

PEMERIKSAAN KUAT TEKAN FOAM CONCRETE MENGGUNAKAN RASIO SEMEN DAN AGREGAT

F. Nadia^{1*}, Saloma², dan A. Saggaf²

¹Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Sriwijaya, Palembang

²Dosen Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Sriwijaya, Palembang

*Corresponding author e-mail: fatimahnadia202@gmail.com

ABSTRAK: *Foam concrete* dikembangkan sebagai material beton ringan dengan kekuatan memadai untuk konstruksi modern. Tantangan utama material ini adalah mencapai keseimbangan antara berat jenis rendah dan kuat tekan optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi rasio semen dan agregat serta penggunaan *Expanded Polystyrene* (EPS) sebagai pengganti sebagian agregat halus terhadap sifat fisik dan mekanik *foam concrete*. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan variasi rasio semen dan agregat 1:2,75; 1:3; dan 1:3,25, serta penambahan EPS sebesar 20% volume agregat halus. Pengujian meliputi *slump flow*, *setting time*, berat jenis, dan kuat tekan pada umur 28 hari dengan *curing* karung basah. Terjadi peningkatan hasil kuat tekan dan berat jenis dengan perbedaan rasio semen dan agregat. Berat jenis benda uji FC 1, FC 2 dan FC 3 adalah 1222 kg/m³, 1222 kg/m³ dan 1437 kg/m³ dengan hasil kuat tekan masing-masing 1,99 MPa, 1,17 MPa dan 3,20 MPa. Berat jenis benda uji FC-EPS 1, FC-EPS 2 dan FC-EPS 3 adalah 1038 kg/m³, 1083 kg/m³ dan 1106 kg/m³ dengan hasil kuat tekan masing-masing 1,16 MPa, 1,49 MPa dan 1,62 MPa. Berdasarkan hasil kajian bahwa rasio semen dan agregat memiliki peran penting dalam menentukan performa *foam concrete* dan dapat dioptimalkan untuk kebutuhan struktural ringan.

Kata Kunci: *Foam Concrete*, kuat tekan.

ABSTRACT: *Foam concrete* has been developed as a lightweight concrete material with sufficient strength for modern construction. The main challenge of this material is achieving a balance between low density and optimal compressive strength. This study aims to analyze the effect of varying cement-to-aggregate ratios and the use of *Expanded Polystyrene* (EPS) as a partial replacement for fine aggregate on the physical and mechanical properties of *foam concrete*. The research was conducted experimentally using cement-to-aggregate ratios of 1:2.75, 1:3, and 1:3.25, with 20% of the fine aggregate volume replaced by EPS. Tests included *slump flow*, *setting time*, density, and compressive strength at 28 days, with curing performed using the wet burlap method. The results showed an increase in compressive strength and density with different cement-to-aggregate ratios. The densities of specimens FC 1, FC 2, and FC 3 were 1222 kg/m³, 1222 kg/m³, and 1437 kg/m³, with compressive strengths of 1.99 MPa, 1.17 MPa, and 3.20 MPa, respectively. Meanwhile, the densities of FC-EPS 1, FC-EPS 2, and FC-EPS 3 were 1038 kg/m³, 1083 kg/m³, and 1106 kg/m³, with compressive strengths of 1.16 MPa, 1.49 MPa, and 1.62 MPa, respectively. Based on the findings, the cement-to-aggregate ratio plays a crucial role in determining the performance of *foam concrete* and can be optimized for lightweight structural applications.

Keywords: *Foam Concrete*; *Compressive Strength*.

1 Pendahuluan

Foam concrete adalah jenis beton ringan yang dibuat dengan mencampurkan mortar dengan *foam agent*. Bahan ini membentuk gelembung-gelembung udara yang terperangkap secara merata di dalam adukan, mengurangi berat jenis beton secara keseluruhan. Meskipun memiliki massa jenis yang lebih rendah, *foam concrete* masih harus

memenuhi persyaratan kuat tekan tertentu, sehingga pengujian kuat tekan menjadi aspek krusial.

Foam concrete, yang juga dikenal sebagai beton ringan atau beton seluler, adalah material berbasis semen yang dicampur dengan minimal 20% foam (berdasarkan volume) menggunakan foam agent. *Foam concrete* memiliki keunggulan fisik seperti bobot yang ringan, kekuatan yang cukup baik, serta kemampuan isolasi panas

dan suara yang baik. Dengan pemilihan bahan dan jumlah foam yang tepat, *foam concrete* dapat memiliki densitas antara 300 hingga 1600 kg/m³, sehingga cocok untuk berbagai keperluan, mulai dari struktur bangunan, isolasi, hingga pengisian [1].

