

SKRIPSI

KUAT LENTUR BALOK BETON DENGAN LIMBAH PLASTIK *HIGH DENSITY POLYETHYLENE* (HDPE) SEBAGAI SUBSTITUSI AGREGAT HALUS

Disusun dan diajukan oleh:

**MUHAMMAD RAIHAN ATSIL SUDARMAN
D051201011**



**PROGRAM STUDI SARJANA ARSITEKTUR
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**“Kuat Lentur Balok Beton Dengan Limbah Plastik High Density Polyethylene (HDPE)
Sebagai Substitusi Agregat Halus”**

Disusun dan diajukan oleh

Muhammad Raihan Atsil Sudarman
D051201011

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi
Program Sarjana Program Studi Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
pada tanggal 09 September 2024

UNIVERSITAS HASANUDDIN
Menyetujui

Pembimbing I



Dr. Eng. Ir. Nasruddin, ST. MT.
NIP. 19710316 199702 1 001

Pembimbing II



Dr. Ir. Hartawan, MT.
NIP. 19641231 199103 1 034

Mengetahui



Dr. Ir. H. Edward Syarif, ST.,MT.
NIP. 19690612 199802 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Muhammad Raihan Atsil Sudarman

NIM : D051201011

Program Studi : Teknik Arsitektur

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Kuat Lentur Balok Beton dengan Limbah Plastik *High Density Polyethylene* (HDPE) sebagai Substitusi Agregat Halus}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar merupakan hasil karya saya sendiri.

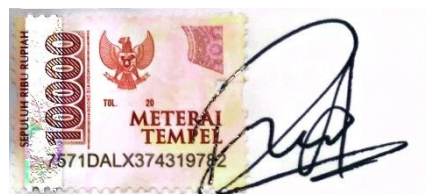
Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitnya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggung jawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 24 September 2024

Yang Menyatakan



Muhammad Raihan Atsil Sudarman

ABSTRAK

MUHAMMAD RAIHAN ATSIL SUDARMAN. *Kuat Lentur Balok Beton dengan Limbah Plastik High Density Polyethylene (HDPE) sebagai Substitusi Agregat Halus* (dibimbing oleh Nasruddin dan Hartawan)

Penggunaan plastik pada beton merupakan solusi optimal untuk mencapai kelestarian lingkungan. Sebanyak 18.13% sampah di Indonesia terdiri dari sampah plastik dengan jenis plastik yang paling banyak diproduksi adalah jenis HDPE, sebesar 46% dari total produksi plastik. Plastik HDPE memiliki sifat yang padat dan daya tarik yang besar. Berdasarkan sifat tersebut, plastik HDPE berpotensi untuk dimanfaatkan pada balok beton sebagai substitusi pasir agar ditemukan kuat lentur balok yang lebih besar dalam menahan tegangan tekan dan tarik. Tujuan penelitian ini yaitu menemukan nilai kuat lentur dan nilai optimum kuat lentur, serta karakter pola keruntuhan balok beton limbah plastik HDPE sebagai substitusi dari berat agregat halus. Metode penelitian ini adalah eksperimental dengan kuat lentur balok beton berukuran penampang 15 cm x 15 cm dan panjang 65 cm. Sebanyak 24 balok yang disubstitusi plastik jenis HDPE berbentuk butiran halus pada variasi 0,00% (normal), 0,50%, 0,70%, dan 0,90% dari berat agregat halus dengan umur benda uji 14 dan 28 hari. Hasil Penelitian menunjukkan balok beton limbah plastik HDPE variasi 0,00%, 0,50%, 0,70%, dan 0,90% memiliki nilai kuat lentur berturut-turut sebesar 3,16 MPa, 3,35 MPa, 2,91 MPa, dan 2,97 MPa pada umur 14 hari serta 3,39 MPa, 3,95 MPa, 3,06 MPa dan 3,07 MPa pada umur 28 hari. Adapun nilai optimum kuat lentur balok beton limbah plastik HDPE diprediksi berada pada variasi 0,25% dengan nilai kuat lentur sebesar 4,77 MPa. Selain itu, Balok beton limbah plastik HDPE variasi 0,00%, 0,50%, 0,70%, dan 0,90% memiliki jenis pola keruntuhan lentur.

Kata kunci: Kuat Lentur, Plastik HDPE, Substitusi Agregat Halus

ABSTRACT

MUHAMMAD RAIHAN ATSIL SUDARMAN. *Flexural Strength of Concrete Beam Using High Density Polyethylene (HDPE) Plastic Waste as a Substitute for Fine Aggregate* (supervised by Nasruddin and Hartawan)

Plastic in concrete is an optimal solution to achieving environmental sustainability. As much as 18.13% of waste in Indonesia consists of plastic waste with the most widely produced type of plastic being HDPE at 46% of total plastic production. HDPE plastic has solid properties and great tensile strength. Based on these properties, HDPE plastic has the potential to be used in concrete beams as a sand substitute in order to find greater flexural strength in resisting compressive and tensile stress. This research objective is to find the value of flexural strength and the optimum value of flexural strength, and character of the failure pattern of HDPE plastic waste concrete beams as a substitute for fine aggregate weight. This research method is experimental on the flexural strength of concrete beams measuring 15 cm x 15 cm in cross section and 65 cm in length. as many as 24 test specimens substituted HDPE plastic with fine granular forms in variations of 0.00% (normal), 0.50%, 0.70%, and 0.90% of the weight of fine aggregate with the test specimen age of 14 and 28 days. The results showed that HDPE plastic waste concrete beams with variations of 0.00%, 0.50%, 0.70%, and 0.90% had flexural strength values of 3.16 MPa, 3.35 MPa, 2.91 MPa, and 2.97 MPa at the age of 14 days and 3.39 MPa, 3.95 MPa, 3.06 MPa, and 3.07 MPa at the age of 28 days, respectively. The optimum value of the flexural strength of HDPE plastic waste concrete beams is predicted to be at variation 0.25% with flexural strength value of 4.77 MPa. In addition, HDPE plastic waste concrete beams with variations of 0.00%, 0.50%, 0.70%, and 0.90% have a type of flexural failure pattern.

Keywords: Flexural Strength, HDPE Plastic, Fine Aggregate Substitution

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
KATA PENGANTAR.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Sasaran Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Batasan Masalah.....	4
1.7 Sistematika Penulisan.....	5
1.8 Keaslian Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Beton.....	8
2.2 Penyusun Beton.....	15
2.3 Plastik HDPE.....	24
2.4 Kuat Lentur.....	26
2.5 Nilai Optimum.....	27
2.6 Pola Keruntuhan.....	30
2.7 Penelitian Terkait.....	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1 Metode Penelitian.....	35
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian.....	35
3.3 Variabel Penelitian.....	35
3.4 Alat Ukur Kuat Lentur.....	36
3.5 Sumber Data.....	37
3.6 Teknik Pengumpulan Data.....	37
3.7 Teknik Pengolahan Data.....	38
3.8 Persiapan Bahan dan Alat Penelitian.....	38
3.9 Tahapan dan Prosedur Penelitian.....	40
3.10 Kerangka Penelitian.....	75
3.11 Alur Pikir Penelitian.....	76
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	77
4.1 Pemeriksaan Karakteristik Bahan.....	77
4.2 Koreksi Mix Design.....	89
4.3 Pengolahan Plastik HDPE.....	90
4.4 Pembuatan Benda Uji.....	100
4.5 Pengujian Kuat Lentur.....	106
4.6 Nilai Optimum Kuat Lentur Balok.....	117

4.7 Pola Retak Balok.....	119
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	127
5.1 Kesimpulan	127
5.2 Saran	127
DAFTAR PUSTAKA	128

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Penampang beton	8
Gambar 2. Persentase volume komposisi beton pada umumnya,	9
Gambar 3. Pengaruh faktor air-semen terhadap kuat tekan beton,	12
Gambar 4. Pengaruh jumlah semen terhadap kuat tekan beton faktor air-semen sama.....	13
Gambar 5. Proses pembuatan semen Portland	16
Gambar 6. Nilai maksimum dan minimum pada sebuah fungsi	30
Gambar 7. Keruntuhan lentur.....	31
Gambar 8. keruntuhan tarik diagonal.....	31
Gambar 9. Keruntuhan tekan geser.....	31
Gambar 10. Alat <i>hydraulic concrete beam testing</i> dua titik pembebanan	37
Gambar 11. Skema tahapan dan prosedur penelitian	40
Gambar 12. Desain cetakan benda uji, (a) tampak 3D, (b) tampak atas, (c) tampak samping dan (d) tampak depan	41
Gambar 13. Skema pengolahan limbah plastik HDPE	42
Gambar 14. Hubungan antara kuat tekan dan faktor air semen (benda uji berbentuk silinder diameter 150 mm, tinggi 300 mm).....	56
Gambar 15. Persen pasir terhadap kadar total agregat yang dianjurkan untuk ukuran butir maksimum 20 mm	60
Gambar 16. Perkiraan berat isi beton basah yang telah selesai dipadatkan	61
Gambar 17. Skema tahap substitusi limbah plastik HDPE	64
Gambar 18. Skema pembuatan benda uji balok beton normal.....	65
Gambar 19. Skema pembuatan benda uji balok beton plastik HDPE variasi 0,50%	66
Gambar 20. Skema pembuatan benda uji balok beton plastik HDPE variasi 0,70%	67
Gambar 21. Skema pembuatan benda uji balok beton plastik HDPE variasi 0,90%	67
Gambar 22. Ilustrasi garis grid.....	70
Gambar 23. Alur pikir penelitian	76
Gambar 24. Hasil pemeriksaan kadar organik pasir	79
Gambar 25. Grafik pemeriksaan gradasi pasir	81
Gambar 26. Grafik pemeriksaan gradasi kerikil	85
Gambar 27. Grafik pemeriksaan gradasi plastik HDPE.....	86
Gambar 28. Semen yang digunakan pada pencampuran	87
Gambar 29. Air yang digunakan pada pencampuran.....	87
Gambar 30. Pengumpulan plastik HDPE di Bank Sampah, Kota Makassar	91
Gambar 31. (a) Plastik HDPE dibersihkan dan (b) plastik HDPE dijemur hingga kering	91
Gambar 32. (a) Pembakaran limbah plastik HDPE dan (b) Bongkahan plastik HDPE	92
Gambar 33. (a) Pencacahan plastik HDPE dan (b) Plastik HDPE yang sudah diolah.....	92
Gambar 34. (a) Plastik disubstitusi ke dalam pasir dan (b) Pengadukan dengan <i>hand mixer</i>	93

