

Pemanfaatan Limbah Plastik Berjenis HDPE Dan PET Sebagai Substitusi Agregat Terhadap Sifat Mekanik Paving Block:

Pemanfaatan Limbah Plastik Berjenis HDPE Dan PET Sebagai Substitusi Agregat Terhadap Sifat Mekanik Paving Block

Siti Annisa Samosir

Program studi magister teknik sipil, Universitas Sumatera Utara

Nursyamsi Nursyamsi

Program studi magister teknik sipil, Universitas Sumatera Utara

Johannes Tarigan

Program studi magister teknik sipil, Universitas Sumatera Utara

The utilization of waste as a substitute material for aggregate in paving blocks has become an effective and innovative option. One of the largest contributors to global plastic waste is Polyethylene Terephthalate (PET) bottles and High Density Polyethylene (HDPE) bottle caps, both of which are types of plastic that can be used in paving mixtures due to their strength and easy availability. This research aims to examine the effects of using plastic bottle waste and bottle cap waste as aggregate substitutes on the mechanical properties of paving blocks, including impact testing and cost analysis. The results of this study show that PET variations perform better than HDPE. A 5% PET plastic variation produced the highest compressive strength of 22.32 MPa, while the lowest compressive strength was recorded with a 15% HDPE variation at 14.62 MPa. In addition to mechanical performance, paving blocks with PET variations are capable of reducing up to 2.45 kg of plastic bottles per 1 m². The utilization of waste as a substitute material for aggregate in paving blocks has become an effective and innovative option. One of the largest contributors to global plastic waste is Polyethylene Terephthalate (PET) bottles and High Density Polyethylene (HDPE) bottle caps, both of which are types of plastic that can be used in paving mixtures due to their strength and easy availability. This research aims to examine the effects of using plastic bottle waste and bottle cap waste as aggregate substitutes on the mechanical properties of paving blocks, including impact testing and cost analysis. The results of this study show that PET variations perform better than HDPE. A 5% PET plastic variation produced the highest compressive strength of 22.32 MPa, while the lowest compressive strength was recorded with a 15% HDPE variation at 14.62 MPa. In addition to mechanical performance, paving blocks with PET variations are capable of reducing up to 2.45 kg of plastic bottles per 1 m².

Highlight :

- Paving blocks with 5% PET or HDPE meet strength standards for parking use while reducing water absorption.
- Higher plastic content (>5%) weakens mechanical and impact resistance due to poor bonding.
- Using PET 5% cuts material costs and reduces plastic waste by 245 kg per 100 m² area.

Keywords : Paving Block, Plastic Waste, HDPE, PET, Mechanical Strength

Pendahuluan

Limbah merupakan permasalahan serius yang berdampak luas pada lingkungan, kesehatan masyarakat, dan perekonomian[1]. Pada tahun 2018, produksi plastik global diperkirakan mencapai sekitar 359 hingga 380 juta ton. Sejak 1950 hingga 2018, total plastik yang telah diproduksi di seluruh dunia mencapai sekitar 6,3 hingga lebih dari 8 miliar ton. Dari jumlah tersebut, hanya sekitar 9% yang dapat didaur ulang dan sekitar 12% yang dibakar. Sebagian besar limbah plastik dibuang ke tempat pembuangan akhir atau lingkungan, sehingga menimbulkan tantangan besar bagi pengelolaan limbah plastik [2]. Pertumbuhan ini didorong oleh urbanisasi yang cepat, peningkatan populasi, dan pembangunan ekonomi.

Material plastik merupakan Bahan yang digunakan dalam aktivitas sehari-hari [3]. Pada Tahun 2012 sampah plastik terdapat di lautan dunia dengan jumlah diperkirakan sekitar 165 juta ton [4]. Pada dasarnya material plastik masuk ke dalam lautan lautan dan akan terurai dengan dibutuhkan waktu bertahun [5]. Namun, tidak semuanya bisa terurai selama proses penguraian plastik, zat kimia berbahaya seperti polistirena dan BPA akan terlepas ke dalam air, yang kemudian menyebabkan pencemaran [2]. Plastik merupakan polimer berbasis hidrokarbon yang memiliki tingkat kesulitan tinggi dalam proses penguraiannya. Menurut [2] Plastik dibedakan berdasarkan kode resin nya.

Polyethylene Terephthalate (PET) dan *High Density Polyethylene (HDPE)* merupakan jenis plastik yang digunakan untuk membuat botol kemasan dan tutup botol. Penggunaan PET dan HDPE tidak dianjurkan untuk digunakan kembali karena mengandung unsur senyawa kimia polistirena dan BPA yang dapat larut dalam air dan berbahaya bagi kesehatan tubuh [6]. Dalam menangani angka penumpukan limbah botol plastik yang terus meningkat dibutuhkan langkah lebih lanjut. Salah satu langkah yang efektif dan inovatif yaitu dengan memanfaatkan limbah botol plastik ke dalam produk konstruksi [7]. Sama hal nya kebutuhan material konstruksi terus meningkat seiring dengan perkembangan populasi. Material konstruksi salah satunya adalah paving block. Paving block umumnya digunakan untuk perkerasan jalan di komplek perumahan dan kawasan permukiman. Peneliti [8] memilih mengolah limbah botol plastik berjenis HDPE untuk menjadikan produk konstruksi berupa paving block. Menurut [8] 1000 buah paving block dapat mengurangi 600 kg plastik.

Di Indonesia saat ini paving blok banyak diminati karena keunggulannya dari segi ketahanan nya terhadap iklim di Indonesia dan juga memberikan estetika. Peneliti [9] membuat inovasi baru dengan melibatkan *waste* (limbah) sebagai pengganti bahan penyusun paving blok, salah satunya dengan menggunakan limbah plastik. *Polyethylene Terephthalate (PET)* dan *High Density Polyethylene (HDPE)* [9][8]. Salah satu jenis plastik yang dapat kita manfaatkan dalam campuran paving dari sifat nya yang kuat dan mudah didapat pada limbah botol plastik dan tutup botol plastik. Penambahan zat aditif berupa *Superplasticizer* yaitu digunakan sebagai bahan tambahan yang mampu meningkatkan berbagai aspek kinerja beton, termasuk kekuatan, daya tahan, kemudahan pengerjaan, serta performa secara keseluruhan [10]. Demi memperoleh paving blok yang ramah lingkungan namun dengan mutu yang baik. Sehingga penelitian ini akan menambahkan *Superplasticizer* jenis master glenium ace 8595 dalam campuran paving block[11].

Pada dasarnya tujuan penelitian ini untuk mengetahui efek pemanfaatan limbah botol plastik dan tutup botol plastik sebagai substitusi agregat terhadap sifat mekanik paving block dengan pengolahan limbah plastik dicacah tanpa dilelehkan untuk mengurangi polusi udara akibat dari pembakaran plastik. Adapun pengujian yang dilakukan yaitu kuat tekan, penyerapan air dan

natrium sulfat. Pengujian *impact* dilakukan pada penelitian ini menggunakan alat *Drop Weight Impact Test* untuk mengetahui daya tahan paving block terhadap beban kejat, pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM). Serta mengetahui potensi pemanfaatan limbah plastik berjenis PET, HDPE dalam produksi paving block, ditinjau dari aspek lingkungan dan analisis biaya.

Metode

Penelitian ini menerapkan metode eksperimental dengan acuan referensi SNI yang berlaku dan Jurnal-jurnal terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan penelitian ini. Penelitian ini mengaplikasikan limbah botol plastik dan tutup botol sebagai substitusi agregat pada paving block.

A. Tahap I : Persiapan Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini :

1. Seperangkat alat pengujian *material properties* (pengujian bahan)
2. Timbangan digital
3. Sekop
4. Mixer
5. Mesin Cetak Paving block
6. Mesin Uji Kuat Tekan (*Compression test*)
7. Mesin Uji *Impact* (*Drop Weight Impact Test*)

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini :

1. semen berjenis *Portland Composite Cement* (PCC)
2. Agregat halus (pasir)
3. Air
4. *Superplasticizer* Master Glenium ACE 8595
5. Cacahan Limbah Botol Plastik (PET)
6. Cacahan Limbah Tutup Botol Plastik (HDPE)

Pengolahan Limbah :

Pengolahan limbah botol plastik dan tutup botol plastik dapat dilakukan dengan beberapa tahapan adapun tahapan proses pengolahan limbah botol plastik dapat dilihat pada Gambar 1 dan tutup botol plastik pada Gambar 2.