Kuat tekan adalah sifat mekanik yang paling penting dari beton, dan nilainya berhubungan langsung dengan kualitas dan daya tahan material. Dalam kasus *foam concrete*, penentuan kuat tekan sangat dipengaruhi oleh proporsi bahan penyusunnya diantaranya rasio semen dan agregat. Perubahan rasio ini akan memengaruhi struktur internal, kepadatan, dan pada akhirnya, kuat tekan dari *foam concrete*.

Oleh karena itu, penelitian mengenai pemeriksaan kuat tekan *foam concrete* dengan variasi rasio semen dan agregat menjadi sangat relevan. Studi ini bertujuan untuk menginvestigasi bagaimana perubahan komposisi campuran, khususnya perbandingan antara semen sebagai pengikat dan agregat sebagai pengisi, memengaruhi kemampuan *foam concrete* untuk menahan beban tekan. Dengan memahami hubungan ini, kita dapat mengoptimalkan formulasi campuran *foam concrete* untuk mencapai keseimbangan terbaik antara berat ringan, kekuatan struktural yang memadai, dan efisiensi material.

2 Tinjauan Pustaka

Penelitian [2] membuat *foam concrete* dengan variasi rasio semen agregat adalah 0,5; 1; 1,5 dan 2,0 dengan nilai w/c adalah 0,5. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang berbanding lurus antara rasio pasir-semen dengan kuat tekan dan densitas kering pada umur 28 hari. Peningkatan rasio pasir-semen menyebabkan peningkatan kuat tekan *foam concrete* seiring dengan bertambahnya kandungan pasir. Hasil pengujian campuran dengan rasio pasir-semen 2,0 mencapai kuat tekan tertinggi sebesar 34 MPa dengan berat jenis 2200 kg/m³.

Penelitian [3] membuat *foam concrete* dengan variasi rasio semen dan agregat yang digunakan adalah 1:0,4; 1:0,5; 1:0,6 dan 1:0,7. Hasil pengujian menunjukkan pada rasio lebih tinggi, *foam concrete* menunjukkan kuat tekan mencapai 2,2 MPa dengan berat jenis 1300kg/m³.

[4] melakukan penelitian lightweight foamed concrete dengan variasi rasio campuran semen-agregat 3:1, 4:1 dan 5:1. Hasil dari pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa bernilai 8,60 MPa dengan densitas 1500 kg/m³ untuk campuran optimal yang diperoleh pada rasio semen agregat 4:1 dengan rasio air-semen 0,46.

Penelitian tentang pengaruh variasi rasio semen terhadap agregat pada *foam concrete* menunjukkan konsistensi temuan bahwa peningkatan proporsi semen cenderung meningkatkan kekuatan tekan dan kepadatan akhir material, sehingga memungkinkan aplikasi hingga kelas semi-struktural bila rasio pengikat mencukupi [5], [6]. Beberapa studi eksperimen melaporkan rentang kekuatan yang luas bergantung pada komposisi campuran, rasio air-semen dan metode pengerjaan, dengan demikian rasio semen agregat adalah parameter utama untuk menyeimbangkan kebutuhan mekanik dan kepadatan pada *foam concrete*[7], [8]. Sintesis literatur ini menunjukkan bahwa ketika tujuan penelitian adalah memperoleh kekuatan tekan optimal sambil mempertahankan kepadatan rendah, strategi yang sering dipakai adalah menaikkan fraksi pengikat sambil menyesuaikan W/C dan penggunaan aditif pengikat untuk mengendalikan porositas makro.

Masukan EPS sebagai pengganti sebagian agregat halus secara konsisten dilaporkan menurunkan densitas dan konduktivitas termal memperbaiki sifat insulasi tetapi umumnya menurunkan kekuatan tekan, kadang secara drastis pada fraksi EPS tinggi. Studi-studi komparatif menunjukkan bahwa efek ini bergantung pada fraksi volumetrik EPS, ukuran butir, dan distribusi EPS dalam matriks. Fraksi EPS kecil sering kali masih menghasilkan kombinasi isolasi dan kekuatan yang dapat diterima, sedangkan fraksi besar menuntut kompensasi melalui peningkatan pengikat atau penggunaan aditif penguat [9], [10]. Oleh karena itu, desain campuran yang melibatkan EPS harus menimbang antara bobot atau isolasi dan kapasitas beban sesuai target.

