

BAB 5

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisa Pengujian Karakteristik Material

Pengujian karakteristik material yang terdiri dari :

1. Berat jenis dan penyerapan air agregat (alam dan terak nikel)
2. Keausan dengan mesin *Los Angeles Abrasion* (alam dan terak nikel)
3. Penetrasi aspal
4. Kehilangan berat
5. Berat jenis aspal
6. Titik lembek aspal
7. Titik nyala dan titik bakar aspal
8. Daktilitas aspal
9. Viskositas aspal

Pengujian-pengujian di atas dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Pemeriksaan karakteristik material dilakukan untuk memeriksa kelayakan dari material yang digunakan.

5.1.1 Analisa Karakteristik Agregat

Agregat yang digunakan pada pengujian karakteristik adalah agregat alam dan agregat terak nikel. Setiap agregat terdiri dari agregat kasar dan agregat halus. Agregat kasar adalah agregat yang tertahan pada saringan No. 4 atau agregat yang dengan diameter lebih dari 4,75 mm. Sedangkan, agregat halus adalah agregat yang lolos dari saringan No. 4 dengan diameter lubang 4,75 mm dan tertahan pada saringan No. 200 dengan diameter lubang 0,075 mm. Berikut adalah analisa pengujian karakteristik agregat :

a. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar Alam

Berat jenis adalah perbandingan berat dengan berat air atau volume dari agregat tersebut. Berat jenis dibutuhkan untuk menghitung komposisi agregat yang dibutuhkan untuk campuran beraspal. Berikut adalah hasil dari pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar.

Tabel 5.1 Berat Jenis Agregat Kasar Alam

BJ Kasar Agregat Alam				
Uraian	I	II	III	Rata-rata
BJ Bulk	2.719	2.660	2.663	2.681
BJ SSD	2.751	2.688	2.699	2.712
BJ App	2.809	2.736	2.761	2.769
Penyerapan (%)	1.176	1.044	1.336	1.185

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari 3 kali pengujian didapat hasil rata-rata berat jenis seperti pada Tabel 5.1. Berat jenis yang digunakan untuk pembuatan benda uji adalah berat jenis *bulk* atau berat jenis curah kering. Rata-rata berat jenis yang didapat adalah sebesar 2,681 Sedangkan untuk penyerapan air didapat rata-rata sebesar 1,185%.



Gambar 5.1 Pengujian Berat Jenis Agregat Kasar Alam

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Nilai berat jenis akan berpengaruh pada berat agregat. Jika berat jenis agregat semakin besar, maka semakin besar pula berat agregat tersebut. Namun semakin besar berat jenis, semakin kecil volume agregat tersebut. Dilihat dari rumus berat jenis, volume berbanding terbalik dengan berat jenis. Nilai berat jenis juga digunakan untuk menentukan berat pada setiap fraksi yang akan digunakan nantinya.

b. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar Terak Nikel

Berat jenis dihitung untuk menentukan perbandingan berat dengan volumenya. Jika berat jenisnya besar maka suatu material akan semakin berat. Pada pengujian ini,

terak nikel diuji berat jenisnya untuk menentukan komposisi pada campuran beraspal nantinya. Berikut adalah hasil pengujian yang dilakukan.

Tabel 5.2 Berat Jenis Agregat Kasar Terak Nikel

BJ Kasar Agregat Terak Nikel				
Uraian	I	II	III	Rata-rata
BJ Bulk	2.909	2.906	2.916	2.910
BJ SSD	2.912	2.914	2.926	2.917
BJ App	2.917	2.931	2.945	2.931
Penyerapan (%)	0.101	0.303	0.343	0.249

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari 3 kali pengujian didapat hasil rata-rata berat jenis seperti pada Tabel 5.2. Berat jenis yang digunakan untuk pembuatan benda uji adalah berat jenis *bulk* atau berat jenis curah kering. Rata-rata berat jenis yang didapat adalah sebesar 2,91. Sedangkan untuk penyerapan air didapat rata-rata sebesar 0,249%.



Gambar 5.2 Pengujian Berat Jenis Agregat Kasar Terak Nikel

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Nilai berat jenis akan berpengaruh pada berat yang dibutuhkan pada saat menghitung komposisi campuran. Jika dibandingkan, berat jenis terak nikel lebih besar dibandingkan berat jenis agregat alam. Hal ini menyebabkan berat dari terak nikel, lebih berat dari agregat alam.

c. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus Alam

Berat jenis agregat halus juga dibutuhkan untuk penentuan kebutuhan komposisi campuran. Agregat yang diklasifikasi sebagai agregat halus adalah agregat yang lolos dari saringan No.4 dan tertahan pada saringan No.200. Dengan kata lain,

agregat dengan ukuran 0,075 – 4,75 mm. Berikut adalah hasil dari pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus.

Tabel 5.3 Berat Jenis Agregat Alam Halus

Berat Jenis Halus Agregat Alam			
Uraian	I	II	III
Berat Benda Uji Permukaan Jenuh (g)	500	500	500
Berat Benda Uji Kering Oven (g)	487.5	487	488.5
Berat Picnometer Diisi Air (g)	780	774	784.5
Berat Picnometer + Benda Uji SSD + Air 25°C (g)	1086	1085.5	1092.5
BJ Bulk	2.513	2.584	2.544
BJ SSD	2.577	2.653	2.604
BJ App	2.686	2.775	2.706
Penyerapan (%)	2.564	2.669	2.354

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari 3 kali pengujian didapat hasil rata-rata berat jenis seperti pada Tabel 5.3. Berat jenis yang digunakan untuk pembuatan benda uji adalah berat jenis *bulk* atau berat jenis curah kering. Rata-rata berat jenis yang didapat adalah sebesar 2,541. Sedangkan untuk penyerapan air didapat rata-rata sebesar 2,529%.



Gambar 5.3 Pengujian Berat Jenis Agregat Halus Alam

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Jika berat jenis agregat semakin besar, maka semakin besar pula berat agregat tersebut. Namun semakin besar berat jenis, semakin kecil volume agregat tersebut. Dilihat dari rumus berat jenis, volume berbanding terbalik dengan berat jenis. Nilai berat jenis juga digunakan untuk menentukan berat pada setiap fraksi yang akan digunakan nantinya.

d. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus Terak Nikel

Agregat halus adalah agregat yang diameternya lebih kecil dari pada agregat kasar. Agregat halus memiliki diameter kurang dari 4,75 namun lebih besar dari 0,075 mm. Agregat halus berfungsi untuk mengisi rongga yang diakibatkan oleh penambahan agregat kasar. berikut adalah hasil pengujian dari berat jenis agregat halus terak nikel.

Tabel 5.4 Berat Jenis Agregat Terak Nikel Halus

Berat Jenis Halus Agregat Terak		
Uraian	I	II
Berat Benda Uji Permukaan Jenuh (g)	500	500
Berat Benda Uji Kering Oven (g)	493	496
Berat Picnometer Diisi Air (g)	771	780
Berat Picnometer + Benda Uji SSD + Air 25°C (g)	1088.5	1107.5
BJ Bulk	2.701	2.875
BJ SSD	2.740	2.899
BJ App	2.809	2.944
Penyerapan (%)	1.420	0.806

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari 2 kali pengujian didapat hasil rata-rata berat jenis seperti pada Tabel 5.2. Berat jenis yang digunakan untuk pembuatan benda uji adalah berat jenis *bulk* atau berat jenis curah kering. Rata-rata berat jenis yang didapat adalah sebesar 2,788. Sedangkan untuk penyerapan air didapat rata-rata sebesar 1,113%. Nilai berat jenis akan berpengaruh pada berat agregat.



Gambar 5.4 Pengujian Berat Jenis Agregat Halus Terak Nikel

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Nilai berat jenis akan berpengaruh pada berat yang dibutuhkan pada saat menghitung komposisi campuran. Jika dibandingkan, berat jenis terak nikel lebih

besar dibandingkan berat jenis agregat alam. Hal ini menyebabkan berat dari terak nikel, lebih berat dari agregat alam.

e. Keausan dengan Mesin *Los Angeles Abrasion* Agregat Alam

Keausan agregat adalah kemampuan suatu agregat menahan gesekan yang terjadi. Jika nilai keausan yang didapat besar maka, agregat akan mudah hancur atau rapuh. Berikut adalah hasil pengujian abrasi dengan mesin LAA.

Tabel 5.5 Hasil Pengujian Keausan dengan Mesin LAA (Agregat Alam)

LAA Agregat Alam				
Gradasi Pemeriksaan		Batu Pecah		
Saringan		Hasil Pengujian		
Lewat	Tertahan	Berat Sebelum, a (g)		
3/4	1/2	2500	2500	2500
1/2	3/8	2500	2500	2500
Jumlah Berat		5000	5000	5000
Berat Sesudah, b (g)		4024	4028.5	4047
a - b		976	971.5	953
LAA Agregat Alam				
Keausan (%)		19.52	19.43	19.06
Keausan Rata-Rata (%)		19.337		

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari 3 kali pengujian didapat hasil rata-rata keausan agregat seperti pada Tabel 5.3. Nilai keausan agregat sudah memenuhi syarat Bina Marga 2018. Bina Marga mensyaratkan nilai keausan <40%.