Figure 1. Proses pengolahan limbah botol plastik berjenis PET



Figure 2. *Proses pengolahan limbah tutup botol plastik berjenis HDPE*

Limbah botol plastik dan tutup botol plastik yang digunakan sebagai substitusi agregat pada paving block akan dikumpulkan kemudian dicuci untuk membersihkan dari sisa-sisa kotoran. Setelah dicuci akan dimasukkan ke mesin

cacah plastik. Setelah dimasukkan ke mesin cacah kemudian diayak dengan ayakan no 4. (lolos ayakan 4,75 mm) sesuai dengan standar [12]

B. Tahapan II : Perencanaan Campiuran Paving Block

Benda uji yang akan dibuat yaitu paving block berbentuk bata dengan dimensi 20 x 10 x 6 cm. Digunakan 2 jenis limbah plastik sebagai substitusi agregat pada paving block yaitu limbah botol plastik yang berjenis (*Polyethylene Terephthalate* (PET) dan Limbah tutup botol plastik yang berjenis *High Density Polyethylene* (HDPE). Persentase limbah digunakan sebesar 5%, 10% dan 15% dari berat pasir. Adapun *mix design* sebagai berikut:

1. Mix Design dan Data Material

Proporsi 1:2 (semen : pasir)

2. Volume Benda uji (Paving Block Bata)

$$= 20 \times 10 \times 6 \text{ cm}$$

$$= 0,0012 \text{ m}^3 / 1 \text{ Benda Uji}$$

3. Data Material

Berat jenis Semen: 3150 Kg/m³

Berat jenis pasir: 2713 kg/m³

Berat jenis Air: 1000 kg/m³

4. Berat Jenis Plastik

Berat Jenis Plastik HDPE : 0,96 gr/cm³

Berat Jenis plastik PET: 1,385 gr/cm³

Campuran pembuatan paving block terdiri dari semen, agregat dan air dengan proporsi 1 : 2 serta pemanfaatan limbah plastik sebagai substitusi agregat paving block dan penambahan zat aditif

berupa *Superplasticizer*. Untuk Komposisi 3 benda uji dapat dilihat pada Tabel 1.

Variasi	Semen (gr)	Pasir (gr)	Plastik PET (gr)	Plastik HDPE (gr)	Air (ml)	Superplasticizer (ml)
Kontrol	2871	5742	-	-	1292	-
PET 5%	2871	4546	147	-	574,2	14
PET 10%	2871	4307	293	-	574,2	14
PET 15%	2871	4067	442	-	574,2	14
HDPE 5%	2871	4546	-	102	574,2	14
HDPE 10%	2871	4307	-	203	574,2	14
HDPE 10%	2871	4067	-	305	574,2	14

Table 1. Kebutuhan material untuk 3 sampel

C. Tahap III : Pembuatan Benda Uji

Pengumpulan material utama yaitu pasir, semen dan air kemudian bahan tambahan yaitu limbah botol plastik (PET), tutup botol plastik (HDPE) yang sudah tercacah dan *superplasticizer* (Master glenium Ace 8595), kemudian menimbang semua material sesuai *mixdesign*, setelah bahan selesai kemudian bahan dicampur dengan proporsi yang telah ditentukan dengan mixer selama ± 10 menit. Bahan yang telah dicampur akan dicetak kedalam mesin press paving block. Pada penelitian ini Paving block yang dibuat berdimensi 20 x 10 x 6 cm. Adapun proses pencetakan paving block menggunakan mesin press dapat dilihat pada Gambar 3.



Figure 3. Proses Pencetakan Benda uji

Benda uji yang telah dicetak akan dilakukan curing selama 7 hari di suhu ruang. Bertujuan untuk menjaga kelembaban material agar tidak mengering terlalu cepat, sehingga kekuatan awal paving block tetap terjaga.

D. Tahap IV : Pengujian

Pengujian mekanik paving block pada penelitian ini terdiri dari uji kuat tekan, penyerapan air dan pengujian natrium sulfat. Adapun sifat - sifat fisika pada paving block menurut SNI 03-0691-1996 dapat dilihat pada Tabel 2:

Mutu	Kuat Tekan (Mpa)		Ketahanan Aus (mm/menit)		Penyerapan Air Rata-Rata maks. (%)	Klasifikasi
	Rata-Rata	Min	Rata-Rata	Min		
A	40	35	0,9	0,103	3	Pejalan Kaki
B	20	17	0,13	0,149	6	Peralatan Parkir
C	15	12,5	0,16	0,184	8	Pejalan Kaki

D	10	8,5	0,219	0,251	10	Taman Dan Penggunaan Lain
---	----	-----	-------	-------	----	---------------------------

Table 2. *Sifat-Sifat Fisika*

1. Pengujian kuat tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan pada paving block yang telah menjalani proses curing selama 7 hari pada suhu ruang. Untuk pengujian kuat tekan, digunakan 3 sampel untuk setiap variasi. Berdasarkan (SNI 03-0691-1996). Paving block sebelum diuji akan dipotong menyesuaikan rusuk-rusuknya yaitu berbentuk kubus dengan dimensi 6 x 6 x 6 cm. Adapun Tahapan Pengujian kuat tekan bisa dilihat pada Gambar 4.



Figure 4. *Pengujian Kuat Tekan*

2. Pengujian penyerapan air

Pengujian penyerapan air berdasarkan (SNI 03-0691-1996) dengan merendam benda uji selama 24 jam dan kemudian menimbang benda uji saat basah dan benda uji saat kering (setelah di oven). Adapun tahapan pengujian penyerapan air dapat dilihat pada Gambar 5.



Figure 5. *Pengujian Penyerapan Air*

3. Pengujian natrium sulfat

Pengujian natrium sulfat berdasarkan (SNI 03-0691-1996) dengan merendamkan paving block sebanyak 5 kali kedalam cairan natrium sulfat kemudian menghitung selisih berat sebelum dan sesudah perendaman. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan paving block dalam menerima serangan kimia berupa natrium sulfat.

4. Pengujian impact

Pengujian *impact* dilakukan dengan acuan [17] ACI 544.2R-89. Menggunakan alat uji *drop weight Impact test* dimana benda uji akan diberi pukulan maksimal 10 kali. Tinggi jatuhnya *hammer* mengenai bola baja adalah 457 mm. Kemudian diameter lubang bekas pukulan dan kedalaman diameter diukur dan melihat fisik paving block dalam menerima pukulan di setiap tahap. Adapun tahapan pengujian *impact* dapat dilihat pada Gambar 6.



Figure 6. *Pengujian Impact*

5. Scanning Electron Microscope (SEM)

Pengujian *Scanning Electron Microscope (SEM)* dilakukan pada paving block yang memiliki kuat tekan optimum untuk mengetahui mikrostruktur plastik terhadap agregat

6. Analisis Biaya

Analisis biaya pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi limbah plastik sebagai substitusi agregat pada paving block ditinjau dari aspek biaya dan lingkungan. Analisis biaya yang dihitung adalah penggunaan paving block dalam 100 m². Analisa biaya hanya dihitung harga material dan tidak termasuk biaya operasional, biaya tenaga kerja dan biaya lainnya

Hasil dan Pembahasan

A. Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan Paving Block mengacu pada (SNI 03-0691-1996). Pengujian kuat tekan dilakukan pada paving block dengan umur curing 7 hari. Benda uji paving block sebelum pengujian kuat tekan akan dilakukan pemotongan berbentuk kubus ukuran 6 x 6 x 6 cm [14]. Adapun hasil pengujian kuat tekan PET dapat dilihat Pada Tabel 3 dan grafik hasil uji kuat tekan PET dapat dilihat pada Gambar 7. Untuk hasil uji kuat tekan HDPE dapat dilihat pada Tabel 4 dan Grafik hasil uji kuat tekan HDPE dapat dilihat pada Gambar 8.