Gambar 35. Grafik pemeriksaan gradasi pasir substitusi plastik HDPE variasi 0,50%	94
Gambar 36. Grafik pemeriksaan gradasi pasir substitusi plastik HDPE variasi 0,70%	96
Gambar 37. Grafik pemeriksaan gradasi pasir substitusi plastik HDPE variasi 0,90%	98
Gambar 38. Grafik rekapitulasi hasil pemeriksaan berat isi pasir normal dan pasir substitusi plastik	99
Gambar 39. Grafik rekapitulasi hasil perhitungan modulus kehalusan pasir normal dan pasir substitusi plastik	100
Gambar 40. (a) Pembuatan cetakan balok dan (b) cetakan balok yang sudah dibuat	101
Gambar 41. Persiapan material campuran, (a) pengayakan pasir dan (b) pengayakan kerikil	101
Gambar 42. (a) Pencampuran benda uji menggunakan molen dan (b) beton segar yang sudah jadi	102
Gambar 43. (a) Tahap pengujian slump dan (b) pengukuran slump	103
Gambar 44. Grafik pengujian nilai rata-rata slump	104
Gambar 45. Pencetakan benda uji, (a) perojokan benda uji dan (b) benda uji yang sudah dicetak	105
Gambar 46. Perawatan wet curing, (a) balok ditutup dengan plastik dan kain basah dan (b) balok direndam di dalam air, Sumber: penulis	106
Gambar 47. (a) pengukuran dimensi ukuran balok dan (b) penimbangan berat balok	106
Gambar 48. Penggambaran pola garis grid balok	107
Gambar 49. Pengujian kuat lentur balok	107
Gambar 50. Grafik berat jenis balok umur 14 hari	110
Gambar 51. Grafik hasil pengujian kuat lentur balok umur 14 hari	111
Gambar 52. Grafik berat jenis balok umur 28 hari	113
Gambar 53. Grafik hasil pengujian kuat lentur balok umur 28 hari	115
Gambar 54. Grafik rekapitulasi hasil pengujian kuat lentur balok plastik HDPE	116
Gambar 55. Hasil perhitungan analisis regresi polinom	117
Gambar 56. Nilai optimum kuat lentur menggunakan Geogebra	118
Gambar 57. Keterangan tampak sisi balok	119

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Keaslian judul penelitian.....	7
Tabel 2. Kelas dan mutu beton.....	10
Tabel 3. Beberapa jenis beton menurut kuat tekannya	11
Tabel 4. Rasio kuat tekan beton pada berbagai umur	12
Tabel 5. Jenis beton menurut berat jenisnya	14
Tabel 6. 27 produk semen pada umumnya.....	15
Tabel 7. Batas komposisi biasa pada semen portland	18
Tabel 8. Senyawa utama semen portland.....	18
Tabel 9. Batas-batas gradasi agregat kasar	20
Tabel 10. Batas-batas gradasi agregat halus	21
Tabel 11. Persyaratan kinerja beton untuk mencampur air	23
Tabel 12. Batas kimia opsional untuk air pencampur gabungan ^A	23
Tabel 13. Jenis plastik.....	24
Tabel 14. Karakteristik serat HDPE.....	25
Tabel 15. Penelitian terkait	32
Tabel 16. Perhitungan kebutuhan material pembuatan cetakan tiap benda uji	41
Tabel 17. Jumlah sampel benda uji.....	43
Tabel 18. Standar warna pada pemeriksaan kadar organik agregat halus.....	47
Tabel 19. Rekapitulasi pemeriksaan bahan.....	53
Tabel 20. Nilai deviasi standar untuk berbagai tingkat pengendalian mutu pekerjaan.....	54
Tabel 21. Perkiraan kuat tekan (MPa) beton dengan faktor air semen dan agregat kasar yang biasa dipakai di Indonesia	55
Tabel 22. Nilai slump beton segar.....	57
Tabel 23. Perkiraan kadar air bebas (Kg/m ³) yang dibutuhkan untuk beberapa tingkat kemudahan pengerjaan adukan beton.....	58
Tabel 24. Persyaratan jumlah semen minimum dan faktor air semen maksimum untuk berbagai macam pembetonan dalam lingkungan khusus	59
Tabel 25. Perbandingan proporsional campuran beton.....	62
Tabel 26. Kebutuhan pasir dan plastik HDPE pada tahap substitusi	63
Tabel 27. Formulir pengujian kuat lentur	71
Tabel 28. Kerangka penelitian	75
Tabel 29. Hasil Pemeriksaan berat isi pasir	77
Tabel 30. Hasil pemeriksaan kadar air pasir	78
Tabel 31. Hasil pemeriksaan kadar lumpur pasir.....	78
Tabel 32. Hasil pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air pasir	80
Tabel 33. Hasil pemeriksaan gradasi pasir.....	80
Tabel 34. Hasil pemeriksaan berat isi kerikil.....	82
Tabel 35. Hasil pemeriksaan kadar air kerikil	83
Tabel 36. Hasil pemeriksaan kadar lumpur kerikil	83
Tabel 37. Hasil pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air kerikil.....	84
Tabel 38. Hasil pemeriksaan gradasi kerikil	84
Tabel 39. Hasil pemeriksaan gradasi plastik HDPE	86
Tabel 40. Rekapitulasi hasil Pemeriksaan bahan	88
Tabel 41. Rekapitulasi perhitungan koreksi mix design	90

Tabel 42. Koreksi kebutuhan pasir dan plastik HDPE pada tahap substitusi	90
Tabel 43. Hasil pemeriksaan berat isi pasir substitusi plastik HDPE variasi 0,50%	93
Tabel 44. Hasil pemeriksaan gradasi pasir substitusi plastik HDPE variasi 0,50%	94
Tabel 45. Hasil pemeriksaan berat isi pasir substitusi plastik HDPE variasi 0,70%	95
Tabel 46. Hasil pemeriksaan gradasi pasir substitusi plastik HDPE variasi 0,70%	95
Tabel 47. Hasil pemeriksaan berat isi pasir substitusi plastik HDPE variasi 0,90%	97
Tabel 48. Hasil pemeriksaan gradasi pasir substitusi plastik HDPE variasi 0,90%	97
Tabel 49. Rekapitulasi hasil Pemeriksaan pasir substitusi plastik HDPE.....	99
Tabel 50. Hasil pengujian slump.....	103
Tabel 51. Hasil pengukuran dimensi benda uji variasi umur 14 hari.....	108
Tabel 52. Hasil pengukuran berat dan perhitungan berat jenis balok variasi umur 14 hari.....	109
Tabel 53. Hasil Pengujian kuat lentur balok variasi umur 14 hari.....	110
Tabel 54. Hasil pengukuran dimensi benda uji variasi umur 28 hari.....	112
Tabel 55. Hasil pengukuran berat dan perhitungan berat jenis balok variasi umur 28 hari.....	112
Tabel 56. Hasil Pengujian kuat lentur balok variasi umur 28 hari.....	114
Tabel 57. Rekapitulasi hasil pengujian kuat lentur balok plastik HDPE	115
Tabel 58. Hasil identifikasi pola keruntuhan balok umur 14 hari.....	119
Tabel 59. Hasil identifikasi pola keruntuhan balok umur 28 hari.....	122

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Pemeriksaan berat isi dan rongga udara agregat	132
Lampiran 2	Pemeriksaan kadar air agregat	135
Lampiran 3	Pemeriksaan kadar lumpur agregat.....	136
Lampiran 4	Pemeriksaan kadar organik agregat halus	137
Lampiran 5	Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air agregat	138
Lampiran 6	Pemeriksaan gradasi dan modulus kehalusan agregat	139
Lampiran 7	Perhitungan koreksi mix design	142
Lampiran 8	Pengujian kuat lentur balok	152
Lampiran 9	Pengujian Kuat Tekan Beton.....	154
Lampiran 10	Perhitungan nilai optimum kuat lentur	156
Lampiran 11	Dokumentasi kegiatan	160

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. karena dengan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Kuat Lentur Balok Beton dengan Limbah Plastik *High Density Polyethylene* (HDPE) sebagai Substitusi Agregat Halus”.

Skripsi ini disusun dan diajukan sebagai tugas akhir untuk memenuhi syarat dalam menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) Sarjana Arsitektur di Departemen Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Banyak hikmah dan pengalaman berharga yang dapat menjadi pelajaran bagi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ayahanda **Sudarman** dan ibunda **Rosnaeni**, sebagai orang tua penulis yang selalu memberikan doa, dukungan, dan kasih sayang yang tak terhingga. Penulis menyadari dengan bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dimulai dari masa awal perkuliahan hingga pada akhir penyusunan skripsi ini, penulis dapat menyelesaikan studi ini dengan baik dan lancar. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, dengan segala kerendahan hati penulis menyampaikan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., selaku rektor Universitas Hasanuddin Makassar.
2. Bapak Prof. Dr. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin beserta staf yang telah membantu penulis dalam berbagai urusan akademik maupun administrasi fakultas.
3. Bapak Dr. Ir. H. Edward Syarif, ST., MT., selaku Ketua Departemen Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin beserta staf yang telah membantu dan mengarahkan penulis dalam berbagai hal dalam urusan akademik maupun administrasi departemen.
4. Bapak Dr. Eng. Ir. Nasruddin Junus, ST., MT., selaku Pembimbing I penulis yang senantiasa membantu dan memberikan arahan selama masa studi penulis hingga penyusunan skripsi.
5. Bapak Dr. Ir. Hartawan, MT., selaku Pembimbing II penulis yang senantiasa membantu dan memberikan arahan selama masa studi penulis hingga penyusunan skripsi.
6. Dosen Penguji, Ibu Dr. Ir. Imriyanti, ST., MT. dan Bapak Andi Lolo Sinrang Arisaputra, ST., M.Eng., Ph.D, yang telah meluangkan waktunya sejak seminar proposal hingga sidang skripsi untuk memberikan saran dan masukan dalam proses penulisan skripsi penulis.
7. Ibu Pratiwi Mushar ST., MT., selaku dosen Laboratorium Bahan, Struktur dan Konstruksi Bangunan serta seluruh Bapak dan Ibu Dosen Departemen Arsitektur yang telah mendidik dan memberikan ilmunya kepada penulis selama proses perkuliahan.

8. Kakanda Muhammad Nurhalim Arsyad, selaku laboran di Laboratorium Bahan, Struktur dan Konstruksi Bangunan yang telah membantu penulis selama penelitian di laboratorium berlangsung.
9. Teman perkuliahan, Muhammad Firas, Rayhan Daiva, Vito Vataria, Haniel Yerikho dan seluruh teman-teman Parametrik, Arsitektur Angkatan 2020 serta seluruh mahasiswa Arsitektur Universitas Hasanuddin yang senantiasa memberikan bantuan, semangat dan dukungan selama perkuliahan hingga selesainya penulisan skripsi.
10. Teman-teman perjuangan KKNT Infrastruktur PUPR Maros Desa Bonto Mate'ne, Kec. Marusu yang senantiasa memberi semangat dan dukungan dalam proses pengabdian masyarakat.
11. Keluarga penulis khususnya Ibunda dan Ayahanda serta saudara-saudara yang telah memberikan doa, dukungan dan nasehat selama masa perkuliahan hingga selesainya penulisan skripsi.
12. Seluruh teman-teman alumni Man 2 Kota Makassar angkatan 2020, khususnya kelas Mipa 1 yang telah memberikan bantuan, dukungan dan nasehat kepada penulis selama masa perkuliahan.
13. PT Bank Rakyat Indonesia dan Pengurus Pensiunan Bank Rakyat Indonesia yang telah memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis selama masa perkuliahan.

