

# Peningkatan Kekuatan Beton Plastik dengan Penambahan Kalsit menggunakan Metode *Soybean Crude Urease Calcite Precipitation*

Risky Sherly Putri<sup>1</sup> dan Heriansyah Putra<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.  
Jl. Raya Dramaga, Kampus IPB Dramaga, PO BOX 220, Bogor, Jawa Barat Indonesia

\* Penulis koresponden: heriansyahptr@apps.ipb.ac.id

**Abstrak:** Beton sebagai bahan konstruksi terus meningkat penggunaannya karena kuat tekannya yang tinggi dan mudah dalam pengerjaannya. Pengelolaan sampah plastik menjadi persoalan karena plastik sulit untuk diuraikan secara alami. Substitusi plastik saja tidak dapat dilakukan pada beton, sehingga diperlukan tambahan lain untuk mempertahankan kekuatan beton. *Soybean crude urease calcite precipitation* (SCU-CP) dijadikan sebagai alternatif pemecahan masalah dengan menggunakan kedelai sebagai pengganti enzim urease yang dapat meningkatkan kekuatan tanah. Penelitian ini menggunakan metode SCU-CP untuk menutupi rongga-rongga kecil antara plastik dan agregat serta memperkuat ikatannya dengan pembentukan kalsit. Oleh karena itu diperlukan evaluasi pengaruh substitusi plastik serta penambahan larutan kalsit terhadap kuat tekan dan tegangan-regangan beton. Sampel beton direncanakan memiliki kuat tekan 20,75 MPa dengan mutu K-250. Substitusi cacahan plastik *highdensity polyethylene* (HDPE) menurunkan kuat tekan beton 5,5% dan 8,2% pada substitusi 1% dan 5%. Semakin banyak agregat halus yang disubstitusi semakin menurun kuat tekan beton plastik. Substitusi plastik menyebabkan tegangan menurun dan beton menjadi lebih lentur. Penambahan kalsit pada beton plastik dapat meningkatkan kuat tekan beton hingga 44%. Kalsit dapat mengisi rongga-rongga kecil pada beton plastik, semakin banyak larutan kalsit yang ditambahkan pada beton artinya banyak endapan kalsit yang terbentuk antara plastik dan beton. Penambahan kalsit meningkatkan tegangan pada regangan yang sama. Hal ini ditunjukkan dari kurva yang semakin tegak yang artinya modulus elastisitas meningkat dan mutu beton semakin baik.

**Diterima:** 25 Agustus 2022

**Disetujui:** 15 October 2022

## Sitasi:

Putri, R.S.; Putra, H. Peningkatan Kekuatan Beton Plastik dengan Penambahan Kalsit menggunakan Metode *Soybean Crude Urease Calcite Precipitation*. *J. Teknik Sipil dan Lingkungan*. 2022; 7 (3): 191-200.,  
<https://doi.org/10.29244/jsil.7.3.191-200>

**Kata kunci:** Agregat; beton plastic; HDPE; kalsit; kuat tekan.

## 1. Pendahuluan

Pemerintah Indonesia memprioritaskan pembangunan infrastruktur sebagai salah satu dari tujuh agenda pembangunan nasional dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) pada 2020-2024. Pembangunan tersebut akan terus meningkat karena pemerintah Indonesia akan mengejar target pembangunan yang tertunda pada 2020 akibat pandemi COVID-19 [1]. Seiring perkembangan dunia konstruksi tersebut, kebutuhan terhadap bahan konstruksi juga meningkat, khususnya beton. Beton memiliki keunggulan dalam kuat tekannya yang tinggi dan mudah dalam pengerjaannya sehingga menjadi bahan bangunan yang paling banyak digunakan di dunia. Komponen beton tersusun atas pasir, kerikil, semen, air serta campuran aditif yang beragam baik dalam ukuran, sifat, maupun fungsinya [2,3].

Jumlah timbulan sampah Indonesia pada tahun 2021 mencapai 24,5 juta ton/tahun. Data dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) menunjukkan 16% dari timbulan sampah tersebut merupakan sampah plastik [4]. Pengelolaan sampah plastik menjadi persoalan karena plastik sulit untuk diuraikan secara alami. Daur ulang sampah plastik hanya merubah sampah plastik menjadi bentuk lain. Produk daur ulang tersebut akan kembali menjadi sampah ketika kehilangan fungsinya, sehingga diperlukan alternatif lain untuk menangani sampah plastik ini [5]. Pemanfaatan sampah plastik sebagai campuran beton dapat menjadi salah satu alternatif untuk mengurangi permasalahan sampah plastik ini [6]. Plastik *highdensity polyethylene* (HDPE) sebagai agregat memiliki permukaan yang licin dan mengkilap yang menyebabkan kualitas ikatan dan kekuatan agregat beton berkurang sehingga adanya rongga-rongga kecil pada beton. Penggunaan plastik HDPE dalam kehidupan sehari-hari meliputi botol jus, susu cair, galon air minum, kantong plastik, mainan anak, dan wadah plastik lainnya [7,8]. Pembuatan beton dengan plastik HDPE dapat dilakukan sebagai substitusi agregat halus [6], agregat kasar [9], ataupun bahan tambah [10]. Upaya substitusi kantong plastik HDPE sebagai agregat halus dengan rasio 1%, 3%, 5%, dan 10% menunjukkan penurunan kuat tekan pada usia 7 dan 28 hari seiring meningkatnya penggunaan kantong plastik [11].

