17	0,92	77,93	333,89	2,59	0,80	20	
864,80	1	485,30	1,04	61,23	0,92	77,93	346,13	2,50	0,82	18	
867,81	1	448,20	1,04	58,33	0,92	77,93	311,93	2,78	0,73	27	
865,68	1	483,60	1,04	60,38	0,92	77,93	345,28	2,51	0,80	20	
841,61	1	482,50	1,04	60,55	0,92	103,91	318,04	2,65	0,77	23	23,8
842,22	1	470,40	1,04	59,97	0,92	103,91	306,52	2,75	0,75	25	
841,07	1	488,50	1,04	61,07	0,92	103,91	323,52	2,60	0,78	22	
841,93	1	481,10	1,04	60,24	0,92	103,91	316,95	2,66	0,76	24	
841,93	1	478,10	1,04	60,24	0,92	103,91	313,95	2,68	0,75	25	



Gambar 13. Grafik Perbandingan VMA Vs Kuantitas Pelarut

Dari perhitungan di atas, dapat disimpulkan bahwa semua sampel dengan pelarut minyak kemiri kadar 10%, 30%, dan 40% memiliki prosentase VMA di atas batas minimum. Nilai VMA tertinggi didapatkan dari variasi kuantitas pelarut 10% dan 40% dengan rerata nilai VMA sebesar 24%. Semakin tinggi nilai VMA maka akan menghasilkan perkerasan yang lebih baik, karena rongga yang tersedia untuk diisi oleh aspal akan semakin besar.

4.4 Void in Mixture (VIM)

Kode Sample = A-10%

Berat Isi Benda Uji Briket (g) = 2,12 gr (dari perhitungan VMA)

% Agregat terhadap Campuran (t) = 0,94 (dari perhitungan VMA)

BJ Agregat (u) = 2,58 gr/cm³ (dari perhitungan VMA)

% Aspal terhadap Campuran (b) = 6% (dari perhitungan VMA)

BJ Aspal (v) = 1,04 gr/cm³ (dari perhitungan VMA)

BJ Maksimum (h) = $100 / \{[(t / u) 100] + [(b / v) 100]\}$
 $= 100 / \{[(0,94 / 2,58 \text{ gr/cm}^3) 100] + [(6\% / 1,04 \text{ gr/cm}^3) 100]\}$
 $= 2,37 \text{ gr/cm}^3$

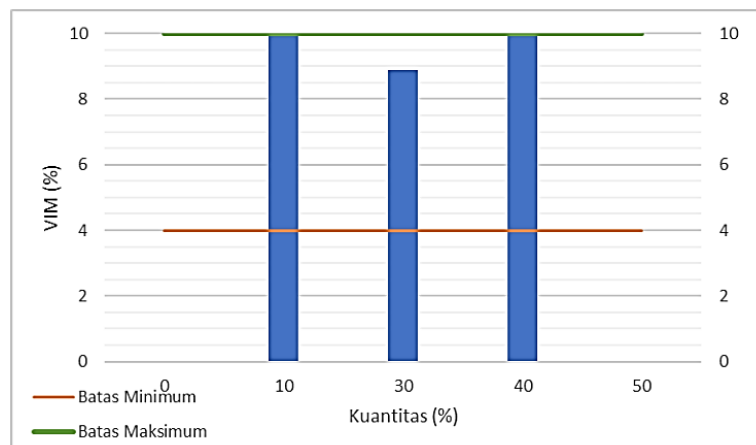
VIM = $100\% - (100\% (g / h))$
 $= 100\% - (100\% (2,12 / 2,37)) = 0,1 = 10\%$

Tabel 19. Hasil Perhitungan VIM

	No.	Kode	Berat Isi Benda Uji Briket	% Agregat terhadap Campuran	BJ gregat	% Aspal terhadap Campuran	BJ Aspal	BJ Maks	VIM	Rerata
Satuan			gr	%	gr/cm ³	%	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%
Notasi			(g)	(t)	(u)	(b)	(v)	(h)		
	1	A-10%	2,12	0,94	2,58	6	1,04	2,37	10	11,6
	2	B-10%	2,09	0,94	2,62	6	1,04	2,40	13	
	3	C-10%	2,09	0,94	2,57	6	1,04	2,36	12	
	4	D-10%	2,09	0,94	2,60	6	1,04	2,39	12	
	5	E-10%	2,10	0,94	2,59	6	1,04	2,37	11	

