

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Aspal

Tahap awal penelitian diawali dengan pengujian karakteristik aspal konvensional sebelum dilakukan proses pencampuran dengan inovasi nano silika. Pengujian ini menggunakan aspal penetrasi 60/70 dan mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2). Adapun parameter yang diuji meliputi berat jenis aspal, titik leleh, daktilitas, penetrasi, serta titik nyala dan titik bakar aspal, yang bertujuan untuk memastikan bahwa aspal yang digunakan memenuhi standar mutu sebelum dimodifikasi dengan bahan tambahan nano silika.

4.1.1 Berat Jenis Aspal

Pengujian laboratorium yang bertujuan untuk perbandingan antara massa aspal terhadap massa air dengan volume yang sama dan menentukan nilai *specific gravity*. Berat jenis aspal menggambarkan kepadatan dan kemurnian aspal. Nilai ini berpengaruh langsung terhadap perhitungan proporsi campuran, stabilitas, dan daya ikat aspal terhadap agregat. Data pengujian ini menjadi dasar perencanaan dan evaluasi campuran sesuai spesifikasi teknis jalan (SNI 06-2441-2011). Data hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.1 dibawah.

Tabel 4. 1 Berat Jenis Aspal Pen 60/70

Pengujian		1	2
Berat Picno Kosong (A)	(gram)	42,6	42
Berat Picno + Air (B)	(gram)	69,2	68,4
Berat Picno + Aspal (C)	(gram)	61	60,2
Berat Picno + Air + Aspal (D)	(gram)	70	68,2
Berat Aspal (C-A)	(gram)	18,4	18,2
Isi Aspal (B-A)-(D-C)	(gram)	26,6 - 9 17,6	26,4 - 8 18,4
Pengujian		1	2
Berat Jenis Aspal (C-A)	(gram)	18,4	18,2
(B-A)-(D-C)		17,6	18,4
	(gram)	1,045	0,989
Berat Jenis Aspal Rerata	(gram)	1,017	

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil pengujian berat jenis aspal yang memenuhi ketentuan SNI 2441-2011 (nilai berat jenis aspal berkisar 1,00 – 1,10 gram) menunjukkan bahwa aspal memiliki

kualitas dan kepadatan yang baik, serta layak digunakan dikarenakan aspal pengujian kami bernilai 1,017 gram.

4.1.2 Titik Lembek Aspal

Titik lembek adalah suhu tertentu ketika aspal kehilangan kekakuannya dan mulai mencair perlahan. Nilai ini diperoleh melalui pengujian di laboratorium menggunakan metode cincin dan bola (*ring and ball method*) berdasarkan SNI 2434-2011. Parameter titik lembek penting untuk menilai ketahanan termal aspal, terutama dalam kondisi lingkungan bersuhu tinggi dan lalu lintas padat. Data hasil pengujian titik lembek aspal dapat dilihat pada tabel 4.2 dibawah.

Tabel 4. 2 Titik Lembek Aspal Pen 60/70

No.	Suhu Yang Diamati (°C)	Waktu (menit)	Keterangan	
			I	II
1	5	02:03		
2	10	04:54		
3	15	06:52		
4	20	08:30		
5	25	10:55		
6	30	11:42		
7	35	12:41		
8	40	13:19		
9	45	15:25		
10	50	16:39	Mulai Melentur	
11	55	18:17	Benda Uji Jatuh	Mulai Melentur
12	57,3	19:02		Benda Uji Jatuh
13	Rata - rata	=	56,15	

Sumber : Hasil Penelitian

Berpacu pada SNI 2434-2011 menyatakan titik lembek aspal mempunyai temperature 48°C - 58°C, dan hasil dari pengujian kami mendapatkan hasil 56,15°C yang berarti layak digunakan.

4.1.3 Daktilitas Aspal

Daktilitas aspal merupakan ukuran kemampuan aspal untuk mengalami perpanjangan tanpa terputus ketika ditarik pada suhu tertentu. Sifat ini mencerminkan tingkat elastisitas dan kekuatan ikatan aspal terhadap agregat. Pengujian daktilitas dilakukan untuk mengetahui jarak maksimum aspal dapat meregang sebelum putus serta menilai ketahanannya terhadap retak akibat

perubahan suhu dan beban lalu lintas. Uji ini dilaksanakan pada suhu 25°C dengan kecepatan 5 cm/menit menggunakan alat daktilitas, mengacu pada SNI 2432-2011. Data hasil pengujian daktilitas dapat dilihat pada tabel 4.3 dibawah.

Tabel 4. 3 Daktilitas Aspal Pen 60/70

Pengujian Daktilitas Aspal	
Pengamatan 1 (cm)	146
Pengamatan 2 (cm)	142
Rata-rata	144

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan SNI 2432-2011 yang menyatakan nilai daktilitas aspal pen 60/70 ≥ 100 cm, dan hasil pengujian kami mendapatkan hasil daktilitas 144 cm, yang berarti sesuai atau layak digunakan.

4.1.4 Penetrasi Aspal

Berdasarkan SNI 2456-2011, pengujian penetrasi aspal dilakukan untuk menentukan tingkat kekerasan aspal dengan cara mengukur kedalaman jarum standar yang menembus sampel aspal pada suhu 25°C, beban 100 gram, dan waktu 5 detik. Nilai penetrasi yang diperoleh menunjukkan tingkat kekentalan atau konsistensi aspal, yang berpengaruh terhadap pemilihan jenis aspal sesuai kondisi iklim dan lalu lintas. Hasil pengujian dinyatakan dalam satuan 0,1 mm. Data hasil pengujian penetrasi dapat dilihat pada tabel 4.4 dibawah.

Tabel 4. 4 Penetrasi Aspal Pen 60/70

	1	2
Pengamatan 1	63	66
Pengamatan 2	64	63
Pengamatan 3	65	61
Pengamatan 4	66	62
Pengamatan 5	64	66
Rerata	64,4	63,6
Rata - rata	64	

Sumber : Hasil Penelitian

Mengacu pada SNI 2456-2011 rentang nilai penetrasi 60-70 mm, sedangkan hasil pengujian yang kami lakukan mendapatkan 64 mm yang berarti sesuai dan memenuhi persyaratan .

4.1.5 Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal

Titik nyala aspal merupakan suhu terendah ketika uap yang dihasilkan dari permukaan aspal mulai menyala saat diberi sumber api, sedangkan titik bakar adalah suhu di mana aspal tetap menyala walaupun sumber api telah dihilangkan. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik keamanan aspal terhadap panas serta perilaku penguapannya selama penyimpanan dan penggunaan di lapangan. Prosedur pengujian dilakukan berdasarkan SNI 2433-2011. Data hasil pengujian titik nyala dan titik bakar dapat dilihat pada tabel 4.5 dibawah.

Tabel 4. 5 Titik Nyala dan Titik Bakar Pen 60/70

No.	Suhu Yang Diamati (°C)	Waktu (menit)	Keterangan	
			Titik Nyala	Titik Bakar
1	55	00:00		
2	60	03:00		
56	330	21:35		
57	335	22:47		
58	340	23:30		
59	345	24:35:00	Titik Nyala	
60	350	24:59:00		
61	355	25:34:00		
62	360	26:19:00		Titik Bakar

Sumber : Hasil Penelitian

Mengacu pada SNI 2433-2011 menyatakan persyaratan nilai titik nyala aspal $\geq 220^{\circ}\text{C}$ dan titik bakar $\geq 250^{\circ}\text{C}$,sedangkan hasil pengujian yang telah dilakukan mendapatkan nilai titik nyala 345°C dan titik bakar 360°C yang menandatkan aspal layak digunakan dan memenuhi persyaratan.

Rekapitulasi dari keseluruhan hasil pengujian karakteristik aspal yang telah dilakukan maka memperoleh hasil menandakatan seluruh pengujian material yang kami lakukan telah lolos dan layak dikarenakan memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018 (Revisi 2). Ditampilkan pada tabel 4.6 dibawah.

Tabel 4. 6 Rekapitulasi Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70

No.	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Aspal Pen 60/70	Keterangan
1	Berat Jenis Aspal	$\geq 1,0$	1,017	Memenuhi
2	Titik Lembek Aspal	≥ 48	56,15	Memenuhi
3	Daktilitas Aspal	≥ 100	144	Memenuhi
4	Penetrasi Aspal	60 – 70	64	Memenuhi
5	Titik Nyala	≥ 232	345	Memenuhi
6	Titik Bakar	≥ 232	360	Memenuhi

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik aspal penetrasi 60/70, seluruh parameter yang diuji menunjukkan nilai yang memenuhi spesifikasi umum Bina Marga 2018 (Revisi 2). Nilai berat jenis aspal sebesar 1,017 telah melampaui batas minimum 1,0, menunjukkan kepadatan material yang baik. Titik lembek aspal mencapai 56,15°C, lebih tinggi dari standar minimum 48°C, menandakan ketahanan yang baik terhadap suhu tinggi. Nilai daktilitas sebesar 144 cm juga melebihi persyaratan minimum 100 cm, yang menunjukkan tingkat kelenturan aspal yang sangat baik.

Selain itu, hasil penetrasi aspal sebesar 64 masih berada dalam rentang spesifikasi 60–70, yang menandakan kekerasan aspal berada pada tingkat ideal untuk digunakan pada perkerasan lentur. Sementara itu, hasil titik nyala sebesar 345°C dan titik bakar sebesar 360°C menunjukkan bahwa aspal memiliki stabilitas termal tinggi dan aman terhadap risiko pembakaran saat proses pemanasan. Dengan demikian, seluruh hasil pengujian menunjukan bahwa aspal penetrasi 60/70 layak digunakan sebagai bahan dasar dalam penelitian ini.

4.2 Pengujian Material

Pengujian material dilakukan untuk mengetahui mutu dan kesesuaian bahan sebelum digunakan dalam campuran. Pengujian terhadap agregat kasar meliputi berat jenis dan penyerapan, keausan (*Los Angeles Abrasion*), serta kelekatan dengan aspal. Sedangkan agregat halus, dilakukan pengujian berat jenis dan penyerapan.

