

## PENGARUH PENAMBAHAN SERAT *POLYPROPYLENE* TERHADAP SIFAT MEKANIK BETON *EXPANDED POLYSTYRENE*

Desi Maryani<sup>1,\*</sup>, Ade Lisantono<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, 55281, Indonesia

\*Corresponding author: [desi.maryani@mail.uajy.ac.id](mailto:desi.maryani@mail.uajy.ac.id)

**Abstrak:** Beton *expanded polystyrene* (EPS) mempunyai berat jenis lebih ringan dibanding beton normal. Beton EPS banyak diminati untuk bahan dasar pembuatan elemen non struktural suatu bangunan, misalnya partisi pracetak. Penambahan serat *polypropylene* pada beton diharapkan dapat memperbaiki ikatan dan daya lekat pada bahan penyusunnya, sehingga mencegah terjadinya retak dan menambah daktilitas pada komponen beton ringan. Pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas, kuat tarik belah, serta kuat lentur mengacu pada ASTM C330-09 tentang *Standar Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*. Benda uji berupa silinder beton dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm yang akan diuji saat usia beton 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari. Pada pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas, serta kuat tarik belah digunakan sekurang-kurangnya 3 silinder untuk tiap variasi pengujian, sementara pengujian kuat lentur digunakan sekurang-kurangnya 2 balok dengan dimensi 200x200x700mm. Hasil penelitian menunjukkan kuat tekans rata-rata menurun berturut-turut 14%, -35%, -6%, dan -19% saat usia beton 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kebutuhan air untuk melarutkan serat *polypropylene*. Hasil pengujian kuat tarik belah meningkat berturut-turut -26%, -16%, 15%, dan 33% saat usia beton 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari. Penggunaan serat *polypropylene* pada silinder beton meningkatkan kuat tarik belah beton EPS sebesar 33% saat usia beton 28 hari dibandingkan dengan beton non serat. Peningkatan nilai kuat lentur (MOR) beton serat berturut-turut sebesar 22%, 38%, -11%, dan 28% saat usia beton 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari terhadap beton non serat.

**Kata kunci:** *expanded polystyrene*, serat *polypropylene*, beton serat

### PENDAHULUAN

Beton dengan agregat ringan memiliki berat jenis yang lebih ringan apabila dibandingkan dengan beton normal. Hal ini menjadikannya sebagai bahan yang diminati untuk bahan dasar pembuatan elemen non struktural suatu bangunan, misalnya partisi pracetak. Sifatnya yang ringan mampu mereduksi beban yang bekerja pada struktur bangunan, sehingga dimensi struktur menjadi lebih kecil dan lebih ekonomis. Pada penelitian terdahulu Maryani dkk (2019) menggabungkan partisi pracetak yang terbuat dari beton EPS dengan penambahan lembaran papan kalsium silikat pada kedua sisi luarnya. Beton EPS yang ringan sebagai bahan inti (*core*) dan papan kalsium silikat yang kaku dan lebih kuat sebagai lapis luar (*outer*) menjadi kesatuan komposit, yaitu panel *sandwich*, dengan harapan mengalami peningkatan kekuatan sehingga layak untuk digunakan sebagai elemen struktural. Akan tetapi, penelitian tidak mencapai hasil yang diharapkan, karena kekuatan material beton ringan pracetak tersebut

tidak memenuhi standar kekuatan menurut SNI 03-3122-1992 tentang Panel Beton Ringan Berserat.

Pemanfaatan EPS dalam bidang konstruksi dirasa perlu untuk mendukung pelestarian bahan ramah lingkungan, mengingat EPS memiliki sifat yang sulit untuk didaur ulang. Menurut Asaad (2022) sifat mekanik beton ringan yang ditujukan untuk panel *sandwich* memiliki daya lekat dan kekuatan geser inti yang cenderung sama, tidak berubah, ketika EPS daur ulang digunakan untuk menggantikan EPS murni dengan tingkat penggantian yang relatif rendah yaitu 1 hingga 2 kg/m<sup>3</sup>.