Gambar 5.5 Pengujian Keausan Dengan Menggunakan Mesin LAA Agregat Alam

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Nilai keausan ini berpengaruh pada kekuatan agregat tersebut dalam menahan gesekan dan benturan. Semakin besar nilai keausannya, maka semakin lemah agregat tersebut untuk menahan gesekan dan benturan.

f. Keausan dengan Mesin *Los Angeles Abrasion* Agregat Alam

Pengujian keausan juga dilakukan pada terak nikel. Pengujian ini ditujukan untuk pengecekan nilai keausan terak nikel terhadap syarat nilai keausan. Pengujian ini dilakukan karena terak nikel akan dijadikan bahan pengganti dari agregat alam maka semua pengujian untuk agregat alam harus lakukan juga pada terak nikel. Berikut adalah hasil dari pengujian keausan terak nikel.

Tabel 5.6 Hasil Pengujian Keausan dengan Mesin LAA (Agregat Terak Nikel)

LAA Agregat Terak			
Gradasi Pemeriksaan		Batu Pecah	
Saringan		Hasil Pengujian	
Lewat	Tertahan	Berat Sebelum, a (g)	
3/4	1/2	2500	2500
1/2	3/8	2500	2500
Jumlah Berat		5000	5000
Berat Sesudah, b (g)		3847	3791.5
a - b		1153	1208.5
Keausan (%)		23.06	24.17
Keausan Rata-Rata (%)		23.615	

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari 3 kali pengujian didapat hasil rata-rata keausan agregat seperti pada Tabel 5.3. Nilai keausan agregat sudah memenuhi syarat Bina Marga 2018. Bina Marga mensyaratkan nilai keausan <40%.



Gambar 5.6 Pengujian Keausan Dengan Menggunakan Mesin LAA Agregat Terak Nikel

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Nilai keausan terak nikel lebih besar dari agregat alam. Keausan terak nikel sebesar 23,615% sedangkan agregat alam sebesar 19,337% terdapat 4,278% perbedaan pada kedua jenis agregat tersebut. Hal ini dipengaruhi dari bentuk terak nikel yang sedikit berongga yang mengakibatkan terak nikel sedikit lebih mudah untuk hancur saat terkena tumbukan atau gesekan. Namun terak nikel masih memenuhi syarat keausan yaitu $<40\%$

g. Pengujian TCLP Terak Nikel

Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) merupakan sebuah metode pengujian kadar metal seperti kandungan logam berat yang dapat terurai dan mencemari lingkungan. Pengujian TCLP dilakukan umumnya berdasarkan standar USEPA 1992 SW 846-1311 untuk mengukur jumlah kadar logam berat dan potensi penggunaan limbah padat industri *ferrous* dan *non-ferrous* pada terak nikel. (Ibnu Jamil Khairi, 2020).

Terak nikel awalnya digolongkan pada limbah B3. Namun berdasarkan PP No.101 tahun 2014, pemanfaatan limbah B3 harus dilakukan pengujian untuk mengetahui kandungan zat berbahaya. Salah satu caranya adalah dengan melakukan uji *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP).

Tabel 5.7 Hasil Uji TCLP Terak Nikel

No	Parameter	Unit	Hasil	Persyaratan		Metode
				TCLP-A	TCLP-B	
1	Antimony	mg/l	<0.04	6	1	US EPA
2	Arsenic	mg/l	<0.07	3	0.5	US EPA
3	Barium	mg/l	0.03	210	35	US EPA
4	Beryllium	mg/l	<0.03	4	0.5	US EPA
5	Boron	mg/l	0.05	150	25	US EPA
6	Cadmium	mg/l	<0.01	0.9	0.15	US EPA
7	Chromium	mg/l	<0.01	15	2.5	US EPA
8	Copper	mg/l	<0.01	60	0.15	US EPA
9	Lead	mg/l	0.06	3	2.5	US EPA
10	Mercury	mg/l	<0.018	0.3	10	US EPA
11	Molybdenum	mg/l	<0.01	21	0.5	US EPA
12	Selecium	mg/l	<0.13	3	0.05	US EPA
13	Silver	mg/l	<0.03	40	3.5	US EPA
14	Selenium	mg/l	<0.13	3	0.5	US EPA
15	Zink	mg/l	<0.03	40	5	US EPA

(Sumber : *Website* Kemterian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2021)

Setelah dilakukan penelitian lebih lanjut, terak nikel lolos pengujian TCLP dengan hasil seperti tabel di atas. Terak nikel tidak memiliki zat pencemar yang lebih dari yang disyaratkan. Maka terak nikel dapat digunakan dan tidak digolongkan dalam limbah B3. Dilihat dari karakteristik nikel yang mirip dengan agregat alam, membuat nikel berpotensi untuk bisa menggantikan material alam untuk mencegah terjadinya dampak negatif jika material alam mulai menipis (PUPR, 2022).

5.1.2 Analisa Karakteristik Aspal

Ada 7 karakteristik aspal yang akan diuji antara lain : penetrasi aspal, kehilangan berat, berat jenis aspal, titik lembek, daktilitas, viskositas, titik nyala dan titik bakar. Pengujian-pengujian tersebut menggunakan prosedur yang ada pada Standar Nasional Indonesia dan Spesifikasi Bina Marga tahun 2018. Berikut adalah analisa pengujian karakteristik aspal.

a. Penetrasi Aspal

Penetrasi aspal adalah pengujian untuk menentukan tingkat kekerasan aspal. Pada pengujian ini, aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70. Berikut adalah hasil pengujian penetrasi aspal.

Tabel 5.8 Hasil Pengujian Penetrasi Aspal

Penetrasi Pada Suhu 25°C, Beban 100 g Selama 5 detik	I	II	III
Pengamatan I	65	63	63
Pengamatan II	63	67	70
Pengamatan III	61	61	68
Pengamatan IV	64	64	66
Pengamatan V	70	69	61
Pengamatan VI	68	66	64
Rata-Rata	65.2	65.0	65.3

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari 3 kali pengujian didapat hasil rata-rata penetrasi aspal seperti pada Tabel 5.5. Didapat nilai rata-rata dari pengujian 1 sebesar 65,2; pengujian 2 sebesar 65; dan pengujian 3 sebesar 65,3 menandakan nilai penetrasi aspal masih pada rentang nilai 60-70. Nilai-nilai tersebut adalah nilai penurunan jarum penetrasi dengan beban 100 g selama 5 detik. Nilai penetrasi ini sudah sesuai dengan spesifikasi aspal 60/70. Pada pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kekerasan atau konsistensi aspal yang akan digunakan. Jika semakin besar nilai penetrasi maka aspal semakin lembek atau tidak konsisten dan mudah berubah bentuk. Jika aspal terlalu lembek, maka campuran tidak akan mampu untuk menahan beban yang besar karena akan mudah untuk berdeformasi.



Gambar 5.7 Pengujian Penetrasi Aspal

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

b. Kehilangan Berat

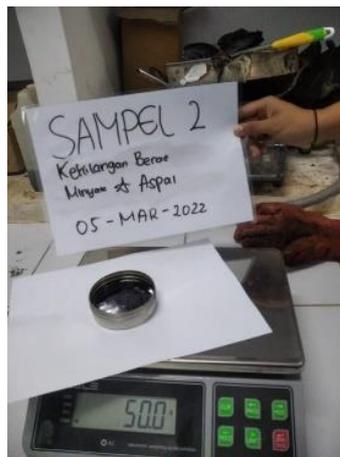
Pengujian kehilangan berat ini bertujuan untuk mengetahui tingkat penurunan berat aspal saat diberikan suhu tertentu. Tingkat kehilangan ini dinyatakan dalam bentuk persentase perubahan berat sebelum dan setelah dipanaskan. Berikut adalah hasil pengujian kehilangan berat aspal.

Tabel 5.9 Hasil Pengujian Kehilangan Berat Aspal

Uraian	I	II	III
Berat Cawan + Aspal Keras (g)	88	88	88
Berat Cawan Kosong (g)	33	33	33
Berat Aspal Keras (g)	50	50	50
Berat Sebelum Pemanasan (g)	88	88	88
Berat Sesudah Pemanasan (g)	87.75	87.78	87.92
Berat Endapan (g)	0.25	0.22	0.08
Kehilangan Berat Aspal (%)	0.28	0.25	0.09
Rata-rata	0.21		

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari 3 kali pengujian didapat hasil rata-rata kehilangan berat aspal seperti pada Tabel 5.6. Nilai kehilangan berat aspal ini sudah memenuhi syarat Bina Marga 2018 yang mensyaratkan nilai kehilangan berat sebesar $<0,8\%$. Pengujian ini dilakukan guna mengetahui kehilangan berat aspal pada suhu 163°C . Pengujian ini penting untuk memastikan aspal tidak kehilangan berat yang signifikan. Jika berat yang hilang terlalu besar, akan mengakibatkan berkurangnya kadar aspal setelah terkena suhu tinggi.



