

Perbandingan penggunaan aditif limbah plastik *LDPE* dan *pet* terhadap material *AC-WC* ditinjau dari aspek *marshall properties*, *stiffness modulus* dan kekedapan

Faizal Rizaf Fauzi¹, Agus Riyanto¹, Zilhardi Idris¹, Nurul Hidayati¹

¹ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan Kartasura, Jawa Tengah, Indonesia 57102

Article Info

Available online

Keywords:

AC-WC
LDPE plastic waste
PET plastic waste
Marshall properties
Stiffness modulus
impermeability

Corresponding Author:

Faizal Rizaf Fauzi
*faizalrizaff@gmail.com

Abstract

AC-WC (Asphalt Concrete – Wearing Course) is a layer that often experiences structural and functional damage, one way to improve the structural and functional aspects of the mixture is the use of plastic waste additives. The purpose of this study was to analyze the comparison of LDPE and PET plastic waste additives in the AC-WC mixture in terms of: Marshall properties, stiffness modulus and impermeability. The first stage of research, namely the collection of primary and secondary data. After obtaining the appropriate proportions of asphalt and aggregate in the mixture, then make samples with varying levels of LDPE and PET plastic waste respectively 0%, 2%, 4%, 6% and 8% by weight of the optimum asphalt content. The samples were then subjected to Marshall properties testing, stiffness modulus testing, and impermeability testing. The results of research on the use of PET plastic waste in the aspect of Marshall properties are slightly better than the use of LDPE plastic waste. The optimum LDPE plastic waste content obtained was 5.25% and the optimum PET plastic waste content was obtained at 4.14%. The optimum mixed stiffness modulus value for the use of LDPE plastic waste was $1.25 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, while for the optimum use of PET plastic waste it was $1.35 \times 10^9 \text{ N/m}^2$. The permeability coefficient indicating the impermeability of an AC-WC mixture for the use of LDPE plastic waste is 0.165914 cm/s, while for the use of PET plastic waste it is 0.156578 cm/s.

Copyright © 2023 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Aspal adalah material berwarna hitam yang berfungsi sebagai pengikat agregat dalam campuran perkerasan lentur. Laston (Aspal

Beton) adalah suatu lapisan pada konstruksi jalan yang terdiri dari agregat halus, *filler*, dan agregat kasar, yang dicampur, diamparkan

dan dipadatkan dalam keadaan panas pada suhu tertentu (Susilowati, 2021).

Aspal masih banyak digunakan dalam pembangunan jalan raya di Indonesia. Campuran aspal yang umum digunakan di Indonesia saat ini adalah *Hot Mix Asphalt*. Salah satu jenis campuran yang digunakan adalah *AC-WC (Asphalt Concrete Wearing Course)*, yaitu lapis aspal beton yang berada pada permukaan jalan yang bersifat tahan terhadap cuaca, kedap air, memiliki kekesatan tertentu, serta memiliki daya tahan yang cukup baik (Sukirman, 2003).

Kegagalan pada campuran perkerasan jalan baik yang diakibatkan oleh kerusakan struktural maupun fungsional masih sering terjadi di Indonesia. Kerusakan struktural maupun fungsional ini akan menyebabkan penurunan kualitas perkerasan jalan, sehingga perlu adanya inovasi baru yang berupa penambahan aditif limbah plastik dalam campuran *AC-WC*. Parameter yang ditinjau pada penelitian ini yang berkaitan dengan aspek struktural maupun fungsional adalah *Marshall properties*, *stiffness modulus*, dan kekedapan.

Limbah plastik merupakan salah satu jenis limbah anorganik yang memiliki berbagai fungsi dan bentuk yang sangat populer karena banyak digunakan oleh masyarakat. Hal ini diperkuat oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLKH) (2022), yang mengungkapkan, bahwa 18,6 persen dari 19,1 juta ton timbunan sampah merupakan limbah plastik. Pemanfaatan limbah plastik di bidang perkerasan jalan raya perlu dilakukan sebagai upaya mengurangi jumlah limbah plastik serta diharapkan dapat meningkatkan kualitas dan memperbaiki hasil *Marshall properties* pada perkerasan jalan.

Tujuan penelitian ini untuk mengetahui perbedaan pengaruh limbah plastik *LDPE* dan *PET* pada campuran *AC-WC (Asphalt Concrete-wearing Course)* ditinjau dari *Marshall properties*, *stiffness modulus*, dan kekedapan.

2. METODE

Penelitian ini adalah eksperimen yang dilakukan di Laboratorium Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta dengan total benda uji sebanyak 22 buah. Limbah plastik yang digunakan berupa limbah plastik jenis *LDPE* dan *PET* dari lingkungan sekitar Universitas Muhammadiyah Surakarta. *Fresh aggregate* yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari *Quarry* Siwal Boyolali, sedangkan aspal yang digunakan berupa aspal panas penetrasi 60/70 dari PT. Pertamina Cilacap. Pemeriksaan *Marshall* mengikuti prosedur PC-0201-76 atau AASHTO T 245-74, untuk pemeriksaan *stiffness modulus* menggunakan nomogram *Van Der Poel* dan nomogram *Shell*, sedangkan kekedapan diuji dengan pengujian koefisien permeabilitas.

Tahapan penelitian adalah sebagai berikut : persiapan, pengumpulan data sekunder diambil dari informasi data penelitian yang telah ada sebelumnya dan data primer primer diambil saat penelitian secara langsung di Laboratorium Bahan Perkerasan dan Transportasi Jalan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta, penentuan kadar plastik optimum dengan variasi kadar aditif 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% terhadap berat kadar aspal optimum, pembuatan benda uji, pengujian *Marshall properties*, *stiffness modulus*, dan kekedapan, analisa data dan pembahasan, dan yang terakhir memberikan kesimpulan serta saran.