Penggunaan beton dengan agregat ringan EPS menjadikan beton bersifat ringan, sementara kekuatan beton mengalami penurunan ketika proporsi EPS yang digunakan sebagai pengganti agregat makin besar. Upaya untuk memperbaiki sifat mekanis beton ringan EPS salah satunya adalah dengan penambahan serat yang memiliki karakteristik mirip dengan EPS.

Penelitian ini mengangkat permasalahan sifat mekanik beton dengan agregat ringan EPS

yang diberi perlakuan panas agar memiliki ikatan yang lebih baik dan pengaruh penggunaan serat *polypropylene* yang untuk meningkatkan kekuatan beton. Penelitian ini mengkaji hasil penelitian sebelumnya oleh Wibowo dkk (2021) tentang kuat tekan dan daya serap air dari beton EPS yang diberi perlakuan panas. Penggunaan serat dalam penelitian ini dilakukan untuk memperbaiki sifat mekanik beton EPS agar dapat memenuhi persyaratan beton struktural dengan agregat ringan.

Penelitian ini memiliki tujuan khusus untuk mengevaluasi kuat tekan dan modulus elastisitas, kuat tarik belah, serta kuat lentur (*modulus of rupture*) dari beton EPS. Hasil evaluasi menjadi dasar justifikasi teknis kelayakan penggunaan beton EPS sebagai material beton struktural. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat bagi para pengembang ilmu teknik sipil baik di dunia pendidikan maupun praktisi/industri.

Penambahan serat pada beton EPS dapat meningkatkan kekuatan mekaniknya dengan mempertahankan kepadatannya yang rendah dan berat jenis yang relatif ringan. Namun, ketika proporsi serat melebihi batas tertentu, kekuatan tekan mengalami penurunan dengan peningkatan proporsi serat (Sun dkk, 2022). Penambahan serat panjang secara efektif meningkatkan kekuatan tekan beton ringan (Jiang dkk, 2022).

Menurut Lisantono dan Kung (2016) kadar optimum penggunaan serat *polypropylene* pada beton yaitu 0,9 kg/m<sup>3</sup>.

## METODE PENELITIAN

Metode pelaksanaan penelitian berdasarkan studi eksperimental dengan percobaan langsung di Laboratorium Struktur dan Bahan Bangunan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta. Silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm serta balok dengan dimensi penampang 200x200 mm dan panjang balok 700 mm digunakan sebagai benda uji.

Jumlah benda uji sekurang-kurangnya terdiri dari 3 buah silinder untuk uji kuat tekan dan modulus elastisitas, serta kuat tarik belah, sementara uji kuat lentur (*modulus of rupture*) menggunakan sekurang-kurangnya 2 buah balok untuk tiap variasi pengujian. Pengujian silinder dan balok dilakukan saat beton EPS berusia 7

hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari. Variasi pengujian berupa penambahan serat *polypropylene* pada beton EPS dan beton EPS non serat.

## Material

Pengujian pendahuluan berupa pengamatan fisik pada agregat ringan yang akan digunakan. Pengamatan fisik dilakukan pada satu sampel representatif untuk setiap pengujian; *organic impurities, staining, loss on ignition, grading, bulk density, dan clay lumps*.

EPS diberi perlakuan panas pada suhu 100°C selama 15 menit, dengan proporsi penggunaan EPS sebagai pengganti agregat sebesar 60% agar mencapai ketentuan berat jenis beton ringan yaitu <1800 kg/m<sup>3</sup> (Wibowo dkk, 2020). Penambahan serat *polypropylene* sebanyak 0,9 kg/m<sup>3</sup> untuk memperbaiki ikatan pada komponen penyusun beton ringan dan mengurangi munculnya retak-retak (Lisantono dan Kung, 2016). *Super plasticizer* digunakan untuk membantu agregat dapat menyebar secara merata. Komposisi bahan penyusun beton EPS ditunjukkan dalam Tabel 1.