Penggunaan substitusi plastik saja tidak dapat dilakukan terhadap beton, sehingga diperlukan tambahan lain untuk mempertahankan kekuatan beton. Berdasarkan penelitian Yasuhara *et al.* (2011) [12], metode *Enzyme-Mediated Calcite Precipitation* (EMCP) dapat menghasilkan kristal  $\text{CaCO}_3$  dengan kombinasi enzim urease, urea, dan kalsium klorida ( $\text{CaCl}_2$ ) dalam bentuk larutan. Penggunaan enzim urease berguna sebagai pemisah urea menjadi ion karbonat dan amonium. Ion karbonat membentuk endapan kristal  $\text{CaCO}_3$  (kalsium karbonat) dengan bantuan ion kalsium [13]. Akan tetapi, penggunaan enzim urease kurang ekonomis jika diaplikasikan dalam metode EMCP berskala besar dikarenakan bahan urease dapat memakan biaya >90% biaya materialnya [14]. Putra *et al.* (2021) [15] mengembangkan alternatif yang disebut dengan *soybean crude urease calcite precipitation* (SCU-CP). Metode ini dapat membentuk kristal kalsit menggunakan soybean sebagai pengganti enzim urease yang dapat meningkatkan kekuatan tanah [15,16]. Penggunaan metode SCU-CP dengan soybean sebagai katalis juga dapat menutupi retakan pada beton dengan injeksi yang menghasilkan endapan kalsit dan menurunkan permeabilitas hingga 95,43% [16]. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi penggunaan metode SCU-CP dalam menutup rongga-rongga kecil antara plastik dan agregat serta memperkuat ikatan antara plastik dan mortar dengan pengujian kuat tekan dan analisis tegangan-regangan beton.

## 2. Metode

### 2.1. Material

Material yang digunakan pada penelitian adalah cacahan plastik *High Density Polyethylene* (HDPE), semen Portland komposit (PCC) merk Tiga Roda, pasir Cimangkok, batu pecah Lebakwangi, aquades, air PDAM, dan larutan kalsit yang terdiri dari  $\text{CaCl}_2$ , urea, dan ekstrak kedelai).

### 2.2. Pengujian Material

Agregat halus dan agregat kasar yang digunakan diuji propertis sifat fisik materialnya yang meliputi pengujian kadar air, kadar organik, kekekalan agregat, kadar lumpur, berat jenis (SSD), penyerapan air, keausan, modulus kehalusan dan kekekalan agregat. Pengujian yang dilakukan mengacu pada standar ASTM dan SNI. Adapun data sifat fisik material yang digunakan pada sampel beton dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Agregat halus dan agregat kasar yang digunakan telah memenuhi standar yang disyaratkan sesuai dengan Tabel 1. Agregat halus yang digunakan tergolong pasir kasar, sementara itu agregat kasar yang digunakan memiliki ukuran maksimum 20 mm. Plastik yang digunakan sebagai substitusi agregat halus pada penelitian ini adalah plastik *High Density Polyethylene* (HDPE) yang dicacah dengan ukuran 1,5

mm sampai 4,75 mm. Agregat kasar, agregat halus, dan cacahan plastik HDPE yang digunakan dapat dilihat pada **Gambar 1**.

**Tabel 1.** Sifat fisik material yang digunakan pada sampel beton

No	Parameter Pengujian	Agregat Halus	Standar Agregat Halus	Agregat Kasar	Standar Agregat Kasar	Acuan
1	Kadar Air (%)	3,1	3 - 5	3,3	3 - 5	[17]
2	Kadar Organik (-)	No. 2	< No. 3	-	-	[18]
3	Kekekalan Agregat (%)	8,1	< 12	8,5	< 12	[19]
4	Kadar Lumpur (%)	0,6	< 5	0,55	< 1	[20]
5	Berat Jenis (SSD) (-)	1,88	1,6 – 3,2	2,45	1,6 – 3,2	Agregat halus [21] Agregat kasar [22]
6	Penyerapan Air (%)	5,45	0,2 – 2,3	2,2	< 3	Agregat halus [21] Agregat kasar [22]
7	Keausan (%)	-	-	29,02	< 40	[23]
8	Modulus Kehalusan (-)	2,339	1,5-3,8	6,5	6,0–7,1	[24]