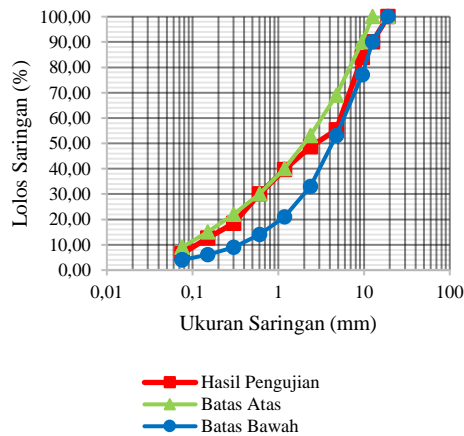
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pemeriksaan Material

Hasil pengujian gradasi agregat didapatkan dari data sekunder (Pratama, 2020), menurut Spesifikasi Umum Bina Marga Divisi 6 tahun 2018. Berikut adalah tabel hasil pengujian gradasi agregat :

Tabel 1. Hasil Rekayasa *Blending* Agregat Kasar, Medium, dan Halus

Ukuran Saringan	% Lolos Saringan			Gradasi Gabungan (%)	Spesifikasi (%)	Keterangan
	(F1)	(F2)	(F3)			
3/4 "	17.5	40.5	42.0	100.0	100 - 100	Sesuai
1/2 "	7.5	40.5	42.0	90.0	90 - 100	Sesuai
3/8 "	1.4	40.5	42.0	83.9	77 - 90	Sesuai
No. 4	0.4	13.0	42.0	55.3	53 - 69	Sesuai
No. 8	0.3	6.3	42.0	48.6	33 - 53	Sesuai
No. 16	0.3	4.9	34.5	39.7	21 - 40	Sesuai
No. 30	0.3	4.7	25.0	30.0	14 - 30	Sesuai
No. 50	0.3	4.3	13.9	18.4	9 - 22	Sesuai
No. 100	0.3	3.0	9.2	12.6	6 - 15	Sesuai
No. 200	0.3	1.0	5.0	6.4	4 - 9	Sesuai
Pan	0.0	0.0	0.0	0.0	0 - 0	Sesuai



Gambar 1. Grafik Rekayasa *Blending* Agregat Campuran

3.2 Hasil Rekayasa *Blending* Agregat

Berdasarkan Tabel 2 dapat dilakukan rekayasa *blending*, dengan penambahan jumlah total agregat adalah 1200 gr. Berat aspal dan berat agregat masing-masing kadar aspal yang digunakan dalam percobaan dapat dilihat pada tabel sebagai berikut:

Tabel 2. Berat Aspal dan Berat Agregat pada Campuran

Kadar Aspal (%)	Berat Aspal Terhadap Campuran (gr)	Berat Agregat			Berat Total Agregat (gr)	Berat Total Campuran (gr)
		F1 (gr)	F2 (gr)	F3 (gr)		
4.5	54	210	486	504	1200	
5	60	210	486	504	1260	

Tabel Lanjutan 2. Berat Aspal dan Berat Agregat pada Campuran

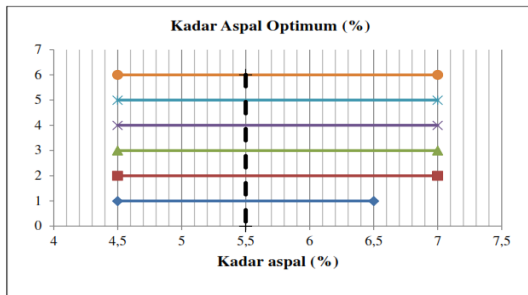
Kadar Aspal (%)	Berat Aspal Terhadap Campuran (gr)	Berat Agregat			Berat Total Agregat (gr)	Berat Total Campuran (gr)
		F1 (gr)	F2 (gr)	F3 (gr)		
5.5	66	210	486	504	1200	
6	72	210	486	504	1272	
6.5	78	210	486	504	1278	
7	84	210	486	504	1284	

3.3 Penentuan Kadar Aspal Optimum

Setelah dilakukan rekayasa *blending* maka tahap selanjutnya adalah pembuatan benda uji menentukan kadar aspal optimum dengan variasi kadar 4,5%, 5%, 5,5%, 6,0%, 6,5%, dan 7,0% dari total campuran, yaitu 1200 gr, masing-masing kadar aspal dibuat 3 buah. Hasil perhitungan *Marshall* untuk menentukan kadar aspal optimum dapat dilihat pada Tabel berikut :

Tabel 3. Penentuan Kadar Aspal Optimum

Kadar Aspal (%)	VIM (%)	VMA (%)	VFWA (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
4.5%	5,36	15,38	65,12	977,88	3,14	311,43
	4,42	14,28	69,01	637,02	3,06	208,18
	5,53	15,48	64,30	913,89	4,78	191,19
Rerata	5,10	15,05	66,14	842,93	3,66	236,93
5.0%	4,90	15,49	69,23	817,17	3,61	226,34
	4,52	15,77	71,35	821,15	4,24	193,67
	3,60	14,96	75,94	922,89	3,54	260,70
Rerata	4,34	15,41	72,17	853,74	3,80	226,90
5.5%	5,35	17,49	69,41	746,50	4,34	172,01
	4,09	16,12	74,64	922,38	3,58	257,65
	5,18	17,22	69,93	749,71	4,02	186,50
Rerata	4,87	16,94	71,33	806,20	3,98	205,39
6.0%	4,52	17,77	74,59	1093,65	3,46	316,08
	4,48	17,58	74,50	669,14	2,06	324,83
	3,62	16,94	78,66	676,41	5,92	114,26
Rerata	4,21	17,43	75,92	813,07	3,81	251,72
6.5%	4,95	19,38	74,43	682,77	2,87	237,90
	5,97	20,12	70,34	723,88	4,00	180,97
	5,17	19,39	73,36	1018,71	4,25	239,70
Rerata	5,36	19,63	72,71	808,45	3,71	219,52
7.0%	3,52	19,35	81,79	571,29	4,16	137,33
	4,44	20,55	78,38	823,99	3,26	252,76
	4,71	20,40	76,90	920,14	5,00	184,03
Rerata	4,22	20,10	79,02	771,81	4,14	191,37



Gambar 2. Grafik Kadar Aspal Optimum (KAO)

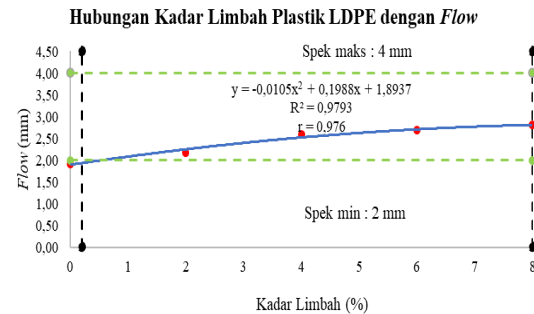
Berdasarkan Tabel dan Gambar didapatkan nilai kadar aspal minimum sebesar 5% dan nilai kadar aspal maksimum sebesar 6%, sehingga nilai kadar aspal optimum yang didapatkan sebesar 5,5%.