	6	A-30%	2,17	0,94	2,67	6	1,04	2,44	11	8,8
	7	B-30%	2,20	0,94	2,59	6	1,04	2,38	7	
	8	C-30%	2,18	0,94	2,50	6	1,04	2,30	5	
	9	D-30%	2,18	0,94	2,78	6	1,04	2,53	14	
	10	E-30%	2,15	0,94	2,51	6	1,04	2,31	7	
	11	A-40%	2,16	0,94	2,65	6	1,04	2,42	11	11,4
	12	B-40%	2,20	0,94	2,75	6	1,04	2,50	12	
	13	C-40%	2,15	0,94	2,60	6	1,04	2,38	10	
	14	D-40%	2,15	0,94	2,66	6	1,04	2,43	11	
	15	E-40%	2,14	0,94	2,68	6	1,04	2,45	13	

Dapat disimpulkan dari perhitungan nilai VIM yang telah dibuat, prosentase rongga di dalam campuran ketiga varian memenuhi batas minimum. Nilai VIM tertinggi didapatkan dari variasi kuantitas pelarut 10% dan 40% dengan rerata nilai VIM sebesar 10%. Nilai VIM diatas batas standar akan menyebabkan perkerasan mudah keropos karena rongga yang terisi udara relatif besar. Adapun nilai VIM dibawah standar akan menyebabkan perkerasan tidak leluasa bersifat elastis sehingga akan mempercepat timbulnya patahan (retakan).



Gambar 14. Grafik Perbandingan Nilai VIM (%) terhadap Kuantitas Minyak Kemiri (%)
4.5 Void Filled with Bitumen (VFB)

Kode Sample = A-10%

% Aspal terhadap Campuran (b) = 6% (dari perhitungan VMA)

Berat Isi Benda Uji Briket (g) = 2,12 gr (dari perhitungan VMA)

BJ Aspal (v) = 1,04 gr/cm³ (dari perhitungan VMA)

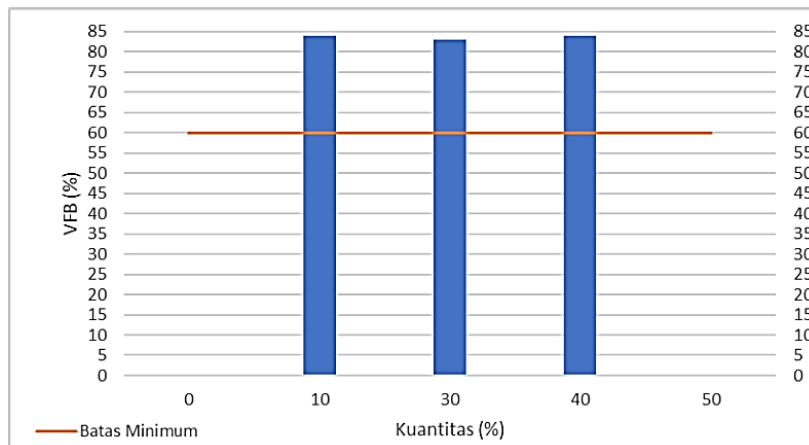
(i) = $(b \cdot g) / v = (6\% \cdot 2,13) / 1,04 = 0,12$

(j) = 0,77 (dari perhitungan VMA)

VFB = $100\% - (i / j) = 100\% - (0,12 / 0,77) = 0,84 = 84\%$

Tabel 20. Hasil Perhitungan 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	A-10%	6	2,12	1,04	0,12	0,77	84	84
	2	B-10%	6	2,09	1,04	0,12	0,75	84	
	3	C-10%	6	2,09	1,04	0,12	0,76	84	
	4	D-10%	6	2,09	1,04	0,12	0,76	84	
	5	E-10%	6	2,10	1,04	0,12	0,76	84	
	6	A-30%	6	2,17	1,04	0,13	0,77	84	84
	7	B-30%	6	2,20	1,04	0,13	0,80	84	
	8	C-30%	6	2,18	1,04	0,13	0,82	85	
	9	D-30%	6	2,18	1,04	0,13	0,73	83	
	10	E-30%	6	2,15	1,04	0,12	0,80	85	
	11	A-40%	6	2,16	1,04	0,13	0,77	84	84
	12	B-40%	6	2,20	1,04	0,13	0,75	83	
	13	C-40%	6	2,15	1,04	0,12	0,78	84	
	14	D-40%	6	2,15	1,04	0,12	0,76	84	
	15	E-40%	6	2,14	1,04	0,12	0,75	83	


Gambar 15. Grafik Perbandingan nilai VFB Vs Kuantitas

Dari data di atas, didapatkan bahwa prosentase rongga yang terisi aspal memenuhi batas minimum dengan nilai VFB ketiga variasi adalah sebesar 84%. Jika KAO telah ditentukan, maka semakin rendah tinggi VFB maka semakin baik perkerasan, karena menandakan semakin banyak kadar aspal yang mengikat agregat tetapi dalam batas kadar aspal yang dibutuhkan oleh perkerasan.