HASIL UJI KUAT TEKAN PET				
Variasi	P (N)	A (mm ²)	Uji Kuat Tekan (Mpa)	Rata- Rata (Mpa)
Kontrol	89100	3600	24,75	25,38
	95000	3600	26,39	
	90000	3600	25,00	
PET 5%	77100	3600	21,42	22,32
	82600	3600	22,94	
	81400	3600	22,61	
PET 10%	65800	3600	18,28	19,09
	69900	3600	19,42	
	70500	3600	19,58	
PET 15%	63700	3600	17,69	17,22

	62600	3600	17,39
	59700	3600	16,58

Table 3. Hasil Uji Kuat Tekan PET

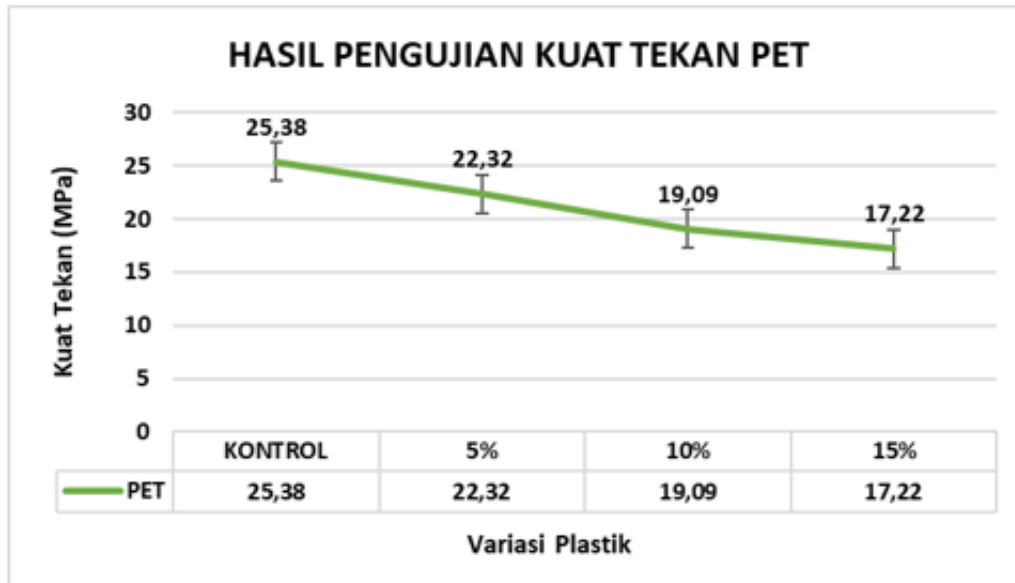


Figure 7. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan PET

HASIL UJI KUAT TEKAN HDPE				
Variasi	P (N)	A (mm ²)	Uji Kuat Tekan (Mpa)	Rata- Rata (Mpa)
Kontrol	89100	3600	24,75	25,38
	95000	3600	26,39	
	90000	3600	25,00	
HDPE 5%	71900	3600	19,97	21,24
	72000	3600	20,00	
	85500	3600	23,75	
HDPE 10%	59800	3600	16,61	16,78
	54200	3600	15,06	
	67200	3600	18,67	
HDPE 15%	49800	3600	13,83	14,62
	54600	3600	15,17	
	53500	3600	14,86	

Table 4. Hasil Uji Kuat Tekan HDPE

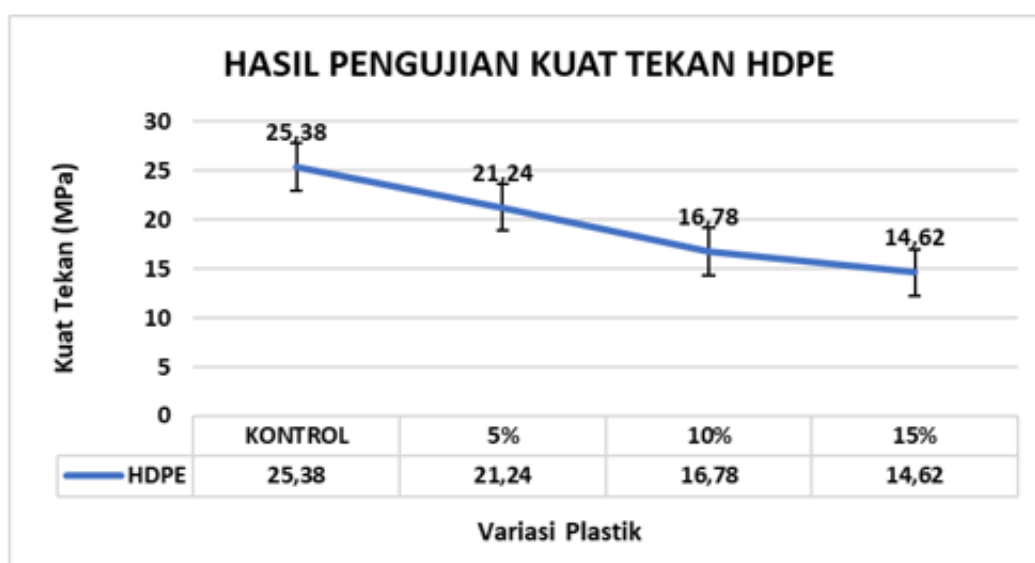


Figure 8. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan HDPE

Hasil pengujian kuat tekan paving block dengan variasi campuran limbah plastik PET terjadi penurunan kekuatan tekan terhadap paving block kontrol tanpa plastik, dimana:

1. Paving block kontrol (tanpa plastik) : Kuat Tekan 25,38 MPa (mutu B).
2. Paving block dengan PET 5%: Kuat Tekan 22,32 MPa, turun 12,06 % dari kontrol (mutu B).
3. Paving block dengan PET 10%: Kuat Tekan 19,09 MPa, turun 24,79 % dari kontrol (mutu B).
4. Paving block dengan PET 15%: Kuat Tekan 17,22 MPa, turun 32,16 % dari kontrol (mutu B).

Menurut SNI 03-0691-1996, paving block mutu B memiliki kuat tekan minimal 17 Mpa dapat digunakan untuk peralatan parkir. Maka, meskipun ada penurunan kekuatan tekan akibat penambahan limbah plastik PET, semua variasi memenuhi klasifikasi mutu B dan dapat diaplikasikan sebagai peralatan parkir berdasarkan SNI 03-0691-1996.

Sama halnya yang terjadi pada paving block berjenis HDPE penurunan kuat tekan signifikan seiring bertambahnya persentase plastik.

1. Paving block kontrol (tanpa plastik) : Kuat Tekan 25,38 MPa (mutu B).
2. Paving block HDPE 5%: Kuat Tekan 21,24 MPa, turun 16,31 % dari kontrol (Mutu B).
3. Paving block HDPE 10 %: Kuat Tekan 16,78 MPa, turun 33,89 % dari kontrol (Mutu C)
4. Paving block HDPE 15%: Kuat Tekan 14,62 MPa, turun 42,39 % dari kontrol (Mutu C)

Dengan demikian, paving block dengan campuran HDPE 5% tetap memenuhi mutu B yang dapat digunakan untuk peralatan parkir, sementara campuran HDPE 10% dan 15% mengalami penurunan mutu menjadi mutu C yang diperuntukkan pejalan kaki sesuai klasifikasi SNI 03-0691-1996. Hasil Uji kuat tekan PET dan HDPE dapat dilihat pada Gambar 9.



Figure 9. Grafik Hasil uji Kuat tekan PET dan HDPE

Grafik tersebut menunjukkan bahwa kuat tekan paving block dari jenis plastik PET dan HDPE menurun seiring bertambahnya persentase limbah plastik [14]. Variasi PET dengan persentase 5% menghasilkan kuat tekan optimum yaitu 22,32 Mpa. Kemudian untuk persentase terendah dihasilkan oleh HDPE 15% yaitu 14,62 Mpa. Penurunan signifikan dengan penambahan persentase plastik dikarenakan kurangnya lekatan antara material plastik dan material pasir, semen.

B. Penyerapan Air

Pengujian penyerapan air dilakukan untuk mengukur seberapa besar kemampuan paving block dalam menyerap air melalui pori-porinya. Pengujian penyerapan air mengacu pada SNI-03-0692-1996. Dengan merendamkan benda uji ke dalam air selama 24 jam. Kemudian benda uji akan di timbang dan dilakukan pengeringan dengan di oven kemudian dihitung selisih berat benda uji basah dan berat benda uji kering hasil uji penyerapan air Paving block PET dapat dilihat pada Tabel 5 dan HDPE Tabel 6 untuk Grafik hasil penyerapan air PET dan HDPE dapat dilihat pada Gambar 10.