3.4 Mencari Nilai Marshall Properties

Marshall Properties adalah salah satu faktor yang penting dalam menentukan kinerja suatu campuran aspal. Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja campuran aspal adalah Stabilitas, Flow, Void In Mix (VIM), Void Filled With Asphalt (VFWA), Void In Mineral Agregate (VMA), dan Marshall Quotient (MQ). Hasil perhitungan Marshall dengan aditif limbah plastik LDPE dapat dilihat pada tabel berikut :

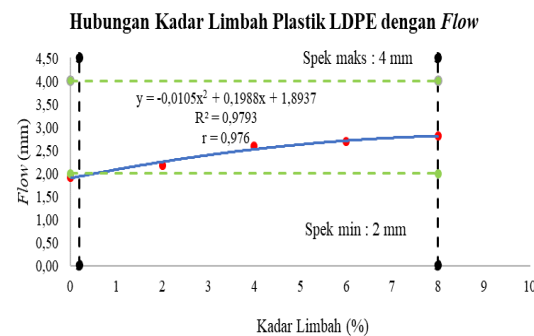
Tabel 4. Hasil Pengujian Marshall Properties Aditif Plastik LDPE

Kadar Aditif Plastik LDPE	VIM (%)	VMA (%)	VFWA (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
0%	6,1573	17,102	63,9963	923,93	1,87	494,08
	5,3356	16,376	67,4183	1012,4	1,93	524,56
	5,6158	16,624	66,218	1028,94	1,96	524,971
Rerata	5,7029	16,701	65,8775	988,425	1,92	514,537
2%	5,7017	16,82	66,1021	1136,13	2,14	530,899
	4,9283	16,138	69,4618	1105,13	2,11	523,756
	4,4416	15,709	71,7253	1164,13	2,27	512,833
Rerata	5,0238	16,222	69,0964	1135,13	2,17	522,496
4%	4,438	15,746	71,8487	1232,64	2,61	472,276
	4,246	15,581	72,7521	1472,78	2,53	582,127
	6,61	17,665	62,5847	1474,44	2,63	560,622
Rerata	5,096	16,331	69,0619	1393,29	2,59	538,342
6%	4,905	16,263	69,8389	1329,64	2,74	485,272
	4,794	16,165	70,3446	1318,83	2,63	501,458
	3,622	15,133	76,0643	1223,95	2,7	453,316
Rerata	4,44	15,853	72,082	1290,81	2,69	480,015
8%	3,099	14,745	78,982	1210,97	2,82	429,422
	4,038	15,572	74,066	1291,5	2,77	466,246
	1,685	13,501	87,523	1289,48	2,83	455,646
Rerata	2,941	14,606	80,19	1263,98	2,80667	450,438



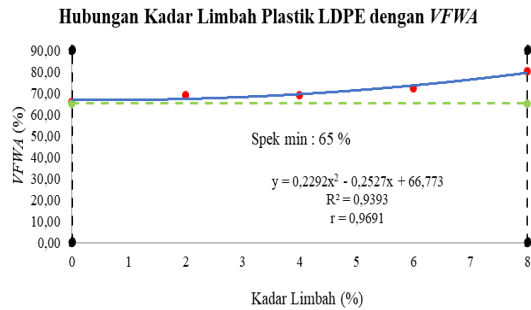
Gambar 3. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik LDPE dengan Stabilitas

Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai optimum pada X = 5,3984 % dan Y = 1335,556 kg. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar r = 0,937, hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan stabilitas sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai R² = 0,878, yang artinya bahwa sebesar 87,8 % hasil stabilitas dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain.



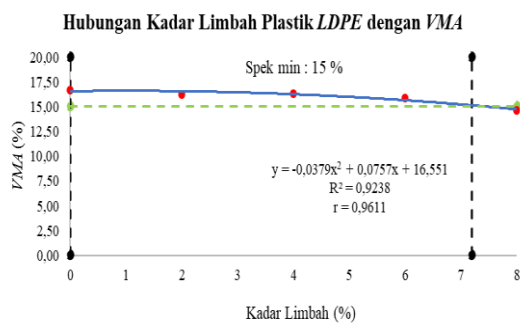
Gambar 4. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik LDPE dengan Flow

Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai optimum pada X = 8,000 % dan Y = 2,80 mm. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar r = 0,976, hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan stabilitas sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai R² = 0,9793, yang artinya bahwa sebesar 97,93 % hasil flow dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain.



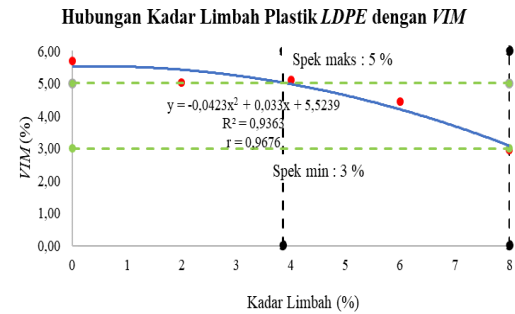
Gambar 5. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik LDPE dengan VFWA

Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai optimum pada $X = 8,000\%$ dan $Y = 79,41\%$. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar $r = 0,9691$, hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan VFWA sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai $R^2 = 0,9393$, yang artinya bahwa sebesar 93,93% hasil VFWA dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain.