Penulis menyadari penyusunan skripsi ini jauh dari kata sempurna karena keterbatasan kemampuan dan ilmu pengetahuan yang dimiliki oleh penulis. Oleh karena itu atas kesalahan dan kekurangan dalam penulisan skripsi ini, penulis memohon maaf dan bersedia menerima kritikan dan saran yang membangun. Akhir kata, penulis berharap Allah SWT. berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengelolaan limbah konstruksi merupakan bagian dari kontribusi industri konstruksi terhadap pembangunan berkelanjutan (K. Yahya dan A. H. Boussabaine, 2004). Sehingga tren perkembangan industri konstruksi saat ini mulai beralih pada konsep pembangunan berkelanjutan yang lebih memperhatikan faktor-faktor efisiensi energi, penggunaan bahan ramah lingkungan, dan pengelolaan limbah. Salah satu langkah yang ditemukan untuk mencapai konsep pembangunan berkelanjutan adalah dengan menghasilkan beton yang memanfaatkan pengelolaan berbagai jenis limbah, di antaranya yaitu limbah plastik. Sifat plastik yang serbaguna (ringan, fleksibel, kuat, tahan lembab, dan murah) dapat menjadikannya pengganti atau alternatif dari banyak material komposit yang ada seperti beton (Babafemi, Adewumi John dkk., 2018). Menurut Abdulaziz I. Almohana dkk. (2022), penggunaan plastik pada beton merupakan solusi optimal untuk mencapai kelestarian lingkungan.

Menurut data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), timbulan sampah di Indonesia mencapai angka 36 juta ton/tahun pada tahun 2022 dan sebanyak 18.13% sampah terdiri dari sampah plastik. Data Kementerian Perindustrian menunjukkan bahwa jenis plastik yang paling banyak diproduksi di Indonesia adalah plastik jenis *High Density Polyethylene* untuk selanjutnya disebut HDPE, yaitu sebesar 46% dari total produksi plastik (United States Agency for International Development, 2022). Plastik jenis HDPE merupakan plastik daur ulang yang memiliki sifat fisik kepadatan yang baik, daya tarik yang besar, tahan panas, dan sedikit buram dan transparan. Sifat plastik HDPE yang tergolong kuat mendorong banyak peneliti untuk mengembangkan inovasi baru, salah satunya dengan mencampur limbah plastik dengan material yang lebih kuat untuk kebutuhan inovasi material pembangunan konstruksi berkelanjutan.

Menurut Ida N. Saputro (2010), hampir 60% material yang digunakan dalam pekerjaan konstruksi adalah beton, yang pada umumnya dipadukan dengan baja atau

jenis lainnya. Beton merupakan bahan konstruksi yang dibuat dari air, semen Portland, agregat halus dan agregat kasar, yang mempunyai sifat tahan api, mudah diperoleh, dan kuat tekan yang tinggi. Akan tetapi menurut Kardiyono Tjokrodimuljo (2007), beton memiliki sifat getas, sehingga mempunyai kuat tekan tinggi namun kuat tariknya rendah. Gaya tekan dan gaya tarik akibat tegangan-tegangan yang terjadi pada beton mempengaruhi kemampuan kuat lentur beton.

Kemampuan kuat lentur beton dipengaruhi dari kekuatannya menahan tegangan tekan dan tarik, sehingga untuk mendapatkan perkuatan lentur yang lebih besar diperlukan alternatif pada beton yang bersifat kuat dan elastis. Limbah HDPE dapat dijadikan sebagai material alternatif pada beton karena memiliki sifat padat dan daya tarik yang baik. Oleh karena itu, dalam penelitian ini mencoba untuk menemukan inovasi material konstruksi ramah lingkungan dengan memanfaatkan substitusi limbah plastik jenis HDPE agar ditemukan kuat lentur balok beton yang lebih besar dalam menahan tegangan tekan dan tarik, dan diharapkan limbah plastik di Indonesia bisa diolah menjadi alternatif material yang lebih ramah terhadap lingkungan.

Dantje A. T. Sina, dkk. (2012) melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan cacahan limbah plastik jenis *High Density Polyethylene* (HDPE) pada kuat lentur beton dan didapatkan kesimpulan bahwa kuat lentur beton dengan variasi substitusi limbah kantong plastik HDPE 0.0% (normal), 0.50%, 0.70% dan 0.90% berturut-turut sebesar 4.12 Mpa, 4.30 Mpa, 4.21 Mpa dan 3.64 Mpa, serta penggunaan limbah botol plastik jenis HDPE pada beton dengan persentase cacahan 0,50% dari berat semen mampu mengurangi pencemaran sampah plastik selama ini.

Fitri Junarti (2023) melakukan penelitian tentang pengaruh substitusi limbah kantong plastik (*HDPE*) terhadap kuat tekan beton dengan metode *dry curing* dan didapatkan kesimpulan bahwa kuat tekan beton pada umur 28 hari dengan variasi substitusi limbah kantong plastik HDPE 0.0% (normal), 0.50%, 0.70% dan 0.90% berturut-turut sebesar 15.12 Mpa, 17.92 Mpa, 15.55 Mpa dan 15.69 Mpa, sedangkan nilai optimum yang dicapai untuk substitusi limbah kantong plastik HDPE pada campuran beton yaitu 0.66% dengan nilai 19.71 Mpa. Penelitian ini

memberikan saran untuk dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai substitusi limbah kantong plastik HDPE.

Berdasarkan hal di atas, terbuka kesempatan untuk melakukan penelitian tentang pengaruh kuat lentur balok beton dengan limbah plastik HDPE sebagai substitusi agregat halus. Penelitian ini melanjutkan penelitian terdahulu tentang kuat tekan beton dengan limbah kantong plastik HDPE dengan mengambil variasi yang sama yaitu 0,00%, 0,50%, 0,70% dan 0,90% sebagai substitusi dari berat agregat halus. Limbah plastik HDPE ini diaplikasikan pada balok beton dan diharapkan dapat ditemukan beton yang lebih baik dari segi kuat lentur dan pemanfaatan limbah plastik dibandingkan dengan beton normal.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dibahas di atas maka dapat disimpulkan rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Berapakah nilai kuat lentur balok beton limbah plastik jenis HDPE variasi 0,00%, 0,50%, 0,70%, dan 0,90% sebagai substitusi dari berat agregat halus pada umur beton 14 dan 28 hari?
2. Berapakah nilai optimum kuat lentur balok beton limbah plastik jenis HDPE variasi 0,00%, 0,50%, 0,70%, dan 0,90% sebagai substitusi dari berat agregat halus?
3. Bagaimana karakter pola keruntuhan balok beton limbah plastik jenis HDPE variasi 0,00%, 0,50%, 0,70%, dan 0,90% sebagai substitusi dari berat agregat halus pada umur beton 14 dan 28 hari?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah:

1. Menemukan nilai kuat lentur balok beton limbah plastik jenis HDPE variasi 0,00%, 0,50%, 0,70%, dan 0,90% sebagai substitusi dari berat agregat halus pada umur beton 14 dan 28 hari.
2. Menemukan nilai optimum kuat lentur balok beton limbah plastik jenis HDPE variasi 0,00%, 0,50%, 0,70%, dan 0,90% sebagai substitusi dari berat agregat halus.

3. Menunjukkan karakter pola keruntuhan balok beton limbah plastik jenis HDPE variasi 0,00%, 0,50%, 0,70%, dan 0,90% sebagai substitusi dari berat agregat halus pada umur beton 14 dan 28 hari.

1.4 Sasaran Penelitian

Adapun yang menjadi sasaran dalam penelitian ini adalah:

1. Kajian tentang kuat lentur balok beton normal dan balok beton limbah plastik jenis HDPE variasi 0,00%, 0,50%, 0,70%, dan 0,90% sebagai substitusi dari berat agregat halus pada umur beton 14 dan 28 hari.
2. Kajian tentang nilai optimum pada kuat lentur balok beton normal dan balok beton limbah plastik.
3. Kajian tentang karakter pola keruntuhan beton normal dan beton limbah plastik jenis HDPE.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah:

1. Memberikan hasil tentang kuat lentur balok beton dan nilai optimalnya serta karakter pola keruntuhan dengan limbah plastik HDPE sebagai substitusi agregat halus yang dibandingkan dengan beton normal.
2. Dapat dijadikan bahan referensi untuk penelitian selanjutnya mengenai kuat lentur beton yang lebih efisien dan ramah lingkungan.
3. Dapat menanggulangi jumlah limbah plastik jenis HDPE dan dimanfaatkan menjadi material beton yang ramah terhadap lingkungan.

1.6 Batasan Masalah

Beberapa lingkup masalah yang dibatasi untuk mencapai maksud dan tujuan penelitian yaitu:

1. Pelaksanaan penelitian dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi dan Struktur Bangunan Departemen Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
2. Material penyusun beton pada penelitian ini sebagai berikut:
 - a. Semen portland komposit (PCC).

- b. Agregat kasar berupa kerikil batu pecah yang berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi dan Struktur Bangunan Departemen Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
 - c. Agregat halus berupa pasir dari daerah Gowa, Sulawesi Selatan.
 - d. Air yang digunakan yaitu air di Laboratorium Bahan Konstruksi dan Struktur Bangunan Departemen Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
3. Plastik HDPE yang digunakan pada penelitian berupa lembaran plastik yang dikumpulkan di Kota Makassar.
 4. Substitusi limbah plastik HDPE sebesar 0.50%, 0.70% dan 0.90% dari berat agregat halus. Beton plastik HDPE variasi 0.00% (normal) digunakan sebagai pembanding dari beton plastik HDPE.
 5. Perencanaan proporsi beton mengikuti pedoman SNI 03-2834-2000 tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. Kuat tekan beton normal yang direncanakan adalah 25 MPa.
 6. Benda uji berbentuk balok dengan penampang persegi berukuran 15 cm x 15 cm dan panjang 65 cm dengan jumlah 24 buah. Adapun cetakan benda uji dibuat dari multiplek dengan ketebalan 12 mm.
 7. Peralatan yang digunakan untuk menguji kuat lentur beton adalah alat *hydraulic concrete beam testing* dengan pembebanan dua titik.
 8. Pengujian kuat lentur balok beton dilakukan pada umur 14 dan 28 hari.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yaitu dengan membagi dalam 5 bab dan sub bab agar penelitian ini lebih jelas dan mudah dimengerti. bab tersebut adalah:

BAB I PENDAHULUAN

Bab pendahuluan membahas mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, sistematika penulisan dan keaslian judul penelitian yang akan dilakukan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab tinjauan pustaka menguraikan kajian literatur yang menjelaskan teori-teori dasar tentang karakteristik dan material beton normal dan penyusun beton normal,

plastik HDPE, kuat lentur beton, nilai optimum, pola keruntuhan beton dan penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan untuk acuan penelitian ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab metodologi penelitian berisikan tentang metode penelitian, variabel penelitian, desain pembuatan benda uji, waktu dan tempat penelitian, persiapan alat dan bahan penelitian, tahapan dan prosedur pada penelitian ini.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab hasil dan pembahasan menyajikan hasil analisis perhitungan data-data dan pembahasan yang diperoleh dari hasil penelitian.

BAB V PENUTUP

Bab penutup berisikan kesimpulan dari hasil analisis penelitian dan disertai dengan saran-saran yang diusulkan.