(a) Agregat Kasar

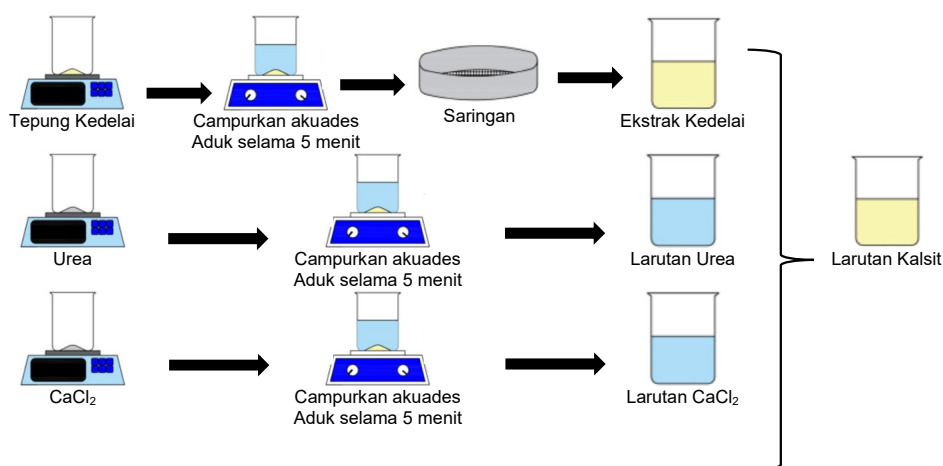
(b) Agregat Halus

(c) Cacahan Plastik

**Gambar 1.** Agregat yang digunakan dalam penelitian.

### 2.3. Pembuatan Larutan Kalsit

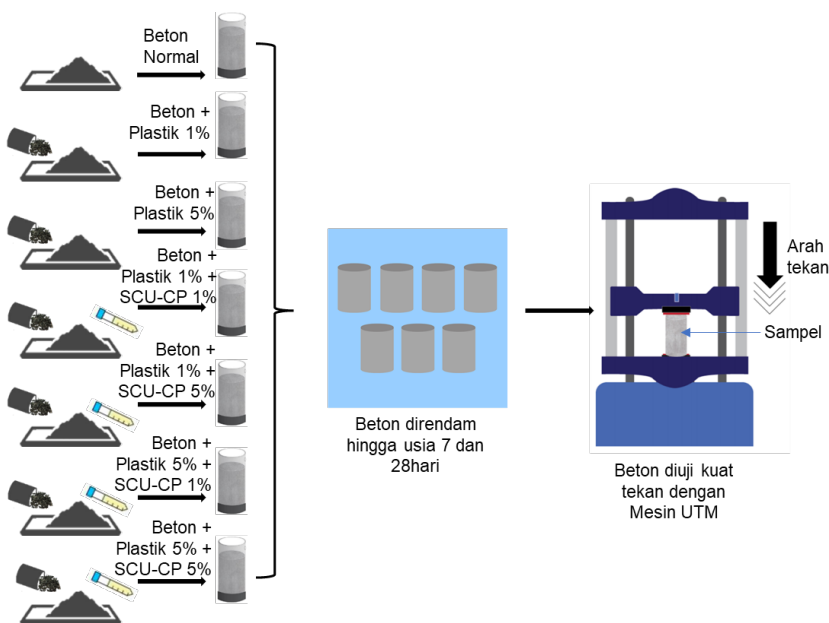
Pembuatan larutan kalsit, mengacu pada penelitian yang dikembangkan oleh Putra *et al.* (2021) dan Neupane *et al.* (2013) [15,25]. Larutan kalsit dibuat dengan perbandingan volume pengadukan 1: 1: 2 untuk  $\text{CaCl}_2$ , urea, dan kedelai [15]. Kalsium klorida dan Urea yang digunakan memiliki kemurnian level *laboratory grade*. Bubuk kedelai berupa makanan dari kedelai dengan kemurnian 100%, dan air destilasi. Urea,  $\text{CaCl}_2$  dan bubuk kedelai masing-masing dicampur dengan akuades dan diaduk dengan selama 5 menit. Larutan kedelai kemudian diekstrak dengan cara disaring menggunakan saringan nomor 200 (diameter 0,075 mm). Ekstrak kedelai yang telah disaring kemudian dicampurkan dengan larutan urea dan larutan  $\text{CaCl}_2$  hingga menjadi larutan kalsit [15,25]. Secara sederhana pembuatan larutan kalsit dapat dilihat pada **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Ilustrasi pembuatan larutan kalsit.

**2.4. Pembuatan dan Pengujian Beton**

Pembuatan sampel beton berdasarkan penyusunan material beton (mix design) pada Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No. 07/SE/M/2016 tentang pedoman tata cara penentuan campuran beton normal dengan semen *Ordinary Portland Cement* (OPC), *Portland Pozollan Cement* (PPC) dan *Portland Composite Cement* (PCC) [26]. Sampel dibuat dengan cetakan berupa silinder dengan diameter 5 cm dan tinggi 10cm. Sampel beton dibuat dengan 7 variasi yang meliputi beton normal (0% plastik, 0% kalsit), beton + plastik 1%, beton + plastik 5%, beton + plastik 1% + kalsit 1%, beton + plastik 1% + kalsit 5%, beton + plastik 5% + kalsit 1%, dan beton + plastik 5% + kalsit 5%. Masing-masing variasi beton akan dibuat sampel sebanyak 2 buah, sehingga terdapat 28 sampel. Sampel beton direncanakan memiliki kuat tekan 20,75 MPa dengan mutu K-250. Adapun campuran dan skematik Pengujian disajikan pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Ilustrasi pembuatan sampel dan pengujian kuat tekan beton.