Gambar 5.8 Pengujian Kehilangan Berat

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

c. Berat Jenis Aspal

Pengujian berat jenis bertujuan untuk menentukan nilai berat jenis yang akan digunakan pada rencana gradasi campuran aspal. Selain itu, berat jenis aspal juga digunakan untuk pengecekan kelayakan aspal yang akan digunakan. Berikut adalah hasil dari pengujian berat jenis aspal.

Tabel 5.10 Hasil Pengujian Berat Jenis Aspal

Uraian	I
Berat Picnometer (g)	34.5
Berat Picnometer + Air (g)	130.5
Berat Picnometer + Benda Uji (g)	113.5
Berat Picnometer + Benda Uji + Air (g)	131.5
BJ Aspal	1.013

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari pengujian didapat hasil berat jenis aspal seperti pada Tabel 5.7. Nilai berat jenis aspal ini sudah memenuhi syarat Bina Marga 2018 yang mensyaratkan berat jenis aspal sebesar >1 . Berat jenis aspal diuji untuk menentukan berat aspal yang dibutuhkan pada campuran nantinya. Jika berat jenis aspal memiliki nilai yang tinggi, maka berat aspal pada campuran juga akan semakin berat.



Gambar 5.9 Pengujian Berat Jenis Aspal

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

d. Titik Lembek Aspal

Titik lembek adalah besarnya suhu yang dibutuhkan untuk membuat aspal menjadi lembek atau lunak. Pengujian ini bertujuan untuk pengecekan kelayakan aspal yang akan digunakan. Berikut adalah hasil dari pengujian titik lembek aspal.

Tabel 5.11 Hasil Pengujian Titik Lembek

Titik Lembek (°C)	Titik Lembek (°C)
48	50

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari pengujian didapat hasil titik lembek seperti pada Tabel 5.8. Nilai yang didapatkan pada pengujian 1 sebesar 48°C dan pengujian 2 sebesar 50°C. Nilai suhu tersebut adalah nilai titik lembek dari aspal yang digunakan. Titik lembek adalah suhu yang dibutuhkan untuk aspal berubah bentuk dari padat menjadi lembek. Nilai titik lembek aspal ini sudah memenuhi syarat Bina Marga 2018 yang mensyaratkan titik lembek aspal sebesar >48°C. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui titik lembek dari suatu aspal. Jika suhu yang didapatkan pada titik lembek bernilai kecil, maka aspal akan mudah menjadi lembek atau tingkat kekerasannya menjadi berkurang yang mana akan merugikan untuk campuran.



Gambar 5.10 Pengujian Titik Lembek

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

e. Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal

Titik nyala dan titik bakar adalah besarnya suhu yang dibutuhkan aspal untuk memercikan api dan terbakar. Pengujian ini juga bertujuan untuk pengecekan kelayakan aspal yang akan digunakan. Berikut adalah hasil dari pengujian titik nyala dan titik bakar aspal.

Tabel 5.11 Hasil Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar

Titik Nyala (°C)	Titik Bakar (°C)
325	340

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari pengujian didapat hasil titik nyala dan titik bakar seperti pada Tabel 5.9. Titik nyala yang didapat pada pengujian adalah sebesar 325°C sedangkan titik bakar yang didapat adalah sebesar 340°C yang artinya aspal akan menimbulkan percikan api pada suhu 325°C dan aspal akan terbakar pada suhu 340°C. Nilai titik nyala aspal ini sudah memenuhi syarat Bina Marga 2018 yang mensyaratkan titik nyala aspal sebesar >232°C. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai titik nyala dan titik bakar. Jika nilai titik bakar semakin rendah, maka aspal akan sangat mudah terbakar dan jika itu terjadi, maka campuran aspal akan menjadi berbahaya karena mudah terbakar.



Gambar 5.11 Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

f. Daktilitas Aspal

Daktilitas adalah pengujian pemuluran dari suatu aspal. Semakin besar pemuluran yang terjadi maka, aspal tersebut semakin daktil. Berikut adalah hasil dari pengujian daktilitas aspal.

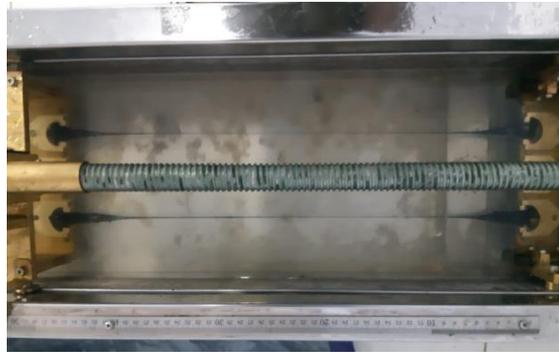
Tabel 5.13 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal

Sampel Daktilitas	Panjang Pengujian (cm)
I	120
II	95
III	112
Rata-Rata	109

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari pengujian didapat hasil daktilitas seperti pada Tabel 5.10. Nilai daktilitas aspal ini sudah memenuhi syarat Bina Marga 2018 yang mensyaratkan daktilitas aspal sebesar >100 cm. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan aspal untuk memulur atau memanjang. Panjangnya pemuluran dipengaruhi oleh tingkat

kelekatan aspal. Semakin panjang pemulurannya maka semakin besar tingkat kelekatan aspal. Dengan kelekatan aspal yang tinggi, maka campuran akan semakin kuat karena aspal adalah pengikat dari agregat pada campuran.



Gambar 5.12 Pengujian Daktilitas Aspal

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

g. Viskositas Aspal

Viskositas adalah nilai keenceran dari suatu aspal. Semakin encer suatu aspal maka, semakin cepat waktu yang didapat dari pengujian viskositas ini. Berikut adalah hasil pengujian viskositas aspal.

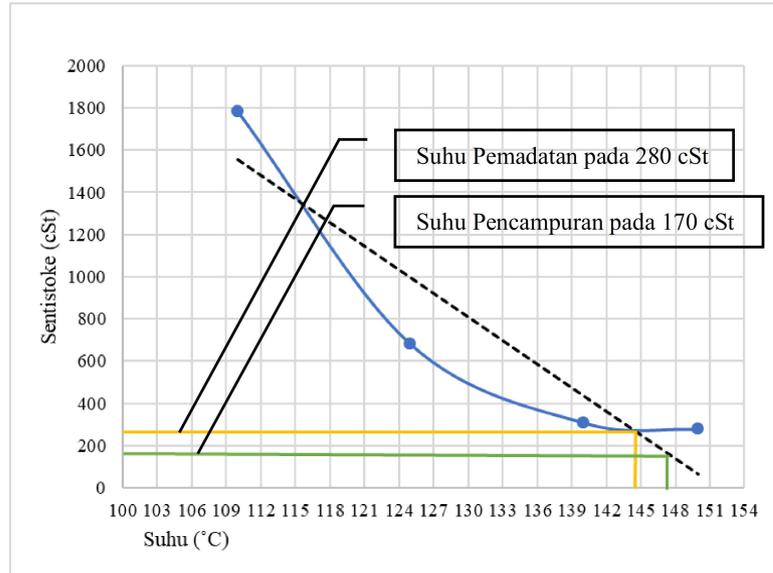
Tabel 5.14 Hasil Pengujian Viskositas Aspal

Suhu (°C)	Waktu (s)	Faktor Koreksi	cSt
110	817	2.180	1781.06
125	312	2.180	680.16
140	142	2.180	309.56
150	99	2.810	278.19

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari pengujian didapat hasil viskositas seperti pada Tabel 5.10. Nilai viskositas aspal ini sudah memenuhi syarat Bina Marga 2018 yang mensyaratkan viskositas aspal sebesar $>300\text{cSt}$. Jika waktu yang didapat bernilai kecil, maka aspal akan semakin cair. Aspal dengan nilai viskositas yang rendah akan berpengaruh pada suhu pemadatan dan suhu pencampuran. Semakin kecil viskositasnya, maka semakin kecil suhu yang dibutuhkan untuk pemadatan dan pencampuran.

Dari hasil tersebut dibuat grafik untuk menentukan suhu pemadatan dan pencampuran. Berikut adalah grafik viskositas aspal.



Gambar 5.13 Grafik Viskositas Aspal

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Grafik di atas berguna untuk menentukan perkiraan suhu pencampuran dan perkiraan suhu pemadatan. Berdasarkan RSNI M-01-2003 pada tabel 1 suhu tersebut ditentukan dari nilai 170 cSt dan 280 cSt. Saat 170 cSt didapat suhu 147°C sebagai suhu pencampuran dan saat 280 cSt didapat suhu 144°C sebagai suhu pemadatan.