**Tabel 1.** *Mix design* beton EPS

Bahan	Komposisi/m <sup>3</sup>
Semen portland	729 kg/m <sup>3</sup>
Pasir	428,4 kg/m <sup>3</sup>
EPS	3,1 kg/m <sup>3</sup>
Air	212,21 kg/m <sup>3</sup>
<i>Polypropylene</i> *	0,9 kg/m <sup>3</sup>

Catatan:

1. perhitungan 1m<sup>3</sup> *mix design* mengacu pada penelitian Wibowo dkk (2021) pada proporsi EPS 60% agar diperoleh berat jenis beton ringan (<1800 kg/m<sup>3</sup>) dengan nilai kuat tekan tertinggi,
2. penambahan serat *polypropylene* sebesar 0,9 kg/m<sup>3</sup> (Lisantono dan Kung, 2016).

## Kuat Tekan, Modulus Elastisitas

Menurut ASTM 330-09, formulasi perhitungan kuat tekan beton ditunjukkan dalam Persamaan (1):

$$f_c = \frac{P}{a} \quad (1)$$

dengan  $f_c$  = kuat tekan beton EPS (MPa),  $P$  = beban maksimum yang diaplikasikan pada silinder (N), dan  $A$  = luasan penampang silinder (mm<sup>2</sup>). Persyaratan kuat tekan beton struktural dengan agregat ringan ditunjukkan dalam Tabel 2.

**Tabel 2.** Persyaratan kuat tekan beton struktural dengan agregat ringan (Sumber: ASTM 330-09)

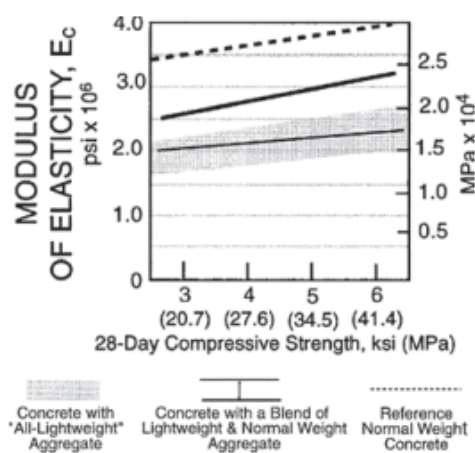
Berat Jenis (kg/m <sup>3</sup> )	Kuat Tekan Rata-rata umur 28 hari (MPa)
Semua Agregat Ringan	
1760	28
1680	21
1600	17
Kombinasi Agregat Normal dan Ringan	
1840	28
1760	21
1680	17

Berdasarkan ACI 213R-14, formulasi perhitungan modulus elastisitas beton ditunjukkan dalam Persamaan (2):

$$E = \frac{\delta}{\varepsilon} \quad (2)$$

dengan E = modulus elastisitas (MPa),  $\delta$  = tegangan (MPa), dalam kasus ini yaitu kuat tekan, dan  $\varepsilon$  = regangan (tanpa satuan).

Beton normal memiliki nilai modulus elastisitas yang lebih tinggi daripada beton ringan karena modulus agregat penyusunnya lebih besar dari pada modulus agregat ringan. Kisaran modulus elastisitas beton ringan ditunjukkan dalam Gambar 1.

**Gambar 1.** Modulus elastisitas beton ringan (Sumber: ACI 213R-14)

Dalam ACI 213R-14, modulus elastisitas beton ringan dianggap bervariasi antara 50-75% modulus beton pasir dan kerikil pada kekuatan yang sama. Variasi dalam persebaran

agregat ringan biasanya memberi pengaruh yang kecil pada modulus elastisitas apabila volume relatif pasta semen dan agregat cukup konstan. Setup pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas ditunjukkan Gambar 2.