Berdasarkan **Gambar 3**, sampel beton yang telah dibuat harus melewati *fase curing* atau perawatan. Perawatan dilakukan dengan merendam sampel di dalam bak perendaman. Selanjutnya beton diangkat dan dikeluarkan dari bekistingnya. Pengujian terhadap kuat tekan beton dilakukan menggunakan

*Universal Testing Machine* (UTM) dengan mengacu pada SNI-03-1974-2011 [27]. Mutu beton dapat diidentifikasi dengan mengetahui kuat tekan beton, semakin tinggi kuat tekan beton maka semakin tinggi mutu beton tersebut [28]. Permukaan atas sampel beton harus dibuat rata dan halus pada saat pengujian dan diuji usia 7 dan 28 hari. Beban pada saat runtuh dibagi luas benda uji memberikan kuat tekan beton.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Mix Design

Pembuatan proporsi beton atau *mix design* didasarkan pada penyusunan material beton (*mix design*) pada Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No. 07/SE/M/2016 tentang pedoman tata cara penentuan campuran beton normal dengan semen OPC, PPC dan PCC [26]. Kuat tekan beton yang direncanakan yaitu 20,75 MPa atau beton K-250. Beton dengan mutu K-250 termasuk beton mutu sedang yang biasanya digunakan untuk beton bertulang. Proporsi campuran material beton dapat dilihat pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Proporsi campuran material tiap m<sup>3</sup> dan tiap sampel

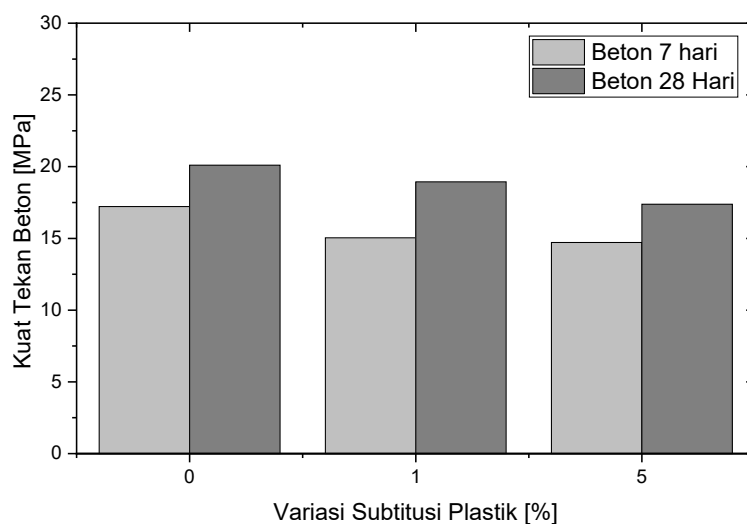
Variasi Sampel	Semen	Agregat Kasar	Agregat Halus	Air	Plastik HDPE	Larutan Kalsit
<b>Proporsi Campuran Tiap m<sup>3</sup></b>	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
Beton Normal	367,00	1054,00	526,70	182,50	0,00	0,00
<b>Proporsi Campuran Tiap 0,0002 m<sup>3</sup></b>	<b>(g)</b>	<b>(g)</b>	<b>(g)</b>	<b>(g)</b>	<b>(g)</b>	<b>(g)</b>
Beton Normal	73,40	210,80	105,34	36,50	0,00	0,00
Beton + Plastik HDPE 1%	73,40	210,80	104,29	36,50	1,05	0,00
Beton + Plastik HDPE 5%	73,40	210,80	100,07	36,50	5,27	0,00
Beton + Plastik HDPE 1% + Kalsit 1%	73,40	210,80	104,29	36,14	1,05	0,37
Beton + Plastik HDPE 1% + Kalsit 5%	73,40	210,80	104,29	34,68	1,05	1,83
Beton + Plastik HDPE 5% + Kalsit 1%	73,40	210,80	100,07	36,14	5,27	0,37
Beton + Plastik HDPE 5% + Kalsit 5%	73,40	210,80	100,07	34,68	5,27	1,83

Hasil perhitungan *mix design* menghasilkan proporsi campuran beton normal untuk setiap m<sup>3</sup>-nya. Berdasarkan perbandingan volume absolut, untuk proporsi campuran beton normal tiap 0,0002 m<sup>3</sup> dibutuhkan 73 g semen, 210,8 g agregat kasar, 105,34 g agregat halus, dan 336,5 g air. Hasil perhitungan tersebut menghasilkan proporsi agregat halus 35% dan agregat kasar 65% [26]. Agregat halus disubstitusi dengan cacahan plastik HDPE sebanyak 1% dan 5%, yaitu 1,05 g dan 5,27 g untuk tiap variasi sampelnya. Penambahan larutan kalsit dilakukan dengan variasi 1% dan 5% terhadap air masing-masing sebanyak 0,37 g dan 1,83 g. Penggunaan variasi persentase plastik dan larutan kalsit sebesar 1% dan 5% mengacu pada penelitian Kane *et al.* [29].

