

Perbaikan Beton Plastik PET dengan Metode *Soybean Crude Urease-Calcite Precipitation* (SCU-CP)

Tiara Aresti^{(1,a)*}, Mega Nurhanisa⁽¹⁾, dan Azrul Azwar⁽¹⁾

⁽¹⁾Program Studi Fisika, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Indonesia, 78124

Email : ^(a*)tiaraarsti18@gmail.com

Disubmisi: 20 Maret 2025, Direvisi: 31 Januari 2026, Diterima: 11 Februari 2026

Abstract.

Background: Lightweight concrete produced by substituting 5% of polyethylene terephthalate (PET) plastic is used as a fine aggregate replacement, along with a soybean-based calcite solution prepared using the Soybean Crude Urease - Calcite Precipitation (SCU-CP) method, with calcite solution variations of 0%, 5%, and 10%.

Aims: This study aims to evaluate the production outcomes of lightweight concrete based on PET plastic waste and calcite solution using the SCU-CP method.

Methods: Concrete samples were prepared in two forms: cubic concrete for compressive strength testing and beam concrete for thermal conductivity testing.

Results: The results indicate that a 5% substitution of PET plastic reduces the density by 12.8% and compressive strength by 43.3% compared to normal concrete, but enhances the thermal insulation properties with a 53% reduction in thermal conductivity. Meanwhile, the substitution of calcite solution leads to an increase in density, compressive strength, and thermal conductivity compared to PET concrete without calcite solution. The 5% and 10% calcite solution substitutions increase density by 10.5% and 12.8%, compressive strength by 9.4% and 13.6%, and thermal conductivity by 200% and 375%, respectively.

Conclusion: The calcite solution improves the density and compressive strength of PET concrete; however, the obtained compressive strength values do not meet the standards for structural lightweight concrete but are classified as non-structural lightweight concrete. The resulting thermal conductivity values are low and fall within the lightweight concrete category. Due to its low thermal conductivity, this concrete has the potential to be used as a non-structural material, such as wall cladding, to reduce heat transfer.

Keywords: lightweight concrete, recycled PET, SCU-CP method, concrete compressive strength, concrete thermal conductivity.

Abstrak.

Latar Belakang: Pembuatan beton ringan dengan substitusi plastik *polyethylene terephthalate* (PET) sebanyak 5% sebagai pengganti agregat halus, bersama larutan kalsit berbahan dasar kedelai menggunakan metode *Soybean Crude Urease – Calcite Precipitation* (SCU-CP) dengan variasi larutan kalsit 0%, 5%, dan 10%.

Tujuan: Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji hasil pembuatan beton ringan berbasis limbah plastik PET dan larutan kalsit menggunakan metode SCU-CP.

Metode: Sampel beton dibuat menjadi dua bentuk yaitu beton kubus untuk uji kuat tekan dan beton balok untuk uji konduktivitas termal.

Hasil: Hasil menunjukkan bahwa substitusi plastik PET 5% mengurangi densitas 12,8% dan kuat tekan 43,3% dari beton normal, tetapi meningkatkan sifat isolasi termal beton dengan penurunan konduktivitas termal 53%. Sedangkan substitusi larutan kalsit menyebabkan peningkatan densitas, kuat tekan, dan konduktivitas termal dibanding beton PET tanpa larutan kalsit. Substitusi larutan kalsit 5% dan 10% berturut-turut meningkatkan densitas 10,5% dan 12,8%; kuat tekan 9,4% dan 13,6%; serta konduktivitas termal 200% dan 375%.

Kesimpulan: Larutan kalsit memperbaiki densitas dan kuat tekan beton PET, namun nilai kuat tekan yang dihasilkan belum memenuhi standar sebagai beton ringan struktural tetapi tergolong sebagai beton ringan non-struktural. Nilai konduktivitas termal yang diperoleh tergolong rendah dan termasuk ke dalam jenis beton ringan. Karena memiliki konduktivitas termal yang rendah, beton ini berpotensi digunakan sebagai material non-struktural, seperti pelapis dinding untuk mengurangi perpindahan panas.

Kata kunci: beton ringan, plastik PET, metode SCU-CP, kuat tekan beton, konduktivitas termal beton.