4.6 Marshall Quotient (MQ)

Kode Sampel = A-10%

Nilai Stabilitas (q) = 691,14 kg (dari perhitungan stabilitas marshall)

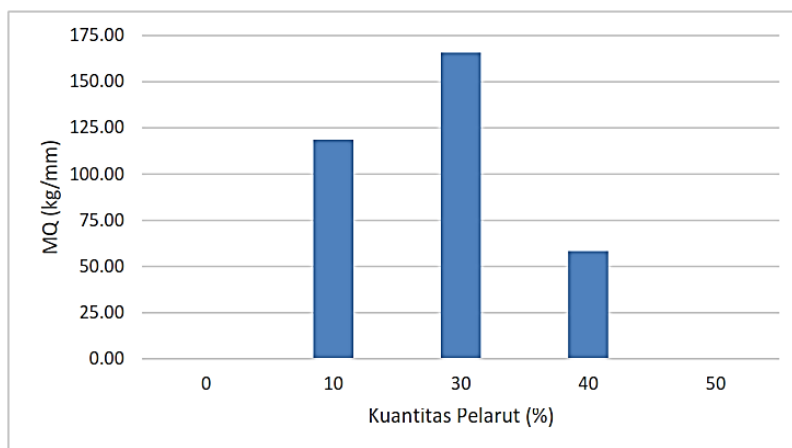
Nilai Flow = 1,58 mm (dari perhitungan flow)

MQ = $q / \text{nilai flow} = 691,14 \text{ kg} / 1,58 \text{ mm} = 437,43 \text{ kg/mm}$

Tabel 21. Hasil Perhitungan MQ

	No.	Kode	Nilai Stabilitas	Nilai <i>Flow</i>	MQ	Rerata
Satuan			kg	mm	kg/mm	kg/mm
Notasi			(q)			
	1	A-10%	691,14	1,58	437,43	124,75
	2	B-10%	510,84	3,00	170,28	
	3	C-10%	525,87	4,00	131,47	
	4	D-10%	533,38	4,98	107,10	
	5	E-10%	405,67	4,50	90,15	
	6	A-30%	826,36	0,89	928,50	165,78
	7	B-30%	661,09	3,99	165,69	
	8	C-30%	474,07	3,58	132,42	
	9	D-30%	658,72	0,89	740,13	
	10	E-30%	517,17	0,32	1616,15	
	11	A-40%	258,58	0,06	4309,74	68,35
	12	B-40%	300,50	2,81	106,94	
	13	C-40%	244,22	0,28	872,21	
	14	D-40%	201,12	5,95	33,80	
	15	E-40%	301,68	4,69	64,32	

Data yang dicoret pada tabel di atas adalah data yang tidak digunakan dalam perhitungan rerata, karena nilainya tidak valid. Nilai dinyatakan tidak valid karena nampak adanya perbedaan besaran dibandingkan dengan nilai yang lainnya. Nilai MQ tertinggi didapatkan dari variasi kuantitas pelarut 30% dengan rerata nilai MQ sebesar 165,78 kg/mm. Hal ini menunjukkan bahwa kuantitas pelarut 30% memberikan kekuatan tertinggi dalam penerimaan beban. Dibandingkan kedua variasi lainnya, dibutuhkan beban yang relatif besar untuk menyebabkan deformasi pada perkerasan per mm-nya.

**Gambar 16.** Grafik Hubungan MQ Vs Kuantitas

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan parameter marshall dari perkerasan dengan variasi kuantitas pelarut memenuhi persyaratan CPHMA, yaitu:

1. Nilai stabilitas tertinggi didapatkan dari variasi kuantitas pelarut 30% dengan rerata nilai stabilitas sebesar 627,48 kg di atas batas minimum yaitu 500 kg.
2. Nilai *flow* tertinggi didapatkan dari variasi kuantitas pelarut 10% dan 40% dengan rerata nilai *flow* sebesar 4,49 mm di atas batas minimum yaitu 3 mm.
3. Nilai VMA tertinggi didapatkan dari variasi kuantitas pelarut 10% dan 40% dengan rerata nilai VMA sebesar 24% di atas batas minimum yaitu 16%.
4. Nilai VIM tertinggi didapatkan dari variasi kuantitas pelarut 10% dan 40% dengan rerata nilai VIM sebesar 10% berada di atas batas minimum yaitu 4%.
5. Nilai VFB ketiga variasi adalah sebesar 84% berada di atas batas minimum 60%.
6. Nilai MQ tertinggi didapatkan dari variasi kuantitas pelarut 30% dengan rerata nilai MQ sebesar 165,78 kg/mm.