1.8 Keaslian Penelitian

Tabel 1. Keaslian judul penelitian

Peneliti	Tahun	Judul Penelitian	Variabel Penelitian	Variasi	Umur Uji
Venu Malagavelli dan Neelakanteswara R. Paturu	2010	Perilaku beton bertulang serat HDPE.	Kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat lentur	Limbah plastik jenis HDPE sebesar 0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 2,5%, 3%, 3,5%, 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, dan 6% dari volume beton.	7, 14 dan 28 hari.
Dantje A. T. Sina, dkk.	2012	Pengaruh penambahan cacahan limbah plastik jenis <i>High Density Polyethylene</i> (HDPE) pada kuat lentur beton	Kuat lentur.	Limbah plastik jenis HDPE berbentuk serat sebesar 0%, 0,50%, 0,70% dan 0,90% dari berat semen.	7 dan 28 hari.
Erwin Rommel, dkk.	2014	Pengaruh penggunaan serat <i>High Density Polyethylene</i> (HDPE) pada campuran beton terhadap kuat tarik beton	Kuat tarik.	Limbah plastik jenis HDPE berbentuk serat 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% dan 10% dari volume campuran.	28 hari.
Fitri Junarti	2023	Pengaruh substitusi limbah kantong plastik (<i>HDPE</i>) terhadap kuat tekan beton dengan metode <i>dry curing</i> .	Kuat tekan.	Limbah plastik jenis HDPE substitusi agregat halus sebesar 0%, 0,50%, 0,70% dan 0,90%.	7, 14 dan 28 hari.
Muhammad Raihan Atsil Sudarman	2024	Kuat lentur balok beton dengan limbah plastik <i>High Density Polyethylene</i> (HDPE) sebagai substitusi agregat halus	Kuat lentur.	Limbah plastik jenis HDPE substitusi agregat halus sebesar 0%, 0,50%, 0,70% dan 0,90%.	14 dan 28 hari.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton adalah material komposit, oleh karena itu kualitas beton sangat tergantung dari kualitas masing-masing material pembentuknya (Kardiyono Tjokrodinuljo, 2007). Beton adalah campuran antara semen portland atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan membentuk masa padat (SNI 03-2834-2000). Jika beton dilihat secara melintang pada gambar 1, maka akan tampak beberapa material pembentuk beton yang mengeras dan padat

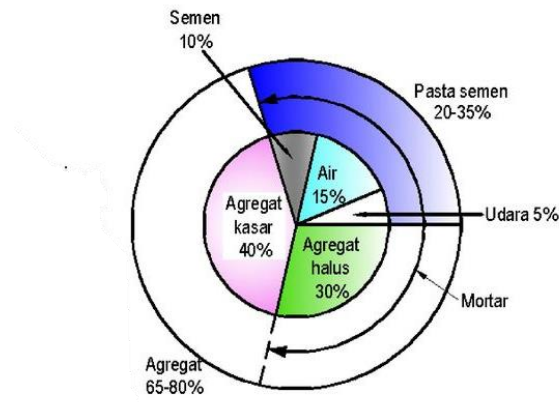
Air dan semen Portland membentuk pasta yang disebut pasta semen (Kardiyono Tjokrodinuljo, 2007). Pasta semen ini mengisi pori-pori di antara butiran-butiran agregat halus maupun agregat kasar. Pasta semen ini oleh peristiwa kimia (reaksi air dan semen) akan mengeras, dan menjadi perekat antar butiran-butiran agregat, sehingga butiran-butiran agregat saling terekat dengan kuat dan terbentuklah suatu massa yang kompak/padat. Pengerasan itu berjalan dalam waktu yang panjang dan akibatnya campuran bertambah keras setara dengan umurnya.



Gambar 1. Penampang beton, Sumber: Kardiyono Tjokrodinuljo (2007)

Menurut Paul Nugraha dan Antoni (2004), pada beton yang baik setiap butir agregat seluruhnya terbungkus mortar. Demikian pula halnya dengan ruang antar agregat, harus terisi oleh mortar. Sehingga kualitas pasta atau mortar menentukan kualitas beton. Sifat masing-masing bahan juga berbeda dalam hal perilaku beton

segar maupun pada saat sudah mengeras, selain faktor biaya yang perlu diperhatikan. Di lain pihak, secara volumetris beton diisi oleh agregat sebanyak 61-76% (gambar 2). Dengan demikian, agregat juga mempunyai peran yang sama pentingnya sebagai material pengisi beton.



Gambar 2. Persentase volume komposisi beton pada umumnya,
Sumber: Paul Nugraha dan Antoni (2004)

2.1.1 Macam-macam beton

Menurut Peraturan Beton Bertulang Indonesia (1971), berdasarkan mutu dan kelas, beton dibagi menjadi 3 kelas yaitu:

1. Beton kelas I (B_0) adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan non-struktural. Pelaksanaannya tidak diperlukan keahlian khusus. Pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan ringan terhadap mutu bahan-bahan.
2. Beton kelas II (B_1) adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural secara umum. Pelaksanaannya memerlukan keahlian khusus yang cukup dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Kelas II dibagi dalam mutu-mutu standar: B_1 , K 125, K 175, dan K 225.
3. Beton kelas III adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural dimana dipakai mutu beton dengan kekuatan tekan karakteristik yang lebih tinggi dari 225 kg/cm^2 . Pelaksanaannya memerlukan keahlian khusus dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli.

Mutu dan kelas beton lebih lengkap dilampirkan pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Kelas dan mutu beton

Kelas	Mutu	σ'_{bk} (kg/cm ²)	σ'_{bm} dengan $S_d = 46$ (kg/cm ²)	Tujuan	Pengawasan Terhadap	
					Mutu Agregat	Kekuatan Tekan
I	B ₀	-	-	Non-Struktural	Ringan	Tanpa
II	B ₁	-	-	Struktural	Sedang	Tanpa
	K125	125	200	Struktural	Ketat	Kontinu
	K175	175	250	Struktural	Ketat	Kontinu
	K225	225	300	Struktural	Ketat	Kontinu
III	K > 225	> 225	> 300	Struktural	Ketat	Kontinu

Sumber: Peraturan Beton Bertulang Indonesia (1971)

2.1.2 Kelebihan dan kekurangan beton

Menurut Kardiyono Tjokrodinuljo (2007), beton dibandingkan dengan bahan bangunan lain mempunyai beberapa kelebihan, antara lain yaitu:

1. Harganya relatif murah karena menggunakan bahan-bahan dasar yang umumnya tersedia di lokasi daerah pembangunan, kecuali semen portland.
2. Termasuk bahan yang awet, tahan aus, tahan kebakaran, tahan terhadap pengkaratan atau pembusukan oleh kondisi lingkungan, sehingga biaya perawatan murah.
3. Kuat tekannya cukup tinggi sehingga jika dikombinasikan dengan baja tulangan (yang kuat tariknya tinggi) dapat dikatakan mampu dibuat untuk struktur berat. Beton dan baja boleh dikatakan mempunyai koefisien muai yang hampir sama.
4. Beton segar dapat dengan mudah diangkut maupun dicetak dalam bentuk dan ukuran sesuai keinginan.

Walaupun beton mempunyai kelebihan, namun beton juga mempunyai kekurangan menurut Kardiyono Tjokrodinuljo (2007) antara lain:

1. Bahan dasar penyusun beton (agregat halus maupun agregat kasar) bermacam-macam sesuai dengan lokasi pengambilannya, sehingga cara perencanaan dan cara pembuatannya bermacam-macam pula.
2. Beton keras mempunyai beberapa kelas kekuatan sehingga harus disesuaikan dengan bangunan yang dibuat, sehingga cara perencanaan dan cara pelaksanaannya bermacam-macam pula.
3. Beton mempunyai kuat tarik yang rendah, sehingga getas dan mudah retak. Oleh karena itu, perlu diberikan cara-cara mengatasinya, misalnya dengan memberikan baja tulangan, serat, dan sebagainya.

2.1.3 Sifat beton

Menurut Kardiyono Tjokrodinuljo (2007), secara umum beton adalah bahan bangunan yang dibuat dari air, semen portland, agregat halus dan agregat kasar, yang bersifat keras seperti batuan. Beberapa sifat beton antara lain:

1. Kekuatan beton

Beton bersifat getas, sehingga mempunyai kuat tekan tinggi namun kuat tariknya rendah. Beberapa kuat tekannya beton dapat dibagi menjadi beberapa jenis pada tabel 3 berikut.

Tabel 3. Beberapa jenis beton menurut kuat tekannya

Jenis Beton	Kuat Tekan (MPa)
Beton sederhana (<i>plain concrete</i>)	Sampai 10 MPa
Beton normal (beton biasa)	15 – 30 MPa
Beton pra tegang	30 – 40 MPa
Beton kuat tekan tinggi	40 – 80 MPa
Beton kuat tekan sangat tinggi	> 80 Mpa

Sumber: Kardiyono Tjokrodinuljo (2007)

Pada dasarnya kuat tekan beton menurut Kardiyono Tjokrodinuljo (2007) dipengaruhi faktor-faktor berikut, yaitu:

- a. Umur beton

Kuat tekan beton bertambah tinggi dengan bertambahnya umur sejak beton dicetak (tabel 4). Laju kenaikan kuat tekan beton mula-mula cepat,

lama-lama laju kenaikan semakin lambat, dan laju kenaikan tersebut menjadi sangat relatif sangat kecil setelah berumur 28 hari.

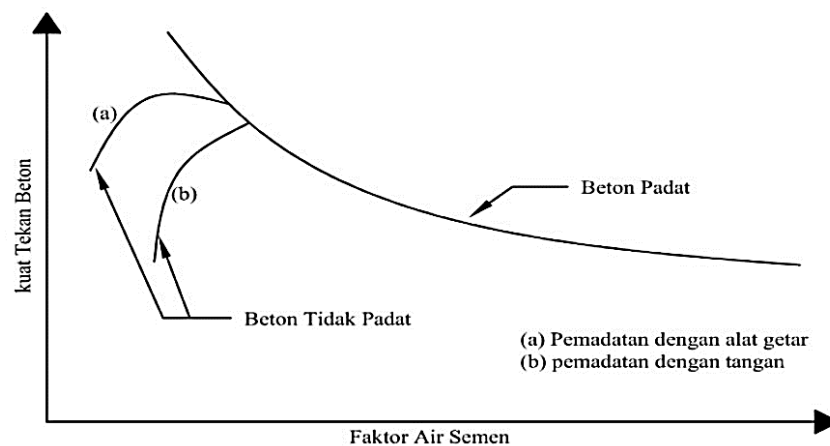
Tabel 4. Rasio kuat tekan beton pada berbagai umur

Umur beton (hari)	3	7	14	21	28	90	365
Semen portland biasa	0,40	0,65	0,88	0,95	1,00	1,20	1,35
Semen portland dengan kekuatan awal yang tinggi	0,55	0,75	0,90	0,95	1,00	1,15	1,20

Sumber: Peraturan Beton Bertulang Indonesia (1971)

b. Faktor air-semen

Faktor air-semen (f.a.s) ialah perbandingan berat antara air dan semen portland di dalam campuran adukan beton. Dalam praktek, nilai faktor air-semen berkisar antara 0,40 dan 0,60. Pada gambar 3 menunjukkan bahwa semakin besar nilai faktor air-semen maka semakin kecil nilai kuat tekan beton.