4.2.1 Agragat Kasar

1. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan

Pengujian berat jenis dilakukan untuk mengetahui hubungan antara massa volume agregat dan massa volume air pada kondisi suhu yang sama. Berat jenis agregat dipengaruhi oleh jumlah pori di dalamnya; semakin besar pori, semakin rendah nilai berat jenis. Agregat dengan berat jenis rendah lebih mudah menyerap aspal, sehingga durabilitas campuran menurun. Sebaliknya, berat jenis tinggi menunjukkan agregat padat yang lebih tahan terhadap kerusakan, meskipun berisiko menyebabkan *bleeding*. Adapun penyerapan agregat merupakan kemampuan material untuk menahan air yang masuk melalui pori-porinya.

Pengujian berat jenis dan penyerapan melalui perhitungan untuk mendapatkan hasil berikut :

a. Agragat Kasar $\frac{3}{4}$

- Berat benda uji kering oven (BK) = 984 gr
- Berat benda uji kering permukaan jenuh (BJ) = 1000 gr
- Berat benda uji dalam air (BA) = 625 gr

Dari data pengolahan diatas dapat dilakukan perhitungan :

$$\begin{aligned}\bullet \text{ Berat Jenis curah (bulk)} &= \frac{BK}{BJ - BA} \\ &= \frac{984}{1000-625} \\ &= 2,642 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bullet \text{ Berat jenis kering permukaan (SSD)} &= \frac{BJ}{BJ - BA} \\ &= \frac{1000}{1000 - 625}\end{aligned}$$

$$= 2,667 \text{ kg/m}^3$$

- Berat jenis semua (*apparent*) =
$$\frac{BK}{BK - BA}$$

$$= \frac{984}{984 - 625}$$

$$= 2,741 \text{ kg/m}^3$$

- Penyerapan =
$$\frac{BJ - BA}{BK} \times 100\%$$

$$= \frac{(1000-625)}{984} \times 100\%$$

$$= 1,626 \%$$

b. Agregat Kasar $\frac{1}{2}$

- Berat benda uji kering oven (BK) = 985 gr
- Berat benda uji kering permukaan jenuh (BJ) = 1000 gr
- Berat benda uji dalam air (BA) = 670 gr

Dari data pengolahan diatas dapat dilakukan perhitungan :

- Berat jenis curah (bulk) =
$$\frac{BK}{BJ - BA}$$

$$= \frac{985}{1000-670}$$

$$= 2,985 \text{ kg/m}^3$$

- Berat jenis kering permukaan (SSD) =
$$\frac{BJ}{BJ - BA}$$

$$= \frac{1000}{1000-670}$$

$$= 3,030 \text{ kg/m}^3$$

- Berat jenis semu (apparent) =
$$\frac{BK}{BK - BA}$$

$$= \frac{985}{985-670}$$

$$= 3,127 \text{ kg/m}^3$$

- Penyerapan =
$$\frac{BJ-BA}{BK} \times 100\%$$

$$= \frac{(1000-670)}{985} \times 100\%$$

$$= 1,523\%$$

Dari hasil pengujian, diperoleh bahwa berat jenis agregat kasar ukuran $\frac{3}{4}$ inci sebesar $2,624 \text{ kg/m}^3$ dan agregat kasar ukuran $\frac{1}{2}$ inci sebesar $2,985 \text{ kg/m}^3$. Nilai tersebut sesuai dengan ketentuan spesifikasi yang mensyaratkan berat jenis agregat minimal $2,5 \text{ kg/m}^3$. Adapun penyerapan agregat $\frac{3}{4}$ inci sebesar $1,626\%$ dan agregat $\frac{1}{2}$ inci sebesar $1,523\%$, keduanya memenuhi batas maksimum 3% sebagaimana tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2).

2. *Lost Angeles Abrasion Test*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana agregat kasar mampu bertahan terhadap keausan yang disebabkan oleh gesekan dan benturan. Dari hasil pengujian diperoleh nilai abrasi agregat yang masih berada dalam batas ketentuan SNI 2417:2008, di mana batas maksimum kehilangan berat agregat untuk lapisan perkerasan jalan ditetapkan sebesar 40% .

a. Benda Uji 1

- Berat awal (a1) = 5000 gr
- Berat akhir (b1) = 3790 gr

b. Benda Uji 2

- Berat awal (a2) = 5000 gr
- Berat akhir (b2) = 4015 gr

Dari pengujian *lost angeles abrasion* didapatkan data pengujian berikut :

- $$\begin{aligned} \bullet \text{ Keausan 1} &= \frac{a_1 - b_1}{a_1} \times 100\% \\ &= \frac{(5000 - 3790)}{5000} \times 100\% \\ &= 24,2\% \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} \bullet \text{ Keausan 2} &= \frac{a_2 - b_2}{a_2} \times 100\% \\ &= \frac{(5000 - 4015)}{5000} \times 100\% \\ &= 19,7\% \end{aligned}$$
- $$\bullet \text{ Keausan rata - rata} = 21,95$$

Didapatkan nilai sebesar 21,95 dari data pengujian diatas yang memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2) $\leq 40\%$.

3. Pengujian Kelekatan Agregat Terhadap Aspal

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui persentase luas permukaan agregat yang tertutup oleh aspal. Nilai kelekatan diperoleh melalui pengamatan visual terhadap kemampuan aspal menempel pada permukaan agregat. Berdasarkan hasil pengujian, agregat masih tertutup aspal secara menyeluruh tanpa terlihat adanya pengelupasan, sehingga tingkat kelekatan agregat terhadap aspal dapat dikategorikan baik, yakni $\geq 95\%$, sesuai dengan ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2).

Dari keseluruhan data pengujian diatas didapatkan rekapitulasi karakteristik aspal, yang dapat disimpulkan pengujian ini memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2). Rekapitulasi pengujian material agregat kasar dapat dilihat pada tabel 4.7 dibawah ini.

Tabel 4. 7 Rekapitulasi Pengujian Material Agregat Kasar

No.	Jenis Pengujian		Spesifikasi	Hasil Pengujian	Keterangan
1	Berat Jenis	Agregat $\frac{3}{4}$	$\geq 2,5$	2,624	Memenuhi
		Agregat $\frac{1}{2}$		2,985	
2	Penyerapan	Agregat $\frac{3}{4}$	≤ 3	1,626	Memenuhi
		Agregat $\frac{1}{2}$		1,523	
3	Lost Angeles Abrasion Test		≤ 40	21,95	Memenuhi
4	Kelekatan Agregat Terhadap Aspal		≥ 95	99	Memenuhi

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil rekapitulasi pengujian agregat kasar, seluruh parameter yang diuji menunjukkan hasil yang memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2). Nilai berat jenis agregat untuk agregat $\frac{3}{4}$ inci sebesar 2,624 dan agregat $\frac{1}{2}$ inci sebesar 2,985, keduanya melebihi batas minimum 2,5, yang menunjukkan bahwa agregat memiliki kepadatan dan kekuatan yang baik sebagai material penyusun campuran aspal. Hasil pengujian penyerapan air juga memenuhi syarat, yaitu 1,626% untuk agregat $\frac{3}{4}$ inci dan 1,523% untuk agregat $\frac{1}{2}$ inci, masih berada di bawah batas maksimum 3%, menandakan agregat memiliki porositas rendah dan tidak mudah menyerap air.

Selanjutnya, hasil uji keausan dengan alat *Los Angeles Abrasion Test* menunjukkan nilai 21,95%, jauh di bawah batas maksimum 40%, yang mengindikasikan agregat memiliki ketahanan aus yang tinggi terhadap beban lalu lintas. Selain itu, hasil pengujian kelekatan agregat terhadap aspal menunjukkan nilai 99%, melebihi syarat minimum 95%, sehingga agregat dinyatakan memiliki daya lekat yang sangat baik terhadap aspal. Dengan demikian, secara keseluruhan agregat yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi standar mutu dan layak digunakan sebagai bahan penyusun campuran aspal porus.

4.2.2 Agragat Halus

1) Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk membandingkan berat volume agregat dengan berat volume air pada suhu yang sama. Hubungan antara berat jenis dan porositas agregat bersifat berlawanan; agregat dengan berat jenis rendah memiliki

pori-pori lebih besar, sehingga mampu menyerap aspal dalam jumlah lebih banyak dan menurunkan durabilitas campuran. Sebaliknya, agregat dengan berat jenis tinggi cenderung memiliki ketahanan yang lebih baik, namun berisiko menyebabkan *bleeding*. Sementara itu, penyerapan agregat menggambarkan seberapa besar kemampuan agregat dalam menyerap air ke dalam pori-porinya.

Pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus dihitung untuk mendapatkan hasil berikut :

a. Abu Batu

- Berat benda uji kering permukaan jenuh (SSD) = 500 gr
- Berat benda uji kering oven (BK) = 494 gr
- Berat *picnometer* + air 25°C (B) = 662,5 gr
- Berat *picnometer* + benda uji + air 25°C (Bt) = 977,5 gr

Dari data tersebut dapat dilakukan pengolahan data sebagai berikut :

- Berat jenis curah (bulk) =
$$\frac{BK}{B+SSD-Bt}$$
$$= \frac{494}{662,5+500-977,5}$$
$$= 2,670 \text{ kg/m}^3$$
- Berat jenis kering permukaan (SSD) =
$$\frac{SSD}{B+SSD-Bt}$$
$$= \frac{500}{662,5+500-977,5}$$
$$= 2,703 \text{ kg/m}^3$$
- Berat jenis semu (*apparent*) =
$$\frac{BK}{B+BK-Bt}$$
$$= \frac{494}{662,5+494-977,5}$$
$$= 2,760 \text{ kg/m}^3$$

- $$\begin{aligned} \text{Penyerapan} &= \frac{\text{SSD}-\text{BK}}{\text{BK}} \times 100\% \\ &= \frac{500-494}{494} \times 100\% \\ &= 1,215\% \end{aligned}$$

b. Pasir

- Berat benda uji kering permukaan jenuh (SSD) = 500 gr
- Berat benda uji kering oven (BK) = 493 gr
- Berat picnometer + air 25°C (B) = 662,5 gr
- Berat picnometer + benda uji + air 25 °C (Bt) = 980 gr

Dari data tersebut dapat dilakukan pengolahan data sebagai berikut :

- $$\begin{aligned} \text{Berat jenis curah (bulk)} &= \frac{\text{BK}}{\text{B}+\text{SSD}-\text{Bt}} \\ &= \frac{493}{662,5+500-980} \\ &= 2,701 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

- $$\begin{aligned} \text{Berat jenis kering permukaan (SSD)} &= \frac{\text{SSD}}{\text{B}+\text{SSD}-\text{Bt}} \\ &= \frac{500}{662,5+500-980} \\ &= 2,740 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

- $$\begin{aligned} \text{Berat jenis semu (apparent)} &= \frac{\text{BK}}{\text{B}+\text{BK}-\text{Bt}} \\ &= \frac{493}{662,5+493-980} \\ &= 2,809 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

- Penyerapan
$$= \frac{\text{SSD-BK}}{\text{BK}} \times 100\%$$
$$= \frac{500-493}{493} \times 100\%$$
$$= 1,420\%$$

Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat halus abu batu memiliki berat jenis 2,670 kg/m³, sedangkan agregat halus pasir mencapai 2,985 kg/m³. Nilai tersebut sesuai dengan ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2), yaitu berat jenis agregat minimal 2,5 kg/m³. Adapun penyerapan agregat halus abu batu sebesar 1,215% dan pasir sebesar 1,420%, masih memenuhi batas maksimum 3% yang dipersyaratkan.