Masalah kritis yang sering muncul adalah kualitas zona transisi antara partikel EPS dan matriks semen ikatan lemah menyebabkan konsentrasi kekosongan dan kelemahan mekanik. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa perlakuan permukaan EPS atau penggunaan modifier kimiawi dapat memadatkan antarmuka, mendorong pembentukan produk hidrasi yang lebih baik, dan meningkatkan transfer beban, beberapa studi bahkan melaporkan peningkatan ketahanan hingga puluhan persen setelah perlakuan antarmuka [11], [12], [13]

3 Metodologi

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental di laboratorium dengan prosedur sebagai berikut:

- (1) Menggunakan material semen Portland Composite Cement (PCC), agregat halus, rasio *foaming agent* dan air 1:40. Pembuatan foam dengan metode preformed.
- (2) Variasi perbandingan penggunaan semen dan agregat adalah 1:2,75; 1:3 dan 1:3,25.
- (3) Untuk campuran FC-EPS ditambah butiran EPS sebesar 3 mm dan substitusi sebesar 20% dari volume agregat pasir.
- (4) Pengujian pada beton segar yaitu *slump flow* dengan *slump cone* dan *setting time* dengan *vicat apparatus*.
- (5) Pengujian beton keras yaitu kuat tekan dan berat jenis dengan UTM pada umur 28 hari setelah di curing dengan karung basah.

Dalam penelitian ini, setiap variasi campuran beton dibuat sebanyak enam sampel agar hasil pengujian dapat dibandingkan secara lebih objektif antarvariasi campuran. Proses pembuatan dilakukan secara cermat mulai dari penimbangan bahan, pencampuran, hingga pencetakan agar setiap sampel memiliki mutu dan karakteristik yang seragam. Tahap awal sebelum menentukan mix design adalah melakukan pengamatan terhadap material penyusun beton yaitu agregat halus untuk memastikan bahwa material memenuhi standar kualitas yang dipersyaratkan agar menghasilkan campuran beton dengan optimal. Hasil dari pengamatan material tersebut disajikan sebagai berikut:

Tabel 1. Rekapitulasi hasil pengamatan karakteristik agregat halus

No.	Karakteristik Material	Hasil Pengamatan	Persyaratan (ASTM C33)
1.	Berat Volume		
	a. Kondisi Lepas	1,536 kg/liter	1,4 – 1,9 kg/liter
	b. Kondisi Padat	1,422 kg/liter	1,4 – 1,9 kg/liter
2.	Penyerapan air	1,01%	Maksimum 2%
3.	<i>Specific gravity</i>		
	a. Berat Jenis Curah	2,526	1,6 – 3,3
	b. Berat Jenis SSD	2,552	1,6 – 3,3
	c. Berat Jenis Jenuh	2,592	1,6 – 3,3
4.	Modulus Kehalusan	2,458	2,3 – 3,1
5.	Gradasi Agregat Kasar	Zona 2 (Agak Halus)	

Perhitungan komposisi campuran ACI 523.3R-14 menjadi campuran *foam concrete* dengan data-data berikut:

- a. Berat jenis rencana beton : 1120 kg/m³
- b. Densitas *foam* : 104,33 kg/m³
- c. *Foam yield* : 0,95

- d. Berat jenis semen : 3150 kg/m³
- e. Berat jenis pasir : 2552 kg/m³
- f. Berat Jenis Air : 1000 kg/m³
- g. Berat Jenis EPS : 20 kg/m³
- h. Rasio semen-air : 0,45

Kuat tekan dan berat jenis *foam concrete* dipengaruhi oleh *job mix formula* yang dihitung sesuai pedoman ACI 523.3R-14. Dengan memanfaatkan data yang ada, didapatkan hasil perhitungan JMF untuk prosedur pencampuran beton pada Tabel 1.

Tabel 2. Job Mix Formula Foam concrete

Materials/ Mixes	FC 1:2,75	FC 1:3	FC 1:3,25	FC-EPS 1:2,75	FC-EPS 1:3	FC-EPS 1:3,25
Cement (kg/m ³)	269,880	269,880	269,880	269,880	269,880	269,880
Sand (kg/m ³)	742,169	809,639	877,108	593,735	647,711	701,687
W/C	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Foam (L)	517,145	517,145	517,145	517,145	517,145	517,145
EPS (kg/m ³)	-	-	-	1,175	1,282	1,388

4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Pengujian Beton Segar

Pengujian beton segar pada penelitian ini dilakukan dengan dua cara yaitu pengujian *slump flow* dan *setting time* dengan alat *vicat apparatus*.