Gambar 5.14 Pengujian Viskositas

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

5.2 Perencanaan Campuran Aspal Beton

Pada sub bab ini adalah penjelasan tentang perhitungan kebutuhan material agregat alam dan terak nikel yang akan digunakan untuk campuran beraspal. Sesuai dengan perencanaan awal, peneliti akan membuat 54 benda uji sesuai dengan Tabel 4.5. Dalam merencanakan campuran, dibutuhkan beberapa data seperti berat jenis aspal, berat jenis agregat alam dan berat jenis agregat terak nikel. Berikut adalah contoh perhitungan kebutuhan material.

Pertama adalah menentukan gradasi yang digunakan. Gradasi yang peneliti gunakan adalah nilai tengah dari grafik gradasi yang ada di Bina Marga seperti pada Gambar 4.1. Dari grafik tersebut didapat nilai tengah dari batas atas dan batas bawah gradasi tersebut. Berikut adalah nilai tengah dari masing-masing saringan.

Tabel 5.15 Nilai Tengah Gradasi

Nomor/ Ukuran Saringan		Nilai Tengah Gradasi (Gradasi Rencana)
inch	mm	(%)
3/4"	19	100.0
1/2"	12.5	95.0
3/8"	9.52	83.5
No. 4	4.76	61.0
No. 8	2.36	43.0
No. 16	1.18	30.5
No. 30	0.6	22.0
No. 50	0.3	15.5
No. 100	0.15	10.5
No. 200	0.075	6.5

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari nilai tengah gradasi di atas, dapat dihitung persentase tertahan pada setiap saringannya. Perhitungan ini ditujukan untuk mendapatkan gradasi yang tepat sesuai dengan Bina Marga 2018. Persentase tertahan dihitung dengan cara sebagai berikut.

$$\text{Persentase tertahan} = 100 - N. \text{ tengah} - \sum \% \text{tertahan saringan di atasnya} \quad (5.1)$$

Sebagai contoh, persentase tertahan pada saringan No.16 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Persentase tertahan No. 16} &= 100 - 30,5 - 5 - 11,5 - 22,5 - 18 \\ &= 12,5\% \end{aligned}$$

Berikut adalah hasil dari perhitungan persentase berat tertahan.

Tabel 5.16 Persentase Tertahan Gabungan

Nomor/ Ukuran Saringan		Persentase Tertahan Gabungan
inch	mm	(%)
3/4"	19	0.0
1/2"	12.5	5.0
3/8"	9.52	11.5
No. 4	4.76	22.5
No. 8	2.36	18.0
No. 16	1.18	12.5
No. 30	0.6	8.5
No. 50	0.3	6.5
No. 100	0.15	5.0
No. 200	0.075	4.0
PAN		6.5

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Selanjutnya adalah perhitungan berat agregat setiap saringan. Berikut adalah rumus yang digunakan.

$$\text{Berat Agregat} = \% \text{tertahan} \times \text{berat total agregat} \quad (5.2)$$

Sebagai contoh, berikut adalah perhitungan berat agregat pada saringan no. 8.

$$\begin{aligned} \text{Berat agregat saringan No. 8} &= 18\% \times 1152 \\ &= 207,36 \text{ g} \end{aligned}$$

Berikut adalah hasil dari perhitungan berat agregat disetiap saringannya.

Tabel 5.17 Berat Agregat Setiap Saringan

Nomor/ Ukuran Saringan		Berat Agregat (kg)
inch	mm	
3/4"	19	0.000
1/2"	12.5	57.600
3/8"	9.52	132.480
No. 4	4.76	259.200
No. 8	2.36	207.360
No. 16	1.18	144.000
No. 30	0.6	97.920
No. 50	0.3	74.880
No. 100	0.15	57.600
No. 200	0.075	46.080
PAN		74.880

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Tahap perhitungan selanjutnya adalah mengonversi berat tersebut menjadi volume dengan cara sebagai berikut.

$$\text{Volume agregat} = \frac{\text{berat agregat}}{\text{berat jenis agregat bulk}} \quad (5.3)$$

Tujuan dari perhitungan ini adalah untuk membagi secara rata persentase agregat alam dengan agregat terak nikel yang akan ditambahkan nantinya. Berikut adalah contoh dari perhitungan volume agregat pada saringan No. 30.

$$\begin{aligned} \text{Volume Agregat} &= \frac{102}{2,547} \\ &= 40,047 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Berikut adalah hasil dari perhitungan volume agregat.

Tabel 5.18 Volume Agregat

Nomor/ Ukuran Saringan		Volume Agregat (mm ³)
inch	mm	
3/4"	19	0.000
1/2"	12.5	22.380

Nomor/ Ukuran Saringan		Volume Agregat (mm ³)
inch	mm	
3/8"	9.52	51.473
No. 4	4.76	100.709
No. 8	2.36	84.806
No. 16	1.18	58.893
No. 30	0.6	40.047
No. 50	0.3	30.624
No. 100	0.15	23.557
No. 200	0.075	18.846
PAN		30.624

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Perhitungan selanjutnya adalah perhitungan berat terak nikel. Berat terak nikel tergantung pada persentase terak yang akan digunakan. Contohnya pada persentase terak nikel 60% maka dari volume agregat diambil 60% menjadi volume terak nikel. Lalu dikonversi kembali menjadi satuan berat dengan cara mengalikan volume terak nikel dengan berat jenisnya. Berikut adalah rumus perhitungan berat nikel.

$$\text{Berat Terak Nikel} = \% \text{terak} \times \text{vol. agregat} \times \text{B.J. terak} \quad (5.4)$$

Dari rumus di atas, maka didapat hasil sebagai berikut.

Tabel 5.19 Berat Terak Nikel

Nomor/ Ukuran Saringan		Volume Terak (60%)	Berat Terak (60% Volume)
inch	mm		
3/4"	19	0.000	0.0
1/2"	12.5	12.891	37.5
3/8"	9.52	29.649	86.3
No. 4	4.76	58.008	168.8
No. 8	2.36	48.848	136.2
No. 16	1.18	33.922	94.6
No. 30	0.6	23.067	64.3
No. 50	0.3	17.640	49.2
No. 100	0.15	13.569	37.8

Nomor/ Ukuran Saringan		Volume Terak (60%)	Berat Terak (60% Volume)
inch	mm		
No. 200	0.075	10.855	30.3
PAN		17.640	49.2

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari semua variasi aspal dan variasi persentase terak nikel, dihitung kebutuhan masing-masing agregat yang dibutuhkan. Berikut adalah contoh rekapitulasi yang dihasilkan dari perhitungan tersebut.

Tabel 5.20 Rekapitulasi Perhitungan Kebutuhan Agregat

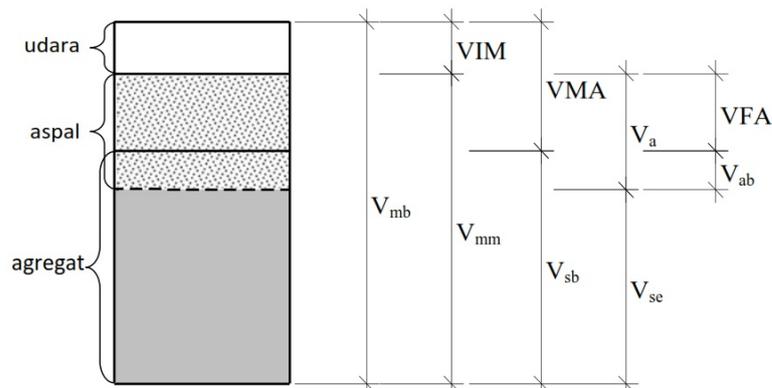
Nomor/ Ukuran Saringan		Berat Agregat (kg)	Volume Agregat (cm ³)	Volume Terak (60%)	Berat Terak (60% Volume)	Berat Agregat (40% volume)	Total
inch	mm	4.0%					
3/4"	19	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	0.00
1/2"	12.5	57.600	21.485	12.891	37.5	23.0	60.55
3/8"	9.52	132.480	49.414	29.649	86.3	53.0	139.27
No. 4	4.76	259.200	96.680	58.008	168.8	103.7	272.48
No. 8	2.36	207.360	81.413	48.848	136.2	82.9	219.13
No. 16	1.18	144.000	56.537	33.922	94.6	57.6	152.18
No. 30	0.6	97.920	38.445	23.067	64.3	39.2	103.48
No. 50	0.3	74.880	29.399	17.640	49.2	30.0	79.13
No. 100	0.15	57.600	22.615	13.569	37.8	23.0	60.87
No. 200	0.075	46.080	18.092	10.855	30.3	18.4	48.70
PAN		74.880	29.399	17.640	49.2	30.0	79.13
Total Berat Agregat (gr)		1152.0	443.5	266.09	754.12	460.80	1214.92
Berat Aspal Total (gr)		48.00					

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

5.3 Analisa Karakteristik Campuran Beraspal

Ada 6 karakteristik *Marshall* yang diuji pada penelitian ini antara lain : VMA, VIM, VFA, Stabilitas, *flow* dan *Marshall Qoutient*. Nilai-nilai karakteristik ini yang akan menentukan kadar aspal optimum yang didapatkan.