2) Pengujian Kadar Lumpur

Pengujian kadar lumpur bertujuan untuk mengetahui seberapa besar persentase lumpur yang terkandung pada agregat halus. Kandungan lumpur yang berlebihan dapat memengaruhi mutu campuran aspal, karena lapisan lumpur yang menempel pada agregat dapat menghambat ikatan antar butiran agregat dan aspal.

Pengujian kadar lumpur agregat halus dihitung untuk mendapatkan hasil berikut

a. Abu Batu

Setelah pengocokan *picnometer* dengan durasi 30 menit mendapatkan hasil pada sampel pertama tinggi abu batu 117cc, tinggi lumpur 12cc, sehingga tinggi keseluruhan 129cc. Sedangkan untuk sampel kedua mendapatkan tinggi abu batu 112cc, tinggi lumpur 15cc sehingga tinggi keseluruhan 127cc. Dari hasil nilai pengujian diatas dapat dilakukan perhitungan presentase kadar lumpur yang terkandung, perhitungan kedua sampel sebagai berikut :

- Nilai kadar lumpur (1)
$$= \frac{B}{A} \times 100\%$$
$$= \frac{117}{12} \times 100\%$$
$$= 97,5\%$$

- Kadar lumpur (1) = $100\% - \text{nilai kadar lumpur}$
 $= 100\% - 97,5\%$
 $= 2,5\%$

- Nilai kadar lumpur (2) = $\frac{B}{A} \times 100\%$
 $= \frac{112}{15} \times 100\%$
 $= 74,67\%$

- Kadar lumpur (1) = $100\% - \text{nilai kadar lumpur}$
 $= 100\% - 74,67\%$
 $= 25,33\%$

- Rata – rata = 86,08%

b. Pasir

Setelah pengocokan *picnometer* dengan durasi 30 menit mendapatkan hasil pada sampel pertama tinggi pasir 110cc, tinggi lumpur 16cc, sehingga tinggi keseluruhan 126cc. Sedangkan untuk sampel kedua mendapatkan tinggi pasir 118cc, tinggi lumpur 10cc sehingga tinggi keseluruhan 128cc. Dari hasil nilai pengujian diatas dapat dilakukan perhitungan presentase kadar lumpur yang terkandung, perhitungan kedua sampel sebagai berikut :

- Nilai kadar lumpur (1) = $\frac{B}{A} \times 100\%$
 $= \frac{110}{16} \times 100\%$
 $= 68,75\%$

- Kadar lumpur (1) = $100\% - \text{nilai kadar lumpur}$
 $= 100\% - 68,75\%$
 $= 31,25\%$

- Nilai kadar lumpur (2) =
$$\frac{B}{A} \times 100\%$$

$$= \frac{118}{10} \times 100\%$$

$$= 11,80\%$$

- Kadar lumpur (2) =
$$100\% - \text{nilai kadar lumpur}$$

$$= 100\% - 11,80\%$$

$$= 88,20\%$$

- Rata – rata = 93,37%

Berdasarkan hasil pengujian kadar lumpur pada agregat halus, diperoleh nilai rata-rata sebesar 86,08% untuk abu batu dan 93,37% untuk pasir. Nilai tersebut telah memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2), yang mensyaratkan kadar lumpur agregat halus minimal 50%.

Dari data pengujian material agregat halus diatas maka didapatkan rekapitulasi pengujian, yang dapat disimpulkan pengujian ini memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2). Data rekapitulasi pengujian material agregat halus dapat dilihat pada tabel 4.8 dibawah.

Tabel 4. 8 Rekapitulasi Pengujian Material Agregat Halus

No.	Jenis Pengujian		Spesifikasi	Hasil Pengujian	Keterangan
1	Berat Jenis	Abu Batu	$\geq 2,5$	2,670	Memenuhi
		Pasir		2,701	
2	Penyerapan	Abu Batu	≤ 3	1,215	Memenuhi
		Pasir		1,420	
3	Pengujian Kadar Lumpur	Abu Batu	≥ 50	86,083	Memenuhi
		Pasir		93,375	

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil pengujian karakteristik agregat halus, menunjukkan hasil yang memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2). Nilai berat jenis abu batu sebesar 2,670 dan pasir sebesar 2,701, keduanya melebihi batas minimum 2,5, yang menandakan agregat memiliki kepadatan dan kekuatan yang baik sebagai bahan penyusun campuran.

Hasil pengujian penyerapan air menunjukkan nilai 1,215% untuk abu batu dan 1,420% untuk pasir, masih di bawah batas maksimum 3%, sehingga dapat disimpulkan bahwa agregat memiliki porositas rendah dan ketahanan baik terhadap penyerapan air. Selain itu, hasil pengujian kadar lumpur juga menunjukkan nilai 86,083% untuk abu batu dan 93,375% untuk pasir, yang berarti kedua material memiliki kebersihan dan kualitas gradasi yang baik serta memenuhi standar kelayakan sebagai agregat halus dalam campuran aspal.

4.2.3 Agregat Kasar

Pembuatan *job mix* dilakukan melalui pengujian analisis saringan pada material guna membuat rancangan campuran aspal. Berikut ini adalah pengujian analisis pada material penyusul :

a. Agregat Kasar $\frac{3}{4}$ (SNI ASTM C136:2012)

Berdasarkan tabel 4.9 dibawah mendapatkan hasil dari agregat $\frac{3}{4}$ yang lolos dari saringan $\frac{3}{4}$ itu sendiri dan tertahan pada saringan dibawahnya sampai ke pan. Agregat kasar $\frac{3}{4}$ yang diuji seberat 5000 gr didapatkan total agregat tertahan sebesar 4992 gr.

Tabel 4. 9 Analisis Saringan Agregat Kasar $\frac{3}{4}$

Material		= Agregat $\frac{3}{4}$			
Berat Material		= 5000 gr			
Saringan		Tertahan			Lolos
No	Ukuran (mm)	B. Tertahan (gr)	B. Tertahan (%)	Kumulatif (%)	
	0	(1)	(2)=(1/W ₁)	(3)	(4)=(100-3)
$\frac{3}{4}$ "	19.000	0.00	0.00	0.00	100
$\frac{1}{2}$ "	12.500	967.00	19.37	19.37	80.63
$\frac{3}{8}$ "	9.500	2337.00	46.81	66.19	33.81
#4	4.750	1599.00	32.03	98.22	1.78
#8	2.360	73.00	1.46	99.68	0.32
#16	1.180	5.80	0.12	99.80	0.20
#30	0.600	2.30	0.05	99.84	0.16
#50	0.300	3.40	0.07	99.91	0.09
#100	0.150	1.20	0.02	99.93	0.07
#200	0.075	2.40	0.05	99.98	0.02
PAN	0	0.90	0.02	100	0.00
Total (W ₁)		4992	100		

Sumber : Hasil Penelitian

b. Agregat kasar $\frac{1}{2}$ (SNI ASTM C136:2012)

Berdasarkan tabel 4.10 dibawah mendapatkan hasil dari agregat $\frac{1}{2}$ yang lolos dari saringan $\frac{1}{2}$ itu sendiri dan tertahan pada saringan dibawahnya sampai ke pan.

Agregat kasar $\frac{1}{2}$ yang diuji seberat 2500 gr didapatkan total agregat tertahan sebesar 2496,5 gr.

Tabel 4. 10 Analisis Saringan Agregat Kasar $\frac{1}{2}$

Material		= Agregat $\frac{1}{2}$			
Berat Material		= 2500 gr			
Saringan		Tertahan			Lolos
No	Ukuran	B. Tertahan	B. Tertahan	Kumulatif	
	(mm)	(gr)	(%)	(%)	(%)
	0	(1)	(2)=(1/W _i)	(3)	(4)=(100-3)
$\frac{3}{4}$ "	19.000	0	0	0	100
$\frac{1}{2}$ "	12.500	0.00	0	0.00	100.00
$\frac{3}{8}$ "	9.500	342.00	13.70	13.70	86.30
#4	4.750	1564.00	62.65	76.35	23.65
#8	2.360	567.00	22.71	99.06	0.94
#16	1.180	13.00	0.52	99.58	0.42
#30	0.600	5.80	0.23	99.81	0.19
#50	0.300	1.60	0.06	99.88	0.12
#100	0.150	0.30	0.01	99.89	0.11
#200	0.075	0.70	0.03	99.92	0.08
PAN	0	2.10	0.08	100	0.00
Total (W _i)		2496.5	100		

Sumber : Hasil Penelitian

c. Abu Batu (SNI ASTM C136:2012)

Tabel 4. 11 Analisis Saringan Abu Batu

Material		= Abu Batu			
Berat Material		= 500 gr			
Saringan		Tertahan			Lolos
No	Ukuran	B. Tertahan	B. Tertahan	Kumulatif	
	(mm)	(gr)	(%)	(%)	(%)
	0	(1)	(2)=(1/W _i)	(3)	(4)=(100-3)
$\frac{3}{4}$ "	19.000	0.00	0.00	0.00	100
$\frac{1}{2}$ "	12.500	0.00	0.00	0.00	100.00
$\frac{3}{8}$ "	9.500	0.00	0.00	0.00	100.00
#4	4.750	6.00	1.20	1.20	98.80
#8	2.360	18.64	3.74	4.94	95.06
#16	1.180	155.36	31.14	36.08	63.92
#30	0.600	81.45	16.33	52.40	47.60
#50	0.300	40.21	8.06	60.46	39.54
#100	0.150	40.00	8.02	68.48	31.52
#200	0.075	90.25	18.09	86.57	13.43
PAN	0	67.00	13.43	100	0.00
Total (W _i)		498.91	100		

Sumber : Hasil Penelitian

Dari tabel 4. 11 diatas mendapatkan hasil dari abu batu yang lolos dari saringan No.4 itu sendiri dan tertahan pada saringan dibawahnya sampai ke pan. Abu batu yang diuji seberat 500 gr didapatkan total agregat tertahan sebesar 498,91 gr

d. Pasir (SNI ASTM C136:2012)

Dari tabel 4.12 dibawah mendapatkan hasil dari pasir yang lolos dari saringan No.4 itu sendiri dan tertahan pada saringan dibawahnya sampai ke pan. Pasir yang diuji seberat 500 gr didapatkan total agregat tertahan sebesar 498,9 gr.