Gambar 3. Pengaruh faktor air-semen terhadap kuat tekan beton, Sumber: Kardiyono Tjokrodinuljo (2007)

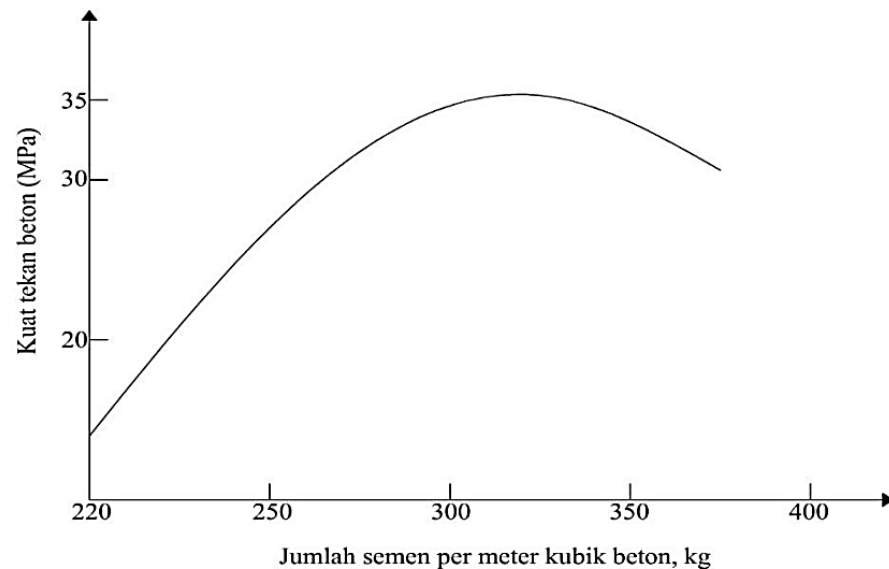
c. Kepadatan

Kekuatan beton berkurang jika kepadatan beton berkurang. Beton yang kurang padat berisi rongga sehingga kuat tekannya berkurang.

d. Jumlah pasta semen

Jumlah pasta semen dalam beton berfungsi untuk merekatkan butir-butir agregat. Pasta semen berfungsi secara maksimal jika seluruh pori

antar butir-butir agregat terisi penuh dengan pasta semen, serat seluruh permukaan butir agregat terselimuti pasta semen. Pada nilai faktor air-semen sama, variasi jumlah semen juga menggambarkan variasi jumlah pasta semen dan mempengaruhi kuat tekan beton. Grafik pengaruh jumlah semen terhadap kuat tekan beton tertera pada gambar 4 berikut.



Gambar 4. Pengaruh jumlah semen terhadap kuat tekan beton faktor air-semen sama, Sumber: Kardiyono Tjokrodinuljo (2007)

e. Jenis semen

Semen Portland untuk pembuatan beton terdiri dari beberapa jenis. Masing-masing jenis semen portland mempunyai sifat, sehingga mempengaruhi pula terhadap kuat tekan betonnya.

f. Sifat agregat

Beberapa sifat agregat yang mempengaruhi kekuatan beton yaitu:

- 1) Kekasaran permukaan, permukaan agregat yang kasar membuat rekatan antara permukaan agregat dan pasta semen lebih kuat daripada permukaan agregat yang halus dan licin.
- 2) Bentuk agregat, karena bentuk agregat yang bersudut membuat butir-butir agregat itu sendiri saling mengunci dan sulit digeserkan, berbeda dengan batu kerikil yang bulat.
- 3) Kuat tekan agregat, sekitar 70% volume beton terisi agregat, sehingga kuat tekan beton didominasi kuat tekan agregat.

2. Berat jenis

Beton normal yang dibuat dengan agregat pasir dan keirikal mempunyai berat jenis sekitar 2,3 – 2,4. Jenis-jenis beton menurut berat jenisnya dan macam-macam pemakaiannya dapat dilihat pada tabel 5 berikut.

Tabel 5. Jenis beton menurut berat jenisnya

Jenis Beton	Berat Jenis	Pemakaian
Beton sangat ringan	< 1,00	Non struktur
Beton ringan	1,00 – 2,00	Struktur ringan
Beton normal (biasa)	2,30 – 2,40	Struktur
Beton berat	> 3,00	Perisai sinar X

Sumber: Kardiyono Tjokrodimuljo (2007)

3. Modulus elastisitas

Modulus elastisitas beton tergantung pada modulus elastisitas agregat dan pastanya.

4. Susutan pengerasan

Volume beton setelah keras sedikit lebih keil daripada volume beton sewaktu masih lunak, karena pada waktu mengeras mengalami sedikit susut karena peristiwa penguapan air. Bagian yang susut adalah pastanya, karena agregat tidak berubah volume. Oleh karena itu, semakin banyak pastanya semakin besar susutan betonnya. Susutan beton sekitar $2 \cdot 10^{-3}$ dan pasta sekitar $6 \cdot 10^{-3}$.

5. Kerapatan air

Pada bangunan tertentu, beton diharapkan dapat rapat air agar tidak bocor juga untuk mencegah terjadinya karat pada baja tulangan, diperlukan beton yang rapat air. Pembuatan beton kedap air didapatkan dengan cara:

- a. Menambah butiran pasir halus.
- b. Menambah jumlah semen.
- c. Faktor air-semen maksimum 0,45 – 0,50.
- d. Memakai jenis semen portland tertentu.

6. Ketahanan terhadap ausan dan kejut

Pada bangunan tertentu sering beton (beton khusus) diharapkan dapat tahan terhadap ausan, abrasi, atau erosi.

2.2 Penyusun Beton

2.2.1 Semen portland

Semen adalah bahan pengikat hidrolis, yaitu bahan anorganik yang digiling halus, yang bila dicampur dengan air akan membentuk pasta, mengeras dan mengeras melalui reaksi dan proses hidrasi, dan setelah mengeras, tetap mempertahankan kekuatan dan stabilitasnya bahkan di bawah air (BS EN 197-1:2011). Beberapa produk semen pada umumnya terdiri dari 27 macam (tabel 6).

Tabel 6. 27 produk semen pada umumnya

Tipe utama	Notasi 27 Produk (Tipe semen biasa)		Komposisi (persentasi dari massa ^a)												
			Klinker	Terak tanur tiup	Uap silika	Pozzolana		Abu terbang		serpih yang terbakar	Batu gamping		Konstituen tambahan kecil		
						Alami	Alami terkalsinasi	Bersilika	Berkapur		L	LL			
			K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL			
CEM I	Semen portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Semen portland-terak	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Semen portland-asap silika	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Semen portland-pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Semen portland-abu terbang	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
	Semen portland-serpih bakar	CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
	Semen portland-batu gamping	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
		CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
	Semen portland-komposit ^c	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
CEM II/B-LL		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5		
CEM II/A-M		80-88							12-20				0-5		
CEM III	Semen tanur tinggi	CEM II/B-M	65-79							21-35				0-5	
		CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Semen pozzolan ^c	CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM IV/A	65-89	-	11-35						-	-	-	0-5	
CEM V	Semen komposit ^c	CEM IV/B	45-64	-	36-55						-	-	-	0-5	
		CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30						-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-49	-	31-49						-	-	-	0-5

Sumber: BS EN 197-1 (2011)

Keterangan:

- Nilai dalam tabel mengacu pada jumlah konstituen tambahan utama dan kecil.
- Proporsi asap silika dibatasi hingga 10%
- Kandungan utama selain klinker dinyatakan dengan penunjukan semen.

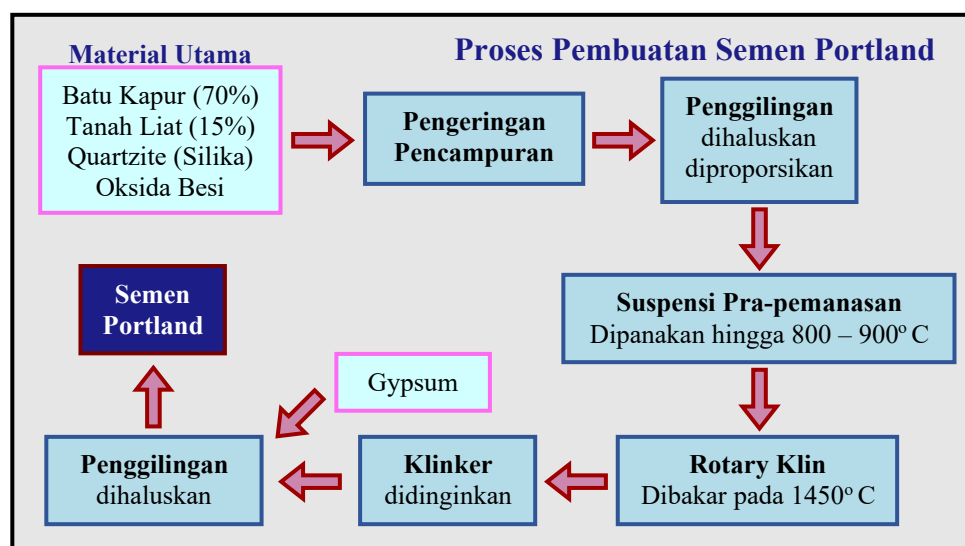
Menurut SNI 15-2049-2004, semen portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan

tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Kardiyono Tjokrodimuljo (2007) menjelaskan fungsi semen ialah untuk bereaksi dengan air menjadi pasta semen. Pasta semen berfungsi untuk merekatkan butir-butir agregat agar terjadi suatu massa yang kompak/padat. Selain itu, pasta semen juga untuk mengisi rongga-rongga di antara butir-butir agregat.

Semen mortar adalah semen hidrolis, terutama digunakan dalam konstruksi pasangan bata, terdiri dari campuran semen portland atau semen hidrolis campuran dan bahan plastisasi (seperti batu kapur atau kapur terhidrasi atau hidrolis), bersama dengan bahan lain yang digunakan untuk meningkatkan satu atau lebih sifat seperti pengaturan waktu, kemampuan kerja, retensi air, dan daya tahan (ASTM C 1329 – 05).

1. Pembuatan semen portland

Menurut Kardiyono Tjokrodimuljo (2007), semen diperoleh dengan membakar secara bersamaan, suatu campuran dari calcareous (yang mengandung kalsium karbonat atau batu gamping) dan argillaceous (yang mengandung alumina) dengan perbandingan tertentu. Secara mudahnya, kandungan semen Portland ialah: kapur, silika, dan alumina. Ketiga bahan dasar tersebut dicampur dan dibakar dengan suhu 1550°C dan menjadi klinker. Setelah itu kemudian dikeluarkan, didinginkan dan dihaluskan sampai halus seperti bubuk. Biasanya lalu ditambahkan gips atau kalsium



Gambar 5. Proses pembuatan semen Portland,
Sumber: Paul Nugraha dan Antoni (2004)

sulfat (CaSO_4) kira-kira 2 – 4 persen sebagai bahan pengontrol waktu pengikatan. Kemudian dimasukkan kedalam kantong dengan berat tiap-tiap kantong 50 kg atau 40 kg. Untuk lebih jelasnya, proses pembuatan semen portland dijabarkan dengan skema pada gambar 5 di atas.

2. Jenis-jenis semen portland

a. Semen portland

Sesuai dengan penggunaannya, semen portland sesuai SNI 15-2049-2004 dibagi dalam 5 jenis sebagai berikut :

Jenis I : Semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.

Jenis II : Semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.

Jenis III : Semen portland yang penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada permulaan setelah pengikatan.

Jenis IV : Semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah.

Jenis V : Semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat

b. Semen portland pozzolan

Menurut Paul Nugraha dan Antoni (2004), semen portland pozzolan (SPP) ialah suatu bahan perekat hidrolis yang dibuat dengan menggiling halus klinker semen portland dan pozzolan. Pozzolan ialah bahan alami atau buatan yang sebagian besar terdiri dari unsur-unsur silikat (SiO_2) dan atau aluminat (Al_2O_3) yang reaktif. Pozzolan tidak bersifat seperti semen, namun dalam bentuknya yang halus jika dicampur dengan kapur padam aktif dan air pada suhu kamar akan mengeras dalam beberapa waktu, sehingga membentuk masa yang padat dan sukar larut dalam air.