PENDAHULUAN

Pesatnya pertumbuhan sektor konstruksi membuat kebutuhan material bangunan yang ringan, efisien, dan ramah lingkungan semakin meningkat. Beton ringan struktural merupakan salah satu solusi yang kini banyak diterapkan karena keunggulannya lebih ringan dibandingkan beton normal [1], sehingga dapat mengurangi beban struktural, biaya transportasi, dan waktu pemasangan. Beton ringan struktural merupakan beton yang mengandung campuran pengganti agregat halus, dengan ketentuan massa jenis harus memenuhi standar. Pemilihan beton dengan kekuatan yang sesuai sangat penting dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi. Khususnya untuk beton dengan tujuan sebagai dinding utama, harus memiliki nilai kuat tekan tinggi untuk memastikan struktur yang aman, tahan lama, dan efisien.

Tabel 1. Klasifikasi nilai densitas beton [2,3]

Tipe Beton	Densitas (kg/m ³)	Standar Acuan
Beton normal	2200 - 2500	SNI 03-2834-2000
Beton ringan struktural	1400 - 1850	SNI 03-3449-2002
Beton ringan	< 1400	SNI 03-3449-2002

Stabilitas termal yang baik juga sangat diperlukan beton terutama pada bangunan di lingkungan dengan perubahan suhu

signifikan atau membutuhkan efisiensi termal tinggi seperti negara dengan iklim tropis yaitu Indonesia [4].

Tabel 2. Klasifikasi nilai konduktivitas termal beton [5]

Tipe Beton	Konduktivitas Termal (W/m.K)
Beton normal	1,1 – 8,6
Beton ringan struktural	0,58 – 1,05
Beton ringan	0,2 - 1,9

Aplikasi beton ringan struktural dengan substitusi limbah plastik sebagai pengganti agregat halus bisa menjadi inovasi yang baik untuk bangunan rumah berkelanjutan. Pemilihan jenis plastik diperlukan untuk menghasilkan beton berkualitas, karena kemampuan beton dalam menyerap dan menahan panas sangat penting untuk manajemen termal suatu bangunan. Plastik *polyethylene terephthalate* (PET) memiliki konduktivitas termal lebih rendah dibandingkan jenis plastik lain dan penggunaannya pada beton berpotensi mengurangi konduktivitas termal [6]. Rata-rata massa jenis limbah plastik PET adalah 850,00 kg/m³ [7], sehingga tergolong ke dalam jenis agregat halus karena massa jenisnya < 1100 kg/m³ [3]. Plastik ini termasuk ke dalam jenis termoplastik, dapat dipanaskan dan dibentuk ulang berkali-kali tanpa mengubah sifat kimianya. Plastik jenis ini paling sering digunakan, terutama pada botol kemasan air mineral, dan memiliki

sejumlah keunggulan lainnya seperti sifat termal yang rendah, kelenturan, ketahanan terhadap mikroorganisme, bobot yang ringan, dan ketahanan terhadap korosi.

Namun, peningkatan jumlah plastik yang digunakan menyebabkan penurunan nilai kuat tekan [5,8]. Kuat tekan beton merupakan kemampuan beton dalam menahan beban tekan untuk mengetahui tingkat kualitas beton tersebut. Maka diperlukan perhitungan komposisi campuran bahan beton dengan baik karena akan mempengaruhi hasil akhir suatu beton.

Tabel 3. Klasifikasi nilai kuat tekan beton [1,3]

Tipe Beton	Kuat Tekan (MPa)	Standar Acuan
Beton normal	> 21	SNI 2847:2019
Beton ringan struktural	17,24 - 41,36	SNI 03-3449-2002
Beton ringan	< 17,24	SNI 03-3449-2002

Berdasarkan penelitian terdahulu, beton dengan persentase plastik PET 5% dapat meningkatkan kuat tekan dan pada persentase 10%, 15%, dan 20% terjadi penurunan kuat tekan [9]. Sehingga plastik PET dengan persentase 5% lebih disarankan untuk substitusi agregat halus. Permukaan plastik yang licin dan halus menyebabkan daya rekat antar partikel penyusun beton menjadi lebih lemah. Diperlukan cara untuk memperbaiki karakteristik beton plastik tersebut, salah satunya menggunakan pengendapan kalsit. Metode *Soybean Crude Urease - Calcite Precipitation* (SCU-CP) adalah metode perbaikan beton dengan cara pengendapan kalsit dari bahan utama kedelai murni, untuk membuat permukaan plastik menjadi kasar dan ikatan antar material menjadi lebih kuat [8]. Kalsit akan menjadi pengikat antara plastik dan material lainnya dalam komposisi beton. Berdasarkan