4.1.1 Pengujian Slump Flow

Tabel 3. Hasil pengujian *slump flow foam concrete* benda uji FC dan FC-EPS dengan variasi rasio semen dan agregat

Campuran	Rasio Semen-Agregat	Diameter Sebaran			Rata-Rata
		A	B	C	
FC	1:2,75	55,5	55,5	55	55,33
	1:3	51	54	52	52,33
	1:3,25	38	40	39	39
FC-EPS	1:2,75	62	61	60	61
	1:3	60	60	60	60
	1:3,25	59	59	58	58,67

Hasil pengujian *slump flow* pada *foam concrete* menunjukkan bahwa nilai tertinggi diperoleh pada campuran dengan rasio semen-pasir 1:2,75, yaitu sebesar 55,33 cm. Nilai ini menunjukkan tingkat *workability* yang lebih baik dibandingkan dengan variasi campuran lainnya. Peningkatan nilai *slump flow* pada campuran tersebut

disebabkan oleh proporsi semen yang lebih besar sehingga pasta semen yang terbentuk lebih banyak dan mampu melapisi butiran agregat secara merata. Kondisi ini mengurangi gesekan antar partikel sehingga adukan menjadi lebih mudah mengalir.

Sebaliknya, pada campuran dengan rasio semen dan agregat yang lebih tinggi nilai, *slump flow* cenderung mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan peningkatan kandungan agregat halus menyebabkan kebutuhan air meningkat dan menurunkan kelecakan campuran [14]. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi rasio semen terhadap agregat, maka workability *foam concrete* akan meningkat, sedangkan penambahan agregat pasir yang berlebihan dapat menghambat kemampuan alir campuran.

Hasil pengujian *slump flow* menunjukkan bahwa beton FC-EPS memiliki nilai diameter sebar yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton FC dengan nilai 61,00. Peningkatan nilai *slump flow* ini menandakan bahwa penambahan butiran EPS dalam campuran *foam concrete* dapat meningkatkan workability atau kemudahan pengerjaan beton. Butiran EPS memiliki sifat yang ringan dan permukaan halus sehingga dapat mengurangi gesekan antarpartikel agregat dan pasta semen. Hal ini menyebabkan campuran menjadi lebih mudah mengalir dan menyebar ketika dilakukan pengujian *slump flow* [15]

4.1.2 Pengujian Setting time

Pengujian waktu ikat dilakukan dengan menggunakan alat vicat apparatus untuk menentukan lamanya waktu yang dibutuhkan beton segar hingga mulai mengalami proses pengerasan. Dari pengujian ini diperoleh dua parameter utama, yaitu waktu ikat awal dan waktu ikat akhir. Hasil pengujian *setting time foam concrete* tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.

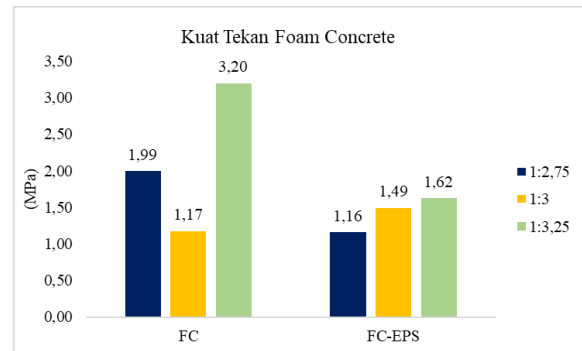
Tabel 4. Hasil pengujian *setting time foam concrete* benda uji FC dan FC-EPS dengan variasi rasio semen dan agregat

Kode campuran	Rasio semen dan agregat	Kandungan EPS	Waktu ikat (Menit)	
			Ikat Awal	Ikat Akhir
FC 1	1:2,75	-	420	555
FC 2	1:3	-	416	525
FC 3	1:3,25	-	345	450
FC-EPS 1	1:2,75	20%	410	540
FC-EPS 2	1:3	20%	345	450
FC-EPS 3	1:3,25	20%	337	435

Berdasarkan dari analisis yang telah dilakukan yaitu nilai *slump flow* menunjukkan dengan penggunaan rasio semen dan agregat yang lebih rendah membuat benda uji lebih kental dan diameter penyebaran lebih kecil. Hal ini berkaitan dengan semakin kecil diameter slump yang dihasilkan, menunjukkan bahwa proses pengikatan campuran berlangsung lebih cepat [16].