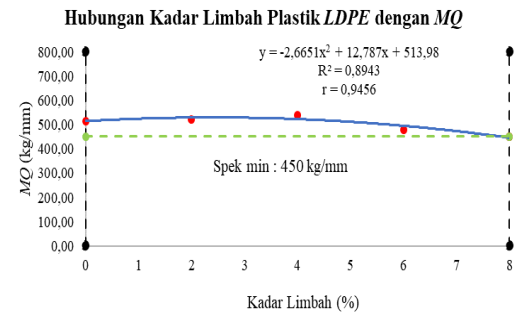
Gambar 6. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik LDPE dengan VMA

Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai optimum pada $X = 0,998\%$ dan $Y = 16,550\text{ kg}$. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar $r = 0,9611$, hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan VMA sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai $R^2 = 0,9238$, yang artinya bahwa sebesar 92,38% hasil VMA dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain.



Gambar 7. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik LDPE dengan VIM

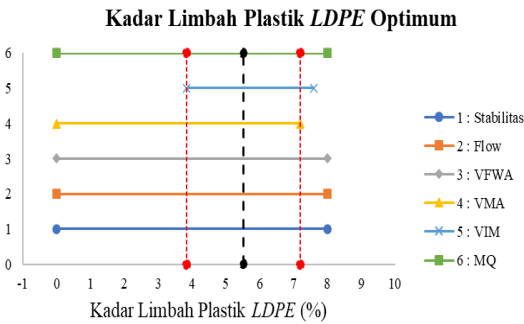
Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai optimum pada $X = 0,3900\%$ dan $Y = 5,240\%$. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar $r = 0,9676$, hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan VIM sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai $R^2 = 0,9363$, yang artinya bahwa sebesar 93,63% hasil VIM dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain.



Gambar 8. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik LDPE dengan MQ

Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai optimum pada $X = 2,398\%$ dan $Y = 528,8938\text{ kg/mm}$. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar $r = 0,9456$, hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan MQ sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai $R^2 = 0,8943$, yang artinya bahwa sebesar 89,43% hasil MQ dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain.

Hasil perhitungan Marshall untuk menentukan kadar plastik LDPE optimum dapat dilihat pada grafik berikut :



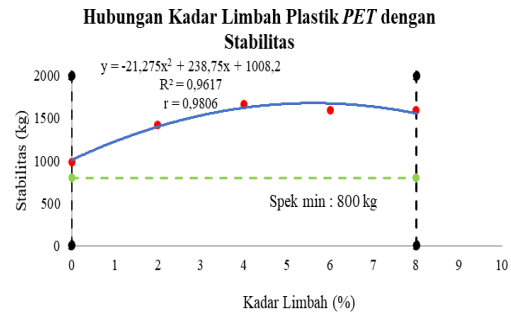
Gambar 9. Grafik Kadar Limbah Plastik LDPE Optimum

Berdasarkan Tabel dan Gambar didapatkan nilai kadar aspal minimum sebesar 3,85% dan nilai kadar aspal maksimum sebesar 7,2%, sehingga nilai kadar aspal optimum yang didapatkan sebesar 5,52%. Hasil perhitungan Marshall dengan aditif limbah plastik PET dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 5. Hasil Pengujian Marshall Properties Aditif Plastik PET

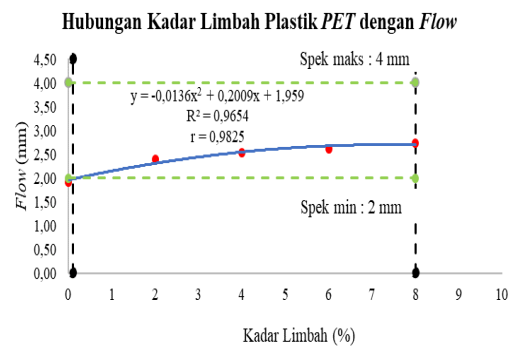
Kadar Aditif Plastik PET	VIM (%)	VMA (%)	VFWA (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
0%	6,1573	17,102	63,9963	923,93	1,87	494,08
	5,3356	16,376	67,4183	1012,4	1,93	524,56
	5,6158	16,624	66,218	1028,94	1,96	524,971
	5,7029	16,701	65,8775	988,425	1,92	514,537
2%	5,3629	16,645	67,9953	1414,8	2,38	594,453
	4,2447	15,692	72,9499	1409,21	2,41	584,734
	4,2638	15,709	72,8574	1450,74	2,38	609,555
	4,6119	16,015	71,2675	1424,92	2,39	596,247
4%	4,6664	16,194	71,1841	1708	2,51	680,477
	3,9697	15,581	74,5227	1653,95	2,53	653,734
	4,9277	16,423	69,9962	1643,14	2,54	646,905
	4,5212	16,066	71,901	1668,36	2,52667	660,372
6%	4,2211	15,634	73,001	1527,1	2,64	578,445
	4,2211	15,634	73,001	1643,14	2,54	646,905
	4,0504	15,484	73,8414	1598,86	2,66	601,074
	4,1642	15,584	73,2811	1589,7	2,61333	608,808
8%	2,8014	13,633	79,4517	1652,46	2,73	605,295
	3,751	14,477	74,0901	1551,43	2,75	564,155
	2,3194	13,205	82,4352	1570,73	2,7	581,75
	2,9573	13,772	78,659	1591,54	2,72667	583,733

Hubungan kadar aditif limbah plastik PET dengan stabilitas dapat dilihat pada Gambar 10.



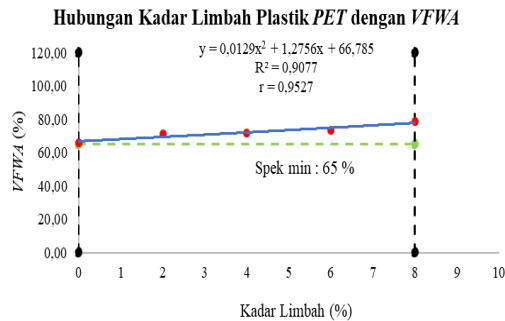
Gambar 10. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik PET dengan Stabilitas

Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai optimum pada $X = 5,611\%$ dan $Y = 1674,788\text{ kg}$. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar $r = 0,9806$, hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan stabilitas sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai $R^2 = 0,9617$, yang artinya bahwa sebesar 96,17% hasil stabilitas dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain.