Semen portland pozzolan menghasilkan panas hidrasi lebih sedikit daripada semen biasa. Sifat ketahanan terhadap kotoran dalam air (misalnya kandungan garam) lebih baik, sehingga menurut Paul Nugraha dan Antoni (2004) sangat cocok jika dipakai untuk:

- 1) Bangunan di air payau atau laut yang selalu berhubungan dengan air yang mengandung sulfat.
 - 2) Bangunan beton yang memerlukan kedekatan air tinggi, misalnya dinding ruang basement, bak air penyimpanan, bangunan sanitasi.
 - 3) Pekerjaan plesteran (mortar) yang memerlukan adukan (mortar/beton) yang plastis.
3. Sifat-sifat semen portland
- a. Susunan kimia

Dapat dilihat pada tabel 7. Oksida-oksida besi tersebut berinteraksi satu sama lain untuk membentuk serangkaian produk yang lebih kompleks selama proses peleburan (Paul Nugraha dan Antoni, 2004).

Tabel 7. Batas komposisi biasa pada semen portland

Oksida	Konten, persen
Kapur, CaO	60 – 67
Silika, SiO ₂	17 – 25
Alumina, Al ₂ O ₃	3 – 8
Besi, Fe ₂ O ₃	0,5 – 6,0
Magnesia, MgO	0,5 – 4,0
Alkali (sebagai Na ₂ O)	0,3 – 1,2
Sulfur, SO ₃	2,0 – 3,5

Sumber: Adam M. Neville (2011)

Walaupun kompleks, namun pada dasarnya dapat disebutkan 4 senyawa yang paling penting pada tabel 8 berikut.

Tabel 8. Senyawa utama semen portland

Nama senyawa	Komposisi oksida	Singkatan
Trikalsium silikat	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Dikalsium silikat	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Trikalsium aluminat	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Tetrakalsium aluminoforit	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ Af

Sumber: Adam M. Neville (2011)

- b. Hidrasi semen
- c. Kekuatan pasta semen dan jumlah air yang terpakai
- d. Sifat fisik semen
 - 1) Kehalusan butir
 - 2) Waktu ikatan awal dan waktu ikatan akhir
 - 3) Panas hidrasi
 - 4) Berat jenis
- e. Sifat kimia semen
 - 1) Kesegaran semen
 - 2) Sisa yang tak larut

2.2.2 Agregat

Menurut Kardiyono Tjokrodinuljo (2007), Agregat ialah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat ini kira-kira menempati sebanyak 70 persen volume mortar atau beton. Agregat harus mempunyai bentuk yang baik (bulat dan mendekati kubus), bersih, keras, kuat dan gradasinya baik. Agregat harus pula mempunyai kestabilan kimiawi, dan Dalam hal-hal tertentu harus tahan aus, dan tahan cuaca. Agregat diperoleh dari sumber daya alam yang telah mengalami pengecilan ukuran secara alamiah (agregat alami) seperti kerikil atau dapat pula diperoleh dengan cara memecah batu alam, membakar tanah liat dan sebagainya (agregat buatan).

Kardiyono Tjokrodinuljo (2007) menjelaskan faktor-faktor yang membatasi besar butir maksimum ialah jarak bidang samping cetakan beton, dimensi plat beton yang dibuat serta jarak bersih antar baja tulangan dalam beton, yaitu:

1. Ukuran maksimum butir agregat tidak boleh lebih besar dari $\frac{3}{4}$ kali jarak bersih antar baja tulangan.
2. Ukuran maksimum butir agregat tidak boleh lebih besar dari $\frac{1}{3}$ kali tebal plat
3. Ukuran maksimum butir agregat tidak boleh lebih besar dari $\frac{1}{5}$ kali jarak terkecil antara bidang samping cetakan.

Kardiyono Tjokrodinuljo (2007) menjelaskan bahwa agregat yang mempunyai ukuran butir-butir besar disebut agregat kasar, sedangkan agregat yang

berbutir kecil disebut agregat halus. Dalam bidang teknologi beton, nilai batas antara agregat kasar dan agregat halus umumnya ialah 4,75 mm atau 4,80 mm. Agregat yang butir-butirnya lebih besar dari 4,80 mm disebut agregat kasar, dan agregat yang butir-butirnya lebih kecil dari 4,80 mm disebut agregat halus.

1. Agregat kasar

Pada ASTM C33, Agregat kasar harus terdiri dari kerikil, kerikil pecah, batu pecah, terak tanur sembur berpendingin udara, atau beton semen hidrolik pecah, atau kombinasi keduanya, sesuai dengan persyaratan spesifikasi ini. Kerikil alam atau batu pecah adalah butiran mineral keras yang sebagian besar butirnya berukuran antara 5 – 80 mm (PUBI 1982). Besar butir maksimum yang diizinkan tergantung pada maksud pemakaiannya. Adapun batas gradasi untuk agregat kasar sesuai tabel 9.

Tabel 9. Batas-batas gradasi agregat kasar

Lubang (mm)	Persen berat butir yang lewat ayakan Besar butir maksimum	
	40 mm	20 mm
40	95 – 100	100
20	30 – 70	95 – 100
10	10 – 35	25 – 55
4,8	0 – 5	0 – 10

Sumber: Kardiyono Tjokrodimaljo (2007)

Syarat-syarat kerikil alam dan batu pecah untuk beton :

a. Syarat fisik

- 1) Kekerasan yang ditentukan tidak boleh mengandung bagian hancur yang tembus ayakan 2 mm, lebih dari 32% berat.
- 2) Bagian yang hancur bila diuji tidak lebih dari 50% berat.
- 3) Bagian butir yang panjang dan pipih, maksimum 20% berat, terutama untuk beton mutu tinggi.

b. Syarat kimia

- 1) Kekekalan terhadap Na_2SO_4 bagian yang hancur maksimum 12% berat, dan kekekalan terhadap MgSO_4 bagian yang hancur, maksimum 10% berat.

- 2) Kemampuan bereaksi terhadap alkali harus negatif sehingga tidak berbahaya.

2. Agregat halus

Agregat halus harus terdiri dari pasir alam, pasir buatan, atau kombinasi keduanya. Pasir standar adalah pasir silika, yang hampir seluruhnya terdiri dari butiran kuarsa hampir murni yang bulat secara alami, digunakan untuk menyiapkan mortar dalam pengujian semen hidrolik (ASTM C 778 – 02).

Pasir atau agregat halus adalah agregat dengan besar butir maksimum 4,76 mm berasal dari alam atau hasil olahan. Agregat halus alam adalah agregat halus hasil disintegrasi dari batuan sedangkan agregat halus olahan adalah agregat halus yang dihasilkan dari pemecahan dan pemisahan butiran dengan cara penyaringan atau cara lainnya dari batu, atau terak tanur tinggi.

a. Bentuk dan ukuran

Bentuk dan ukuran agregat untuk adukan harus memenuhi:

- 1) Agregat halus alami hasil disintegrasi batu alam,
- 2) Agregat halus hasil olahan diproses khusus sehingga bentuk dan ukuran sesuai dengan persyaratan.
- 3) Agregat bulat dan berukuran seragam tidak boleh digunakan.

b. Sifat fisik

Sifat fisik agregat untuk adukan harus memenuhi:

- 1) Gradasi agregat untuk lapisan 1 dan lapisan 2 sesuai tabel 10.

Tabel 10. Batas-batas gradasi agregat halus

Lubang (mm)	Persen berat butir yang lewat ayakan jenis agregat halus			
	Kasar	Agak kasar	Agak halus	Halus
10	100	100	100	100
4,8	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100
2,4	60 – 95	75 – 100	85 – 100	95 – 100
1,2	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100
0,6	15 – 34	35 – 59	60 – 79	80 – 100
0,3	5 – 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50
0,15	0 – 10	0 – 10	0 – 10	0 – 15

Sumber: Kardiyono Tjokrodinuljo (2007)

- 2) Besar butir yang tertinggal di antara dua saringan yang berurutan pada di atas harus tidak boleh 50%, ayakan antara no.50 dan no.100 tidak lebih 25%.
 - 3) Bila nilai modulus kehalusan bervariasi lebih dari 0,2 dari nilai yang diambil untuk pemilihan proporsi adukan, agregat tidak boleh dipakai tanpa melakukan pengaturan proporsi kembali.
- c. Syarat agregat halus
- Syarat agregat halus dalam plesteran dan adukan sebagai berikut:
- 1) Bahan pengisi,
 - 2) Penahan penyusutan,
 - 3) Penambahan kekuatan.

2.2.3 Air

Menurut Direktorat Pekerjaan Umum (PUBI – 1982), air pada persyaratan umum bahan bangunan adalah air sebagai bahan konstruksi bangunan meliputi kegunaannya dalam pembuatan dan perawatan beton pematangan kapur, adukan pasangan dan adukan plesteran. Adapun persyaratannya yaitu:

1. Air harus bersih.
2. Tidak mengandung lumpur, minyak dan benda terapung lainnya yang dapat dilihat secara visual.
3. Tidak mengandung benda-benda tersuspensi lebih dari 2 g/liter.
4. Tidak mengandung garam-garam yang dapat larut dan dapat merusak beton (asam-asam, zat organik dsb) lebih dari 15 g/liter. Kandungan khlorida (Cl), tidak lebih dari 500 p.p.m. dan senyawa sulfat tidak lebih dari 1000 p.p.m. sebagai SO_3 .
5. Bila dibandingkan dengan kekuatan tekan adukan dan beton yang memakai air suling, maka penurunan kekuatan adukan dan beton yang memakai air yang diperiksa tidak lebih dari 10%.
6. Semua air yang mutunya meragukan harus dianalisa secara kimia dan dievaluasi mutunya menurut pemakaiannya.
7. Khusus untuk beton praktekan, kecuali syarat-syarat tersebut di atas, air tidak boleh mengandung khlorida lebih dari 50 p.p.m.

Menurut ASTM C 1602/C 1602M – 06, air minum diperbolehkan untuk digunakan sebagai air pencampur dalam beton tanpa pengujian kesesuaiannya dengan persyaratan spesifikasi ini. Air pencampur yang seluruhnya atau sebagian terdiri dari sumber air yang tidak dapat diminum atau dari operasi produksi beton diizinkan untuk digunakan dalam proporsi berapa pun hingga batas yang memenuhi syarat untuk memenuhi persyaratan tabel 11. batas opsional mana pun yang terdapat dalam tabel 12. harus ditentukan pada saat pemesanan beton.

Tabel 11. Persyaratan kinerja beton untuk mencampur air

	Batas
Kuat tekan, kontrol % minimal pada 7 hari ^{AB}	90
Waktu set, deviasi dari kendali, jam : menit ^A	Minimal 1:00 hingga maksimum 1:30

Sumber: ASTM C 1602/C 1602M – 06

Keterangan :

- A Perbandingan harus didasarkan pada proporsi tetap untuk desain campuran beton yang mewakili pasokan air yang meragukan dan campuran kontrol yang menggunakan 100% air minum atau air sulingan.
- B Hasil kuat tekan harus didasarkan pada paling sedikit dua benda uji standar yang terbuat dari sampel komposit.