penelitian terdahulu, persentase penambahan larutan kalsit sebanyak 5% berpotensi lebih efektif dibandingkan persentase penambahan larutan kalsit sebanyak 1% [8,10]. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa peningkatan jumlah larutan kalsit yang ditambahkan akan meningkatkan jumlah endapan kalsit yang terbentuk antara plastik dan beton. Metode perawatan beton juga penting dilakukan untuk menghasilkan beton berkualitas. Semakin lama usia perawatan beton maka beton akan semakin mengeras hingga mencapai target kekuatan (f_c) dan akan sempurna setelah 28 hari masa perawatan [11,12].

Dengan demikian, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh substitusi larutan kalsit terhadap karakteristik beton plastik PET yaitu densitas, kuat tekan, dan konduktivitas termalnya, serta potensi penerapannya dalam konstruksi bangunan ramah lingkungan, ekonomis, dan berkelanjutan pada fabrikasi beton dari plastik PET 5% dengan substitusi larutan kalsit 0%, 5%, dan 10% menggunakan metode SCU-CP.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi eksperimental untuk menganalisis kemampuan larutan kalsit dalam memperkuat ikatan komposisi material beton plastik PET. Penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis dampak penggunaan plastik PET sebagai pengganti agregat halus terhadap beberapa parameter penting, yaitu densitas, kuat tekan, dan konduktivitas termal. Selain itu, dilakukan variasi substitusi larutan kalsit untuk mengetahui perubahan nilai ketiga parameter tersebut.

Bahan dan Alat

Bahan dan alat utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- a. **Bahan:** air, akuades, bubuk kedelai murni, urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), kalsium klorida (CaCl_2), batu pecah, pasir alami, plastik PET dari botol mineral, dan semen PCC.
- b. **Alat:** cetakan beton (ukuran $15 \times 15 \times 15$) cm untuk beton kubus; ukuran $12,6 \times 12,6 \times 1,3$ cm untuk beton balok), gelas kimia, gelas ukur, *grinder*, gunting, jangka sorong, mistar, magnetic stirrer, pipet tetes, saringan no. 6 dan 200, sendok semen, stopwatch, timbangan digital, timbangan duduk, thermal conductivity apparatus untuk uji termal, Universal Testing Machine (UTM) untuk uji kuat tekan, dan wadah.

Prosedur penelitian sebagai berikut:

Perancangan Sampel Beton

Rancangan komposisi material beton atau mix design beton yang digunakan pada penelitian ini akan mengacu pada SNI 03-2834-2000. Akan dibuat 2 bentuk sampel, sampel kubus berukuran $150 \times 150 \times 150$ mm untuk uji kuat tekan dan sampel balok berukuran $126 \times 126 \times 13$ mm untuk uji konduktivitas termal. Berdasarkan SNI

2847:2019, pada penelitian ini sampel beton dirancang dengan mutu 21 MPa sesuai dengan fungsi sebagai dinding struktural.

Prosedur Penelitian

Nilai deviasi standar 7 MPa, nilai ini adalah batas kuat tekan yang disyaratkan dalam SNI 03-2834-2000 sebagai penilaian konsistensi produksi dan kontrol kualitas. Faktor air semen ditetapkan 0,48, nilai ini akan berpengaruh terhadap kinerja spesifik yaitu kekuatan, *durability* (keawetan), dan *workability* (kemudahan pengerjaan). Penggunaan air berlebihan akan mempermudah pengerjaan, namun dapat menurunkan kekuatan beton [13]. Nilai slump yang akan digunakan pada beton adalah 75 – 100 mm. Menurut Kardiyono (2007) dalam Putra dan Amelia (2022), rentang nilai slump tersebut sesuai untuk elemen-elemen struktural seperti pelat, balok, kolom, dan dinding [8]. Nilai-nilai slump ditentukan, maka selanjutnya dibuat rancangan pencampuran bahan sampel beton.