**Gambar 2.** Setup uji kuat tekan dan modulus elastisitas beton EPS

### Kuat Tarik Belah

Menurut ASTM 330-09, formulasi perhitungan kuat tarik belah beton seperti ditunjukkan dalam Persamaan (3):

$$T = \frac{2P}{\pi ld} \quad (3)$$

dengan T = kuat tarik belah (MPa), P = beban maksimum (N), D = diameter silinder (mm), dan L = panjang silinder (mm). Persyaratan kuat tarik belah beton struktural dengan agregat ringan ditunjukkan dalam Tabel 3.

**Tabel 3.** Persyaratan kuat tarik belah beton struktural dengan agregat ringan (Sumber: ASTM 330-09)

Berat Jenis (kg/m <sup>3</sup> )	Kuat Tarik Belah Rata-rata umur 28 hari (MPa)
Semua Agregat Ringan	
1760	2,2
1680	2,1
1600	2,0
Kombinasi Agregat Normal dan Ringan	
1840	2,3
1760	2,1
1680	2,1

Setup uji kuat tarik belah beton EPS ditunjukkan dalam Gambar 3.



**Gambar 3.** Setup uji kuat tarik belah beton EPS

### Kuat Lentur

Menurut ASTM C78-02, formulasi perhitungan kuat lentur (*modulus of rupture*) dapat dihitung menggunakan Persamaan (4):

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4)$$

dengan R = kuat lentur atau *modulus of rupture* (MPa), P = beban maksimum (N), L = panjang balok (mm), b = rata-rata lebar balok pada area patahan (mm), d = kedalaman rata-rata balok pada area patahan (mm). Setup uji kuat tarik belah beton EPS ditunjukkan dalam Gambar 4.

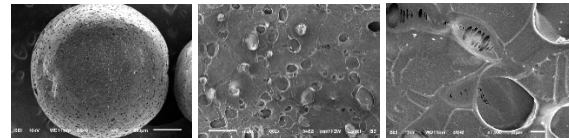


**Gambar 4.** Setup uji kuat lentur beton EPS

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Material penyusun beton terdiri dari semen Portland, agregat halus, agregat kasar, dan air. Dalam penelitian ini, agregat halus berupa pasir diambil dari Sungai Progo dengan ukuran butir 4,75 mm, berat jenis 2,65 gr/cm<sup>3</sup>, kadar air 2,25% dan kandungan lumpur 1,45%. Hasil pembacaan *Standar Gardner Color* pada pasir Progo menunjukkan nomor 5, yaitu warna

kuning muda sekali yang berarti kandungan zat organik dalam pasir tergolong sedikit sehingga pasir baik untuk dipergunakan sebagai material bangunan. Agregat lainnya menggunakan butiran EPS, yang memiliki berat jenis sangat ringan. Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk mengamati perubahan yang terjadi pada butiran EPS sebelum dan sesudah diberi perlakuan panas. Perbesaran dilakukan hingga 1000 kali untuk melihat permukaan EPS dengan lebih teliti. Hasil uji SEM butiran *heated-EPS* ditunjukkan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Hasil uji SEM *heated-EPS*

Hasil pengujian menunjukkan berat jenis beton EPS saat usia 7 hari, 14 hari, 21 hari, 28 hari berkisar antara 1637,11 – 1773,78 kg/m<sup>3</sup>. Hal ini sesuai dengan ketentuan berat jenis untuk kategori beton structural dengan agregat ringan menurut ASTM C330-09:2010.

### Kuat Tekan, Modulus Elastisitas

Pola keruntuhan pengujian kuat tekan pada silinder beton non serat dan beton serat dapat dilihat pada Gambar 6. Keduanya memiliki pola yang serupa, yaitu retak memanjang dari permukaan silinder yang dikenai pembebanan. Retak merambat kebawah hingga batas tertentu.