VIM adalah rongga yang masih tersisa setelah campuran beton aspal dipadatkan. VIM ini dibutuhkan untuk tempat bergesernya butir-butir agregat akibat pemadatan tambahan yang terjadi oleh repetisi beban lalu lintas atau tempat jika aspal meleleh menjadi lunak akibat meningkatnya suhu udara. VMA adalah volume rongga di dalam beton aspal padat jika seluruh selimut aspal ditiadakan. VMA akan meningkat jika selimut aspal lebih tebal, atau agregat yang digunakan bergradasi terbuka. VFA adalah volume rongga antara agregat dari beton aspal padat yang terisi oleh aspal, disebut juga volume film atau selimut aspal. (Sukirman S. , 2016)



Gambar 5.15 Skematis Berbagai Jenis Rongga Beton Aspal Padat

(Sumber : Sukirman, 2016)

Berikut adalah tabel hasil pengujian dari *Marshall* pada penelitian ini.

Tabel 5.21 Rekapitulasi Hasil Pengujian

Karakteristik Marshall	Kadar Aspal (%)	Kadar Terak Nikel			Spesifikasi
		0%	20%	60%	
VMA (%)	4	20.21	18.64	15.77	Minimum 15%
	4.5	20.44	17.55	15.35	
	5	24.25	18.77	15.33	
	5.5	17.17	16.95	15.61	
	6	19.13	16.86	15.82	
VIM (%)	4	10.86	8.70	7.95	3% - 5%
	0	9.97	6.27	6.25	
	5	13.18	6.46	4.98	
	5.5	3.85	3.12	4.03	
	6	4.93	1.77	3.00	
VFA (%)	4	46.30	53.43	49.73	

Karakteristik Marshall	Kadar Aspal (%)	Kadar Terak Nikel			Spesifikasi
		0%	20%	60%	
	4.5	51.35	64.45	59.36	Minimum 65%
	5	47.38	66.14	67.56	
	5.5	77.61	81.67	74.18	
	6	74.32	89.99	81.07	
Stabilitas (kg)	4	1105.27	1073.89	1094.81	Minimum 800kg
	4.5	969.29	990.21	1171.52	
	5	986.73	1077.38	1077.38	
	5.5	1140.14	927.45	1004.16	
	6	1028.57	1046.00	958.83	
Flow (mm)	4	2.87	2.77	2.13	2mm - 4mm
	4.5	2.40	1.93	3.23	
	5	2.47	2.00	3.00	
	5.5	2.40	2.30	1.87	
	6	3.27	2.40	1.77	
MQ (kg/mm)	4	401.40	391.05	514.36	Minimum 250 kg/mm
	4.5	404.71	531.50	379.18	
	5	404.65	558.32	371.19	
	5.5	476.36	407.86	550.43	
	6	319.58	436.77	545.82	

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

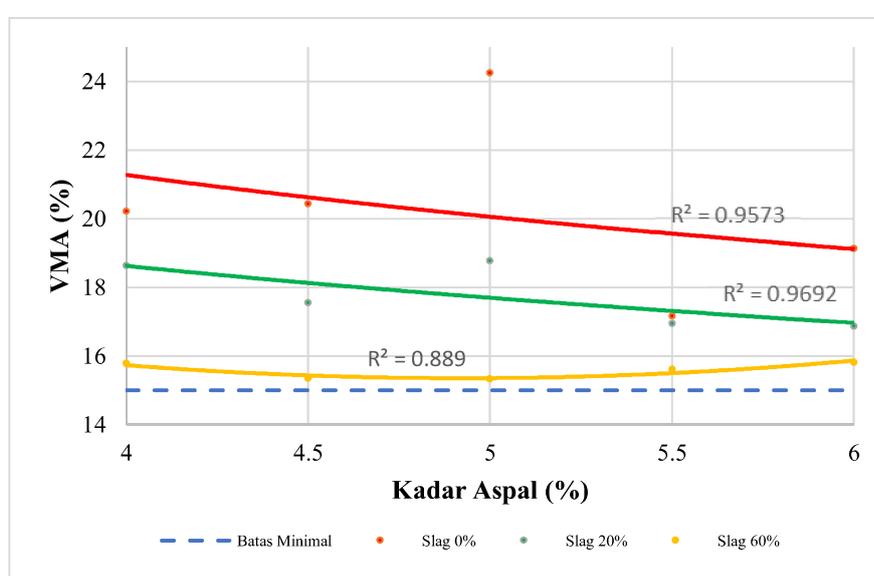
Berdasarkan tabel di atas, ada beberapa nilai yang tidak sesuai dengan standar Bina Marga, namun ada juga nilai yang memenuhi standar. Pada nilai VMA, semua nilai yang didapat telah memenuhi syarat. Pada nilai VIM dari nilai 15 nilai VIM, terdapat 6 nilai VIM yang memenuhi syarat. Pada nilai VFA dari 15 nilai VFA terdapat 8 nilai VFA yang memenuhi syarat. Pada nilai stabilitas dari 15 semua nilai yang didapat memenuhi syarat. Pada nilai *flow* dari 15 nilai VFA terdapat 12 nilai VFA yang memenuhi syarat. Pada nilai MQ dari 15 semua nilai yang didapat memenuhi syarat.

5.3.1 Analisa VMA (*Void In Mineral Aggregate*)

VMA adalah rongga pada pori campuran beraspal termasuk rongga udara dan volume aspal efektif. Menghitung nilai VMA dengan cara sebagai berikut. Contoh perhitungan ini diambil pada perhitungan VMA di benda uji 1 dengan kadar aspal 4,5 % dan kadar terak nikel 0% :

$$\begin{aligned} \text{Void in Material Aggregate} &: 100 - \frac{\text{Berat Isi} \times (100 - \text{Kadar Aspal})}{\text{Bj Agregat Curah}} \\ &: 100 - \frac{2.19 \times (100 - 4.5)}{2.61} \\ &: 19.73 \% \end{aligned}$$

Dari semua pengujian VMA, hasil yang didapat paling tinggi adalah saat kadar aspal 5% untuk kadar terak nikel 0%. Sedangkan untuk kadar terak nikel 60%, nilai VMA terbesar ada pada kadar aspal 6%. Namun seluruh pengujian memenuhi standar yang disyaratkan yaitu >15%.



Gambar 5.16 Grafik Perbandingan Kadar Aspal vs VMA

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari grafik di atas, nilai VMA tertinggi terdapat pada benda uji dengan kadar terak nikel 0%. Tepatnya pada kadar aspal 5% dengan nilai sebesar 24,25%. Nilai VMA berpengaruh pada rongga yang terisi oleh aspal. Semakin besar nilainya, maka semakin besar pula rongga yang terisi oleh aspal.

Jika ditinjau dari sisi penambahan terak nikel, penambahannya mengakibatkan berkurangnya nilai VMA. Hal ini dikarenakan berat isi pada campuran bernilai kecil yang disebabkan oleh penyerapan pada campuran yang tinggi. Dilihat dari berat benda uji kondisi SSD yang besar.

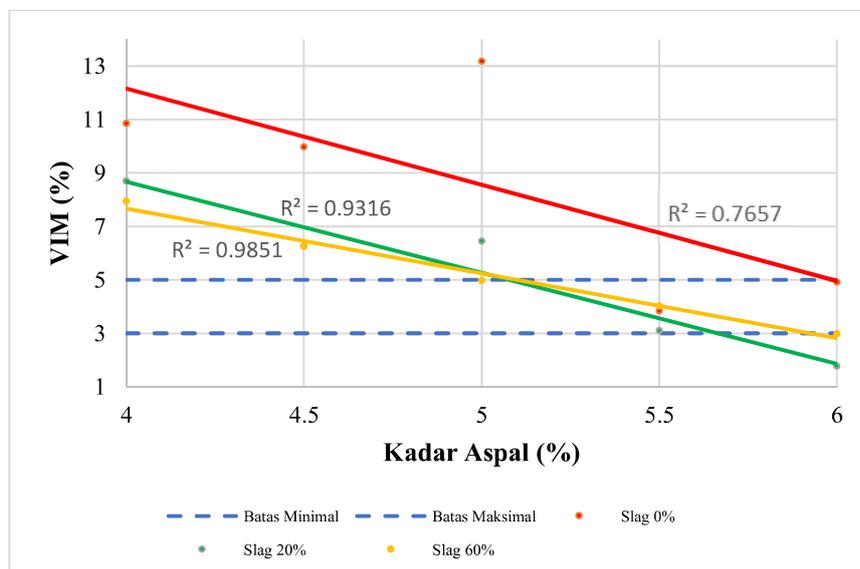
Berdasarkan nilai koefisien determinasi terhadap nilai VMA sebesar 0,889 – 0,9692 menunjukkan bahwa hubungan terhadap nilai VMA memiliki korelasi kuat.