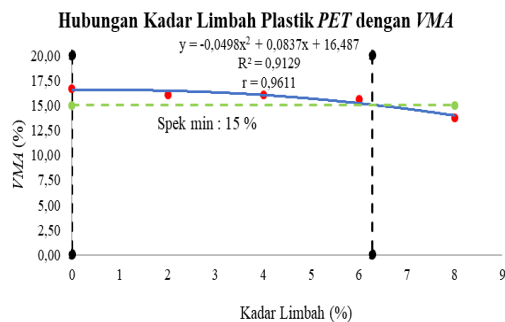
Gambar 11. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik PET dengan Flow

Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai optimum pada $X = 7,386\%$ dan $Y = 2,693\text{ mm}$. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar $r = 0,9825$, hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan stabilitas sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai $R^2 = 0,9654$, yang artinya bahwa sebesar 96,54% hasil flow dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain.



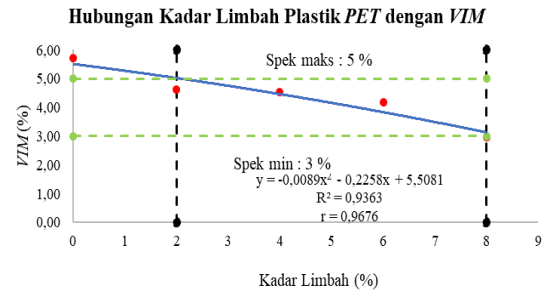
Gambar 12. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik PET dengan VFWA

Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai optimum pada $X = 8,000$ % dan $Y = 77,8157$ %. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar $r = 0,9527$, hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan stabilitas sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai $R^2 = 0,9077$, yang artinya bahwa sebesar 90,77 % hasil VFWA dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain.



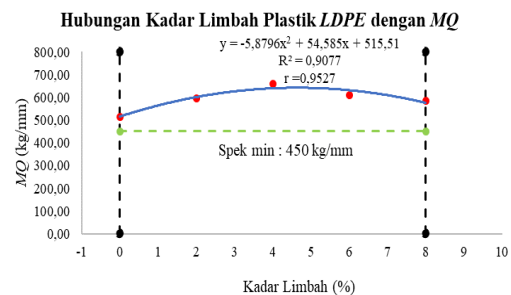
Gambar 13. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik PET dengan VMA

Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai optimum pada $X = 0,8403$ % dan $Y = 16,55$ kg. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar $r = 0,9611$, hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan VMA sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai $R^2 = 0,9237$, yang artinya bahwa sebesar 92,37 % hasil VMA dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain.



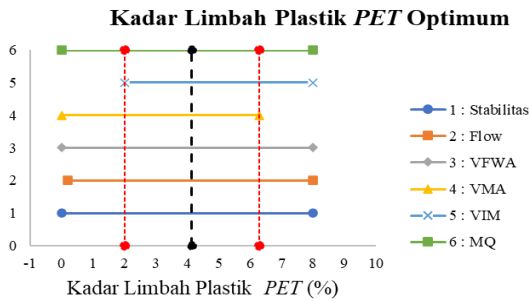
Gambar 14. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik PET dengan VIM

Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai optimum pada $X = 0,000$ % dan $Y = 5,523$ kg. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar $r = 0,9676$, hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan VIM sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai $R^2 = 0,9363$, yang artinya bahwa sebesar 93,63 % hasil VIM dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain.



Gambar 15. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik PET dengan MQ

Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai optimum pada $X = 4,6418$ % dan $Y = 639,7763$ kg/mm. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar $r = 0,9527$, hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan MQ sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai $R^2 = 0,9077$, yang artinya bahwa sebesar 90,77 % hasil MQ dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain. Hasil perhitungan Marshall untuk meentukan kadar plastik PET optimum dapat dilihat pada grafik berikut :



Gambar 16. Grafik Kadar Limbah Plastik PET Optimum

Berdasarkan Tabel dan Gambar didapatkan nilai kadar PET minimum sebesar 2% dan nilai kadar aspal maksimum sebesar 6,24%, sehingga nilai kadar aspal optimum yang didapatkan sebesar 4,14%.

3.5 Mencari Nilai Stiffness Modulus

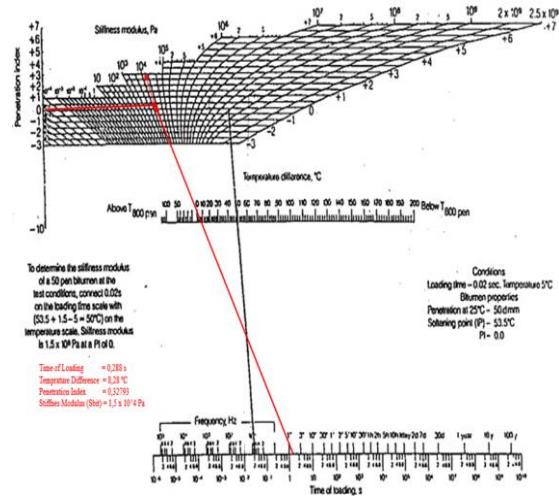
Stiffness modulus atau modulus kekakuan merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui besarnya nilai modulus kekakuan campuran (*mix stiffness*). Parameter yang digunakan untuk menentukan besarnya *stiffness modulus* dalam campuran adalah *time of loading*, *temprature difference*, *penetration index*, *bitumen volume (vb)*, dan *mineral aggregate volume (va)*. Parameter-parameter penentuan *stiffness modulus* aspal aditif limbah plastik LDPE tersebut diuraikan sebagai berikut :

Tabel 6. Parameter Penentu Sbit

Kadar Limbah Plastik LDPE Optimum (%)	Kecepatan (km/jam)	Time of Loading (s)	Temperature Difference (°C)	Penetration Index
	5	0,288		
5,52	10	0,144	8,28	0,32793
	20	0,072		