**Gambar 6.** Pola keruntuhan benda uji kuat tekan

Pada pengujian tersebut kekuatan tekan rata-rata menurun berturut-turut 14%, -35%, -6%, dan -19% saat beton EPS berusia 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari. Hasil pengujian modulus elastisitas dan kuat tekan ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5. Penggunaan serat *polypropylene* pada silinder beton tidak memberikan pengaruh yang signifikan untuk kekuatan tekan

beton bila dibandingkan dengan beton non serat. Penurunan nilai kekuatan tekan beton serat ini disebabkan oleh meningkatnya kebutuhan air untuk melarutkan serat *polypropylene*, Serat perlu dilarutkan dalam air selama 15 menit sebelum di campurkan dalam adukan beton, hal ini bertujuan agar serat *polypropylene* dapat menyebar secara homogen dan tidak mengalami penggumpalan.

**Tabel 4.** Hasil uji modulus elastisitas beton EPS

Sample	Umur (hari)	Rata-rata Mod.Elastisitas (Mpa)	Rata-rata Berat Jenis (kg/m <sup>3</sup> )
NS	7	13663	1727
S	7	15301	1699
NS	14	14475	1761
S	14	14374	1689
NS	21	19559	1739
S	21	16530	1698
NS	28	6219	1731
S	28	5835	1677

**Tabel 5.** Hasil uji kuat tekan beton EPS

Sample	Umur (hari)	Rata-rata Berat Jenis (kg/m <sup>3</sup> )	Rata-rata kuat tekan (MPa)
NS	7	1727	8,72
S	7	1699	9,94
NS	14	1761	14,03
S	14	1689	9,13
NS	21	1739	12,62
S	21	1698	11,89
NS	28	1731	13,87
S	28	1677	11,30

Catatan:

- NS: silinder beton non serat
- S : silinder beton serat

Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan nilai kuat tekan beton EPS baik beton serat maupun non serat masih dibawah 17 MPa. Oleh karena itu, beton EPS tidak memenuhi persyaratan kuat tekan beton struktural dengan agregat ringan sesuai ASTM 330-09:2010.

### Kuat Tarik Belah

Pola keruntuhan silinder beton non serat dan beton serat pada pengujian kuat tarik belah ditunjukkan oleh Gambar 7. Keruntuhan silinder

beton non serat ditunjukkan dengan silinder yang terbelah menjadi 2 bagian, namun terdapat keremukan didalam inti silinder. Hal ini menunjukkan bahwa silinder non serat cenderung lebih rapuh (*brittle*) dibandingkan dengan beton dengan penambahan serat.



**Gambar 7.** Pola keruntuhan benda uji kuat tarik belah

Pengujian kuat tarik belah dilakukan pada 24 silinder yang terdiri 12 silinder beton non serat dan 12 silinder beton serat. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 6. Pada pengujian tersebut kekuatan tarik belah meningkat berturut-turut -35%, -18%, 13%, dan 25% saat beton EPS berusia 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari. Penggunaan serat *polypropylene* pada silinder beton dapat meningkatkan kuat tarik belah sebesar 25% saat beton EPS berusia 28 hari dibandingkan dengan beton non serat.

**Tabel 6.** Hasil uji kuat tarik belah beton EPS

Sampel	Umur (hari)	Rata-rata Kuat Tarik Belah (Mpa)	Rasio
NS	7	1,67	-26%
S	7	1,24	
NS	14	1,51	-16%
S	14	1,27	
NS	21	1,19	15%
S	21	1,37	
NS	28	1,25	33%
S	28	1,66	

Catatan:

- NS: silinder beton non serat
- S : silinder beton serat

Hasil pengujian kuat tarik belah menunjukkan nilai kuat tarik belah beton EPS baik beton serat maupun non serat masih dibawah 2,1 MPa. Oleh karena itu, beton EPS tidak memenuhi persyaratan kuat tarik belah beton struktural dengan agregat ringan sesuai ASTM 330-09:2010.