5.3.2 VIM (*Void In Mixture*)

VIM adalah rongga yang tidak terisi oleh aspal. VIM adalah bagian dari VMA namun tidak terisi aspal. Menghitung nilai VIM dengan cara sebagai berikut. Contoh perhitungan ini diambil pada perhitungan VIM di benda uji 1 dengan kadar aspal 4,5 % dan kadar terak nikel 20% :

$$\begin{aligned}
 \text{Void in Mixture} &: 100 \times \frac{\text{BJ. Campuran Maksimum} - \text{Berat Isi}}{\text{BJ. Campuran Maksimum}} \\
 &: 100 \times \frac{2,46 - 2,28}{2,46} \\
 &: 7,55 \%
 \end{aligned}$$

Dari semua pengujian VIM, hasil yang didapat yang memenuhi syarat adalah saat kadar aspal 5,5% untuk semua kadar terak nikel, kadar aspal 6% pada saat kadar terak nikel 0% dan 60% dan kadar aspal 5% pada saat kadar terak nikel 60%. Syarat yang disyaratkan oleh Bina Marga adalah 3-5%.



Gambar 5.17 Grafik Perbandingan Kadar Aspal vs VIM

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari grafik di atas, ditinjau dari variasi aspal, nilai VIM cenderung semakin menurun. Hal ini dikarenakan semakin banyaknya aspal yang digunakan, maka

semakin sedikit pula rongga yang kosong karena terisi oleh aspal. Jadi dapat disimpulkan bahwa semakin besar kadar aspal yang dipakai, maka semakin kecil VIM yang dihasilkan.

Jika ditinjau dari variasi terak nikel yang digunakan, penggunaan terak nikel bisa dikatakan efektif karena terdapat 4 kadar terak nikel yang memenuhi syarat Bina Marga. Tepatnya pada kadar terak nikel 60% terdapat 3 kadar aspal yang memenuhi syarat yaitu 4,5%; 5% dan 6% dan pada kadar nikel 20% pada kadar aspal 5,5%. Sedangkan hanya 2 kadar dengan terak nikel 0% yang memenuhi syarat Bina Marga. Tepatnya pada kadar aspal 5,5% dan 6%.

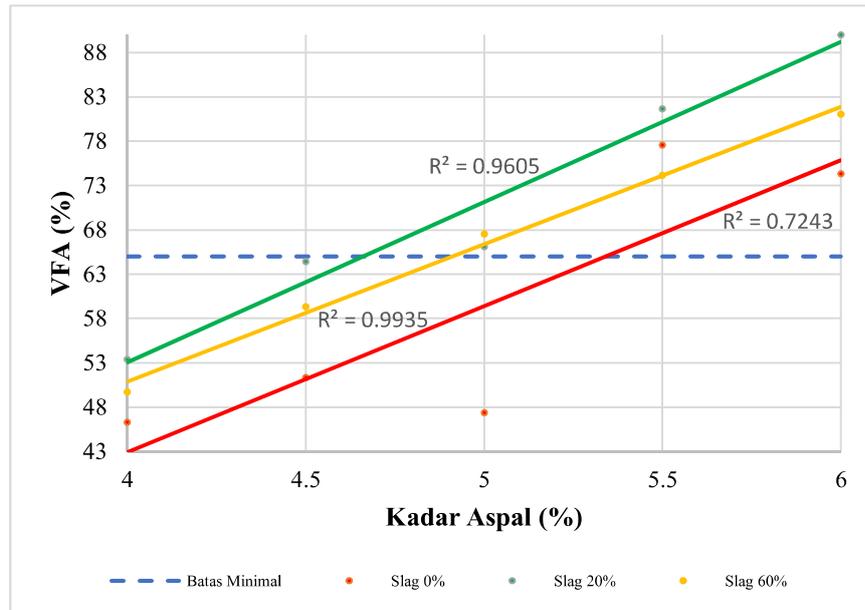
Berdasarkan nilai koefisien determinasi terhadap nilai VIM sebesar 0,7657 – 0,9851 menunjukkan bahwa hubungan terhadap nilai VIM memiliki korelasi kuat.

5.3.3 VFA (*Void Filled with Asphalt*)

VFA adalah persentase rongga yang terisi oleh aspal. Nilai ini dipengaruhi dari nilai VIM dan VMA. Menghitung nilai VFA dengan cara sebagai berikut. Contoh perhitungan ini diambil pada perhitungan VFA di benda uji 1 dengan kadar aspal 5 % dan kadar terak nikel 60% :

$$\begin{aligned} \text{Void in Mixture} & : 100 \times \frac{\text{VMA} - \text{VIM}}{\text{VMA}} \\ & : 100 \times \frac{15,1 - 4,72}{15,1} \\ & : 68,77 \% \end{aligned}$$

Dari semua pengujian VFA, hasil yang didapat yang memenuhi syarat adalah saat kadar aspal 5% untuk kadar terak nikel 20% dan 60%, dan semua kadar terak nikel dengan kadar aspal 5,5% dan 6%. Syarat yang disyaratkan oleh Bina Marga adalah >65%.



Gambar 5.18 Grafik Perbandingan Kadar Aspal vs VFA

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari grafik di atas, ditinjau dari variasi aspal, nilai VFA cenderung semakin meningkat. Hal ini dikarenakan semakin banyaknya aspal yang digunakan, maka semakin banyak pula rongga yang terisi oleh aspal. Jadi dapat disimpulkan bahwa semakin besar kadar aspal yang dipakai, maka semakin besar VFA yang dihasilkan.

Jika ditinjau dari variasi terak nikel yang digunakan, penggunaan terak nikel bisa dikatakan efektif karena mendapatkan nilai VFA yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran tanpa terak nikel. Hal ini disebabkan karena bentuk terak nikel yang relatif berongga mengakibatkan mudahnya aspal untuk mengisi rongga dalam campuran.

Nilai VFA ini juga berhubungan dengan nilai VIM dan VMA. Hubungan antara VIM dan VFA berbanding terbalik yang berarti jika nilai VIM semakin besar, maka nilai VFA akan semakin kecil. Sedangkan hubungan antara VFA dan VMA berbanding lurus yang berarti jika nilai VMA semakin besar maka semakin besar pula nilai VFA. Namun terlalu besarnya nilai VMA dapat mengakibatkan *bleeding* pada saat temperatur tinggi yang akan menyebabkan aspal naik kepermukaan.

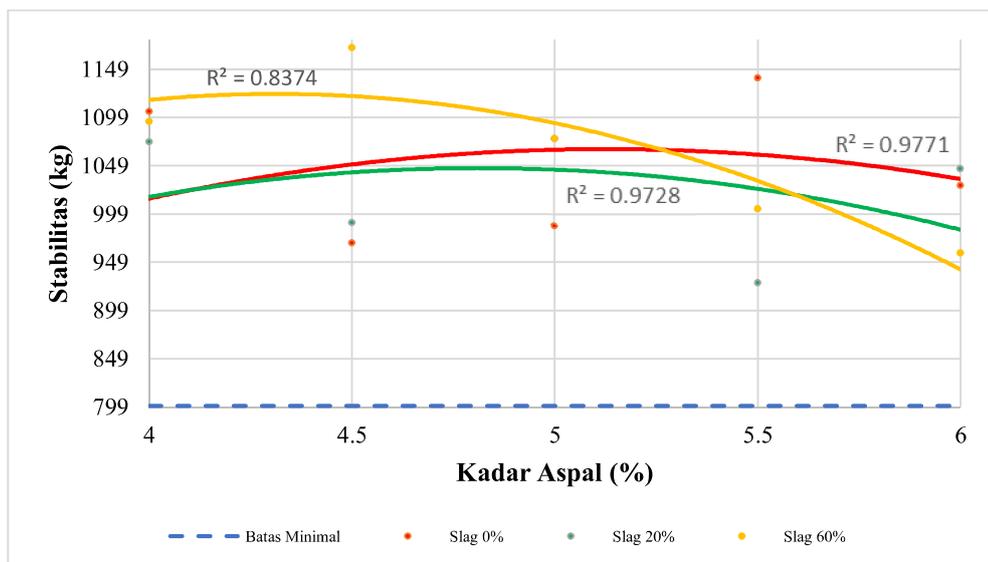
Berdasarkan nilai koefisien determinasi terhadap nilai VFA sebesar 0,7243 – 0,9935 menunjukkan bahwa hubungan terhadap nilai VFA memiliki korelasi kuat.

5.3.4 Stabilitas

Stabilitas adalah nilai kekuatan campuran dalam menahan beban. Stabilitas didapat dari nilai yang ditunjukkan pada *dial* yang ditunjukkan pada alat *Marshall*. Menghitung nilai Stabilitas dengan cara sebagai berikut. Contoh perhitungan ini diambil pada perhitungan Stabilitas di benda uji 2 dengan kadar aspal 5,5 % dan kadar terak nikel 0% :

Stabilitas : Bacaan *Dial* x angka kalibrasi *Marshall*
: 108 x 10,46
: 1129,68 kg

Dari semua pengujian stabilitas, semua benda uji memenuhi syarat Bina Marga yang mensyaratkan stabilitas >800 kg.