#### 3.2. Kuat Tekan Beton

Beton dengan variasi plastik memenuhi 65% kuat tekan rencana beton 7 hari, ketiga variasi mencapai 12,45 MPa [30]. Beton normal memiliki kuat tekan 17,2 MPa, beton + plastik 1% memiliki kuat tekan 15,0 MPa dan beton + plastik 5% memiliki kuat tekan 14,7 MPa. Beton normal/ tanpa plastik memiliki kuat tekan tertinggi dibandingkan dengan beton yang disubstitusi plastik dan beton dengan substitusi plastik 5% memiliki kuat tekan terendah. Hal ini menunjukkan semakin besar persentase substitusi plastik terhadap agregat halus, kuat tekan beton semakin menurun. Menurut Vanitha *et al.* (2015), kuat tekan beton plastik dengan substitusi 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10%, berturut-turut adalah 8,7 MPa, 8,5 MPa, 7 MPa,

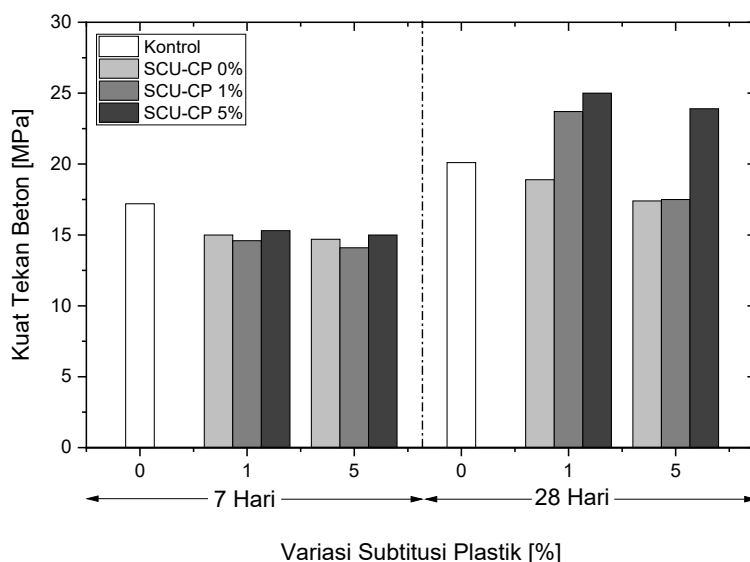
6 MPa, 4,5 MPa, dan 4 MPa [31]. Subtitusi plastik pada beton dapat menurunkan kuat tekan beton seiring meningkatnya persentase subtitusi plastik pada beton usia 7 hari. Adapun hasil pengujian kuat tekan beton dengan variasi plastik dapat dilihat pada **Gambar 4**. Beton dengan variasi plastik tidak memenuhi kuat tekan rencana 28 hari, yaitu 99% sebesar 19,8 MPa. Penambahan plastik pada beton menyebabkan kuat tekan menurun. Hal ini sesuai dengan penelitian Ullah *et al.* 2022 yang melakukan subtitusi plastik terhadap agregat halus dengan variasi 0%, 10%, 15% dan 20%. Kuat tekan menurun sebesar 2,6%, 9%, dan 13,6% seiring dengan bertambahnya persentase plastik [32,33].



**Gambar 4.** Grafik variasi subtitusi plastik terhadap kuat tekan beton.

Adapun kekuatan beton untuk setiap variasi tambahan larutan SCU-CP disajikan pada **Gambar 5**. Hasil pengujian pada beton 7 hari, beton dengan perlakuan memiliki kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan dengan beton normal. Beton dengan penambahan SCU-CP 1% mengakibatkan terjadinya penurunan kuat tekan. Penambahan SCU-CP 5% meningkatkan kuat tekan beton namun tidak dapat mengembalikan kekuatannya seperti semula/ sama dengan atau melebihi kekuatan beton normal. Kalsit pada usia 7 hari belum terbentuk sempurna, sehingga belum dapat meningkatkan kekuatan beton secara signifikan. Hal ini terjadi karena kristal kalsit belum terbentuk dengan baik hingga mengakibatkan terbentuknya *amorphous* (SCU-CP yang lemah). Amorf atau *Amorphous calcium carbonate* (ACC) adalah polimorf kalsium karbonat yang paling tidak stabil dalam kondisi normal [34]. *Amorphous* memiliki adhesi yang lemah dengan partikel lain [35].