Tabel 4. Rancangan komposisi material sampel beton kubus

Variasi Sampel Beton		Semen (kg)	Air (kg)	Batu Pecah (kg)	Pasir (kg)	Plastik (kg)	Larutan Kalsit (kg)
V1	Kontrol	1,31	0,575	3,864	2,309	0	0
V2	PET 5% + Larutan kalsit 0%	1,31	0,575	3,864	2,194	0,115	0
V3	PET 5% + Larutan kalsit 5%	1,31	0,546	3,864	2,194	0,115	0,029
V4	PET 5% + Larutan kalsit 10%	1,31	0,517	3,864	2,194	0,115	0,058

Tabel 5. Rancangan komposisi material sampel beton balok

Variasi Sampel Beton		Semen (kg)	Air (kg)	Batu Pecah (kg)	Pasir (kg)	Plastik (kg)	Larutan Kalsit (kg)
V1	Kontrol	0,0771	0,034	0,2273	0,136	0	0

V2	PET 5% + Larutan kalsit 0%	0,0771	0,034	0,2273	0,129	0,007	0
V3	PET 5% + Larutan kalsit 5%	0,0771	0,032	0,2273	0,129	0,007	0,0017
V4	PET 5% + Larutan kalsit 10%	0,0771	0,03	0,2273	0,129	0,007	0,0034

Persiapan Plastik PET

- Botol mineral bekas dari plastik PET dibersihkan dan dikeringkan.
- Botol kemudian dipotong menjadi lebih kecil untuk mempermudah proses penghalusan bahan.
- Cacahan botol plastik digiling menggunakan grinder dan diayak menggunakan saringan no. 6 hingga bahan berukuran sesuai dengan standar kehalusan agregat < 5 mm.

Pembuatan Larutan Kalsit

Pembuatan larutan kalsit dengan metode SCU-CP mengikuti prosedur penelitian terdahulu. Ada dua proses yang dilakukan yaitu pembuatan larutan kedelai pada konsentrasi 20 g/L dan pembuatan larutan reagen terdiri dari larutan urea 1 mol/L dan larutan CaCl_2 1 mol/L [8,14,15].



Gambar 1. Proses pembuatan larutan kalsit

Pembuatan dan Perawatan Sampel Beton

- Semua bahan yang telah disiapkan dibersihkan terlebih dahulu, kemudian ditimbang sesuai dengan rancangan

komposisi material sampel beton pada Tabel 4 dan Tabel 5.

- Campurkan semua bahan yang telah disiapkan, lalu aduk hingga semua bahan tercampur merata. Setelah itu adonan dimasukkan kedalam cetakan beton bentuk kubus dan balok.
- Proses pencetakan sampel dilakukan hingga sampel kering atau sekitar 24 jam.
- Beton yang sudah kering dikeluarkan dari cetakan.
- Dilanjutkan dengan proses curing atau perawatan dengan merendam sampel hingga seluruh permukaannya tertutup air selama 28 hari.
- Sampel beton harus tetap dalam kondisi lembab pada temperatur ruang sebelum dilakukan pengujian [16].

Pengujian Sampel Beton

Sebagai indikator keberhasilan fabrikasi beton, maka dilakukan beberapa pengujian sebagai berikut:

a. Pengujian Densitas

Densitas dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

dimana ρ = densitas (kg/m^3), m = massa kering beton setelah perawatan (kg), dan V = volume beton (m^3).

b. Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan sampel beton dilakukan dengan mengaplikasikan alat *Universal Testing Machine* (UTM) dan dihitung berdasarkan persamaan SNI 03-1974-1990 [17].

$$f_c = \frac{p_r}{A} \quad (2)$$

dimana f_c = kuat tekan (MPa), p_r = beban maksimum (N), dan A = luas bidang permukaan (mm^2).

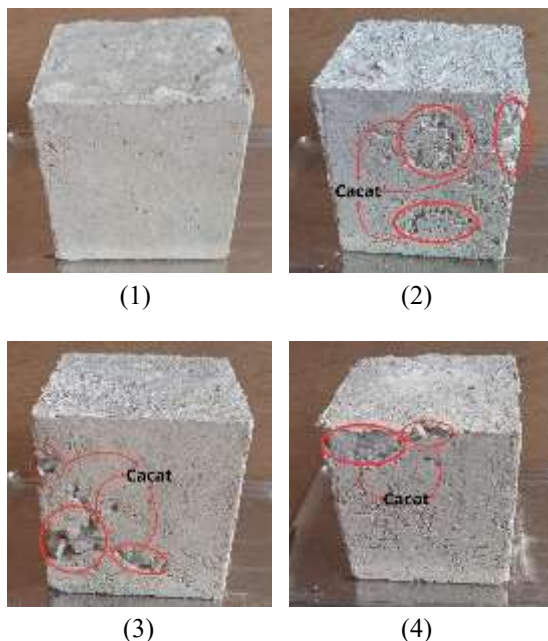
c. Pengujian Konduktivitas Termal

Pengujian konduktivitas termal sampel beton dilakukan dengan mengaplikasikan alat *thermal conductivity apparatus* dan dihitung berdasarkan persamaan PASCO *scientific* [18].