Tabel 4. 12 Analisis Saringan Pasir

Material		Pasir			
Berat Material		500 gr			
Saringan		Tertahan			Lolos
No	Ukuran (mm)	B. Tertahan (gr)	B. Tertahan (%)	Kumulatif (%)	
	0	(1)	(2)=(1/W ₁)	(3)	(4)=(100-3)
¾"	19.000	0.00	0.00	0.00	100
½ "	12.500	0.00	0.00	0.00	100.00
⅜ "	9.500	0.00	0.00	0.00	100.00
#4	4.750	0.00	0.00	0.00	100.00
#8	2.360	14.60	2.93	2.93	97.07
#16	1.180	59.30	11.89	14.81	85.19
#30	0.600	94.50	18.94	33.75	66.25
#50	0.300	66.50	13.33	47.08	52.92
#100	0.150	17.60	3.53	50.61	49.39
#200	0.075	181.90	36.46	87.07	12.93
PAN	0	64.50	12.93	100	0.00
Total (W ₁)		498.9	100		

Sumber : Hasil Penelitian

Setelah melakukan pengujian analisi saringan, maka mendapatkan data untuk melakukan pengolahan data gradasi campuran optimum. Hasil pengolahan data pada tabel 4.13 dibawah, maka mendapatkan persentase komposisi dengan campuran agregat kasar ¾ 52%, agregat kasar ½ 33%, agregat halus (pasir) 10% dan agregat halus (abu batu) 5%. Jika analisis saringan memenuhi spesifikasi AAPA 2004 berdasarkan nilai batas atas dan bawah, maka mendapatkan grafik seperti berikut :

Tabel 4. 13 Persentase Gradasi Campuran

Saringan		Agregat Kasar		Agregat Halus		Kombinasi Agregat	AAPA OG14	
No	Ukuran	¾"	½ "	Pasir	Abu Batu		Spesifikasi	
	(mm)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	Bawah	Atas
¾"	19.000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100	100
½ "	12.500	80.63	100.00	100.00	100.00	89.93	85	100
⅜"	9.500	33.81	86.30	100.00	100.00	61.06	45	70
#4	4.750	1.78	23.65	100.00	98.80	23.67	10	25
#8	2.360	0.32	0.94	97.07	95.06	14.94	7	15
#16	1.180	0.20	0.42	85.19	63.92	11.96	6	12
#30	0.600	0.16	0.19	66.25	47.60	9.15	5	10
#50	0.300	0.09	0.12	52.92	39.54	7.36	4	8
#100	0.150	0.07	0.11	49.39	31.52	6.59	3	7
#200	0.075	0.02	0.08	12.93	13.43	2.00	2	5
PAN	0	0.00	0.00	0.00	0.00			
Perbandingan campuran dari persentase berat total agregat		Agregat ¾"		=		52	%	
		Agregat ½ "		=		33	%	
		Pasir No. 4		=		10	%	
		Abu Batu No. 4		=		5	%	
		Total		=		100	%	

Sumber : Hasil Penelitian

4.3 Penentuan Hasil Kadar Aspal Optimum

Penelitian Candra menyatakan kadar aspal optimum pada campuran aspal porus tidak hanya mengacu pada parameter stabilitas dan *flow* (Candra et al., 2021). Penentuan KAO harus mempertimbangkan nilai VIM, VMA, stabilitas, *flow* dan MQ. Dengan demikian, kadar aspal yang ditetapkan adalah kadar yang masih memenuhi persyaratan, namun tetap mempertahankan rongga antar agregat agar fungsi drainase lapis porus tidak hilang

Langkah selanjutnya adalah memilih kadar aspal yang memiliki nilai *marshall* tertinggi dengan kadar aspal 4,5%; 5%; 5,5%; 6%; 6,5%; 7%. Dibawah merupakan tabel *job mix design* pada tiap kadar aspal yang dipakai.

Tabel 4. 14 Job Mix Design

Material		Jumlah Benda Uji	Kadar Aspal						Berat Total
			4.5	5	5.5	6	6.5	7	
Agregat ¾"	52%	3	595.92	592.8	589.68	586.56	583.44	580.32	10586.16
Agregat ½ "	33%	3	378.18	376.2	374.22	372.24	370.26	368.28	6718.14
Abu Batu	10%	3	114.6	114	113.4	112.8	112.2	111.6	2035.8
Pasir	5%	3	57.3	57	56.7	56.4	56.1	55.8	1017.9
Kadar Aspal Hasil KAO		3	54	60	66	72	78	84	1242

Sumber : Hasil Penelitian

4.3.1 Marshall Test Kadar Aspal Kovenisional

1. Perhitungan dan Analisis Data

a. Berat Jenis

- Berat Jenis Agregat (*Bulk Specific Gravity*)

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{\% \text{ BP } \frac{3}{4}}{BJ \text{ BULK}} + \frac{\% \text{ BP } \frac{1}{2}}{BJ \text{ BULK}} + \frac{\% \text{ Pasir}}{BJ \text{ BULK}} + \frac{\% \text{ Abu}}{BJ \text{ BULK}}}$$

- Berat Jenis

Semu (*Apparent Specific Gravity*)

$$G_{sa} = \frac{100}{\frac{\% \text{ BP } \frac{3}{4}}{BJ \text{ APP}} + \frac{\% \text{ BP } \frac{1}{2}}{BJ \text{ APP}} + \frac{\% \text{ Pasir}}{BJ \text{ APP}} + \frac{\% \text{ Abu}}{BJ \text{ APP}}}$$

- Berat Jenis Agregat Afektif

$$G_{se} = \frac{G_{sb} + G_{sa}}{2}$$

b. Parameter *Marshall*

- Persentase Rongga Udara (H) =

Keterangan :

$$100 - \left(100 - \frac{C}{B} \right)$$

C : Isi benda uji

B : BJ maks campuran

- Stabilitas (L) = K × Kalibrasi × Koreksi Benda Uji × 0,4536

Keterangan :

K : Pembacaan Stabilitas

Kalibrasi : 9,681

0,4536 : Koversi satuan dari *lb* ke *kg*

- Hasil Bagi Marshall (N) = $\frac{L}{O}$

Keterangan :

L : Stabilitas disesuaikan

O : Pembacaan *flow*

c. Hasil Perhitungan

Berdasarkan hasil pengujian *marshall* aspal konvensional maka didapatkan nilai pembacaan yang dapat dilihat pada tabel 4.15 dibawah.

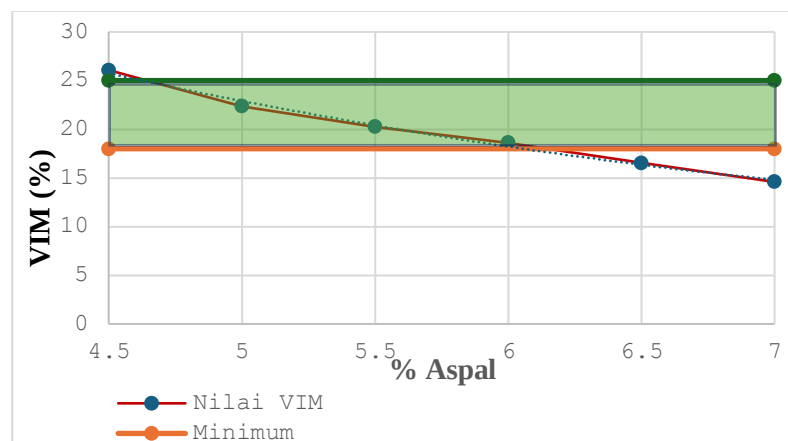
Tabel 4. 15 Rekapitulasi Pengujian Marshall Konvensional

REKAPITULASI						
Kadar Aspal (%)	VIM	VMA	VFA	STABILITAS	FLOW	MQ
4.5	26.076	32.832	23.966	712.20	4.57	155.957
5	22.345	30.347	29.877	753.70	5.03	149.743
5.5	20.258	29.390	34.503	802.82	5.30	151.476
6	18.620	28.860	38.860	853.58	5.63	151.524
6.5	16.543	27.974	44.014	737.80	6.17	119.642
7	14.590	26.289	47.817	724.17	7.03	102.963

Sumber : Hasil Penelitian

1. VIM

VIM (*Void In The Total Mix*) adalah presentase rongga udara didalam campuran terhadap volume campuran agregat dan aspal. VIM berguna sebagai ruang geser agregat yang disebabkan akibat beban lalu lintas dan menjadi ruang pada aspal yang melunak akibat suhu yang berubah. Spesifikasi pada AAPA 2004 yang dapat memenuhi syarat batas nilai pada campuran aspal porus adalah 18% - 25%. Pada penelitian ini persentase yang memenuhi spesifikasi adalah kadar aspal 4,63 – 6,15%.