Variasi	Kode Sampel	Berat Basah (gr)	Berat Kering (gr)	Penyerapan Air (%)	Rata-Rata (%)
Kontrol	K1	3480,00	3425,00	1,61	1,65
	K2	3420,00	3355,00	1,94	
	K3	3505,00	3460,00	1,30	
	K4	3265,00	3210,00	1,71	
	K5	3275,00	3220,00	1,71	
PET 5%	S1	2827,75	2786,04	1,50	1,16
	S2	2983,20	2952,97	1,02	
	S3	2903,12	2873,95	1,01	
	S4	2940,88	2908,12	1,13	
	S5	2924,11	2890,51	1,16	
PET 10%	S1	2736,90	2710,29	0,98	1,03
	S2	2732,83	2704,46	1,05	
	S3	2788,39	2762,06	0,95	
	S4	2712,33	2682,25	1,12	
	S5	2803,26	2774,6	1,03	

PET 15%	S1	2654,22	2640,61	0,52	0,50
	S2	2677,84	2664,27	0,51	
	S3	2745,14	2732,97	0,45	
	S4	2647,46	2631,74	0,60	
	S5	2743,80	2731,43	0,45	

Table 5. Hasil Uji Penyerapan Air (PET)

Variasi	Kode Sampel	Berat Basah (gr)	Berat Kering (gr)	Penyerapan Air (%)	Rata-Rata (%)
Kontrol	K1	3480,00	3425,00	1,61	1,65
	K2	3420,00	3355,00	1,94	
	K3	3505,00	3460,00	1,30	
	K4	3265,00	3210,00	1,71	
	K5	3275,00	3220,00	1,71	
HDPE 5%	S1	2944,76	2908,78	1,24	1,36
	S2	2929,74	2901,76	0,96	
	S3	2813,79	2752,50	2,23	
	S4	2920,25	2883,36	1,28	
	S5	3044,41	3010,94	1,11	
HDPE 10%	S1	2807,62	2759,90	1,73	1,28
	S2	2866,3	2831,15	1,24	
	S3	2787,94	2736,41	1,88	
	S4	2968,51	2949,43	0,65	
	S5	2940,28	2913,43	0,92	
HDPE 15%	S1	2917,87	2895,67	0,77	0,97
	S2	2857,87	2829,09	1,02	
	S3	2916,78	2887,49	1,01	
	S4	2951,64	2922,91	0,98	
	S5	2850,72	2821,11	1,05	

Table 6. Hasil Uji Penyerapan Air (HDPE)

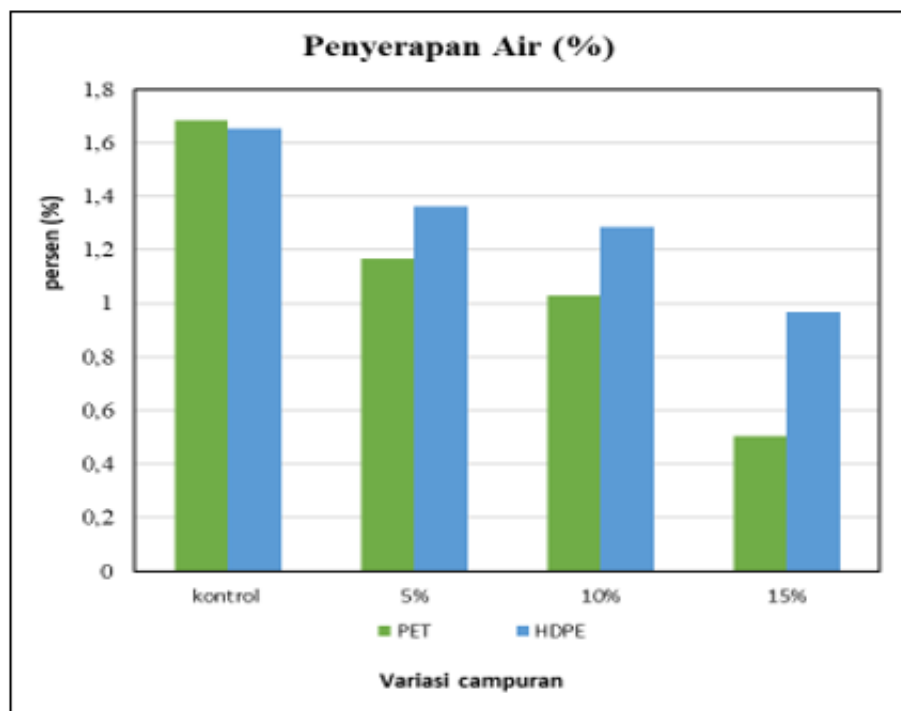


Figure 10. Grafik Hasil uji Penyerapan Air PET dan HDPE

Hasil penyerapan air pada paving block kontrol menghasilkan daya serap tertinggi diantara variasi lainnya yaitu sebesar 1,65% kemudian untuk persentase daya serap tertinggi di variasi PET terjadi pada PET 5% yang menghasilkan daya serap sebesar 1,16%. Hal tersebut sama terjadi pada Variasi persentase HDPE 5% yang menghasilkan daya serap air sebesar 1,36. Sedangkan untuk Tingkat daya serap terendah terjadi pada variasi persentase plastik PET 15%

sebesar 0,50 % dan HDPE 15% sebesar 0,97%. Daya serap air terus menurun seiring dengan pertambahan persentase campuran plastik pada Paving Block. Sejalan dengan penelitian [15]Agyeman et al. 2019, daya serap air paving block menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi plastik dalam campuran, karena paving block tanpa campuran plastik memiliki kemampuan menyerap air yang lebih tinggi dibandingkan dengan paving block yang mengandung plastik. Hal ini dikarenakan plastik bersifat hidrofobik (tidak menyerap air).

C. Pengujian Natrium Sulfat

Pengujian natrium sulfat dilakukan untuk mengetahui daya tahan paving block terhadap pelapukan dan pengaruh lingkungan. Parameter yang digunakan adalah kehilangan berat dan munculnya retak pada paving block setelah perendaman dalam larutan natrium sulfat. Menurut SNI 03-0691-1996, penurunan berat paving block yang lebih dari 1% atau terjadi kerusakan seperti pengikisan atau retak pada saat perendaman benda uji dengan larutan natrium sulfat menurut SNI 03-0691-1996 dinyatakan Cacat. Hasil Uji Natrium Sulfat Pada Paving Block PET dapat dilihat pada Tabel 7 dan HDPE pada Tabel 8. Grafik hasil uji penyerapan air dapat dilihat pada Gambar 11.

Variasi	Benda Uji	Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	Selisih (%)	Keterangan	Selisih Berat (%)
Kontrol	Sampel 1	3372	3368	0,12	Tidak Cacat	0,12
	Sampel 2	3216	3212	0,12	Tidak Cacat	
PET 5%	Sampel 1	2985	2985	0,03	Tidak Cacat	0,12
	Sampel 2	2891	2885	0,21	Tidak Cacat	
PET 10%	Sampel 1	2712	2705	0,28	Tidak Cacat	0,33
	Sampel 2	2655	2645	0,39	Tidak Cacat	
PET 15%	Sampel 1	2624	2605	0,75	Tidak Cacat	0,56
	Sampel 2	2675	2665	0,38	Tidak Cacat	

Table 7. Hasil Uji Natrium Sulfat (PET)

Variasi	Benda Uji	Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	Selisih (%)	Keterangan	Selisih Berat(%)
Kontrol	Sampel 1	3372,00	3368	0,12	Tidak Cacat	0,12
	Sampel 2	3216,00	3212	0,12	Tidak Cacat	
HDPE 5%	Sampel 1	2894,36	2880	0,50	Tidak Cacat	0,56
	Sampel 2	3014,02	2995	0,63	Tidak Cacat	
HDPE 10%	Sampel 1	2834,87	2820	0,52	Tidak Cacat	0,60
	Sampel 2	2768,59	2750	0,67	Tidak Cacat	
HDPE 15%	Sampel 1	2824,99	2800	0,88	Tidak Cacat	0,69
	Sampel 2	2924,46	2910	0,49	Tidak Cacat	

Table 8. Hasil Uji Natrium Sulfat (HDPE)