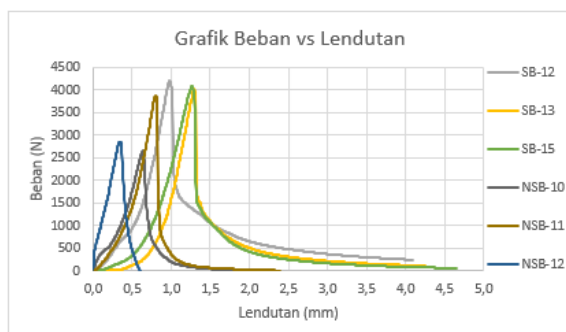


### Kuat Lentur

Pola keruntuhan balok beton non serat dan balok beton serat ditunjukkan pada Gambar 8. Kedua jenis variasi benda uji mengalami retak pada area yang cenderung sama, yaitu di tengah bentang balok. Retak yang terjadi pada benda uji balok serat muncul perlahan seiring dengan penambahan beban, sementara retak yang terjadi pada benda uji balok non serat terjadi secara tiba-tiba. Hal ini mengisyaratkan balok non serat cenderung lebih getas dibandingkan balok serat. Grafik hubungan beban dan lendutan pada pengujian kuat lentur beton usia 28 hari ditunjukkan pada Gambar 9.



**Gambar 8.** Pola keruntuhan benda uji kuat lentur



**Gambar 9.** Grafik hubungan beban dan lendutan pada pengujian kuat lentur beton usia 28 hari

Hasil uji kuat lentur (*modulus of rupture*) beton EPS dengan penambahan serat *polypropylene* ditunjukkan dalam Tabel 7. Peningkatan nilai kekuatan lentur (MOR) beton serat berturut-turut sebesar 22%, 38%, -11%, dan 28% saat beton EPS berusia 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari terhadap beton non serat. Pengujian kuat lentur pada balok beton serat umur 21 hari menunjukkan hasil rasio negatif disebabkan oleh kelalaian dalam persiapan setting alat yang menyebabkan pembebanan yang telah terjadi di awal tidak terbaca.

Hasil pengujian menunjukkan kuat lentur beton EPS pada usia 28 hari memiliki rasio 28% pada beton serat dibandingkan beton non serat.

**Tabel 7.** Hasil pengujian kuat lentur

Sample	Umur (hari)	Rata-rata Kuat Lentur (MPa)	Rasio
SB	7	2,27	22%
NSB	7	1,87	
SB	14	2,41	38%
NSB	14	1,75	
SB	21	2,28	-11%
NSB	21	2,55	
SB	28	2,65	28%
NSB	28	2,07	

Catatan:

- NSB : balok beton non serat
- SN : balok beton serat

### KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian Pengaruh Penambahan Serat *Polypropylene* terhadap Sifat Mekanik Beton Ringan *Expanded Polystyrene* dengan Perlakuan Panas adalah sebagai berikut. Kekuatan tekan rata-rata menurun berturut-turut 12%, -54%, 6%, dan -23% saat beton EPS berusia 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari. Penurunan nilai kuat tekan beton serat ini disebabkan oleh meningkatnya kebutuhan air untuk melarutkan serat *polypropylene*. Jumlah air yang lebih banyak menjadikan beton lebih encer sehingga kuat tekannya menurun. Dalam hal ini, bahan aditif dapat digunakan sebagai opsi untuk mengurangi kebutuhan air dan mempertahankan kuat tekan beton tidak menurun. Mengingat berat jenis butiran EPS yang sangat ringan, perlu dipertimbangkan metode yang cocok dalam penggunaan bahan aditif tersebut agar tidak menyebabkan segregasi.