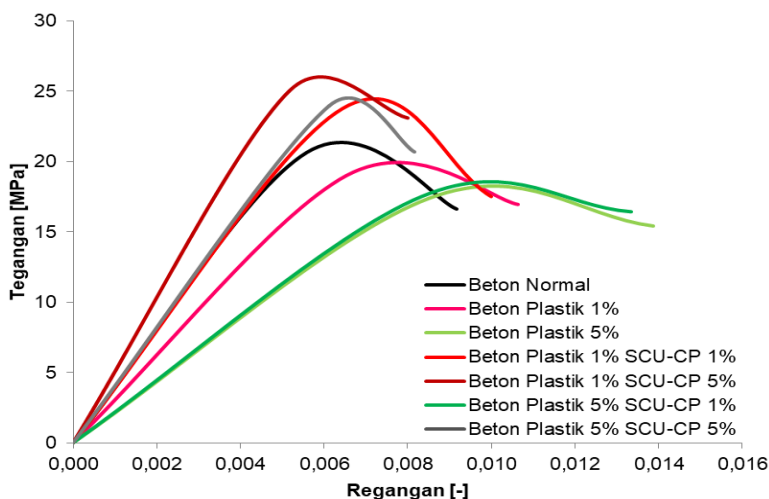
Beton Plastik 28 hari mengalami penurunan kuat tekan, namun kekuatan beton dapat ditingkatkan dengan penambahan kalsit. Beton plastik 1% yang ditambahkan SCU-CP 1% mengalami peningkatan kuat tekan menjadi 23,7 MPa (36% kuat tekan beton plastik 1%). Beton plastik 1% yang ditambahkan SCU-CP 5% mengalami peningkatan kuat tekan menjadi 25,0 MPa artinya 44% kuat tekan beton plastik 1%. Fenomena tersebut terjadi karena kalsit yang terbentuk dapat mengisi rongga yang ada antara plastik dan beton. Larutan kalsit atau  $\text{CaCO}_3$  memiliki ukuran partikel lebih halus dari semen yang berfungsi sebagai pengisi beton [36]. Peningkatan pada beton plastik 5% SCU-CP 1% tidak signifikan, karena kalsit yang ditambahkan sedikit (1%) sedangkan plastik yang disubtitusi lebih banyak (5%). Banyaknya rongga-rongga kecil yang terbentuk akibat pensubtitusian plastik 5% tidak dapat tertutup oleh SCU-CP 1%. Semakin banyaknya plastik yang disubtitusi, semakin banyak pula rongga-rongga kecil yang terbentuk antara plastik dan beton [7]. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Kane *et al.* (2021), yang menunjukkan beton plastik 5% dengan kalsit 1% mengalami peningkatan kuat tekan yang tidak signifikan [29].



**Gambar 5.** Pengaruh penambahan SCU-CP terhadap kuat tekan beton.

### 3.3. Tegangan Regangan Beton

Kurva tegangan-regangan pada beton merepresentasikan secara grafis perilaku beton pada saat pembebanan. Kurva didapatkan dari hubungan regangan pada berbagai interval tegangan. Tegangan dan regangan diperoleh berdasarkan hasil dari pengujian kuat tekan pada silinder beton umur 28 hari [37]. Adapun kurva tegangan-regangan hasil penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 6**.



**Gambar 6.** Kurva Tegangan - regangan pada beton.

Semua kurva menunjukkan karakter yang sama. Kurva beton terdiri dari rentang elastis, plastis, dan retak/ menurun [37]. Penambahan plastik pada beton menyebabkan tegangan pada beton menurun dan regangan meningkat. Akibat dari kondisi tegangan-regangan tersebut menyebabkan kurva menjadi landai dan modulus elastisitas menurun. Puncak Kurva menunjukkan nilai kekuatan beton, semakin tinggi kurva tegangan-regangan, semakin kuat beton [37]. Penelitian Casanova-del-Angel dan Vázquez-Ruiz (2012) menyimpulkan bahwa modulus elastisitas beton menurun ketika plastik ditambahkan. Modulus elastisitas semakin menurun ketika digunakan plastik dengan 7,5% dan 15% [39]. Kelandaian kurva beton dengan substitusi plastik menunjukkan beton plastik bersifat lentur yang artinya memiliki kuat tekan yang lemah dan kuat tarik yang lebih tinggi [37].

Penambahan kalsit pada beton meningkatkan modulus elastisitas, terlihat pada beton plastik 1 lebih landai dari beton plastik 1% SCU-CP 1% dan beton plastik 1% SCU-CP 1% lebih landai dari beton plastik 1% SCU-CP 5%. Kane *at al.* menyebutkan penambahan kalsit pada beton plastik dapat meningkatkan modulus elastisitas, modulus elastisitas seiring penambahan kalsit. Beton dengan proporsi plastik 5% ditambahkan kalsit 1% kenaikan modulus elastisitas tidak signifikan. Berdasarkan kurva tegangan-regangan pada **Gambar 6.**, modulus elastisitas tertinggi terjadi ketika beton plastik 1% SCU-CP 5. Bertambah tegaknya kurva tegangan-regangan menjadikan beton lebih getas. Beton yang getas memiliki kuat tekan yang tinggi namun kuat tarik yang rendah [37]. Kurva yang lebih tegak pada beton plastik dengan SCU-CP 5% menunjukkan mutu beton lebih tinggi. Semakin tegak kurva tegangan-regangan beton artinya mutu beton semakin tinggi [40].