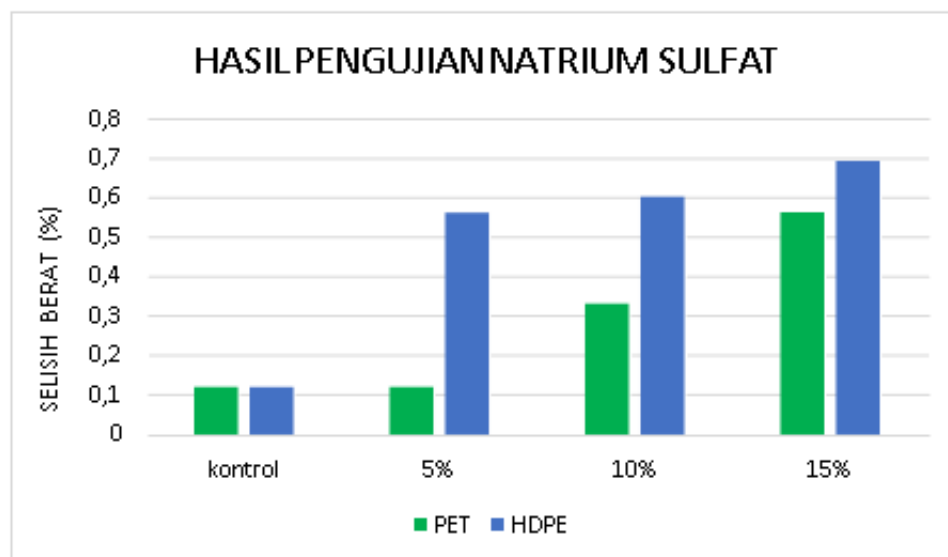


Figure 11. Grafik Hasil Uji Natrium Sulfat PET

Pada pengujian natrium sulfat hasil paving block normal sebesar 0,12%. Sedangkan pada variasi plastik PET menghasilkan selisih terendah yaitu pada variasi PET 5% dengan selisih berat sebesar $0,12\% < 1\%$ sama halnya pada variasi plastik HDPE menghasilkan selisih terendah yaitu pada variasi HDPE 5% dengan selisih berat sebesar $0,56\% < 1\%$. Pada selisih terbesar terjadi pada Variasi PET 15 % menghasilkan selisih $0,56\% < 1\%$ dan HDPE 15% sebesar $0,69\% < 1\%$. Setelah ditinjau secara visual tidak ada perubahan fisik yang terjadi seperti pengikisan atau retak. Menandakan bahwa paving block variasi plastik tidak mengalami CACAT. Hal ini dikarenakan plastik dapat mengurangi reaksi kimia yang merusak antara natrium sulfat dan kalsium hidroksida yang dihasilkan dari reaksi semen dalam paving block. Sehingga menghambat penetrasi larutan natrium sulfat, dan tidak terjadi retak atau kerusakan fisik pada paving block.

D. Pengujian Impact

Pengujian *impact* yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan alat *dropweight Impacttest*, dengan Acuan [17] ACI 544.2R-89 yaitu dengan menjatuhkan *Hammer* dari ketinggian 457 mm. *Hammer* dijatuhkan berulang kali dan diamati kondisi retak pada sampel. Tujuan pengujian ini adalah untuk menganalisis tingkat kerusakan pada spesimen akibat beban kejut serta menilai ketahanan spesimen setelah menerima tumbukan dari beban yang dijatuhkan secara bebas. Beban kejut dihasilkan apabila dua benda bertumbukan atau apabila benda jatuh dan mengenai suatu struktur [16], Pengujian dilakukan dengan 3 percobaan. Adapun untuk kedalaman lubang akibat beban impact pada percobaan I dapat dilihat pada Tabel 9 dan Diameter benturan akibat beban impact pada percobaan I dapat dilihat pada Tabel 10, kedalaman lubang akibat beban impact pada percobaan II dapat dilihat pada Tabel 11 dan Diameter benturan akibat beban impact pada percobaan II dapat dilihat pada Tabel 12, kedalaman lubang akibat beban impact pada percobaan III dapat dilihat pada Tabel 13 dan Diameter benturan akibat beban impact pada percobaan III dapat dilihat pada Tabel 14.

PERCOBAAN I							
KEDALAMAN (mm)							
PUKULAN	Normal	PET 5%	PET 10%	PET 15 %	HDPE 5%	HDPE 10%	HDPE 15%
PUKULAN 1	1,3	0,5	0,8	0,3	0,7	0,8	0,7
PUKULAN 2	1,7	1,4	0,8	0,5	1,3	1	1,3
PUKULAN 3	1,8	2	1,1	0,6	1,5	1,2	1,5

PUKULAN 4	2	2,1	1,1	1	1,6	1,3	1,8
PUKULAN 5	2,1	2,6	1,1	0	1,7	1,5	0
PUKULAN 6	2,1	2,9	1,2	0	1,8	0	0
PUKULAN 7	2,5	3,7	1,2	0	1,8	0	0
PUKULAN 8	2,7	4,1	1,2	0	1,9	0	0
PUKULAN 9	2,8	4,3	1,3	0	2,3	0	0
PUKULAN 10	2,8	4,5	1,3	0	2,5	0	0

Table 9. Kedalaman lubang paving block akibat beban Impact pada percobaan I

PERCOBAAN I							
DIAMETER (cm)							
PUKULAN	Normal	PET 5%	PET 10%	PET 15%	HDPE 5%	HDPE 10%	HDPE 15%
PUKULAN 1	0,85	1,6	1,7	1,05	1,4	1,5	1,4
PUKULAN 2	1,4	2,0	1,9	2,5	1,9	1,65	1,6
PUKULAN 3	1,65	2,4	2,4	2,75	2,3	2,2	2,3
PUKULAN 4	1,9	2,6	2,6	2,9	2,8	2,35	2,4
PUKULAN 5	2,1	2,7	2,6	0	2,8	2,65	0
PUKULAN 6	2,35	2,8	2,7	0	2,9	0	0
PUKULAN 7	2,5	2,9	2,8	0	3,1	0	0
PUKULAN 8	2,75	3,2	2,9	0	3,4	0	0
PUKULAN 9	2,8	3,4	3,0	0	3,5	0	0
PUKULAN 10	2,8	3,8	3,2	0	3,7	0	0

Table 10. Diameter lubang paving block akibat beban Impact pada percobaan I

PERCOBAAN II							
KEDALAMAN (mm)							
PUKULAN	Normal	PET 5%	PET 10%	PET 15%	HDPE 5%	HDPE 10%	HDPE 15%
PUKULAN 1	1	0,6	0,3	0,8	0,8	0,5	0,4
PUKULAN 2	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1	0,9
PUKULAN 3	1,4	0,7	0,7	1,1	1,5	1	1,5
PUKULAN 4	1,5	0,8	1,3	1,3	1,8	1,3	0
PUKULAN 5	1,7	0,8	1,5	0	2	0	0
PUKULAN 6	1,8	0,9	1,8	0	2,3	0	0
PUKULAN 7	2	1,2	2,1	0	2,7	0	0
PUKULAN 8	2,1	1,3	2,5	0	2,8	0	0
PUKULAN 9	2,1	1,3	0	0	0	0	0
PUKULAN 10	2,3	0	0	0	0	0	0

Table 11. Kedalaman lubang paving block akibat beban Impact pada percobaan II

PERCOBAAN II							
DIAMETER (cm)							
PUKULAN	Normal	PET 5%	PET 10%	PET 15%	HDPE 5%	HDPE 10%	HDPE 15%
PUKULAN 1	1,05	1,35	1	1,75	1,3	2,25	1,75
PUKULAN 2	1,25	1,6	1,45	1,85	2,0	2,85	2,1
PUKULAN 3	1,45	2,25	1,55	2,25	2,4	2,85	3,1
PUKULAN 4	1,55	2,35	1,9	2,9	2,5	2,90	0
PUKULAN 5	1,65	2,4	2,05	0	2,7	0	0
PUKULAN 6	1,8	2,5	2,35	0	2,8	0	0
PUKULAN 7	1,9	2,65	2,75	0	3,1	0	0
PUKULAN 8	1,9	2,7	2,85	0	3,4	0	0
PUKULAN 9	2	2,8	0	0	0	0	0
PUKULAN 10	2,15	0	0	0	0	0	0