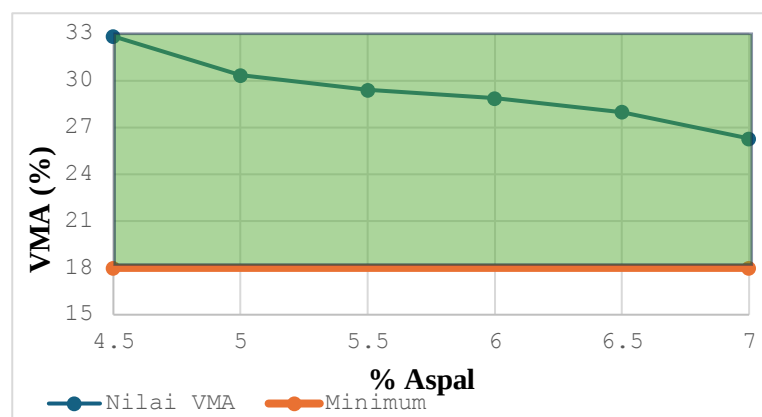
Gambar 4. 1 Pengujian VIM Konvensional

Sumber : Data Pengujian

2. VMA

VMA (*Void in Mineral Aggregate*) merupakan persentase volume rongga di antara butiran agregat dalam campuran aspal yang mencakup

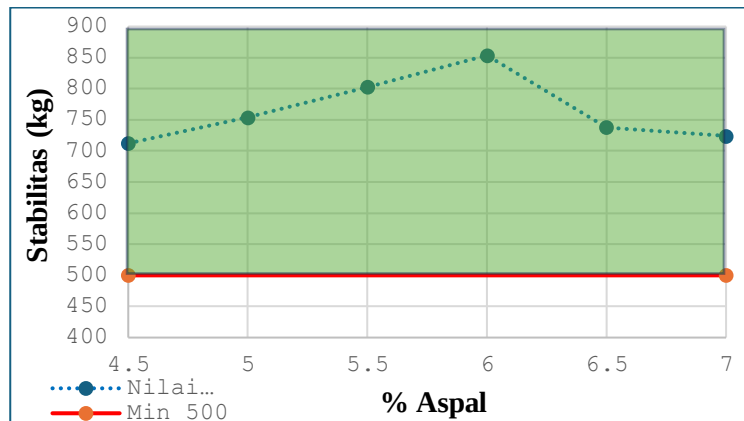
rongga udara dan aspal efektif. VMA berfungsi sebagai ruang yang memungkinkan aspal untuk menyelimuti agregat secara optimal sehingga dapat meningkatkan durabilitas dan kekuatan campuran. Berdasarkan spesifikasi AAPA 2004, nilai minimum VMA yang dipersyaratkan untuk campuran aspal porus adalah $\geq 18\%$. Berdasarkan grafik terlihat bahwa nilai VMA cenderung mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kadar aspal tetapi tetap memenuhi spesifikasi,.



Gambar 4. 2 Pengujian VMA Konvensional
Sumber : Data Pengujian

3. Stabilitas

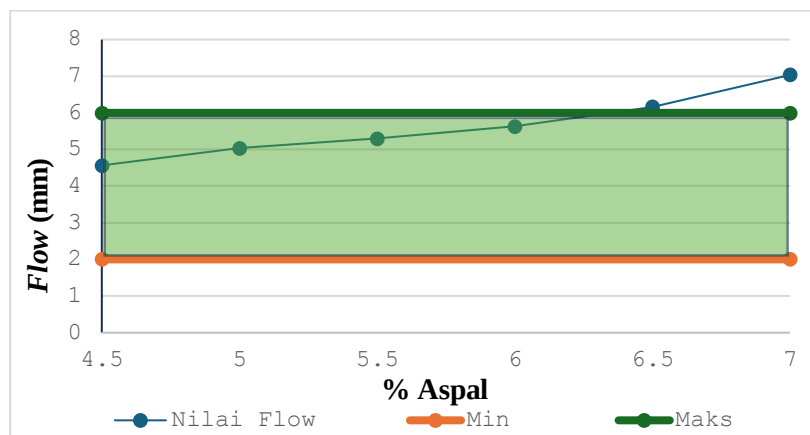
Stabilitas merupakan kemampuan perkerasan dalam menerima beban tanpa adanya deformasi hingga adanya kelelahan plastis. Pada pengujian marshall dengan kadar aspal 4,5% sampai 7% memenuhi syarat pada AAPA 2004 yaitu diatas nilai minimum 500



Gambar 4. 3 Pengujian Stabilitas Konvensional
Sumber : Data Pengujian

4. Flow

Flow adalah ukuran kelelahan plastis (deformasi) campuran aspal saat diuji dengan metode *marshall*, menunjukkan seberapa besar sampel dapat berubah bentuk sebelum hancur atau mencapai stabilitas puncak, diukur dalam satuan mm. Spesifikasi pada AAPA 2004 yang dapat memenuhi syarat batas nilai pada campuran aspal porus adalah 2 mm – 6 mm. Dari hasil pengujian ini persentase kadar aspal yang memenuhi spesifikasi *flow* berkisar 4,5% - 6,39%.

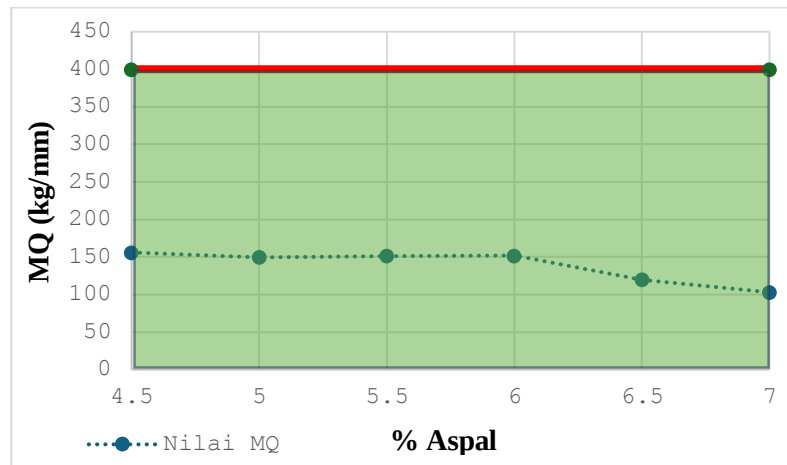


Gambar 4. 4 Pengujian Flow Konvensional
Sumber : Data Pengujian

5. MQ

MQ (*Marshall Quotient*) merupakan parameter yang memberikan keseimbangan antara kekuatan yang cukup untuk menahan beban dan

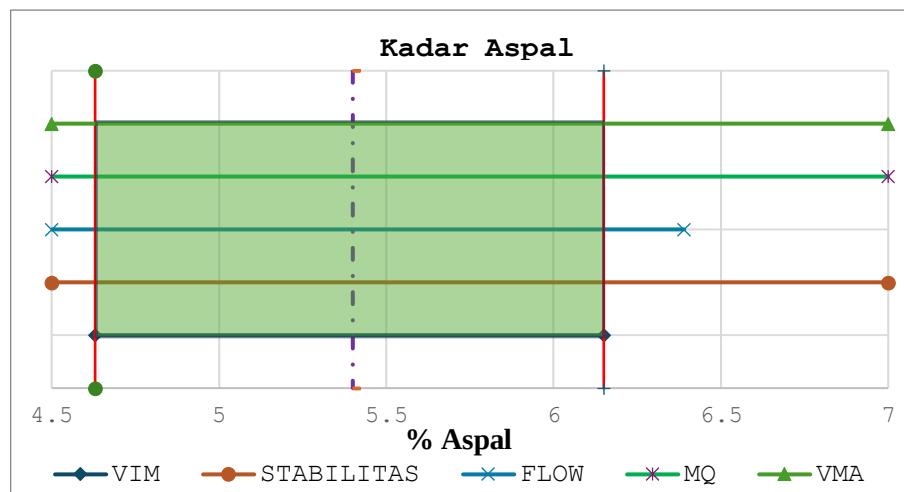
fleksibilitas yang cukup untuk tidak menjadi terlalu rapuh, batas spesifikasi nilai MQ yaitu maksimal 400. Dari hasil pengujian ini menghasilkan 102,963 – 155,957 seluruh kadar aspal memenuhi nilai spesifikasi.



Gambar 4. 5 Pengujian MQ Konvensional

Sumber : Data Pengujian

Dari hasil pengujian *marshall* yang mendapatkan nilai VIM, VMA, stabilitas, *flow*, dan MQ, untuk menentukan KAO pada aspal penulis mengambil nilai Tengah dari keseluruhan parameter *marshall test*, sehingga memperoleh kadar aspal optimum sebesar 5,4%.



Gambar 4. 6 Penentuan Kadar Aspal Optimum

Sumber : Data Pengujian

4.4 Pengujian Aspal Inovasi

Pengujian aspal inovasi ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan karakteristik aspal konvensional dengan aspal yang sudah diinovasikan dengan kadar nano silika, pengujian karakteristik ini meliputi pengujian uji penetrasi dan uji daktilitas.

4.4.1 Penetrasi Aspal

Pengujian penetrasi aspal dilakukan untuk menentukan tingkat kekerasan aspal dengan cara mengukur kedalaman jarum standar yang menembus sampel aspal pada suhu 25°C, beban 100 gram, dan waktu 5 detik. Nilai penetrasi yang diperoleh menunjukkan tingkat kekentalan atau konsistensi aspal, yang berpengaruh terhadap pemilihan jenis aspal sesuai kondisi iklim dan lalu lintas. Hasil pengujian dinyatakan dalam satuan 0,1 mm. Data hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.16 – 4.18.

Tabel 4. 16 Penetrasi Aspal Inovasi NS 2%

NS 2%	1	2
Pengamatan 1	20	23
Pengamatan 2	21	23
Pengamatan 3	20	18
Pengamatan 4	19	24
Pengamatan 5	21	19
Rerata	20.2	21.4
Rata - rata	20.8	

Sumber : Hasil Penelitian

Tabel 4. 17 Penetrasi Aspal Inovasi NS 4%

NS 4%	1	2
Pengamatan 1	20	19
Pengamatan 2	20	18
Pengamatan 3	23	22
Pengamatan 4	17	21
Pengamatan 5	20	20
Rerata	20	20
Rata - rata	20	

Sumber : Hasil Penelitian

Tabel 4. 18 Penetrasi Aspal Inovasi NS 6%

NS 6%	1	2
Pengamatan 1	15	20
Pengamatan 2	15	18

NS 6%	1	2
Pengamatan 3	16	20
Pengamatan 4	15	18
Pengamatan 5	15	17
Rerata	15.2	18.6
Rata - rata	16.9	

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil dari pengujian penetrasi aspal inovasi mendapatkan hasil yang berbeda pada tiap variasi kadar nano silika, NS 2% mendapatkan nilai 20,8 mm, NS 4% mendapatkan nilai 20 mm, NS 6% mendapatkan nilai 16,9 mm. Semakin tinggi kadar nano silika yang semakin rendah nilai penetrasi yang didapat, Penambahan nano silika ke dalam campuran aspal terbukti menyebabkan nilai penetrasi semakin menurun. Penelitian (Mashaan, 2022) menyatakan penambahan nano silika menyebabkan aspal mengalami peningkatan kekakuan, penurunan penetrasi semakin menurun seiring bertambahnya kadar nano silika. Hal ini disebabkan oleh karakter nano silika yang berukuran sangat halus serta bersifat kaku, sehingga struktur ikatan antar molekul aspal menjadi lebih padat dan kaku. (Sukhija et al., 2021) menyatakan penambahan nano silika menyebabkan penurunan nilai penetrasi pada aspal, meningkatkan nilai kekakuan binder namun mengurangi kemampuan deformasi.