Gambar 5.19 Grafik Perbandingan Kadar Aspal vs Stabilitas

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

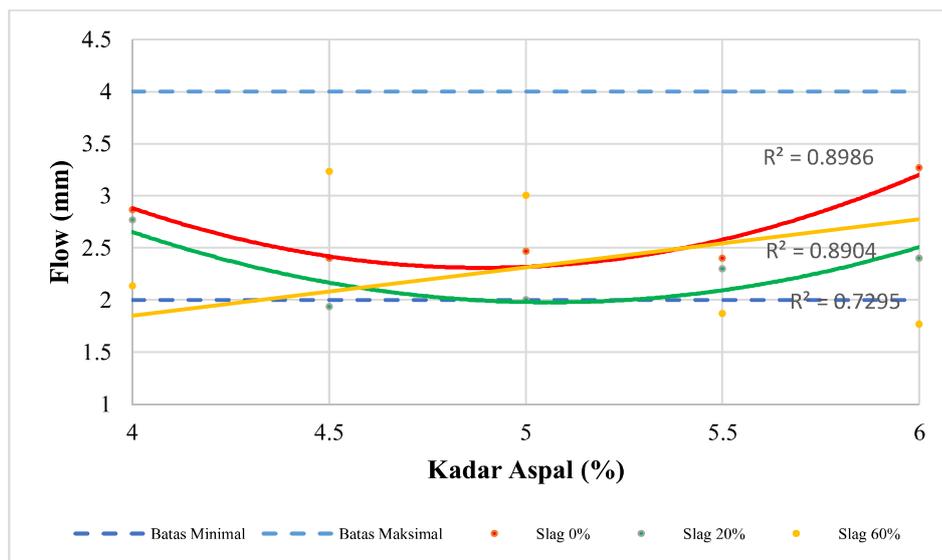
Dilihat dari grafik di atas, nilai stabilitas relatif berdekatan antara semua benda variasi kadar. Namun didapat nilai stabilitas tertinggi sebesar 1171,52 kg, ada saat kadar terak nikel 60% dan kadar aspal 4,5%. Dari hasil pengujian ini dapat disimpulkan bahwa substitusi terak nikel dapat menghasilkan nilai stabilitas yang melebihi syarat Bina Marga.

Dilihat dari grafik di atas, nilai stabilitas cenderung mengalami peningkatan seiring pertambahan terak nikel. Jika dilihat pada kadar aspal 4,5%, saat kadar terak nikel 0% didapat nilai stabilitas sebesar 969,29 kg mengalami kenaikan saat ditambah terak nikel 20% nilai stabilitas menjadi 990,21 kg namun mengalami penurunan saat ditambah terak nikel 60% nilai stabilitas menjadi 1171,52 kg

Berdasarkan nilai koefisien determinasi terhadap nilai stabilitas sebesar 0,8374 – 0,9771 menunjukkan bahwa hubungan terhadap nilai VMA memiliki korelasi kuat.

5.3.5 Flow

Nilai *flow* adalah nilai penurunan yang didapat setelah pengujian Marshall dilakukan. Nilai ini didapat dari *dial flow* pada alat *Marshall* yang digunakan. Berikut adalah nilai *flow* yang didapat dari pengujian :



Gambar 5.20 Grafik Perbandingan Kadar Aspal vs *Flow*

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dilihat dari grafik di atas, nilai penurunan (*flow*) mayoritas memenuhi ketentuan Bina Marga. Namun ada 3 nilai *flow* yang tidak sesuai dengan ketentuan yaitu pada kadar terak nikel 20% pada kadar aspal 4,5% dan pada kadar terak nikel 60% pada kadar aspal 5,5% dan 6%.

Seiring penambahan terak nikel, nilai *flow* cenderung menurun. Seperti pada kadar aspal 4%, terjadi penurunan seiring penambahan terak nikel. Pada terak nikel 0%

didapat nilai *flow* 2,87 mm, pada kadar nikel 20% didapat nilai *flow* 2,77 mm dan pada kadar terak nikel 60% didapat nilai *flow* 2,13 mm. Hal ini disebabkan karena nilai keausan terak nikel cenderung lebih rendah dibandingkan dengan keausan agregat alam yang mengakibatkan campuran lebih mudah mengalami penurunan atau berdeformasi.

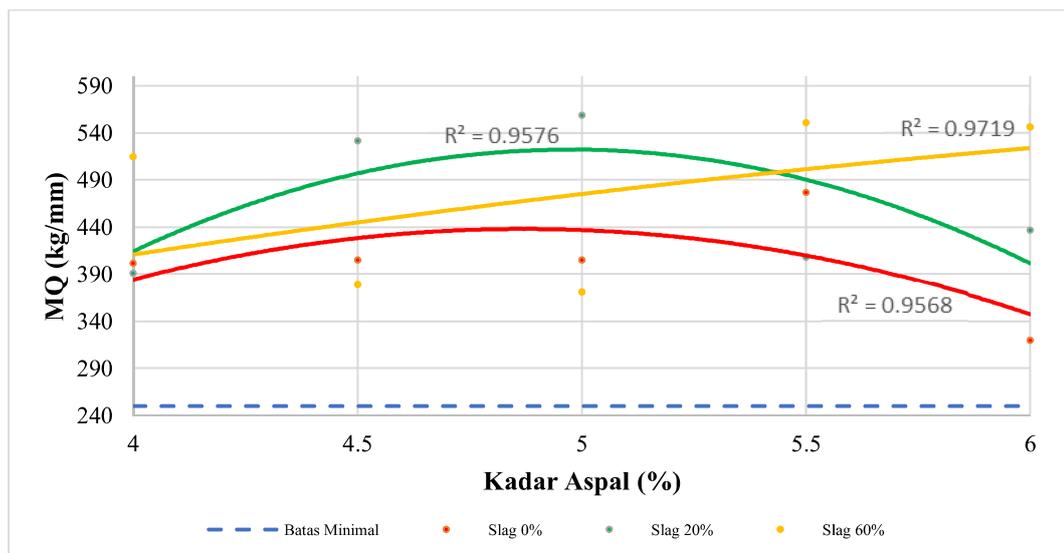
Berdasarkan nilai koefisien determinasi terhadap nilai *flow* sebesar 0,7295 – 0,8986 menunjukkan bahwa hubungan terhadap nilai *flow* memiliki korelasi kuat.

5.3.6 Analisa MQ (*Marshall Qoutient*)

MQ adalah nilai perbandingan dari nilai stabilitas dan nilai *flow*. Menghitung nilai MQ dengan cara sebagai berikut. Contoh perhitungan ini diambil pada perhitungan Stabilitas di benda uji 2 dengan kadar aspal 5,5 % dan kadar terak nikel 20% :

$$\begin{aligned} \text{Marshall Qoutient} &: \frac{\text{Stabilitas}}{\text{flow}} \\ &: \frac{927,45}{2,3} \\ &: 407,86 \text{ kg/mm} \end{aligned}$$

Semua pengujian MQ (*Marshall Qoutient*) memenuhi syarat Bina Marga yang mensyaratkan MQ sebesar >250 kg/mm



Gambar 5.21 Grafik Perbandingan Kadar Aspal vs MQ

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Berdasarkan grafik di atas, nilai MQ cenderung menurun saat penambahan terak nikel 20%. Namun cenderung mengalami peningkatan saat penambahan terak nikel 60%.

Berdasarkan nilai koefisien determinasi terhadap nilai *Marshall Qoutient* sebesar 0,9568 – 0,9719 menunjukkan bahwa hubungan terhadap nilai *Marshall Qoutient* memiliki korelasi kuat.