Table 12. Diameter lubang paving block akibat beban Impact pada percobaan II

PERCOBAAN III							
KEDALAMAN (mm)							

PUKULAN	Normal	PET 5%	PET 10%	PET 15%	HDPE 5%	HDPE 10%	HDPE 15%
PUKULAN 1	1,4	0,4	0,5	0,5	0,8	0,8	0,4
PUKULAN 2	1,5	0,4	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9
PUKULAN 3	1,6	0,5	0,8	0,8	1,5	1,6	1
PUKULAN 4	2	0,6	0,9	0,9	1,8	1,9	1,3
PUKULAN 5	2,2	0,7	1,2	1,3	1,8	2,2	0
PUKULAN 6	2,4	0,8	1,4	0	2	0	0
PUKULAN 7	2,5	0,8	1,5	0	2,3	0	0
PUKULAN 8	2,6	1	1,5	0	2,3	0	0
PUKULAN 9	2,8	1,3	1,7	0	2,5	0	0
PUKULAN 10	2,8	1,4	1,7	0	0	0	0

Table 13. Kedalaman lubang paving block akibat beban Impact pada percobaan III

PERCOBAAN III							
DIAMETER (cm)							
PUKULAN	Normal	PET 5%	PET 10%	PET 15%	HDPE 5%	HDPE 10%	HDPE 15%
PUKULAN 1	0,9	1,1	1,2	1,6	1,35	1,9	1,75
PUKULAN 2	1,4	1,2	1,35	1,4	1,45	2,1	2,1
PUKULAN 3	1,55	1,3	1,4	1,7	1,6	2,4	2,4
PUKULAN 4	2	1,3	1,45	1,9	1,65	2,6	2,85
PUKULAN 5	2,3	1,4	1,5	2,05	1,7	2,8	0
PUKULAN 6	2,35	1,5	1,65	0	1,75	0	0
PUKULAN 7	2,5	1,7	1,8	0	1,9	0	0
PUKULAN 8	2,6	1,8	1,9	0	2,15	0	0
PUKULAN 9	2,7	2,0	1,95	0	2,8	0	0
PUKULAN 10	2,7	2,0	2,05	0	0	0	0

Table 14. Diameter lubang paving block akibat beban Impact pada percobaan III

Hasil pengujian Impact Pada Paving block PET disajikan dalam Grafik. Hasil uji pada percobaan I dapat dilihat pada Gambar 12, Percobaan II dapat dilihat pada Gambar 13 dan Percobaan III dapat dilihat pada Gambar 14.

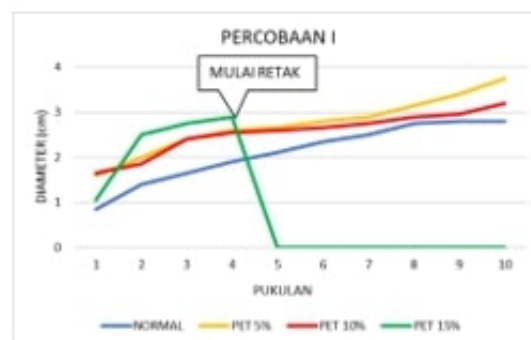
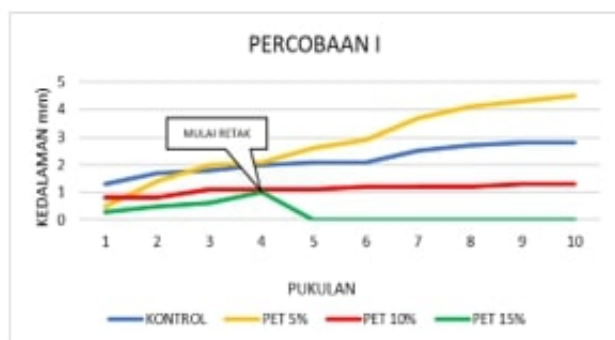


Figure 12. Grafik hasil pengujian ketahanan paving block PET terhadap beban pukulan (dropweight impact test) percobaan I

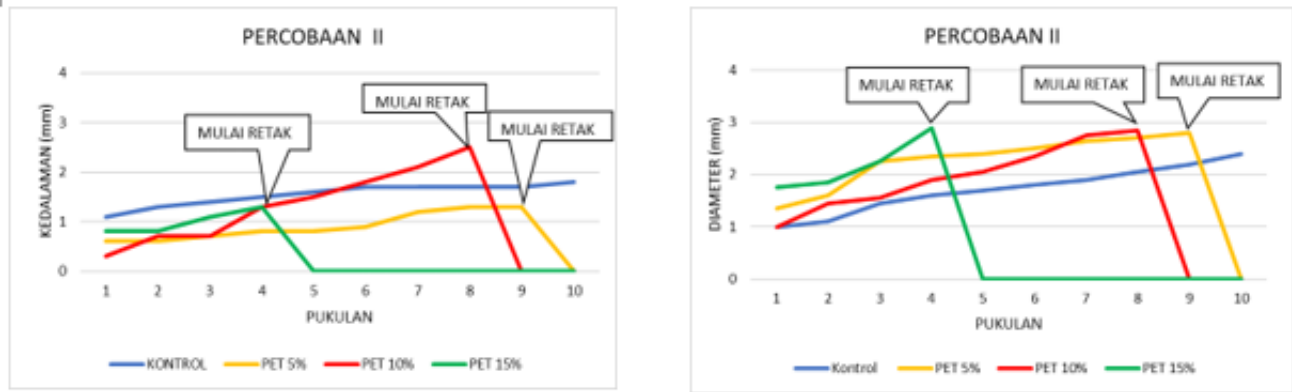


Figure 13. Grafik hasil pengujian ketahanan paving block PET terhadap beban pukulan (drop weight impact test) percobaan II

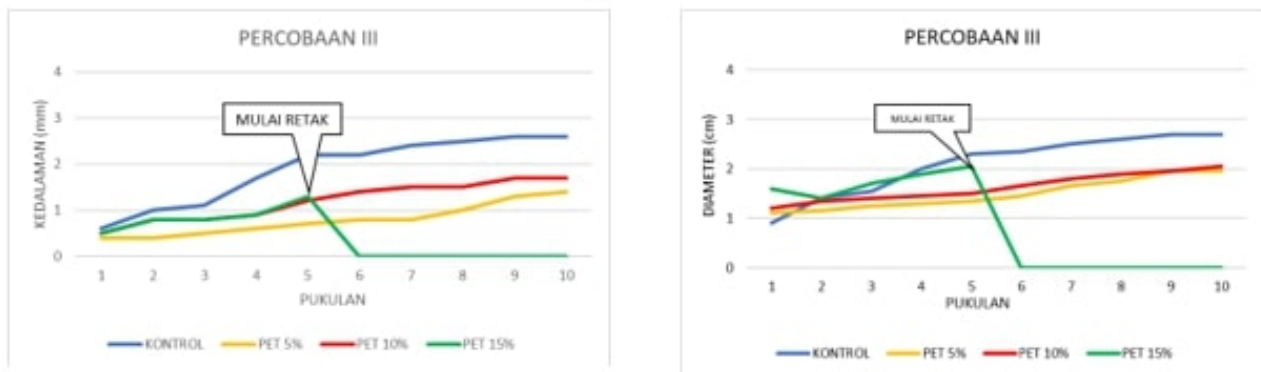


Figure 14. Grafik hasil pengujian ketahanan paving block PET terhadap beban pukulan (drop weight impact test) percobaan III

Hasil pengujian Impact Pada Paving block HDPE disajikan dalam Grafik. Hasil uji pada percobaan I dapat dilihat pada Gambar 15, Percobaan II dapat dilihat pada Gambar 16 dan Percobaan III dapat dilihat pada Gambar 17