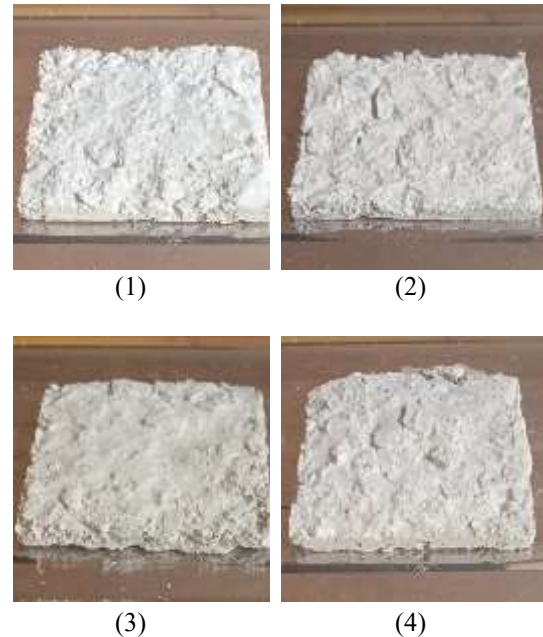
$$k \text{ (cal / s.cm.}^\circ\text{C)} = \frac{(R_0) \cdot \left(80 \frac{\text{cal}}{\text{g}}\right) \cdot (h)}{(A) \cdot (\Delta T)} \quad (3)$$

dimana k = konduktivitas termal ($\text{cal / s.cm.}^\circ\text{C}$), R_0 = laju pencairan es karena perbedaan suhu, h = ketebalan sampel (cm), A = luas bidang permukaan es (cm^2), ΔT = titik didih air (100°C di permukaan laut) - 0°C), dan konversi $1 \text{ cal / s.cm.}^\circ\text{C} = 418,4 \text{ W/m.K}$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

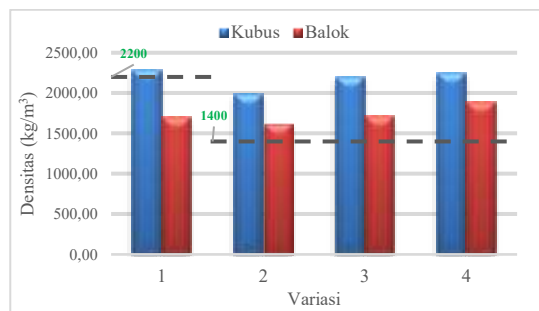


Gambar 2. Sampel beton bentuk kubus



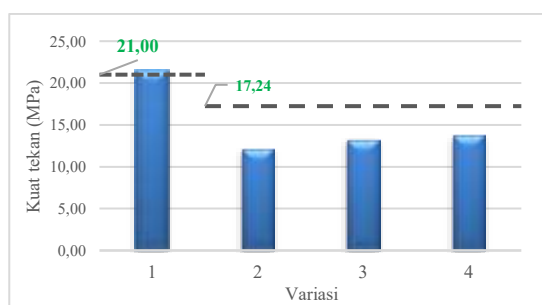
Gambar 3. Sampel beton bentuk balok

Hasil sampel beton pada penelitian ini terdapat cacat di beberapa bagian. Secara visual cacat dapat dilihat jelas pada sampel beton bentuk kubus. Cacat tersebut diakibatkan oleh penambahan plastik PET yang membuat komposisi bahan pada saat pencampuran sukar sekali menyatu dan tersebar rata. Sifat plastik yang tidak menyerap air (hidropobik) dan permukaannya yang licin membuat ikatan antar material menjadi lemah. Hal ini dibuktikan dengan visual beton variasi 1 tanpa plastik PET yang minim cacat. Namun larutan kalsit yang ditambahkan pada komposisi material beton membuat cacat pada beton berkurang. Hal ini terbukti dengan visual pada sampel beton kubus variasi 3 dan 4 yang memiliki lebih sedikit cacat dibanding sampel beton kubus variasi 2. Semakin bertambahnya komposisi larutan kalsit, maka ikatan antar material semakin kuat. Hal ini mengakibatkan tekstur pada sampel beton semakin baik.