Tabel 12. Batas kimia opsional untuk air pencampur gabungan^A

	Batas
A. Batas kimia opsional untuk konsentrasi maksimum air pencampur gabungan dalam air pencampur gabungan, ppm	
1. Pada beton pratekan, geladak jembatan atau tujuan lain	500 ^c
2. Beton bertulang lainnya dalam lingkungan lembab atau mengandung lapisan aluminium atau logam yang berbeda atau dengan bentuk logam galvanis yang menempel di tempatnya	1000 ^c
B. Sulfat sebagai SO ₄ , ppm	3000
C. Alkali sebagai (Na ₂ O + 0.658 K ₂ O), ppm	600
D. Total padatan berdasarkan massa, ppm	50.000

Sumber: ASTM C 1602/C 1602M – 06







Keterangan :









- A Batasan spesifikasi dari tabel ini tidak dilarang untuk ditentukan secara individual atau secara keseluruhan sesuai spesifikasi.
- B ppm adalah singkatan dari bagian per juta.
- C Persyaratan untuk beton harus berlaku bila pabrikan dapat menunjukkan bahwa batas pencampuran air ini dapat dilampaui. untuk kondisi yang memungkinkan penggunaan akselerator kalsium klorida (CaCl_2) sebagai bahan tambahan, batasan klorida diperbolehkan untuk diabaikan.

2.3 Plastik HDPE

Plastik adalah salah satu jenis makro molekul yang dibentuk dengan proses polimerisasi, yaitu proses penggabungan beberapa molekul sederhana (monomer) melalui proses kimia menjadi molekul besar (makromolekul atau polimer). Plastik merupakan senyawa polimer yang unsur penyusun utamanya adalah karbon dan hidrogen. Dalam kehidupan saat ini, ada enam komoditas polimer yang banyak digunakan, diantaranya adalah *polyethylene*, *polypropylene*, *polyvinyl chloride*, *polyethylene terephthalate*, *polystyrene*, dan *polycarbonate*. Mereka membentuk 98% dari seluruh polimer dan plastik yang ditemukan dalam kehidupan sehari-hari. Masing-masing dari polimer tersebut memiliki sifat degradasi dan ketahanan panas, cahaya, dan kimia (Bambang A. H. dan I W. Arnata, 2015). Menurut struktur kimia dan perilaku termal plastik, ada 7 jenis plastik yang tersedia di pasaran.

Tabel 13. Jenis plastik

Nomor Identifikasi Resin	Resin	Kode Identifikasi Resin – Pilihan A	Kode Identifikasi Resin – Pilihan B
1	<i>Poly(ethylene terephthalate)</i>		
2	<i>High density polyethylene</i>		
3	<i>Poly(vinyl chloride)</i>		

Nomor Identifikasi Resin	Resin	Kode Identifikasi Resin – Pilihan A	Kode Identifikasi Resin – Pilihan B
4	<i>Low density polyethylene</i>		
5	<i>Polypropylene</i>		
6	<i>Polystyrene</i>		
7	Resin Lainnya		

Sumber: ASTM D 7611/D 7611M – 13

Kode dengan Nomor Identifikasi Resin “2” dan Istilah Singkatan “HDPE” diperuntukkan bagi barang manufaktur yang diproduksi dari resin polietilen densitas tinggi dengan kepadatan tinggi. Produk polietilen densitas tinggi yang dirujuk didasarkan pada polimer yang dibuat dengan etilen sebagai monomer utama dan mungkin mengandung plastik poliolefin termoplastik rantai panjang lainnya dan polietilen densitas tinggi merupakan resin mayoritas massa yang ada dalam produk plastik tersebut (ASTM D 7611/D 7611M – 13). Adapun karakteristik HDPE terlihat pada tabel 14.

Tabel 14. Karakteristik serat HDPE

Karakteristik	Unit	Nilai
Berat jenis	g/cm ³	0.96
Krtitalinitas	v/o	-50
Muai panas	°C ⁻¹	120x10 ⁻⁶
Daya hantar panas	(watt/m ²) (°C/M)	0,52
Kekuatan tarik	MPa	20 – 40
Modulus Young	MPa	400 – 1200
Ketahanan panas terhadap pemakaian terus menerus	°C	80 – 120
Daya hantar 10 menit	°C	120 - 125

Sumber: Erwin Rommel, dkk. (2014)

Menurut United States for Development Agencies (2022), plastik HDPE sejauh ini merupakan komoditas yang paling banyak diproduksi di industri plastik hulu Indonesia, menyumbang 46% dari total produksi plastik. HDPE adalah polimer linier dengan komposisi kimia polietilen sebagai produk polimerisasi etilen dengan kepadatan curah $0,94 \text{ gm/cm}^3$ atau lebih tinggi, diproduksi dengan reaksi bertekanan rendah antara $5\text{-}140 \text{ kg/cm}^2$ dengan temperature berkisar antara $60\text{-}300^\circ\text{C}$ (Erwin Rommel, dkk., 2014). HDPE lebih keras dan bisa bertahan pada temperatur tinggi (120°C), sangat tahan terhadap bahan kimia sehingga dapat ditemukan pada kemasan deterjen, kantong plastik, tangki, pipa, dan sebagainya.

Plastik HDPE memiliki banyak kelebihan yang menjadikannya pilihan material yang populer dalam aplikasi industri. Berikut kelebihan plastik HDPE:

1. Plastik HDPE tahan terhadap bahan kimia dan korosi yang dapat merusak material lainnya.
2. Plastik HDPE memiliki kekuatan tinggi dan tahan tekanan dan benturan.
3. Mudah diproses dan didaur ulang, sehingga sangat fleksibel dan dapat digunakan dalam berbagai aplikasi. Selain itu, plastik HDPE juga mudah didaur ulang dan dapat digunakan kembali, sehingga membantu mengurangi limbah plastik.
4. Plastik HDPE tahan terhadap suhu tinggi dan rendah, sehingga dapat digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan ketahanan terhadap suhu
5. Ramah lingkungan karena mudah didaur ulang dan dapat digunakan kembali. Selain itu, pembuatan plastik HDPE juga membutuhkan lebih sedikit energi dan sumber daya daripada pembuatan plastik lainnya

Di sisi lain, plastik jenis HDPE juga memiliki kekurangan, yaitu:

1. HDPE cenderung mengembang saat panas. Hal ini bisa terjadi ketika produk plastik terekspos temperatur tinggi terus-menerus.
2. Sifatnya yang kuat dan tahan lama, plastik jenis HDPE ini termasuk jenis plastik yang kaku atau tidak fleksibel.

2.4 Kuat Lentur

Kuat lentur beton adalah kemampuan balok beton yang diletakan pada dua tumpuan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji, yang

diberikan kepadanya, sampai benda uji patah, dinyatakan dalam Mega Pascal (MPa) gaya per satuan luas. Uji lentur menunjukkan kemampuan balok atau pelat beton tanpa tulangan dalam menahan keruntuhan lentur. Kekuatan lentur menandakan tegangan tertinggi yang dialami material pada saat pecah. Rumus kuat lentur sesuai SNI 4431:2011 yang digunakan adalah:

1. Untuk pengujian dimana bidang patah terletak di daerah pusat (daerah 1/3 jarak titik tumpuan bagian tengah), maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan (1) sebagai berikut.

$$\sigma_i = \frac{P.L}{b.h^2} \quad (1)$$

2. Untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada di luar pusat (daerah 1/3 jarak titik tumpuan bagian tengah), dan jarak antara titik pusat dan titik patah kurang dari 5% dari jarak antara titik tumpuan maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan (2) sebagai berikut.

$$\sigma_i = \frac{P.a}{b.h^2} \quad (2)$$

dengan pengertian:

σ_i adalah kuat lentur benda uji (MPa)

P adalah beban tertinggi yang terbaca pada mesin uji (pembacaan dalam ton sampai 3 angka di belakang koma)

L adalah jarak (bentang) antara dua garis tumpuan (mm)

b adalah lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm)

h adalah lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm)

a adalah jarak rata-rata antara tampang lintang patah dan tumpuan luar yang terdekat, diukur pada 4 tempat pada sudut dari bentang (mm)

3. Untuk benda uji yang patahnya di luar pusat (daerah 1/3 jarak titik tumpuan bagian tengah) dan jarak antara titik pembebanan dan titik patah lebih dari 5% bentang, hasil pengujian tidak digunakan.

2.5 Nilai Optimum

Optimal adalah kondisi tertinggi yang mungkin dilakukan seseorang/sesuatu tanpa merusak unsur yang ada padanya. Optimalisasi merupakan pencapaian hasil sesuai harapan secara efektif dan efisien. Optimalisasi banyak juga diartikan

sebagai ukuran dimana semua kebutuhan dapat dipenuhi dari kegiatan-kegiatan yang dilaksanakan. Menurut Winardi (Ali, 2014), optimalisasi adalah ukuran yang menyebabkan tercapainya tujuan dipandang dari sudut usaha.

Untuk mencapai nilai yang paling optimal, diperlukan nilai optimum atau nilai maksimal dalam sebuah ukuran. Untuk menentukan nilai optimum (maksimum/minimum) dari suatu fungsi objektif, diperlukan penyelesaian masalah menggunakan program linear yang berhubungan dengan nilai optimum, langkah-langkah pemecahannya adalah sebagai berikut.

- a. Merumuskan permasalahan ke dalam model matematika.
- b. Membentuk sistem pertidaksamaan linear yang sesuai.
- c. Menggambarkan kendala sebagai daerah di bidang Cartesius yang memenuhi sistem pertidaksamaan linear.
- d. Menentukan nilai optimum (maksimum/minimum) dari fungsi objektif.
- e. Menafsirkan/menjawab permasalahan.

2.5.1 Permodelan dengan analisis regresi

Menurut Eva Ostertagova (2012), Salah satu permodelan matematika yang dapat dilakukan yaitu analisis regresi. Analisis regresi adalah alat statistik untuk menyelidiki hubungan antar variabel. Analisis regresi melibatkan identifikasi hubungan antara variabel terikat dan satu atau lebih variabel bebas. Terdapat kondisi khusus yaitu regresi berganda yang mengacu pada aplikasi regresi yang didalamnya terdapat lebih dari satu variabel bebas.

Regresi polinomial adalah kasus khusus dari regresi berganda, dengan hanya satu variabel bebas X . Regresi polinomial merupakan model regresi linier yang dibentuk dengan menjumlahkan pengaruh masing-masing variabel prediktor (X) yang dipangkatkan meningkat sampai orde ke- k . Secara umum, model regresi polinomial ditulis dalam bentuk persamaan (3) berikut.

$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + \dots + b_kX^k + \varepsilon \quad (3)$$

Dimana:

Y = variabel respons

b_0 = intersep

b_1, b_2, \dots, b_k = koefisien-koefisien regresi

X = variabel prediktor

ε = faktor pengganggu yang tidak dapat dijelaskan oleh model regresi.

(Eva Ostertagova, 2012) Metode analisis regresi yang paling banyak digunakan adalah analisis kuadrat terkecil biasa. Metode ini bekerja dengan membuat garis “paling sesuai” melalui semua titik data yang tersedia dan estimasi parameter dipilih untuk meminimalkan jumlah kesalahan kuadrat. Kita dapat melihat regresi polinomial sebagai kasus khusus dari regresi linier berganda.