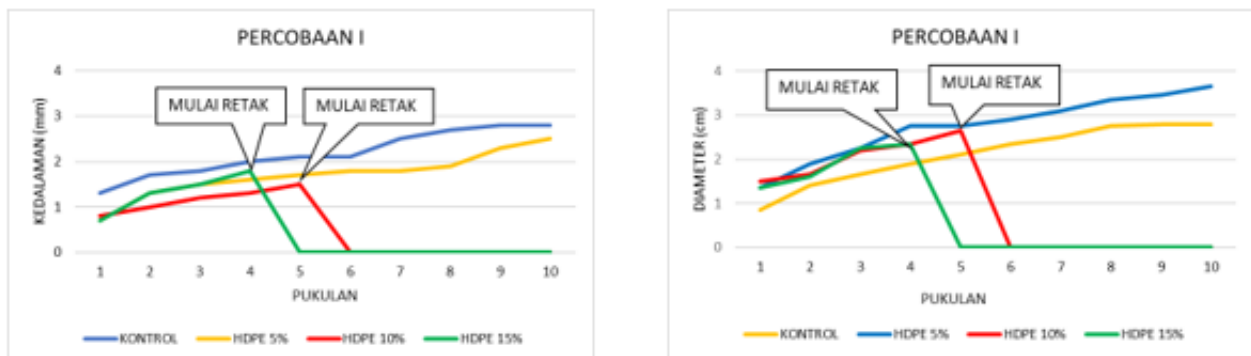


Figure 15. Grafik hasil pengujian ketahanan paving block HDPE terhadap beban pukulan (dropweight impact test) percobaan I

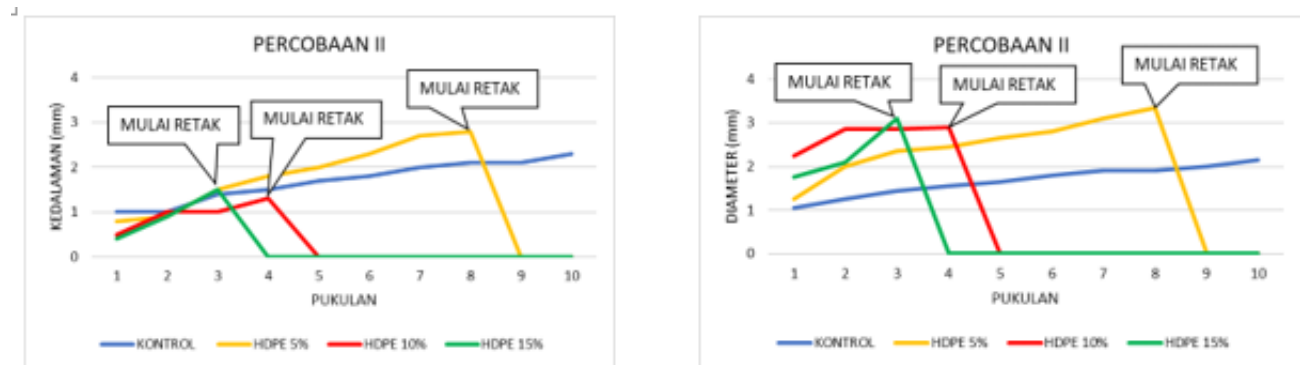


Figure 16. Grafik hasil pengujian ketahanan paving block HDPE terhadap beban pukulan (drop weight impact test) percobaan II

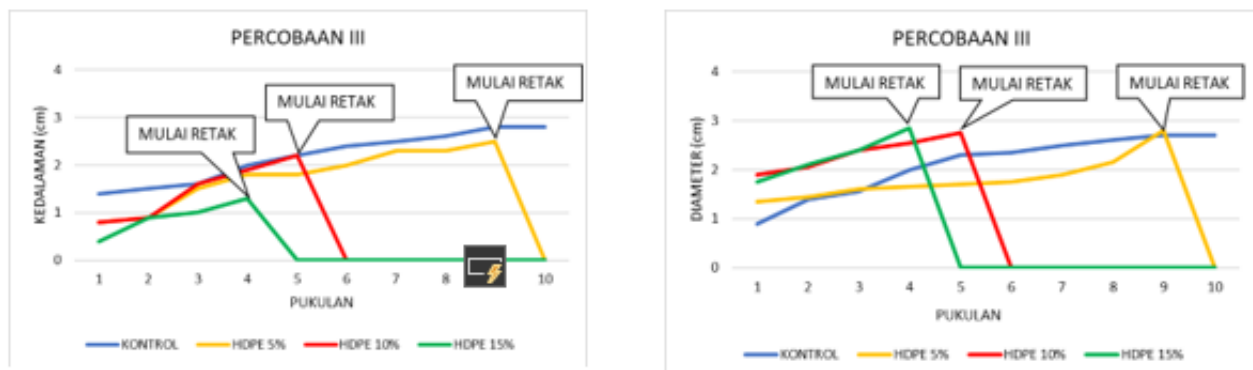


Figure 17. Grafik hasil pengujian ketahanan paving block HDPE terhadap beban pukulan (drop weight impact test) percobaan III

Percobaan yang dilakukan pada pengujian ini sebanyak 3 kali. Hasil pengujian *impact* yang dilakukan sebanyak 3 percobaan menunjukkan bahwa paving block dengan campuran plastik yaitu PET 5% mampu menerima pukulan hingga pukulan paling maksimum. Namun untuk HDPE 5% menunjukkan penurunan yang konsisten pada percobaan kedua dan ketiga. Berikutnya untuk paving block dengan persentase 10% dan 15% menunjukkan penurunan kemampuan dalam menerima benturan akibat beban *impact*. Penurunan performa konsisten menurun seiring dengan penambahan plastik. Hal ini dikarenakan semakin meningkatnya persentase plastik membuat permukaan internal paving block menjadi lebih licin, sehingga ikatan antar material melemah dan menyebabkan kekuatan *impact* menurun.

E . Scanning Electron Microscope (SEM)

Pengujian *Scanning Electron Microscopy (SEM)* dilakukan pada hasil pengujian kuat tekan optimum yaitu pada PET 5%. Hasil pengujian SEM pada PET 5% dengan pembesaran 500x dapat dilihat pada Gambar 18 dan Pembesaran 1000x dapat dilihat pada Gambar 19.

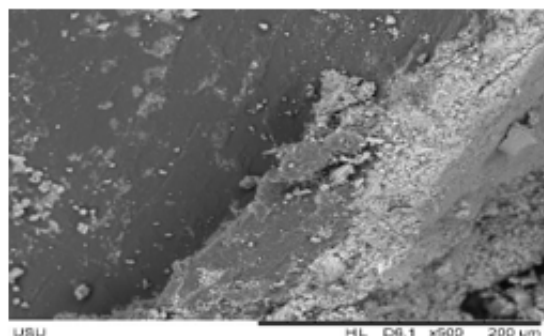


Figure 18. Hasil Scanning Electron Microscope (SEM) Paving block PET 5% Perbesaran 500x

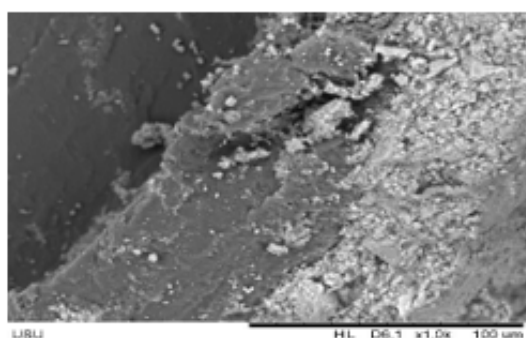


Figure 19. Hasil Scanning Electron Microscope (SEM) Paving block PET 5% Perbesaran 1000x

Hasil Uji SEM dengan perbesaran 500x terlihat permukaan utama yang saling mengikat antara agregat dan plastik. Pada perbesaran 1000x menunjukkan beberapa void yang mengindikasikan terdapat rongga antara partikel pasir. Distribusi agregat terlihat kurang cukup merata dimana mengindikasikan terdapat pencampuran yang kurang homogen antara semen dan pasir. Pada gambar tersebut terdapat 2 area batas yaitu permukaan halus dan kasar. Dimana area tersebut merupakan zona transisi antara plastik dan matriks agregat, pasta semen. Disepanjang zona transisi ini terlihat ikatan antar partikel tampak baik dengan sedikit void yang ditemukan disepanjang zona tersebut. Ikatan antara partikel ini dipengaruhi oleh penggunaan *superplasticizer* yang membantu mendistribusikan partikel sehingga membantu kepadatan. Hasil uji Sem menunjukkan sedikit void (rongga) di zona transisi antara partikel plastik dan agregat, tetapi ikatan antara plastik dan agregat cenderung melemah hal ini dikarenakan permukaan material plastik yang licin dan sifat kimia yang berbeda dengan agregat. Sehingga adhesi antara keduanya kurang kuat. Hal ini menyebabkan kekuatan mekanik menjadi lemah walaupun porositas tampak kecil secara mikroskopis.