5.3.7 Analisa Nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) Campuran Beraspal

Penentuan nilai KAO ini bertujuan mengetahui kadar aspal efektif yang memenuhi parameter *Marshall*. Penentuan nilai ini guna mendapatkan kadar aspal yang optimum untuk campuran, yang nantinya campuran dengan kadar aspal optimum dan dengan persentase terak nikel masing masing bisa dibandingkan. Penggunaan kadar aspal optimum saat perbandingan campuran, guna mendapat nilai tertinggi dari masing-masing persentase terak nikel pada campuran. Berikut adalah *barchart* untuk nilai kadar aspal optimum (KAO) :

Tabel 5.22 Tabel Penentuan KAO Campuran Beraspal Dengan Terak Nikel 0%

Kadar terak Nikel 0 %						
Stabilitas						Min 800kg
VIM						3% - 5%
VFA						Min 65%
VMA						Min 15%
Flow						2mm - 4mm
	4	4.5	5	5.5	6	
Kadar Aspal (%)						

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Tabel 5.23 Tabel Penentuan KAO Campuran Beraspal Dengan Terak Nikel 20%

Kadar terak Nikel 20 %						
Stabilitas						Min 800kg
VIM						3% - 5%
VFA						Min 65%
VMA						Min 15%
Flow						2mm - 4mm
	4	4.5	5	5.5	6	
Kadar Aspal (%)						

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Tabel 5.24 Tabel Penentuan KAO Campuran Beraspal Dengan Terak Nikel 60%

Kadar terak Nikel 60 %						
Stabilitas			↓			Min 800kg
VIM						3% - 5%
VFA						Min 65%
VMA			↓			Min 15%
Flow						2mm - 4mm
	4	4.5	5	5.5	6	
Kadar Aspal (%)						

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Dari *barchart* diatas didapat nilai kadar aspal optimum pada penelitian ini sebesar 5,75% untuk kadar terak nikel 0%, 5,5% untuk kadar terak nikel 20% dan 5% untuk kadar terak nikel 60%. Dilihat dari hasil yang didapat, nilai kadar aspal optimum (KAO) semakin menurun seiring pertambahan terak nikel. Hal ini dikarenakan bentuk terak nikel yang berongga dan membuat terak nikel mudah melekat dengan aspal, jadi semakin banyak nikel yang ditambahkan maka semakin sedikit aspal yang dibutuhkan untuk campuran.

5.4 Pengujian Karakteristik Campuran Beraspal dengan Terak Nikel Pada Kondisi KAO

Pengujian tahap kedua terdiri pengujian karakteristik *Marshall* pada kadar aspal optimum (KAO) dan pengujian *Marshall* sisa. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari terak nikel yang digunakan. Nilai karakteristik ini akan menjadi patokan keefektifan penggunaan terak nikel pada campuran beraspal.

5.4.1 Hasil Pengujian Marshall

Berikut adalah hasil dari pengujian *Marshall* pada campuran aspal dengan kadar aspal optimum (KAO).

Tabel 5.25 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Marshall* Kondisi KAO

Karakteristik Marshall	Kadar Aspal Optimum (%)	Kadar Terak Nikel (%)	Hasil	Spesifikasi
VMA (%)	5,75	0	18.49	Minimum 15%
	5,5	20	16.95	
	5	60	15.61	

Karakteristik Marshall	Kadar Aspal Optimum (%)	Kadar Terak Nikel (%)	Hasil	Spesifikasi
VIM (%)	5,75	0	4.43	3% - 5%
	5,5	20	3.12	
	5	60	3.00	
VFA (%)	5,75	0	76.05	Minimum 65%
	5,5	20	81.67	
	5	60	67.56	
Stabilitas (kg)	5,75	0	1046,00	Minimum 800kg
	5,5	20	927.45	
	5	60	1077.38	
Flow (mm)	5,75	0	2.80	2mm - 4mm
	5,5	20	2.00	
	5	60	3.23	
MQ (kg/mm)	5,75	0	420.38	Minimum 250 kg/mm
	5,5	20	407.86	
	5	60	371.19	

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Berdasarkan tabel di atas, nilai VMA semakin berkurang seiring penambahan terak nikel pada campuran. Begitu pula nilai VIM, seiring penambahan kadar terak nikel semakin berkurang juga VIM yang didapatkan. Nilai VFA sangat dipengaruhi dari nilai VIM dan VMA karena VFA adalah persentase selisih antara nilai VIM dan VMA. Seperti pada hasil yang didapat pada kadar aspal 5,75% dengan kadar terak nikel 0% didapat nilai VMA sebesar 15,61% dan nilai VIM sebesar 3%. Dari kedua hasil nilai tersebut sama sama menghasilkan nilai yang cukup kecil maka akan menghasilkan nilai VFA yang kecil pula yaitu sebesar 67,56%.

Ditinjau dari nilai stabilitas yang didapat dari tabel di atas, terjadi kenaikan dan penurunan. Penurunan terjadi pada saat penambahan kadar terak nikel sebanyak 20%. Berdasarkan tabel di atas, nilai stabilitas yang didapat saat penambahan terak nikel 20% sebesar 927,45 kg, sedangkan tanpa penambahan terak nikel nilai stabilitas yang didapat adalah sebesar 1046 kg. Bila dibandingkan dengan campuran dengan kadar terak nikel 0% terjadi penurunan sebesar 118,55 kg atau setara dengan penurunan 11,33% nilai stabilitas. Namun terjadi kenaikan pada saat penambahan terak nikel sebanyak 60%, didapat nilai stabilitas sebesar 1077,38 kg. Jika

dibandingkan dengan kadar terak nikel 0%, terjadi kenaikan sebesar 31,38 kg atau setara dengan 3% nilai stabilitas. Berdasarkan hasil penelitian ini, terak nikel yang optimal untuk digunakan sebagai substitusi adalah 60% karena kadar ini memenuhi syarat Bina Marga dan meningkatkan nilai stabilitas pada campuran. Hal ini disebabkan karena bentuk dari terak nikel yang berongga, mengakibatkan pengikatan antar terak nikel dan aspal semakin kuat.

Ditinjau dari nilai *flow* penurunan yang terjadi pada hasil tabel diatas, terjadi kenaikan nilai *flow* pada kadar terak nikel 60%. Hasil yang didapatkan dari campuran tersebut adalah sebesar 3,23 mm, sedangkan pada campuran tanpa terak nikel mendapatkan nilai penurunan sebesar 2,8 mm. Hal ini terjadi karena nilai keausan dari terak nikel sedikit lebih besar dibandingkan dengan keausan pada agregat alam. Namun dari semua campuran dengan variasi kadar terak nikel dan kadar aspal, semua memenuhi ketentuan yang disyaratkan oleh Bina Marga Divisi 6 tahun 2018 yang mensyaratkan nilai penurunan sebesar 2-4 mm



Gambar 5.22 Pengujian Marshall

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

5.4.2 Marshall Sisa

Pengujian *marshall* sisa ini ditujukan untuk menentukan keawetan dari campuran. Pada Spesifikasi Bina Marga 2018 Tabel 6.3.3.1c) mensyaratkan nilai *Marshall* sisa sebesar >90% dari stabilitas awal. Berikut adalah rekapitulasi dari pengujian *Marshall* sisa dengan kadar aspal optimum (KAO).



Gambar 5.23 Pengujian *Marshall* Sisa

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Tabel 5.26 Rekapitulasi Pengujian *Marshall* sisa

Karakteristik Marshall Sisa	Kadar Aspal Optimum (%)	Kadar Terak Nikel (%)	Bacaan Dial	Stabilitas	Minimum	Spesifikasi
Stabilitas (kg)	5,75	0	92.333	965.81	941.40	Minimum 90%
	5,5	20	85.667	896.07	834.71	
	5	60	97.333	1018.11	969.64	

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)

Berdasarkan hasil rekapitulasi tabel di atas, nilai stabilitas *Marshall* sisa dari semua kadar aspal optimum (KAO) sudah memenuhi ketentuan Bina Marga yang mensyaratkan nilai stabilitas *Marshall* sisa sebesar 90% dari stabilitas awal. Maka dapat disimpulkan bahwa campuran aspal dengan penambahan terak nikel dapat bertahan pada pengaruh cuaca, air dan suhu. Seiring penambahan terak nikel, terjadi peningkatan dan penurunan nilai stabilitas *Marshall* sisa. Pada penambahan terak nikel 20% terjadi penurunan sebesar 69,74 kg setara dengan 7,2%. Sedangkan pada penambahan terak nikel 60% terjadi peningkatan sebesar 52,3 kg setara dengan 5,4%. Hal ini disebabkan karena bentuk terak nikel yang berongga mengakibatkan semakin kuatnya lekatan dengan aspal.

5.5 Proporsi Optimum

Berdasarkan hasil penelitian, proporsi yang paling ideal untuk penambahan terak nikel pada campuran beraspal lapisan aus adalah penambahan terak nikel sebanyak

60%, dikarenakan kadar tersebut memenuhi ketentuan Bina Marga dalam hal karakteristik *Marshall* (VIM, VMA, VFA, Stabilitas dan penurunan) dan memiliki nilai stabilitas tertinggi. Berikut ini adalah rekapitulasi hasil pengujian *Marshall* dengan penambahan terak nikel sebanyak 60% dengan kadar aspal optimum (KAO) sebesar 5%.

Tabel 5.27 Rekapitulasi Hasil Campuran dengan Kadar Terak Nikel 60%

Karakteristik Marshall	Kadar Aspal Optimum (%)	Kadar Terak Nikel (%)	Hasil	Spesifikasi
VMA (%)	5	60	15.61	Minimum 15%
VIM (%)			3	3%-5%
VFA (%)			67.6	Minimum 65%
Stabilitas (kg)			1077.38	Minimum 800 kg
Flow (mm)			3.23	2mm-4mm
MQ (kg/mm)			371.2	Minimum 250 kg/mm
Marshall Sisa			1018.11	Minimum 90% Stabilitas Awal

(Sumber : Analisis Penulis, 2023)