Gambar 4. Nilai densitas sampel beton

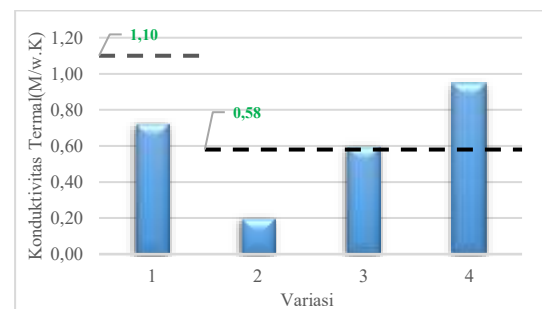
Standar densitas sampel beton sesuai dengan Tabel 1. Sampel beton balok variasi 1 tidak memenuhi standar yang ditetapkan. Ketidaksesuaian ini disebabkan oleh perbedaan bentuk agregat kasar pada kedua jenis sampel tersebut. Semakin bulat agregat kasar yang digunakan maka semakin baik densitasnya, sebaliknya semakin bersudut agregat kasar maka semakin rendah densitasnya [19]. Agregat kasar yang digunakan untuk sampel balok cenderung pipih dan runcing, karena tebal sampel hanya 13 mm. Penggunaan plastik PET dan larutan kalsit juga berpengaruh terhadap nilai densitas. Terjadi penurunan densitas pada variasi 2 dengan substitusi PET 5% dibanding sampel kontrol. Dan peningkatan yang signifikan pada variasi 3 dan variasi 4. Hal ini sejalan dengan volume komposisi larutan kalsit yang ditambahkan.



Gambar 5. Nilai kuat tekan sampel beton

Hasil pengujian kuat tekan sampel beton pada Gambar 5 menunjukkan jika sampel belum memenuhi standar kuat tekan sesuai

dengan Tabel 3. Plastik PET dapat mengurangi kuat tekan sampel secara drastis. Hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan jika plastik dapat menurunkan kuat tekan [5,8]. Substitusi larutan kalsit dapat meningkatkan kuat tekan sampel beton, namun nilai kuat tekan yang dihasilkan belum memenuhi standar. Kondisi ini cukup baik, namun diperlukan persentase larutan kalsit yang sesuai untuk mendapatkan hasil kuat tekan beton yang optimal. Penelitian terdahulu mendukung hal ini dengan menyatakan bahwa kalsit membuat ikatan antar material menjadi lebih kuat [8] dan peningkatan jumlah kalsit pada material beton akan meningkatkan nilai kuat tekan yang dihasilkan [8,10].



Gambar 6. Nilai konduktivitas termal sampel beton

Hasil pengujian konduktivitas termal sampel beton variasi 1 dan 2 tidak memenuhi target sebagai beton ringan struktural sesuai dengan Tabel 2. Sedangkan beton variasi 3 dan 4 memenuhi target. Plastik PET membuat konduktivitas termal beton menurun. Hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa plastik PET berpotensi untuk menurunkan termal beton [6]. Beton variasi 3 dan 4 juga menunjukkan peningkatan yang signifikan terhadap nilai konduktivitas termal sejalan dengan jumlah larutan kalsit yang ditambahkan. Hal ini membuktikan jika

larutan kalsit membuat material beton semakin padat sehingga konduktivitas termalnya meningkat. Kondisi beton dengan konduktivitas termal yang rendah lebih baik untuk stabilitas termal suatu bangunan [6]. Maka, sampel beton variasi 2 tanpa tambahan larutan kalsit adalah kondisi termal yang baik untuk suatu bangunan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa plastik PET menyebabkan penurunan densitas, kuat tekan, dan konduktivitas termal. Meskipun densitasnya menurun, sampel beton plastik PET masih tergolong ke dalam beton ringan struktural sesuai dengan standar. Namun, untuk kuat tekan dan konduktivitas termal nilainya masih rendah dan tergolong ke dalam beton ringan non-struktural. Hal tersebut kurang baik untuk kuat tekan, tetapi cukup baik untuk konduktivitas termal. Karena beton harus kuat menahan beban untuk mencapai kuat tekan sebagai fungsi dinding struktural. Sedangkan nilai termal yang rendah dapat memperbaiki sifat insulasi termal pada beton, sehingga baik untuk aplikasinya sebagai dinding.