Pada perhitungan di atas dapat dilihat lama waktu pembebanan dengan kecepatan 5 km/jam sebesar 0,288 detik, kecepatan 10 km/jam sebesar 0,144 detik, kecepatan 20 km/jam sebesar 0,072 detik kemudian

dilakukan pembacaan Grafik Nomogram *Sbit Van Der Poel*. Grafik *Sbit* pada $V=5$ km/jam dapat dilihat pada gambar sebagai berikut :



Gambar 17. Grafik Nomogram Van Der Poel untuk Menemukan nilai Sbit

Pada Pembacaan nomogram *Van Der Poel* di atas, diperoleh hasil *Sbit* yang dapat dilihat pada Tabel sebagai berikut :

Tabel 7. Hasil Sbit pada Kadar Plastik LDPE Optimum

Kadar Limbah Plastik LDPE Optimum (%)	Kecepatan (km/jam)	Sbit (N/m ²)
	5	1,5 x 10 ⁴
5,52	10	2,0 x 10 ⁴
	20	2,5 x 10 ⁴

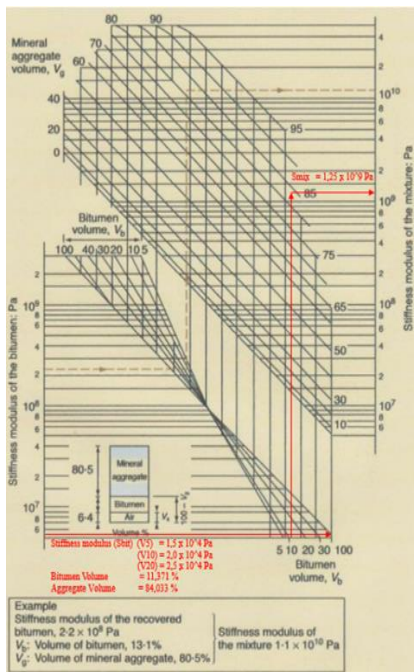
Tabel 7. Hasil Sbit pada Kadar Plastik LDPE Optimum

Berdasarkan besarnya nilai *Sbit* yang telah diketahui, maka dapat dicari besarnya nilai *stiffness modulus of the mix (Smix)* dengan menggunakan parameter nilai *Sbit*, *Bitumen volume (vb)*, dan *Mineral aggregate volume (va)*. Besarnya nilai *Vb* dan *Vg* pada kadar plastik LDPE optimum dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 8. Hasil V_b dan V_a

Kadar Limbah Plastik LDPE Optimum (%)	Volume Agregat (%)	Volume Aspal (%)
4	83,669	11,235
5,52	84,033	11,371
6	84,147	11,413

Nilai *stiffness modulus of the mix* (S_{mix}) diperoleh dengan pembacaan nomogram *Shell* yang dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 18. Grafik Nomogram *Shell* untuk Menemukan nilai S_{mix}

Pada pembacaan nomogram *Shell* di atas, diperoleh hasil S_{mix} pada Tabel sebagai berikut :

Tabel 9. Hasil *Stiffness Modulus* S_{mix}

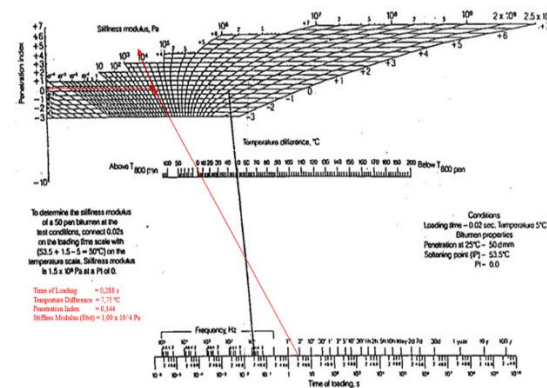
Kadar Limbah Plastik LDPE Optimum (%)	Kecepatan (km/jam)	S_{mix} (N/m ²)
5,525	5	1,25 x 10 ⁹
	10	
	20	

Parameter-parameter penentuan *stiffness modulus* aspal aditif limbah plastik *PET* tersebut diuraikan sebagai berikut :

Tabel 10. Parameter Penentu S_{bit}

Kadar Limbah Plastik PET Optimum (%)	Kecepatan (km/jam)	Time of Loading (s)	Temperature Difference (°C)	Penetration Index
4,14	5	0,288	8,28	0,32793
	10	0,144		
	20	0,072		

Pada perhitungan di atas dapat dilihat lama waktu pembebanan dengan kecepatan 5 km/jam sebesar 0,288 detik, kecepatan 10 km/jam sebesar 0,144 detik, kecepatan 20 km/jam sebesar 0,072 detik kemudian dilakukan pembacaan Grafik Nomogram *Sbit Van Der Poel*. Grafik *Sbit* pada $V=5$ km/jam dapat dilihat pada gambar sebagai berikut :



Gambar 19. Grafik Nomogram *Van Der Poel* untuk Menemukan nilai S_{bit}

Pada Pembacaan nomogram *Van Der Poel* di atas, diperoleh hasil S_{bit} yang dapat dilihat pada Tabel sebagai berikut :

Tabel 11. Hasil S_{bit} pada Kadar Plastik *PET* Optimum

Kadar Limbah Plastik PET Optimum (%)	Kecepatan (km/jam)	S_{bit} (N/m ²)
4,14	5	1,00 x 10 ⁴
	10	1,75 x 10 ⁴
	20	2,75 x 10 ⁴