Kekuatan tarik belah meningkat berturut-turut -26%, -16%, 15%, dan 33% saat beton EPS berusia 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari. Penggunaan serat *polypropylene* pada silinder beton dapat meningkatkan kuat tarik belah beton sebesar 33% saat beton EPS berusia 28 hari dibandingkan dengan beton non serat.

Peningkatan nilai kekuatan lentur (MOR) beton serat berturut-turut sebesar 22%, 38%, -11%, dan 28% saat beton EPS berusia 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari terhadap beton non serat. Penambahan serat *polypropylene*

meningkatkan ikatan beton. Saat menerima beban, beton tidak serta merta mengalami keruntuhan melainkan muncul pemberitahuan awal akan terjadinya keruntuhan. Hal ini ditandai dengan retak-retak yang menjalar di area pembebanan sebelum akhirnya mengalami keruntuhan total. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan serat meningkatkan daktilitas pada beton.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini, khususnya kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) UAJY yang telah memberikan dukungan dana sehingga penelitian dapat berjalan dengan lancar.

## DAFTAR PUSTAKA

- Wibowo, A.P., dkk. (2021). *The strength and water absorption of heated expanded polystyrene beads lightweight-concrete*. International Journal of GEOMATE, 21(83), pp. 150-156.
- Jiang, T., dkk. (2022). *Compressive behavior of lightweight concrete using aerogel-reinforced expanded polystyrene foams*. Case Studies in Construction Materials, 17(2022), e01557.
- Sun, Y., dkk. (2022). *An Investigation of the Properties of Expanded Polystyrene Concrete with Fibers Based on an Orthogonal Experimental Design*. Materials, 15, 1228.
- Mehrab, A.H., Esfahani, M.R. (2022). *Experimental Study on Size Effect and Fracture Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 66(4), pp. 1278-1293.
- Paganggi, W.R., Makmur, A., Rachmansyah (2021). *Pengaruh Penambahan Serat Polypropylene terhadap Kuat Tekan dan Nilai Permeabilitas pada Beton Berpori*. Media Komunikasi Teknik Sipil, Volume 27, No. 1, 135-142.
- Wei, H., Wu, T., Yang, X. (2020). *Properties of lightweight aggregate concrete reinforced with carbon and/or polypropylene fibers*. Materials, 13(3),640.
- Assaad, J.J., Mikhael, C., Hanna, R. (2022). *Recycling of waste expanded polystyrene concrete in lightweight sandwich panels and structural applications*. Cleaner Materials 4,100095.
- Kanagaraj, B., dkk. (2022). *Performance of Sustainable Insulated Wall Panels with Geopolymer Concrete*. Materials, 15(24),8801.
- Maryani, D., Saputra, A., Triwiyono, A. (2019). *Kuat Tekan Panel Dinding Beton Ringan Expanded Polystyrene dengan Lapis Luar Papan Kalsium Silikat*. Teknisia, Volume XXIV, No 1, Mei 2019.
- Lisantono, A., Kung, F. (2016). *Pengaruh Komposisi Serat Polypropylene terhadap Sifat Mekanik Beton*. Konferensi Nasional Teknik Sipil 10, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, 26-27 Oktober 2016.
- Lisantono, A., Praja, B.A., Prasetyo, H.K., Studi Perilaku Kuat Geser Balok Beton Bertulang Memadat Sendiri dengan Serat Polypropylene. Cantilever Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil, Vol 7, No. 2 (2018).
- ASTM Internasional. (2010). *ASTM C330/C330M-09: Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete*. Philadelphia, USA: ASTM International.
- ASTM Internasional. (2014). *ASTM C39/C39M-14: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens<sup>1</sup>*.
- ASTM Internasional. (2004). *ASTM C496-C496M-04: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens<sup>1</sup>*.
- ASTM Internasional. (2002). *ASTM C78-02: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*.
- ASTM Internasional. (2006). *ASTM C567-05a: Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete*.
- ACI Committee 318. (2014). *ACI 213R-14: Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*. American Concrete Institute.