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa Substitusi cacahan plastik *highdensity polyethylene* (HDPE) menurunkan kuat tekan beton 5,5% dan 8,2% pada substitusi 1% dan 5%. Semakin banyak agregat halus yang disubstitusi semakin menurun kuat tekan beton plastik. Substitusi plastik menyebabkan tegangan menurun dan beton menjadi lebih lentur. Sementara itu, penambahan kalsit pada beton plastik dapat meningkatkan tegangan dan kuat tekan beton hingga 44%. Kalsit dapat mengisi rongga-rongga kecil pada beton plastik, semakin banyak larutan kalsit yang ditambahkan pada beton artinya banyak endapan kalsit yang terbentuk antara plastik dan beton. Peningkatan terangan pada regangan yang sama juga terjadi dengan penambahan SCU-CP, hal ini terlihat dari kurva yang tegak yang artinya modulus elastisitas meningkat dan mutu beton semakin bagus. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan larutan SCU-CP dapat meningkatkan ikatan antara plastik dan mortar yang berdampak pada naiknya kuat tekkan beton.

#### Daftar Pustaka

- [1] Muyiddin. Covid-19, New Normal dan Perencanaan Pembangunan di Indonesia. *Indones J Dev Plan* 2022;4:240–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.36574/jpp.v4i2.118>.
- [2] Nugraha P, Antoni. *Teknologi Beton*. Yogyakarta (ID): ANDI; 2007.
- [3] Putra H. *Beton sebagai Material Konstruksi. Pertama*. Yogyakarta (ID): Gre Publishing; 2021.
- [4] [SIPSN] Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. *Capaian Kinerja Pengelolaan Sampah pada tahun 2021 yang terdiri dari 218 Kabupaten/kota se-Indonesia*. Jakarta (ID): Direktorat Jenderal Pengelolaan Sampah, Limbah dan B3; 2021.
- [5] Wahyudi J, Prayitno HT, Astuti AD. The Utilization of Plastic Waste as Raw Material for Producing Alternativev Fuel. *J Litbang* 2018;XIV:58–67.
- [6] Soebandono B, Pujianto A, Kurniawan D. Perilaku Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton Campuran Limbah Plastik HDPE (Compressive and Tensile Strength Behavior of Concrete Filled with HDPE Waste). *J Ilm Semesta Tek* 2013;16:76–82.
- [7] Rahmadiny A, Bargreitha N, Pamungkas TAP, Chandra RR, Setiawan AA. Penggunaan Material Limbah High Density Polyetylene (HDPE) Sebagai Bahan Pengganti Agregat Kasar Pada Campuran Beton. *WIDYAKALA J* 2019;6:6–11. <https://doi.org/10.36262/widyakala.v6i0.161>.
- [8] Masyrurroh A, Rahmawati I. Pembuatan Recycle Plastik HDPE menjadi Asbak. *J ABDIKARYA* 2021;3:53–63.
- [9] Azwanda, Samsunan, Rangga HD. Pengaruh Substitusi Bahan Anorganik Plastik terhadap Kuat Tekan Beton Normal. *J Tek Sipil Dan Teknol Konstr* 2017;52:52–63.



- [10] Mulyadi A, Diawarman, Ismail D. Pengaruh Penambahan Limbah Plastik terhadap Kuat Tekan Mutu Beton K-175. *J Tek Sipil UNPAL* 2018;8:68–75.
- [11] Sangal GS. Study the effect of plastic waste on strength of concrete. *Int J Adv Res Dev* 2018;3:36–9.
- [12] Yasuhara H, Hayashi K, Okamura M. Evolution in mechanical and hydraulic properties of calcite-cemented sand mediated by biocatalyst. *Geotech Spec Publ* 2011:3984–92. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)407](https://doi.org/10.1061/41165(397)407).
- [13] Neupane D, Yasuhara H, Kinoshita N, Ando Y. Distribution of mineralized carbonate and its quantification method in enzyme mediated calcite precipitation technique. *Soils Found* 2015;55:447–57. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.02.018>.
- [14] Baiq HS, Yasuhara H, Kinoshita N, Putra H, Johan E. Examination of Calcite Precipitation Using Plant-Derived Urease Enzyme for Soil Improvement. *Int J GEOMATE* 2020;19:231–7. <https://doi.org/10.21660/2020.72.9481>.
- [15] Putra H, Erizal E, Sutoyo S, Simatupang M, Yanto DHYD, Haluoleo U. Improvement of organic soil shear strength through calcite precipitation method using soybeans as bio-catalyst. *Crystals* 2021;11:1044. <https://doi.org/10.3390/cryst11091044>.
- [16] Zulfikar RA, Putra H, Yasuhara H. The Utilization of Soybean as a Catalyst Material in Enzyme-Mediated Calcite Precipitation (EMCP) for Crack Healing Concrete. *J Civ Eng Forum* 2021;7:59–70. <https://doi.org/10.22146/jcef>.
- [17] [BSN] Badan Standardisasi Nasional. SNI 03-1971-1990 Metode Pengujian Kadar Air Agregat. Jakarta (ID): Badan Standardisasi Nasional; 1990.
- [18] [ASTM] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete. Pennsylvania (US): American Society for Testing and Materials; 2011.
- [19] [BSN] Badan Standardisasi Nasional. SNI 3407:2008 Cara Uji Sifat Kekekalan Agregat dengan Cara Perendaman Menggunakan Larutan Natrium Sulfat atau Magnesium Sulfat. Jakarta (ID): Badan Standardisasi Nasional; 2008.
- [20] [BSN] Badan Standardisasi Nasional. SNI S-04-1989-F Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A. Bandung (ID): Badan Standardisasi Nasional; 1989.
- [21] [BSN] Badan Standardisasi Nasional. SNI 1970-2008 Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus. Jakarta (ID): Badan Standardisasi Nasional; 2008.
- [22] [BSN] Badan Standardisasi Nasional. SNI 1969-2008 Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar. Jakarta (ID): Badan Standardisasi Nasional; 2008.
- [23] [BSN] Badan Standardisasi Nasional Indonesia. SNI 2417-2008 Cara uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles. Jakarta (ID): Badan Standardisasi Nasional; 2008.
- [24] [ASTM] American Society for Testing and Materials. ASTM C33-86. Standard Specification for Concrete Aggregates. Pennsylvania (US): American Society for Testing and Materials; 1986.
- [25] Neupane D, Yasuhara H, Kinoshita N, Unno T. Applicability of enzymatic calcium carbonate precipitation as a soil-strengthening technique. *J Geotechnol Geoenvironmental Eng* 2013;139:2201–11.
- [26] [KemenPUPR] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor: 07/SE/M/2016 tentang Pedoman Tata Cata