Jumlah minyak kemiri sebagai zat pelarut dapat mempengaruhi kinerja CPHMA. Kemampuan CPHMA menerima beban semakin bertambah dipengaruhi kuantitas pelarut yang digunakan, hal ini terlihat dari hasil uji marshall yang telah dilakukan. Semakin tinggi kadar minyak kemiri yang digunakan akan semakin baik pula performa CPHMA dalam menerima beban. Dalam penelitian ini variasi optimum ditinjau dari nilai MQ, karena nilai MQ menunjukkan beban maksimal yang diterima oleh perkerasan hingga mengalami deformasi setiap mm-nya. Semakin besar nilai MQ maka semakin besar pula ketahanan perkerasan terhadap beban yang diterima. Kinerja CPHMA terus meningkat seiring meningkatnya jumlah pelarut yang digunakan. Namun pada titik 40% kuantitas pelarut kinerja CPHMA mengalami penurunan, sehingga kuantitas pelarut terbaik adalah 30%. Nilai *flow* tidak sesuai dengan konsep dasar parameter marshall, dimana idealnya nilai *flow* berbanding lurus dengan nilai marshall, hal ini kemungkinan disebabkan oleh adanya kesalahan teknis pada arloji *flow*.

5.2 Saran

1. Penelitian dapat dilanjutkan dengan variasi perlakuan pada proses pemadatan.
2. Untuk mengantisipasi terjadinya kesalahan teknis pada arloji *flow*, maka untuk penelitian selanjutnya dapat ditambahkan jumlah sampelnya.

DAFTAR REFERENSI

- Departemen Pekerjaan Umum (2006) Pemanfaatan Asbuton Buku 1 Umum.
- Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan (2019) Uji Gelar Aspal Buton Full Ekstraksi. Available at: <http://www.pusjatan.pu.go.id/foto/detail/6/uji-gelar-aspalbuton-full-ekstraksi>.
- Djakfar, L. et al. (2019) Kajian Kinerja Campuran CPHMA Menggunakan Modifier Surfaktan Dan Asam Format. Malang.
- Djakfar, L., Wisnumurti and Khamelda, L. (2020a) Laporan Kemajuan PDD Lila Khamelda 2020. Malang.
- Djakfar, L., Wisnumurti and Khamelda, L. (2020b) 'Methods of Making Laboratory Scale CPHMA Specimens', International Journal of Engineering Trends and Technology, (Special Issue). Available at: <https://ijettjournal.org/special-issues/ijett-aiic102>.
- Djakfar, L., Wisnumurti and Khamelda, L. (2020c) The Evaluation of Using Vegetable Oil as Asbuton Solution on The Performance of CPHMA. Malang.
- Litbang PUPR (2021) Aspal Buton (Asbuton).
- Setiawan, A. (2021) 14 Manfaat Minyak Kemiri untuk Rambut. Available at: <https://www.viva.co.id/gaya-hidup/kesehatan-intim/1394002-14-manfaat-minyak-kemiri-untuk-rambut>.
- Sultra, A. (2020) Luhut Binsar Pandjaitan Kawal Implementasi Pemanfaatan Aspal Buton. Available at: <https://rubriksultra.com/luhut-binsar-pandjaitan-kawalimplementasi-pemanfaatan-aspal-buton/>.
- Sumantoro, I. (2019) Marwah Aspal Buton. Available at: <https://www.kompasiana.com/indrato/5e0144acd541df58642341c3/marwahaspal-buton>.
- Syukur, M. . A. (2016) STUDI LABORATORIUM KUAT TARIK BELAH CAMPURAN ASBUTON CAMPUR PANAS HAMPAR DINGIN.
- Thanaya, I. N. A. and Sparsa, A. A. A. (2017) 'Perbandingan Karakteristik Campuran Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) yang Dipadatkan Secara Dingin dan Panas', Jurnal Teknik Sipil, 24(3), pp. 247–256. doi: 10.5614/jts.2017.24.3.8.
- Yanwardhana, E. (2021) Mau Tahu Berapa Km Tol Sudah Dibangun Jokowi? Nih Datanya!