F. Potensi Limbah Terhadap Lingkungan dan Analisis Biaya

Analisis biaya dilakukan pada paving block dengan kuat tekan optimum yaitu PET 5% . Analisis biaya pembuatan paving block pada penelitian ini hanya mempertimbangkan harga material sebagai komponen biaya. Untuk analisa biaya pada penelitian ini dihitung dalam 100 m² atau setara dengan 5000 paving block. Biaya tenaga kerja, biaya operasional, serta biaya tambahan lainnya tidak termasuk dalam perhitungan ini. Adapun Analisis biaya pada paving block Kontrol dapat dilihat pada Tabel 15 dan Analisis biaya pada paving block PET 5% dapat dilihat pada Tabel 16.

HARGA PAVING BLOCK (100 m2) KONTROL				
Material	Berat (gr)	Berat (kg)	Harga Material (kg)	Total Harga

Semen	4785000	4785	Rp	1.436	Rp	6.868.868
Pasir	9570000	9570	Rp	190	Rp	1.822.921
Air	2153333	2153	Rp	1	Rp1	
		Total			Rp	8.691.789

Table 15. Analisis Biaya Paving Block Kontrol

HARGA PAVING BLOCK (100 m ²) PET 5%						
Material	Berat (gr)	Berat (kg)	Harga Material (kg)		Total Harga	
Semen	4785000	4785	Rp	1.436	Rp	6.868.868
Pasir	9091500	9092	Rp	190	Rp	1.731.775
Air	2153333	2153	Rp	1	Rp	1
Plastik PET	245000	245	Rp	0	Rp	0
		Total			Rp	8.600.643

Table 16. Analisis Biaya Paving Block Variasi PET 5%

Pada paving block dengan persentase PET 5% dengan ukuran 20 x 10 x 6 cm mengurangi sebesar Rp.91.146 untuk 100 m². Dengan menggunakan limbah botol plastik sebesar 245 kg botol plastik. Hal ini menunjukkan bahwa paving block tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga layak secara teknis dan ekonomis.

Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian mekanik, pengujian *impact*, *Scanning Electron Microscope* (SEM) , dan Analisis biaya pada paving block dengan memanfaatkan 2 jenis plastik yaitu PET dan HDPE sebagai substitusi agregat paving block, maka dapat diambil kesimpulan bahwa penggunaan limbah plastik sebagai pengganti agregat pasir pada paving block dengan persentase optimum 5% menunjukkan hasil kuat tekan yang masih memenuhi mutu B untuk peralatan parkir, penyerapan air dalam kategori aman Mutu A, serta ketahanan terhadap serangan natrium sulfat dengan kehilangan berat di bawah 1%. Meskipun penambahan plastik lebih dari 5% menurunkan performa terhadap sifat mekanik dan pengujian *impact*, paving block dengan persentase 5% plastik tetap menunjukkan daya tahan baik. Analisis SEM mengindikasikan ikatan plastik dan agregat yang cukup baik meski kurang kuat secara mekanik hal ini disebabkan karena sifat material yang berbeda antara plastik dan agregat, semen. Namun, Secara ekonomi dan lingkungan, penggunaan limbah plastik ini dapat mengurangi biaya hingga Rp 91.146,- dan limbah botol plastik sebanyak 245 kg untuk area 100 m², sehingga memberikan solusi yang efisien dan ramah lingkungan. Saran untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengeksplorasi penggunaan persentase plastik yang lebih tinggi. Selain itu, perlu dilakukan pengujian ketahanan jangka panjang dan pengolahan limbah plastik yang lebih baik untuk mendukung kualitas bahan dan keberlanjutan produk.

Ucapan Terima Kasih

Puji syukur saya panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi selama proses penelitian ini. Terima kasih juga saya sampaikan kepada keluarga dan semua pihak yang telah memberikan dukungan dan motivasi.

References

- [1] A. J. Chandler, T. T. Eighmy, O. Hjelm, D. S. Kosson, S. E. Sawell, J. Vehlow, and H. A. Sloop, *Municipal Solid Waste Incinerator Residues*. Amsterdam: Elsevier, 1997.
- [2] A. Okunola, K. I. Ologbonjaye, O. Awosolu, and O. E. Alalade, "Public and Environmental Health Effects of Plastic Wastes Disposal: A Review," *Journal of Toxicology and Risk*

- Assessment, vol. 5, no. 2, 2019, doi: 10.23937/2572-4061.1510021.
3. [3] B. Jiang, J. Yu, and Y. Liu, "The Environmental Impact of Plastic Waste," *Journal of Environmental and Earth Sciences*, vol. 2, no. 2, pp. 26-35, 2020, doi: 10.30564/jees.v2i2.2340.
 4. [4] D. S. Devi, "Sampah Plastik Di Perairan Pesisir Dan Laut: Implikasi Kepada Ekosistem Pesisir DKI Jakarta," *Jurnal Riset Jakarta*, vol. 12, no. 1, pp. 17-23, 2019, doi: 10.37439/jurnaldrd.v12i1.2.
 5. [5] A. A. Amanu, A. P. Zahrani, F. A. Ristaatin, A. R. Ardillah, and D. O. Radianto, "Pengaruh Limbah Mikroplastik Terhadap Organisme Dan Upaya Penanganannya," *Manufaktur: Publikasi Sub Rumpun Ilmu Keteknikan Industri*, vol. 2, no. 2, pp. 12-24, 2024, doi: 10.61132/manufaktur.v2i2.293.
 6. [6] B. I. S. Murat, M. S. Kamalruzaman, M. H. N. Azman, and M. F. Misroh, "Assessment of Mechanical Properties of Recycled HDPE and LDPE Plastic Wastes," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 957, no. 1, pp. 1-8, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/957/1/012046.
 7. [7] P. P. Kadam, M. M. Maske, and S. N. Patil, "Development of Eco-Friendly Paving Blocks Using Waste Plastic and Construction Demolition Waste," *AIP Conference Proceedings*, vol. 3111, no. 1, 2024, doi: 10.1063/5.0221582.
 8. [8] A. Soni, T. S. Rajput, K. Sahu, and S. Rajak, "Utilization of Waste Plastic in Manufacturing of Paver Blocks," *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 939-942, 2019, doi: 10.22214/ijraset.2022.40410.
 9. [9] D. Foti, "Use of Recycled Waste PET Bottles Fibers for the Reinforcement of Concrete," *Composite Structures*, vol. 96, pp. 396-404, 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2012.09.019.
 10. [10] ASTM International, *ASTM C494/C494M-19: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, ASTM C494, Jan. 2005, pp. 1-10.
 11. [11] S. Kuswiantoro, M. Mahardana, R. Mumayyizah, A. Iskindaria, R. S. Nurhuda, F. Mufaidah, and M. R. Aldiansyah, "Optimalisasi Penggunaan Superplasticizer Masterglenium Ace 8595 Dalam Implementasi Pekerjaan Beton," *Jurnal Rab Construction Research*, vol. 4, no. 1, pp. 47-58, 2024.
 12. [12] Badan Standar Nasional Indonesia, *SNI 03-6821-2002: Spesifikasi Agregat Ringan Batu Cetak Beton Pasangan Dinding*, Jakarta, 2002.
 13. [13] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-0691-1996: Bata Beton (Paving Block)*, Jakarta.
 14. [14] W. A. Krasna, R. Noor, and D. D. Ramadani, "Utilization of Plastic Waste Polyethylene Terephthalate (PET) as a Coarse Aggregate Alternative in Paving Block," *MATEC Web of Conferences*, vol. 280, p. 04007, 2019.
 15. [15] S. Agyeman, N. K. Obeng-Ahenkora, S. Assiamah, and G. Twumasi, "Exploiting Recycled Plastic Waste as an Alternative Binder for Paving Blocks Production," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 11, p. e00246, 2019, doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00246.
 16. [16] M. F. Tengku and J. Tarigan, "Penggunaan Crum Rubber Pada Pembuatan Paving Blok," *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 2, no. 3, pp. 523-533, 2021, doi: 10.46799/jsa.v2i3.192.
 17. [17] ACI Committee 544, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete," *ACI 544.2R-89*, Reapproved 1999, pp. 1-12.