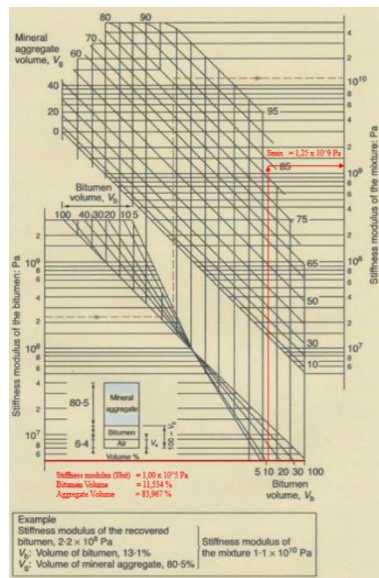
Berdasarkan besarnya nilai S_{bit} yang telah diketahui, maka dapat dicari besarnya nilai *stiffness modulus of the mix* (S_{mix}) dengan menggunakan parameter nilai S_{bit} , *Bitumen volume* (v_b), dan *Mineral aggregate volume* (v_a). Besarnya nilai V_b dan V_g pada kadar

plastik *LDPE* optimum dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 12. Hasil *Vb* dan *Va*

Kadar Limbah Plastik <i>PET</i> Optimum (%)	Volume Agregat (%)	Volume Aspal (%)
4	83,934	11,545
4,14	83,967	11,534
6	84,416	11,420

Nilai *stiffness modulus of the mix (Smix)* diperoleh dengan pembacaan nomogram *Shell* yang dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 20. Grafik Nomogram *Shell* untuk Menemukan Nilai *Smix*

Pada pembacaan nomogram *Shell* di atas, diperoleh hasil *Smix* pada Tabel sebagai berikut :

Tabel 9. Hasil *Stiffness Modulus Smix*

Kadar Limbah Plastik <i>PET</i> Optimum (%)	Kecepatan (km/jam)	<i>Smix</i> (N/m ²)
	5	
4,14	10	1,35 x 10 ⁹
	20	

3.6 Mencari Nilai Kekedapan

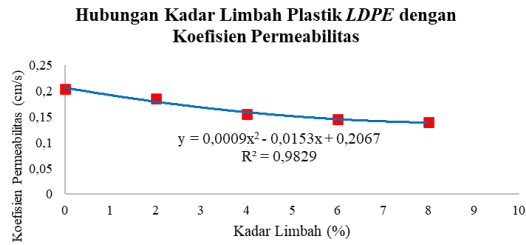
Prinsip dasar pengujian kekedapan yaitu kemampuan beton aspal untuk tidak dapat dimasuki oleh air ataupun udara. Aspal plastik

merupakan suatu material yang memiliki daya ikat yang tinggi, daya ikat yang tinggi akan menghasilkan rongga yang lebih sedikit pula sehingga air dan angin lebih sulit untuk masuk ke dalam lapisan campuran perkerasan. Sifat kekedapan suatu aspal dapat diketahui melalui uji koefisien permeabilitas.

Parameter yang digunakan untuk menentukan besarnya koefisien permeabilitas dalam campuran adalah luas potongan melintang tabung (a), tebal spesimen (L), luas potongan spesimen (A), waktu yang dibutuhkan untuk mengalirkan air dari h1 ke h2 (t), tinggi batas air paling atas pada tabung (h1), dan tinggi batas air paling bawah tabung (h2) Hasil pengujian koefisien permeabilitas pada aspal plastik *LDPE* dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil Pengujian Koefisien Permeabilitas Aspal Plastik *LDPE*

Kadar Aspal Plastik <i>LDPE</i> (%)	a (cm ²)	L (cm)	A (cm ²)	t (s)	h1 (cm)	h2 (cm)	k (cm/s)	
0	1	222,1106	7,20	80,12	115	7	2	0,217196
	2	222,1106	7,10	80,12	128	7	2	0,192427
	3	222,1106	7,00	80,12	119	7	2	0,204065
Rerata	222,1106	7,10	80,12	120,66	7	2	0,204563	
2	1	222,1106	7,00	80,12	139	7	2	0,174703
	2	222,1106	7,10	80,12	127	7	2	0,193942
	3	222,1106	7,10	80,12	132	7	2	0,186596
Rerata	222,1106	7,07	80,12	132,66	7	2	0,18508	
4	1	222,1106	7,10	80,12	165	7	2	0,149277
	2	222,1106	7,10	80,12	149	7	2	0,165306
	3	222,1106	6,90	80,12	159	7	2	0,150546
Rerata	222,1106	7,03	80,12	157,66	7	2	0,155043	
6	1	222,1106	6,90	80,12	167	7	2	0,143334
	2	222,1106	6,90	80,12	164	7	2	0,145956
	3	222,1106	6,80	80,12	161	7	2	0,146521
Rerata	222,1106	6,87	80,12	164	7	2	0,145271	
8	1	222,1106	7,30	80,12	187	7	2	0,135425
	2	222,1106	7,20	80,12	183	7	2	0,136489
	3	222,1106	7,20	80,12	170	7	2	0,146927
Rerata	222,1106	7,23	80,12	180	7	2	0,139614	

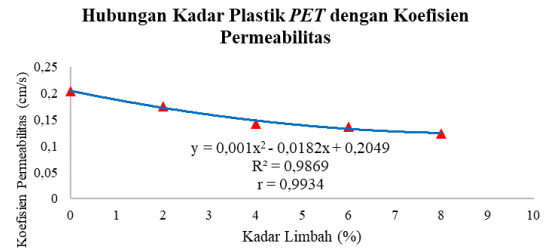


Gambar 21. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik LDPE dengan Koefisien Permeabilitas

Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai tertinggi pada $X = 0,000\%$ dan $Y = 0,2045\text{ cm/s}$. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar $r = 0,9914$, hasil tersebut menunjukkan, bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan koefisien permeabilitas sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai $R^2 = 0,9828$, yang artinya, bahwa sebesar 98,28 % hasil koefisien permeabilitas dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain.