Substitusi larutan kalsit menggunakan metode SCU-CP membuat beton plastik PET menjadi lebih padat dan ikatan antar material menjadi lebih kuat, sehingga mengakibatkan densitas, kuat tekan, dan konduktivitas termal beton meningkat. Nilai densitas yang diperoleh dari beton plastik PET dengan larutan kalsit meningkat signifikan seiring peningkatan komposisi larutan yang ditambahkan dan memenuhi standar yang ditetapkan untuk beton ringan struktural. Namun nilai kuat tekannya belum memenuhi standar untuk beton ringan struktural, sehingga tidak dapat digunakan sebagai dinding utama bangunan. Nilai konduktivitas termalnya juga meningkat tetapi tetap tergolong rendah dan masih bisa

diklasifikasikan ke dalam golongan beton ringan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*, no. 8, 2019.
- [2] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 03-2834-2000 Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*, pp. 1–34, 2000.
- [3] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 03-3449-2002 Tata Cara Rencana Pembuatan Campuran Beton Ringan dengan Agregat Ringan*, pp. 1–29, 2002.
- [4] A. R. Pratama, R. Suryanita, dan Ismediyanto, “Simulasi sifat termal bata ringan cellular lightweight concrete menggunakan LUSAS V.17,” *Sainstek (e-Journal)*, vol. 7, no. 2, pp. 55–61, 2019.
- [5] L. D. Badilla *et al.*, “Thermal conductivity in concrete samples with natural and synthetic fibers,” *Materials*, vol. 17, 2024.
- [6] S. I. Basha, M. R. Ali, S. U. Al-Dulaijan, dan M. Maslhuddin, “Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete,” *J. Build. Eng.*, 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/343545115_Mechanical_and_thermal_properties_of_lightweight_recycled_plastic_aggregate_concrete
- [7] A. Murdiyoto dan Suropto, “Pemanfaatan limbah plastik jenis PET (polyethylene terephthalate) sebagai agregat halus beton ringan,” *Semin. Nas. Inov. Vokasi*, vol. 1, no. 1, pp. 300–305, 2022.
- [8] H. Putra dan R. Amelia, “Perkuatan ikatan plastik dan matriks semen menggunakan metode soybean crude

- urease–calcite precipitation (SCU–CP),” *J. Tek. Sipil*, vol. 17, no. 1, pp. 34–44, 2022.
- [9] M. V. N dan S. Asadi, “PET bottle waste as a supplement to concrete fine aggregate,” *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 558–568, 2017.
- [10] R. S. Putri dan H. Putra, “Peningkatan kekuatan beton plastik dengan penambahan kalsit menggunakan metode soybean crude urease calcite precipitation,” *J. Tek. Sipil dan Lingkungan*, vol. 7, no. 3, pp. 191–200, 2022.
- [11] Mulyati dan Z. Arkis, “Pengaruh metode perawatan beton terhadap kuat tekan beton normal,” *J. Tek. Sipil ITP*, vol. 7, no. 2, pp. 78–84, 2020.
- [12] R. Armidion dan T. Rahayu, “Peningkatan nilai kuat tarik belah beton dengan campuran limbah botol plastik polyethylene terephthalate (PET),” *J. Konstr.*, vol. 10, no. 1, pp. 117–126, 2018.
- [13] V. S. Lumintang, E. Daimoen, C. Sarajar, H. Sumajouw, dan S. W. Supit, “Kuat tekan beton dengan kerikil plastik untuk pembuatan bak kontrol limbah rumah tangga,” *J. Tek. Sipil Terap.*, vol. 1, no. 1, pp. 38–46, 2019.
- [14] H. Putra, Erizal, Sutoyo, M. Simatupang, dan D. H. Y. Yanto, “Improvement of organic soil shear strength through calcite precipitation method using soybeans as bio-catalyst,” *Crystals*, vol. 11, no. 9, 2021.
- [15] G. B. S. Pratama, H. Yasuhara, N. Kinoshita, dan H. Putra, “Application of soybean powder as urease enzyme replacement on EICP method for soil improvement technique,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 622, no. 1, 2021.
- [16] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1974:2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*, 2011.
- [17] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 03-1974-1990 Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*, 1990.
- [18] PASCO Scientific, *Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO Scientific Model TD-8561 (Thermal Conductivity Apparatus)*, 1987.
- [19] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th ed. Harlow, U.K.: Pearson Education Limited, 2021.