4.4.2 Daktilitas Aspal

Daktilitas aspal merupakan ukuran kemampuan aspal untuk mengalami perpanjangan tanpa terputus ketika ditarik pada suhu tertentu. Sifat ini mencerminkan tingkat elastisitas dan kekuatan ikatan aspal terhadap agregat. Pengujian daktilitas dilakukan untuk mengetahui jarak maksimum aspal dapat meregang sebelum putus serta menilai ketahanannya terhadap retak akibat perubahan suhu dan beban lalu lintas. Uji ini dilaksanakan pada suhu 25°C dengan kecepatan 5 cm/menit menggunakan alat daktilitas.

Tabel 4. 19 Daktilitas Aspal Inovasi NS 2%

Pengujian Daktilitas Aspal NS 2%	
Pengamatan 1 (cm)	19.2
Pengamatan 2 (cm)	22.3
Rata-rata	20.75

Sumber : Hasil Penelitian

Tabel 4. 20 Daktilitas Aspal Inovasi NS4%

Pengujian Daktilitas Aspal NS 4%	
Pengamatan 1 (cm)	17.3
Pengamatan 2 (cm)	15.8
Rata-rata	16.55

Sumber : Hasil Penelitian

Tabel 4. 21 Daktilitas Aspal Inovasi NS 6%

Pengujian Daktilitas Aspal NS 6%	
Pengamatan 1 (cm)	17.3
Pengamatan 2 (cm)	12.3
Rata-rata	14.8

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil dari pengujian daktilitas aspal inovasi sangat berbeda dengan aspal pen 60/70 hal ini disebabkan penambahan nano silika yang bersifat kaku, Semakin besar penambahan kadar nano silika terbukti semakin kecil nilai daktilitas yang didapatkan yaitu pada NS 2% mendapatkan 20,75 cm, NS 4% mendapatkan 16,55 cm, dan NS 6% mendapatkan 14,8 cm. (Sukhija et al., 2021) menyatakan penambahan nano silika menyebabkan penurunan nilai daktilitas pada aspal, meningkatkan nilai kekakuan binder namun mengurangi kemampuan deformasi. Data hasil pengujian daktilitas dapat dilihat pada tabel 4.19 – 4.21 diatas.

4.5 Marshall Test Aspal Inovasi

1. Job Mix Design

Setelah melakukan pengujian marshall dari keseluruhan sampel aspal porus konvensional maka mendapatkan kadar aspal optimum sebesar 5,4%, berikut ini adalah *job mix design* pada aspal porus sebagai berikut :

Tabel 4. 22 Job Mix Design Inovasi

Material	Jumlah Benda Uji	Kadar Nano Silika				Berat Total
		0%	2%	4%	6%	
Agregat $\frac{3}{4}$	6	590.30	590.30	590.30	590.30	14167.30
Agregat $\frac{1}{2}$		374.62	374.62	374.62	374.62	8990.78
Abu Batu		56.76	56.76	56.76	56.76	1362.24
Pasir		113.52	113.52	113.52	113.52	2724.48
Kadar Aspal		64.8	64.8	64.8	64.8	1555.2

Sumber : Hasil Penelitian

2. Perhitungan dan Analisis Data

a. Berat Jenis

- Berat Jenis Agregat (*Bulk Specific Gravity*)

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{\% \text{ BP } \frac{3}{4}}{\text{BJ BULK}} + \frac{\% \text{ BP } \frac{1}{2}}{\text{BJ BULK}} + \frac{\% \text{ Pasir}}{\text{BJ BULK}} + \frac{\% \text{ Abu}}{\text{BJ BULK}}}$$

- Berat Jenis Semu (*Apparent Specific Gravity*)

$$G_{sa} = \frac{100}{\frac{\% \text{ BP } \frac{3}{4}}{\text{BJ APP}} + \frac{\% \text{ BP } \frac{1}{2}}{\text{BJ APP}} + \frac{\% \text{ Pasir}}{\text{BJ APP}} + \frac{\% \text{ Abu}}{\text{BJ APP}}}$$

- Berat Jenis Agregat Afektif

$$G_{se} = \frac{G_{sb} + G_{sa}}{2}$$

b. Parameter *Marshall*

- Persentase Rongga Udara (H) = $100 - \left(100 - \frac{C}{B} \right)$

Keterangan :

C : Isi benda uji

B : BJ maks campuran

- Stabilitas (L) = K × Kalibrasi × Koreksi Benda Uji × 0,4536

Keterangan :

K : Pembacaan Stabilitas

Kalibrasi : 9,681

0,4536 : Koversi satuan dari *lb* ke *kg*

- Hasil Bagi Marshall (N) = $\frac{L}{O}$

Keterangan :

L : Stabilitas disesuaikan

O : Pembacaan *flow*

c. Hasil Perhitungan

Berdasarkan Hasil pengujian *marshall* aspal konvensional maka didapatkan nilai pembacaan yang tercantuk pada tabel 4.23 dibawah.

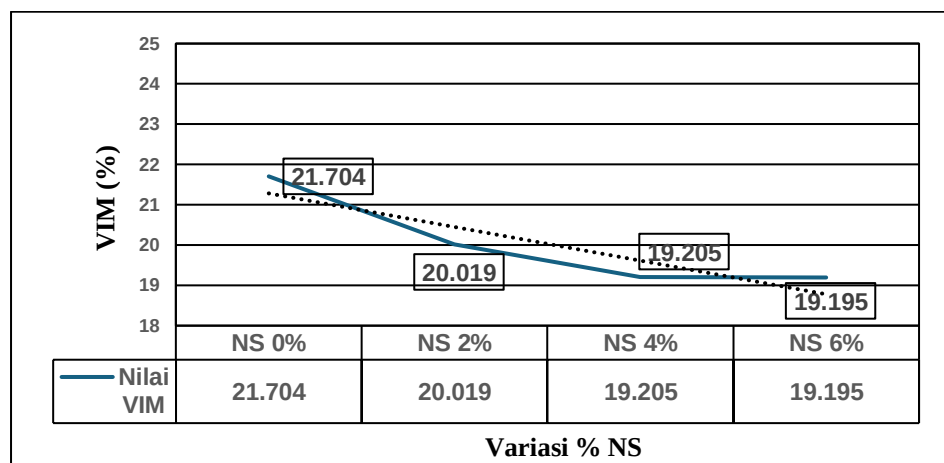
Tabel 4. 23 Rekapitulasi Pengujian Marshall Inovasi

REKAPITULASI						
Variasi	VIM	VMA	VFA	STABILITAS	FLOW	MQ
NS 0%	21.704	30.474	32.150	737.297	5.90	124.966
NS 2%	20.019	28.977	34.415	773.376	5.750	134.500
NS 4%	19.205	28.255	35.589	785.617	5.650	139.047
NS 6%	19.195	28.245	35.652	814.762	4.950	164.598

Sumber : Hasil Penelitian

1. *Void in The Total Mix (VIM)*

Hasil pengujian *Void in Mix* (VIM) menunjukkan bahwa nilai rongga dalam campuran mengalami penurunan seiring bertambahnya kadar nano silika pada campuran aspal porus. Pada variasi tanpa nano silika (NS 0%), nilai VIM berada pada angka 21,704%, kemudian menurun cukup signifikan menjadi 20,019% pada kadar NS 2%. Penurunan kembali terjadi pada kadar NS 4% dengan nilai VIM sebesar 19,205%, dan pada kadar NS 6% nilai VIM relatif stabil berada pada 19,195%.



Gambar 4. 7 Pengujian VIM Inovasi

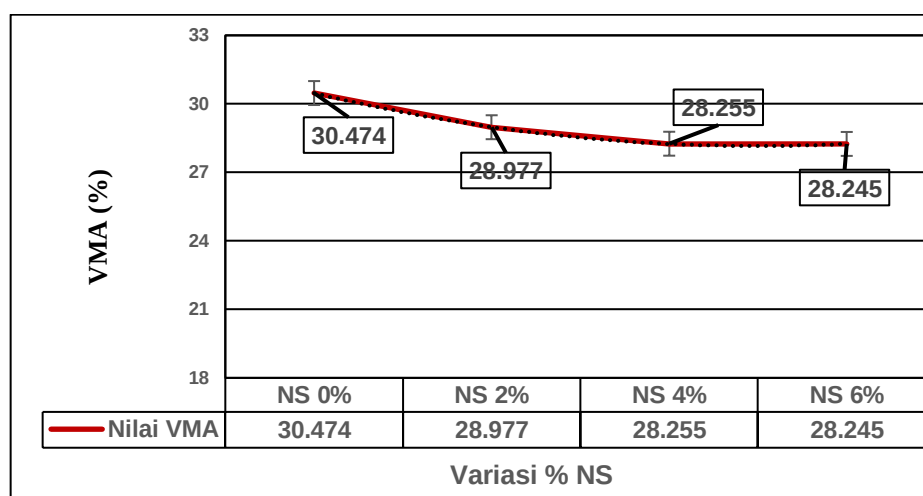
Sumber : Data Pengujian

Penurunan ini menunjukkan bahwa nano silika, yang memiliki ukuran partikel sangat halus, mampu mengisi rongga-rongga kecil pada campuran sehingga mengurangi total volume pori. Meskipun terjadi penurunan, seluruh

nilai VIM masih berada dalam kisaran yang sesuai untuk aspal porus, yaitu sekitar 18–25%, sehingga fungsi drainase tetap dapat bekerja dengan baik. Penurunan VIM ini juga mengindikasikan bahwa campuran menjadi lebih padat dan memiliki ikatan yang lebih baik, yang secara tidak langsung berkontribusi pada peningkatan stabilitas campuran.