Tabel 11. Hasil Pengujian Koefisien Permeabilitas Aspal Plastik PET

Kadar Aspal Plastik PET (%)	a	L	A	t	h1	h2	k	
(%)	(cm ²)	(cm)	(cm ²)	(s)	(cm)	(cm)	(cm/s)	
0	1	222,1106	7,2	80,12	115	7	2	0,217196
	2	222,1106	7,1	80,12	128	7	2	0,192427
	3	222,1106	7	80,12	119	7	2	0,204065
Rerata	222,1106	7,1	80,12	120,66	7	2	0,204563	
2	1	222,1106	6,9	80,12	144	7	2	0,174703
	2	222,1106	7	80,12	137	7	2	0,193942
	3	222,1106	6,9	80,12	132	7	2	0,186596
Rerata	222,1106	6,93	80,12	137,66	7	2	0,17494	
4	1	222,1106	6,9	80,12	171	7	2	0,149277
	2	222,1106	6,9	80,12	169	7	2	0,165306
	3	222,1106	6,9	80,12	162	7	2	0,150546
Rerata	222,1106	6,9	80,12	167,33	7	2	0,143126	
6	1	222,1106	6,9	80,12	168	7	2	0,143334
	2	222,1106	6,9	80,12	178	7	2	0,145956
	3	222,1106	6,8	80,12	176	7	2	0,146521
Rerata	222,1106	6,86	80,12	174	7	2	0,136997	
8	1	222,1106	6,9	80,12	203	7	2	0,135425
	2	222,1106	7	80,12	189	7	2	0,136489
	3	222,1106	6,9	80,12	194	7	2	0,146927
Rerata	222,1106	6,93	80,12	195,33	7	2	0,123262	



Gambar 22. Grafik Hubungan Kadar Limbah Plastik LDPE dengan Koefisien Permeabilitas

Berdasarkan persamaan regresi didapatkan nilai optimum pada $X = 0,000\%$ dan $Y = 0,2048\text{ cm/s}$. Koefisien korelasi didapatkan nilai sebesar $r = 0,9934$, hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan hubungan antara kadar limbah dengan koefisien permeabilitas sangat kuat. Koefisien determinasi diperoleh nilai $R^2 = 0,9869$, yang artinya bahwa sebesar 98,69 % hasil koefisien permeabilitas dipengaruhi oleh kadar limbah dan sisanya dipengaruhi oleh variabel yang lain.

4. PENUTUP

4.1 Kesimpulan

- 1) Kadar plastik LDPE optimum yang didapatkan dari pengujian Marshall properties sebesar 5,25%, dengan besarnya nilai stiffness modulus pada penggunaan limbah plastik LDPE optimum sebesar $1,25 \times 10^9\text{ (N/m}^2\text{)}$. Besarnya nilai koefisien permeabilitas pada kadar limbah plastik LDPE 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% secara berturut-turut sebesar 0,2045 m/s, 0,1850 m/s, 0,1550 m/s, 0,1452 m/s dan 0,1396 m/s.
- 2) Kadar plastik PET optimum yang didapatkan dari pengujian Marshall properties sebesar 5,25%, dengan besarnya nilai stiffness modulus pada penggunaan limbah plastik PET optimum sebesar $1,25 \times 10^9\text{ (N/m}^2\text{)}$. Besarnya nilai koefisien permeabilitas pada kadar limbah plastik PET 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% secara berturut-turut sebesar 0,2045 m/s, 0,1850 m/s, 0,1550 m/s, 0,1452 m/s dan 0,1396 m/s.

3) Berdasarkan pengujian *Marshall properties* yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa nilai *Marshall properties* pada penggunaan limbah plastik *PET* lebih baik dibandingkan pada penggunaan limbah plastik *LDPE*. Hasil kadar plastik *LDPE* optimum diperoleh sebesar 5,25% dengan besarnya nilai *stiffness modulus* sebesar $1,25 \times 10^9$ (N/m²), sedangkan kadar plastik *PET* optimum diperoleh nilai sebesar 4,14% dengan besarnya nilai *stiffness modulus* sebesar $1,35 \times 10^9$ (Nm²). Berdasarkan pengujian kekedapan terhadap air yang telah dilakukan pada benda uji dengan menggunakan limbah plastik *LDPE* dan *PET* dapat diketahui bahwa penggunaan limbah plastik *PET* sebagai aditif sedikit lebih optimal dibandingkan dengan penggunaan limbah plastik *LDPE* sebagai aditif.

Sipil Statik Universitas Sam Ratulangi. Manado.

- Shabrina, A., Riyanto, A., Sunarjono, S., & Harnaeni, S. R. (2019). Analisis Pemanfaatan Pasir Pantai Kemala Sebagai Bahan Tambah Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (Ac-Wc) Terhadap Marshall Properties Dan Nilai Struktural.
- Sukirman, S. 2003. Beton Aspal Campuran Panas. Penerbit Granit. Jakarta.
- Sukirman, S. 1995. Perkerasan Lentur Jalan Raya. Penerbit Nova. Bandung.
- Susilowati, Anni. 2021. Pemanfaatan Limbah Plastik Sebagai Bahan Tambah Pada Beton Aspal Campuran Panas. Bangun Rekaprima. Jakarta.
- Yulfia Citra Ifana, & Nurhidayati. (2004). "Perbedaan Nilai Properties Marshall Aspal Beton Antara Agregat Halus Pasir Dan Pasir Sungai."

DAFTAR PUSTAKA

- Akhmad, Amirudin. 2015. Studi Observasi Variasi Agregat Slurry Seal (Tinjauan Uji Kedalaman Tekstur dan Analisa Biaya). E-Jurnal Matrix Teknik Sipil. Surakarta.
- Ariawan, I Made. 2016. Pengembangan Model Modulus Kekakuan Aspal Untuk Kondisi Iklim Tropis di Indonesia. 2016. Senastek. Bali.
- Fariza, Muhammad dkk. 2017. Sifat-Sifat Volumetrik Dari Aspal Modifikasi Getah Damar, Fly Ash, Minyak Goreng, dan Lateks untuk Aplikasi Lapangan Dibandingkan dengan Benda Uji Laboratorium. E-Jurnal Matriks Teknik Sipil. Suarakarta.
- Kasan, Muhammad. 2009. Studi Karakteristik Volumetrik Campuran Beton Aspal Daur Ulang. E-Jurnal Teknik Sipil Untad. Palu.
- Rombot, Prylita. 2015. Kajian Kinerja Campuran Beraspal Panas Jenis Lapis Aspal Beton Sebagai Lapis Aus Bergradasi Kasar dan Halus. Jurnal