Model regresi polinomial terdiri dari suku-suku pangkat yang berurutan. Setiap model akan menyertakan suku orde tertinggi ditambah semua suku orde rendah (signifikan atau tidak). Model polinomial adalah teknik pemasangan kurva yang efektif dan fleksibel. Terdapat beberapa aplikasi yang dapat mempermudah perhitungan dalam mengerjakan permodelan regresi polinomial, seperti Microsoft Excel, Geogebra dan lainnya.

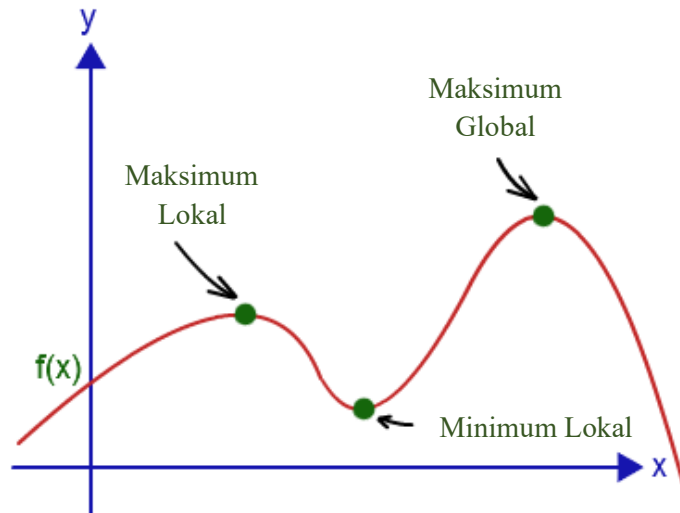
2.5.2 Nilai maksimum dan minimum

Nilai maksimum dan minimum fungsi sejatinya adalah aplikasi atau penerapan dari konsep turunan. Nilai suatu fungsi dikatakan maksimum jika nilai dari fungsi tersebut paling besar dan sebaliknya nilai suatu fungsi dikatakan minimum jika nilai suatu fungsi tersebut paling kecil pada sebuah selang atau interval tertutup. Dari nilai maksimum dan nilai minimum suatu fungsi inilah dapat diperoleh nilai ekstrim. Pengaplikasian nilai ekstrim dalam kehidupan nyata sangat beragam, seperti mencari biaya atau bahan minimum dalam proyek, mencari keuntungan maksimum dan lain hal sebagainya.

Tentunya untuk menemukan nilai maksimum dan minimum diperlukan suatu permodelan berupa fungsi matematika. Permodelan yang dibuat dengan analisis regresi polinomial selanjutnya dilakukan perhitungan nilai maksimum dan minimum suatu fungsi. Nilai maksimum dan minimum yang dimaksud untuk suatu fungsi adalah nilai maksimum dan minimum lokal, artinya hanya berlaku pada interval tertentu saja seperti pada gambar 6. Untuk menentukan nilai maksimum dan minimum suatu fungsi $y = f(x)$, berikut langkah-langkahnya:

1. Syarat stationer : $f'(x) = 0$.

2. Tentukan jenis stationernya (maksimum, minimum atau belok) menggunakan turunan kedua.
3. Menghitung nilai maksimum atau minimum dengan substitusi nilai variabel ke fungsi awal.



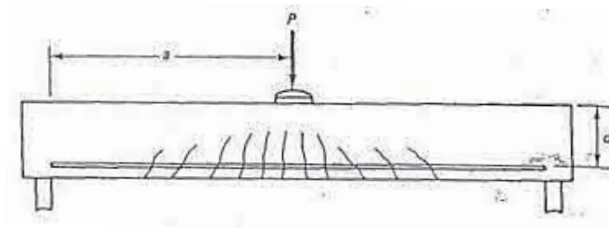
Gambar 6. Nilai maksimum dan minimum pada sebuah fungsi

2.6 Pola Keruntuhan

Oscar F. Nur (2009) menyatakan beban-beban yang bekerja pada struktur menyebabkan terjadinya lentur dan deformasi pada elemen struktur. Apabila beban semakin besar, maka pada balok terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan timbulnya retak lentur disepanjang balok. Bila bebannya semakin bertambah lagi, pada akhirnya dapat terjadi keruntuhan elemen struktur yaitu pada saat beban luarnya mencapai kapasitas elemen. Hasil penggambaran retakan akan menjadi data untuk menentukan pola jenis keruntuhan pada balok.

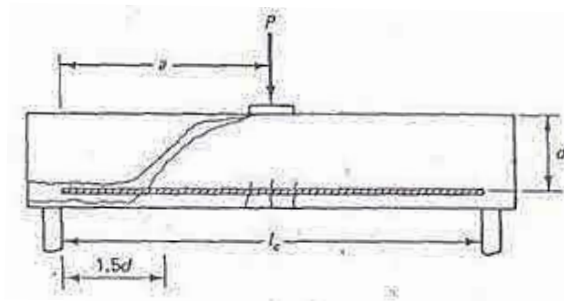
Menurut Samuel Layang (2022), retakan yang terlihat pada balok dapat memberikan informasi terkait jenis pola keruntuhan yang terjadi. Terdapat 3 (tiga) jenis keruntuhan berdasarkan kelansingan balok (Edward G. Nawy, 2009 dalam Samuel Layang, 2022).

1. Keruntuhan lentur (*flexural crack*), keruntuhan ini cenderung pada balok yang langsing. Pola keruntuhan lentur pada gambar 7, retak dimulai dari sisi yang mengalami gaya tarik bergerak vertikal ke arah beban.



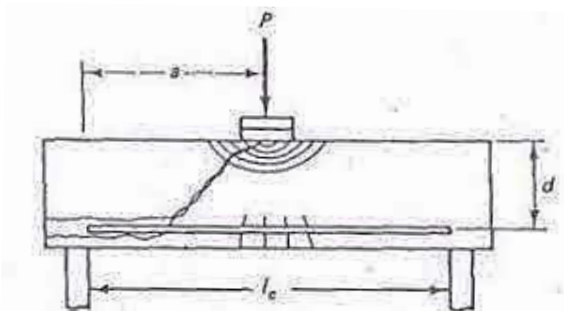
Gambar 7. Keruntuhan lentur, Sumber: Samuel Layang (2022)

2. Keruntuhan tarik diagonal, keruntuhan ini terjadi apabila kekuatan balok dalam tarik diagonal lebih kecil daripada keruntuhan lenturnya. Gambar 8 menunjukkan pola keruntuhan tarik diagonal dengan retak dimulai dari tumpuan dan bergerak miring ke arah beban. Jenis keruntuhan ini sangat berbahaya karena terjadi secara tiba-tiba dan seringkali tidak memberikan tanda-tanda seperti lendutan yang semakin besar.



Gambar 8. keruntuhan tarik diagonal,
Sumber: Samuel Layang (2022)

3. Keruntuhan tekan geser, keruntuhan ini dimulai dengan timbulnya retak lentur halus vertikal ditengah bentang, dan tidak terus menjalar (gambar 9). Hal ini terjadi karena terdapat kehilangan lekatan antara tulangan dengan beton didaerah tumpuan. (Nawy,1990).



Gambar 9. Keruntuhan tekan geser,
Sumber: Samuel Layang (2022)

2.7 Penelitian Terkait

Penelitian terkait pada tabel 15 yang sebelumnya pernah dilakukan menjadi landasan kajian dan bahan perbandingan yang relevan untuk penelitian ini. Penelitian terkait yang dijadikan perbandingan tidak terlepas dari pembahasan kuat lentur beton dengan substitusi plastik jenis HDPE sebagai agregat halus.

Tabel 15. Penelitian terkait

Judul	Peneliti	Pembahasan
Perilaku Beton Bertulang Serat HDPE	Venu Malagavelli dan Neelakanteswara Rao Paturu, 2010	Pembuangan limbah padat menimbulkan banyak permasalahan lingkungan. Penelitian ini menjadi upaya pemanfaatan bahan limbah padat pada beton, berfokus pada limbah kantong semen HDPE. Beton yang digunakan pada penelitian ini mempunyai kuat tekan 25 N/mm ² . Kubus, silinder, dan balok dicor dengan serat HDPE 0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 2,5%, 3%, 3,5%, 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, dan 6% dari volume beton. Sampel diuji kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat lentur dan dilakukan analisis perbandingan antara beton konvensional dan beton modifikasi. Telah ditemukan bahwa terjadi, peningkatan kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur beton dengan menggunakan serat.
Pengaruh Penambahan Cacahan Limbah Plastik Jenis <i>High Density</i>	Dantje A. T. Sina, dkk., 2012	Perlu adanya penanganan khusus terhadap sampah plastik, seperti botol plastik oli merupakan jenis plastik <i>High Density Polyethylene</i> (HDPE). Mutu beton yang direncanakan yaitu 25 MPa dengan pengujian kuat lentur beton dengan penambahan cacahan plastik HDPE

Judul	Peneliti	Pembahasan
<p><i>Polyethylene</i> (HDPE) pada Kuat Lentur Beton</p>		<p>berbentuk serat berukuran 150 mm x 10 mm pada variasi 0%, 0,50%, 0,70% dan 0,90% dari berat semen. Nilai kuat lentur beton dengan variasi cacahan plastik HDPE 0%, 0,50%, 0,70% dan 0,90% berturut-turut sebesar 4,12 MPa, 4,30 MPa (meningkat 4,37%), 4,21 MPa (meningkat 2,19%), 3,94 MPa (menurun 3,64%).</p>
<p>Pengaruh Penggunaan Serat <i>High Density Polyethylene</i> (HDPE) pada Campuran Beton Terhadap Kuat Tarik Beton</p>	<p>Erwin Rommel, dkk., 2014</p>	<p>Penelitian tentang penambahan serat HDPE pada beton normal dimaksudkan untuk mengetahui hubungan antara persentase variasi penambahan serat HDPE untuk pengerjaan, kekuatan tarik dan menentukan pola penyebaran serat dalam beton. Variasi penambahan serat HDPE adalah serat 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% dan 10% dari volume campuran. Pengujian kuat tarik dilakukan dengan benda uji berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 30 mm pada umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan serat HDPE dapat meningkatkan nilai sisi kekuatan tarik, dengan nilai optimum dari 4% dengan kekuatan tarik 2.86 Mpa meningkat sebesar 18%.</p>
<p>Pengaruh Substitusi Limbah Kantong Plastik HDPE</p>	<p>Fitri Junarti, 2023</p>	<p>Muncul berbagai inovasi untuk meningkatkan kualitas beton dan mutu beton, salah satunya dengan memanfaatkan limbah plastik sebagai bahan tambah dalam campuran beton. Beberapa variasi substitusi dari limbah kantong plastik jenis HDPE yaitu</p>

Judul	Peneliti	Pembahasan
Terhadap Kuat Tekan Beton dengan Metode <i>Dry</i> <i>Curing</i> .		0.00% (beton normal), 0.50%, 0.70% dan 0.90%. Hasil penelitian yang telah dilakukan, penggantian sebagian agregat halus dengan limbah kantong plastik HDPE 0.00% (normal), 0.50%, 0.70% dan 0.90% berturut-turut sebesar 15.12 MPa, 17,92 MPa, 15.55 MPa dan 15.69 MPa. Nilai optimum dicapai pada substitusi limbah kantong plastik HDPE pada campuran beton yaitu, 0.66% dengan nilai 19.71 MPa.