2. *Void in Mineral Aggregate (VMA)*

Penambahan nano silika pada campuran aspal porous cenderung menurunkan nilai VMA (*Void in Mineral Aggregate*). Pada variasi NS 0%, nilai VMA tercatat paling tinggi yaitu 30,474%, kemudian mengalami penurunan bertahap pada NS 2% sebesar 28,977%, NS 4% sebesar 28,255%, dan mencapai nilai terendah pada NS 6% yaitu 28,245%. Pola penurunan ini menunjukkan bahwa semakin besar kadar nano silika yang ditambahkan, semakin rapat struktur internal campuran aspal porus.



Gambar 4. 8 Pengujian VMA Inovasi

Sumber : Data Pengujian

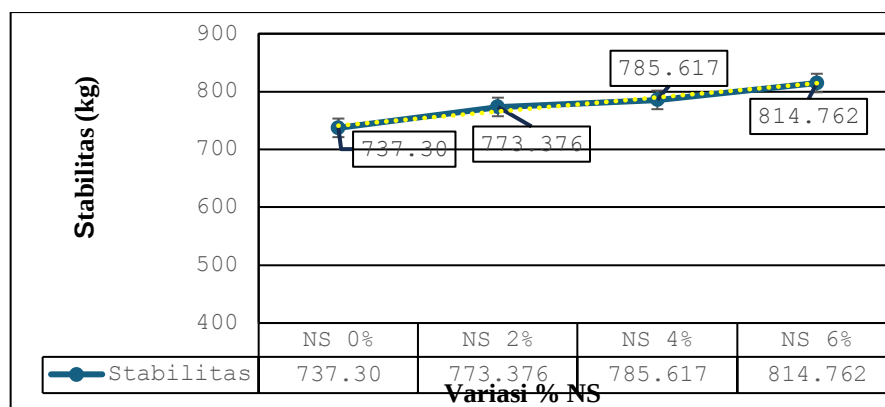
Penurunan nilai VMA ini disebabkan oleh peran nano silika sebagai material pengisi berukuran sangat halus yang mampu mengisi rongga. Dengan terisinya rongga-rongga tersebut, volume ruang kosong antar agregat berkurang sehingga nilai VMA menurun. Meskipun demikian, seluruh nilai VMA yang diperoleh masih berada di atas batas minimum spesifikasi AAPA 2004 ($\geq 18\%$), sehingga campuran aspal porus dengan penambahan nano silika hingga 6% masih memenuhi persyaratan dan tetap mendukung fungsi drainase, sekaligus

berpotensi meningkatkan kekompakan dan ketahanan campuran terhadap kerusakan seperti *ravelling*.

3. Stabilitas

Hasil pengujian stabilitas menunjukkan bahwa penambahan nano silika pada campuran aspal memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan kekuatan campuran dalam menahan beban. Pada variasi tanpa nano silika (NS 0%), nilai stabilitas sebesar 737,297 kg. Ketika ditambahkan nano silika sebesar 2%, nilai stabilitas meningkat menjadi 773,376 kg, kemudian terus naik menjadi 785,617 kg pada kadar NS 4%. Peningkatan yang paling signifikan terjadi pada kadar NS 6% dengan nilai stabilitas mencapai 814,762 kg.

Kenaikan nilai stabilitas ini menunjukkan bahwa nano silika berfungsi sebagai bahan pengisi berukuran sangat halus yang mampu memperkuat ikatan antara aspal dan agregat serta meningkatkan densifikasi campuran. Hal ini menyebabkan campuran menjadi lebih kuat dalam menerima beban vertikal dan lebih tahan terhadap deformasi. Secara keseluruhan, tren peningkatan stabilitas pada seluruh variasi kadar nano silika menegaskan bahwa penambahan nano silika efektif dalam meningkatkan performa struktural campuran porus aspal.



Gambar 4. 9 Pengujian Stabilitas Inovasi

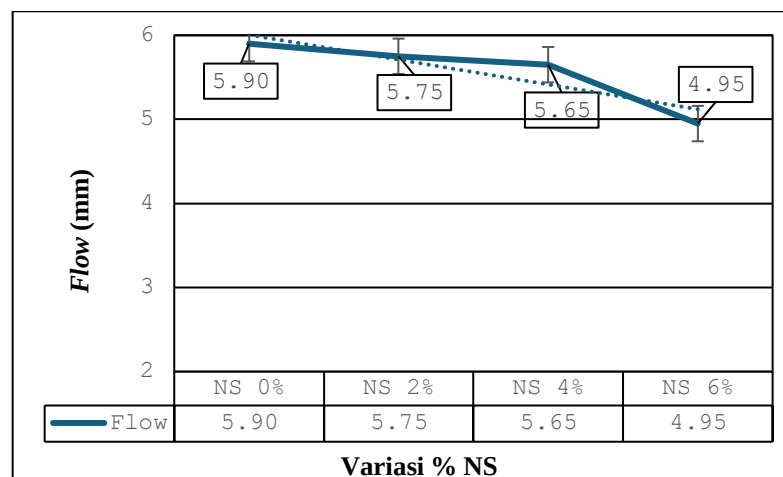
Sumber : Data Pengujian

4. Flow

Hasil pengujian nilai *flow* menunjukkan adanya penurunan seiring bertambahnya kadar nano silika pada campuran aspal. Pada variasi tanpa nano

silika (NS 0%), nilai *flow* berada pada angka 5,90 mm, kemudian menurun menjadi 5,75 mm pada NS 2% dan kembali turun menjadi 5,65 mm pada NS 4%. Penurunan yang paling signifikan terlihat pada kadar NS 6% dengan nilai *flow* mencapai 4,95 mm.

Penurunan nilai *flow* ini mengindikasikan bahwa penambahan nano silika meningkatkan kekakuan campuran, karena *flow* menggambarkan besarnya deformasi plastis yang terjadi ketika campuran menerima beban. Semakin kecil nilai *flow*, semakin kaku dan semakin kecil deformasi yang terjadi pada campuran. Penurunan ini menunjukkan bahwa nano silika berperan mengisi rongga antar partikel agregat, sehingga campuran menjadi lebih stabil dan memiliki deformasi yang lebih kecil saat dibebani.



Gambar 4. 10 Pengujian Flow Inovasi

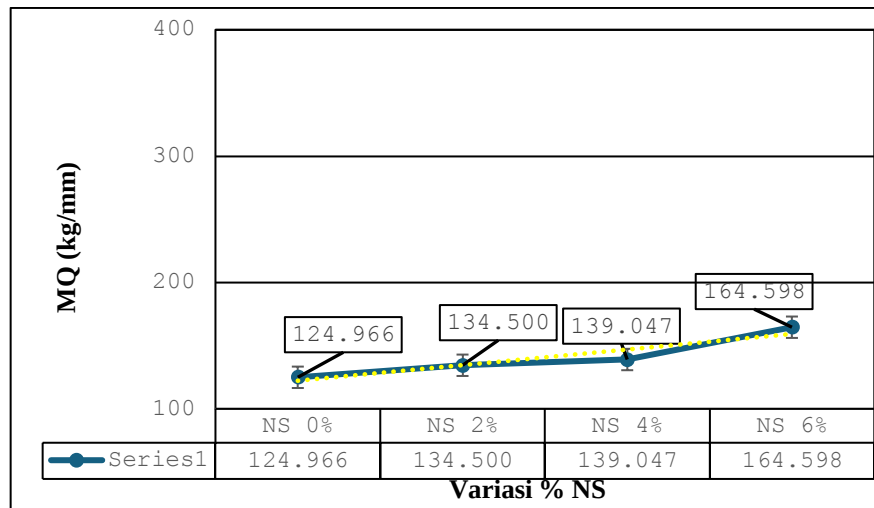
Sumber : Data Pengujian

5. Marshall Quotient (MQ)

Berdasarkan hasil pengujian *Marshall Quotient* (MQ), terlihat bahwa nilai MQ mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar nano silika (NS) pada campuran aspal. Pada variasi tanpa nano silika (NS 0%), nilai MQ sebesar 124,966. Nilai ini kemudian meningkat menjadi 134,500 pada NS 2% dan kembali naik menjadi 139,047 pada NS 4%. Peningkatan paling signifikan terjadi pada kadar NS 6% dengan nilai MQ mencapai 164,598.

Kenaikan ini menunjukkan bahwa penambahan nano silika mampu meningkatkan kekakuan campuran, karena MQ merupakan rasio antara

stabilitas terhadap *flow*. Semakin tinggi nilai MQ, semakin besar kemampuan campuran dalam menahan deformasi plastis. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa nano silika efektif dalam memperbaiki karakteristik kekakuan campuran porus aspal tanpa mengganggu sifat drainase yang menjadi karakter utama campuran ini.



Gambar 4. 11 Pengujian MQ Inovasi

Sumber : Data Pengujian

Menurut Preethi dan Ravichandran, penambahan nano silika pada campuran aspal memberikan pengaruh positif terhadap hasil pengujian *marshall*, khususnya pada parameter stabilitas, *flow*, dan *Marshall Quotient* (MQ) (Preethi & Ravichandran, 2025). Berdasarkan hasil penelitian, nilai stabilitas Marshall meningkat seiring dengan bertambahnya kadar nano silika, yang menunjukkan bahwa campuran memiliki kemampuan lebih baik dalam menahan beban lalu lintas. Peningkatan stabilitas ini disebabkan oleh peran nano silika sebagai *filler* dengan luas permukaan tinggi yang memperkuat ikatan antara binder dan agregat. Sementara itu, nilai *flow* cenderung menurun namun tetap berada dalam batas spesifikasi, yang menandakan bahwa campuran menjadi lebih kaku tanpa kehilangan fleksibilitas secara berlebihan. Kondisi tersebut berdampak pada peningkatan nilai MQ, yang menunjukkan keseimbangan yang lebih baik antara kekuatan dan deformasi campuran serta peningkatan ketahanan terhadap deformasi permanen (*rutting*).