- Penentuan Campuran Beton Normal dengan Semen OPC, PPC dan PCC. Jakarta (ID): Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; 2016.
- [27] [BSN] Badan Standardisasi Nasional. SNI 1974-2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder. Jakarta (ID): Badan Standardisasi Nasional; 2011.
- [28] Mulyono T. Teknologi Beton. Yogyakarta (ID): Andi Offset; 2004.
- [29] Kane S, Thane A, Espinal M, Lunday K, Armağan H, Phillips A, et al. Biomineralization of plastic waste to improve the strength of plastic-reinforced cement mortar. *Materials (Basel)* 2021;14:1–19. <https://doi.org/10.3390/ma14081949>.
- [30] Mishra G. Why do we test concrete compressive strength after 28 days? *Constr* 2021.
- [31] Vanitha S, Natarajan V, Praba M. Utilisation of waste plastics as a partial replacement of coarse aggregate in concrete blocks. *Indian J Sci Technol* 2015;8:1–6. <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i12/54462>.
- [32] Ullah K, Qureshi I, Ahdmad T, Ahmad A. Evaluating The Mechanical and Durability Performance of Concrete Utilizing Plastic Fine Aggregate. 3rd Conf. Sustain. Civ. Eng., Islamabad Pakistan: Department of Civil Engineering Capital University of Science and Technology; 2021.
- [33] Ullah K, Qureshi I, Ahmad A, Ullah Z. Substitution potential of plastic fine aggregate in concrete for sustainable productio. *Structures* 2022;35:622–37. <https://doi.org/DOI:10.1016/j.istruc.2021.11.003>.
- [34] Radha A V., Forbes TZ, Killian CE, Gilbert PUPA, Navrotsky A. Transformation and crystallization energetics of synthetic and biogenic amorphous calcium carbonate. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2010;107:16438–43. <https://doi.org/10.1073/pnas.1009959107>.
- [35] Abdel-Aal N, Sawada K. Inhibition of adhesion and precipitation of CaCO<sub>3</sub> by aminopolyphosphonate. *J Cryst Growth* 2003;256:188–200. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(03\)01354-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(03)01354-X).
- [36] Ali M, Abdullah MS, Saad SA. Effect of Calcium Carbonate Replacement on Workability and Mechanical Strength of Portland Cement Concrete. *Adv Mater Res* 2015;1115:137–41. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1115.137>.
- [37] Hamakaree MI. Stress-Strain Curve for Concrete. [internet]. [diacu 2022 Juni 19]. Tersedia dari <https://theconstructor.org/concrete/stress-strain-curve-concrete/6159/#:~:text=Stress strain curve of concrete,curve is of major interest>; 2021.
- [38] Casanova-del-Angel F, Vázquez-Ruiz JL. Manufacturing Light Concrete with PET Aggregate. *ISRN Civ Eng* 2012;2012:1–10. <https://doi.org/10.5402/2012/287323>.
- [39] Ferreira L, De Brito J, Saikia N. Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. *Constr Build Mater* 2012;36:196–204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.098>.
- [40] Muin RB, Alva S, Patty AH, Fidi, Arianti AD. Pengontrolan Retak pada Beton dengan Optimalisasi Interaksi Komposit Beton pada Interface Zone. *J Teor Dan Penerapan Bid Rekayasa Sipil* 2020;27:61–70.