Selain itu, penambahan nano silika juga mempengaruhi sifat volumetrik campuran, khususnya nilai *Void in Mix* (VIM). Nano silika berkontribusi dalam mengisi rongga mikro di dalam campuran aspal sehingga nilai VIM cenderung menurun dan densitas campuran meningkat. Penurunan VIM ini mengindikasikan bahwa campuran menjadi lebih padat dan stabil, yang mendukung peningkatan nilai stabilitas *marshall*. Dengan kombinasi nilai stabilitas dan MQ yang lebih tinggi, *flow* yang terkontrol, serta VIM yang berada dalam rentang spesifikasi, dapat disimpulkan bahwa penggunaan nano silika mampu meningkatkan kinerja *marshall* secara keseluruhan dan menghasilkan campuran aspal yang lebih kuat dan tahan terhadap beban lalu lintas.

4.6 Cantabro Test Aspal Inovasi

Uji *cantabro* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengevaluasi ketahanan aus pada campuran aspal berpori atau *open graded*. Pada pengujian ini, benda uji berbentuk silinder yang telah melalui proses kondisioning dimasukkan ke dalam mesin *los angeles* tanpa penggunaan bola baja, kemudian diputar sebanyak 300 kali dengan kecepatan sekitar 30 – 33 rpm. Setelah proses pemutaran selesai, massa benda uji diukur kembali untuk menentukan persentase kehilangan massanya. Nilai kehilangan massa tersebut menunjukkan tingkat ketahanan campuran terhadap abrasi, di mana persentase yang lebih rendah menandakan performa campuran yang lebih baik. Mengacu pada AAPA, batas maksimum *Cantabro loss* yang diizinkan untuk campuran aspal porus adalah 20%. Hasil pengujian *Cantabro* dalam penelitian ini disajikan pada tabel 4.24.

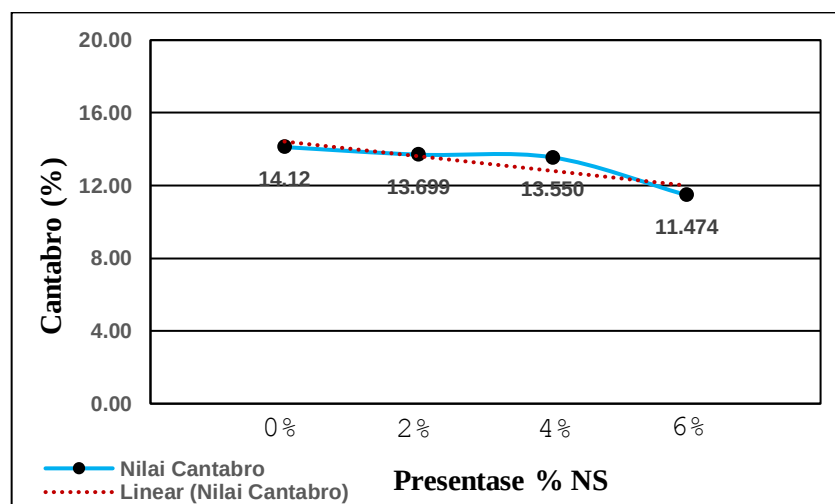
Tabel 4. 24 Rekapitulasi Cantabro Test

No	Variasi	Kode Sampel	W _{Constant}	W _{After LA}	W _{Loss}	Cantabro
			(kg)	(kg)	(gr)	(%)
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
1	NS 0%	A1	1180	1135	166	14.07
		A2	1175	1105	165	14.04
		A3	1180	1095	168	14.12
	Rata-rata					14.12
2	NS 2%	B1	1165.50	1000.50	165.00	14.16
		B2	1173.90	1015.70	158.20	13.48
		B3	1180.10	1021.21	158.89	13.46
	Rata-rata					13.70
3	NS 4%	C1	1178.20	1016.10	162.10	13.76

No	Variasi	Kode Sampel	W _{Constant}	W _{After LA}	W _{Loss}	Cantabro
		C2	1164.20	1036.50	127.70	10.97
		C3	1192.50	1002.63	189.87	15.92
Rata-rata						13.55
4	NS 6%	D1	1184.20	1006.10	178.10	15.04
		D2	1169.40	1025.70	143.70	12.29
		D3	1170.10	1087.10	83.00	7.09
Rata-rata						11.47

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil pengujian *cantabro loss* pada tabel di atas, dapat dianalisis bahwa penambahan nano silika memberikan pengaruh yang nyata terhadap ketahanan aus campuran aspal porus. Pada variasi tanpa nano silika (NS 0%), nilai *cantabro loss* rata-rata sebesar 14,12%, yang menunjukkan kehilangan massa paling besar. Namun, ketika nano silika ditambahkan sebesar 2%, nilai *Cantabro Loss* meningkat menjadi 13,70%, kemudian sedikit menurun pada variasi NS 4% sebesar 13,55%, dan mengalami penurunan yang lebih signifikan pada variasi NS 6% dengan nilai rata-rata 11,47%. Hasil penelitian menunjukkan penggunaan nano silika semakin menurun seiring bertambahnya persentase inovasi, kecenderungan data menunjukkan bahwa setelah penambahan awal, peningkatan kadar nano silika selanjutnya menyebabkan nilai *cantabro loss* semakin menurun. Penelitian Azman Marsri menyatakan nano silika berhasil menurunkan nilai *cantabro loss* dengan hasil penelitian optimum pemberian kadar nano silika 4% mendapatkan hasil 9,37% - 10,74% (Azman Masri et al., 2016).



Gambar 4. 12 Pengujian Cantabro Loss

Sumber : Data Pengujian

Berdasarkan penelitian Crucho menyatakan nano silika mampu mengisi rongga mikro dalam matriks binder dan memperkuat ikatan aspal, serta mampu meningkatkan daya tahan dan meningkatkan ketahanan aus pada campuran (Crucho et al., 2019). Mengacu pada AAPA, 2004, batas maksimum kehilangan massa yang diperbolehkan untuk campuran aspal porus adalah sebesar 20%. Seluruh variasi campuran pada penelitian ini, baik NS 0%, NS 2%, NS 4%, maupun NS 6%, berada jauh di bawah batas tersebut, sehingga seluruh sampel dinyatakan memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan. Penurunan nilai *cantabro loss* pada variasi inovasi menunjukkan bahwa penambahan nano silika pada kadar yang lebih tinggi mampu meningkatkan ketahanan campuran terhadap benturan dan abrasi. Secara teknis, nano silika berperan sebagai material pengisi berukuran sangat halus yang dapat mengisi rongga mikro di dalam campuran dan memperbaiki ikatan antara aspal dan agregat. Ikatan yang lebih kuat ini membuat agregat lebih terkunci satu sama lain, sehingga mengurangi potensi pelepasan butiran saat pengujian *cantabro loss*. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan nano silika, khususnya pada kadar yang lebih tinggi, memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan durabilitas dan ketahanan aus campuran aspal porus.

4.7 Analisis Harga

Analisis harga dilakukan pada perbandingan aspal konvensional dengan aspal inovasi (Aspal porus dengan tambahan kadar nano silika 6% dengan aspal konvensional). Perbandingan dilakukan pada material 1 km dengan lebar 7m dan tebal 5cm. Harga yang digunakan sebagai acuan adalah harga satuan dasar (HSD) Kota Semarang 2024 yang didapatkan dari laman informasi harga satuan dasar provinsi Jawa Tengah 2025. Sedangkan untuk nano silika harga yang digunakan sebagai acuan didapatkan dari salah satu toko pada Alibaba.com dengan spesifikasi teknis nano silika Gasil 200DF. Penggunaan kadar volume nano silika pada penelitian ini didapatkan dari volume aspal dikali dengan penggunaan kadar nano silika. Data untuk analisis harga pada aspal dapat dilihat pada tabel 4.25 dan 4.26 dibawah.

Tabel 4. 25 Analisis Harga Aspal Konvensional

Material	Volume	Satuan	Harga Satuan (Rp.)	jumlah harga (Rp.)
Agregat 3/4	0.492	m ³	336.850	165.696
Agregat 1/2	0.312	m ³	360.197	112.443
Abu Batu	0.047	m ³	363.457	17.191
Pasir	0.095	m ³	334.500	31.642
Aspal	53.998	kg	16.129	870.931
Jumlah tiap m ³				1.197.903
Jumlah tiap 1 km				304.825.906

Sumber : Hasil Penelitian

Tabel 4. 26 Analisis Harga Aspal Inovasi

Material	Volume	Satuan	Harga Satuan (Rp.)	Jumlah Harga (Rp.)
Agregat 3/4	0.492	m ³	336.850	165.695
Agregat 1/2	0.312	m ³	360.197	112.443
Abu Batu	0.047	m ³	363.457	17.190
Pasir	0.095	m ³	334.500	31.642
Aspal	53.998	Kg	16.129	870.931
Nano Silika	3.283	kg	249.753	819.939
Jumlah tiap m ³				2.017.840
Jumlah tiap 1 km				706.244.000

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil analisis biaya, terlihat adanya perbedaan cukup signifikan antara campuran aspal porus konvensional dan campuran aspal porus dengan penambahan nano silika. Pada campuran konvensional, total biaya produksi per meter kubik campuran sebesar Rp 1.197.903, dengan estimasi biaya pekerjaan per satu kilometer mencapai Rp 304.825.906. Sementara itu, pada campuran aspal porus yang diinovasikan dengan nano silika, total biaya per meter kubik meningkat menjadi Rp 2.017.804, dan total biaya per satu kilometer bertambah menjadi Rp 706.244.000.

Kenaikan biaya tersebut terutama dipengaruhi oleh penggunaan nano silika sebagai bahan tambah, yang memiliki harga satuan relatif tinggi yaitu Rp 249.753 per kilogram mengacu pada harga penjualan nano silika pada salah satu toko Alibaba.com (belum termasuk pajak dan biaya pengiriman), serta memberikan kontribusi tambahan pada total kebutuhan material. Meskipun menyebabkan peningkatan biaya, penambahan nano silika dipertimbangkan sebagai investasi yang dapat meningkatkan kinerja campuran, seperti memperbaiki stabilitas, meningkatkan daya lekat antara aspal dan agregat, serta mengurangi potensi

kerusakan berupa *ravelling* atau penurunan ketahanan struktural. Penelitian Miguel menyatakan penggunaan nano silika kadar 4% pada aspal AC-WC mempengaruhi ketahanan terhadap deformasi permanen dan ketahanan Lelah (Miguel et al., 2018), Dengan demikian, perbedaan biaya antara kedua jenis campuran tidak hanya mencerminkan penambahan material baru, tetapi juga mencerminkan upaya untuk memperoleh campuran aspal porus yang memiliki durabilitas lebih baik dan umur layanan yang lebih panjang.