4.2 Hasil Pengujian Beton Keras

4.2.1 Pengujian Kuat Tekan

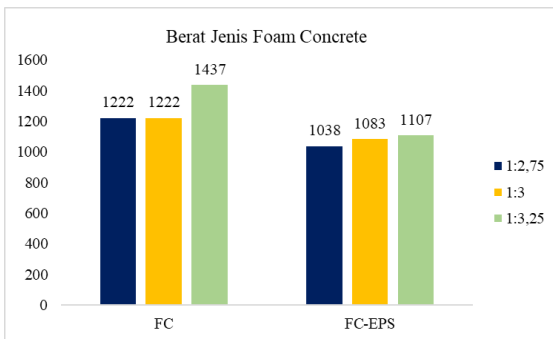


Grafik 1. Hasil pengujian kuat tekan *foam concrete* benda uji FC dan FC-EPS dengan variasi rasio semen dan agregat

Berdasarkan hasil pengujian terhadap benda uji FC dengan rasio semen agregat 1:2,75 mencapai nilai kuat tekan 1,99 MPa dan rasio semen agregat 1:3 diperoleh nilai kuat tekan 1,17 MPa. Nilai kuat tekan optimal diperoleh campuran *foam concrete* dengan rasio 1:3,25 yaitu sebesar 3,20 MPa.

Pada campuran FC-EPS dengan variasi rasio semen agregat 1:2,75 nilai kuat tekan 1,16 MPa. 1:3 menunjukkan nilai kuat tekan sebesar 1,49 MPa dan nilai optimal pada variasi 1:3,25 dengan nilai 1,62 MPa. Campuran *foam concrete* menunjukkan kenaikan kuat tekan yang konsisten, yaitu semakin tinggi rasio semen dan agregat semakin tinggi kuat tekan. Dari hasil pengujian kuat tekan *foam concrete* Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh [2] yang menyatakan bahwa ketika rasio pasir terhadap semen meningkat, kuat tekan beton juga mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kadar pasir.

4.2.2 Pengujian Berat Jenis



Grafik 2. Hasil pengujian berat jenis *foam concrete* benda uji FC dan FC-EPS dengan variasi rasio semen dan agregat

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis, *foam concrete* dengan variasi rasio semen agregat 1:2,75 dan 1:3 memiliki nilai yang sama yaitu 1222 kg/m³. Pada variasi campuran 1:3,75, berat jenis meningkat dengan nilai 1437 kg/m³. Sedangkan pada variasi campuran FC-EPS dengan rasio semen-agregat 1:2,75 memiliki berat jenis paling rendah, yaitu 1038 kg/m³, diikuti oleh variasi 1:3 dengan nilai 1083 kg/m³, dan 1:3,25 sebesar 1107 kg/m³.

Pengujian berat jenis terhadap benda uji menunjukkan bahwa *foam concrete* dengan variasi rasio semen agregat yang rendah memiliki berat jenis yang lebih tinggi. Sementara itu, pada perbandingan antara FC dan FC-EPS, diperoleh FC-EPS memiliki berat jenis lebih rendah dibandingkan dengan beton FC. Hal ini disebabkan oleh penggunaan butiran EPS sebagai pengganti sebagian pasir dapat mengurangi berat total beton [2].

5 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian eksperimental terhadap *foam concrete* dengan variasi rasio semen dan agregat serta substitusi EPS terhadap agregat halus dapat disimpulkan bahwa rasio semen terhadap agregat berpengaruh signifikan terhadap sifat fisik dan mekanik *foam concrete*. Peningkatan rasio semen dan agregat menghasilkan peningkatan kuat tekan dan berat jenis material. Nilai kuat tekan optimal pada *foam concrete* diperoleh pada rasio 1:3,25 sebesar 3,20 MPa dengan berat jenis 1437 kg/m³, sedangkan pada campuran dengan substitusi 20% EPS diperoleh kuat tekan 1,62 MPa dengan berat jenis 1106 kg/m³.

Secara keseluruhan, rasio semen agregat memiliki pengaruh dominan terhadap kuat tekan. Pada benda uji FC dan FC-EPS, nilai kuat tekan tertinggi tercapai pada rasio 1:3,25, menandakan bahwa peningkatan proporsi agregat relatif terhadap semen dalam rentang yang diuji meningkatkan kapasitas tekan akhir. Pada penggunaan EPS dapat diatur sesuai kebutuhan aplikasi untuk mencapai keseimbangan antara berat ringan dan kekuatan tekan yang memadai.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta masukan yang sangat berharga selama proses penelitian dan penulisan berlangsung. Penulis berharap semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

Daftar Pustaka

- [1] M. Kozłowski and M. Kadela, "Mechanical Characterization of Lightweight Foamed Concrete," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/6801258.
- [2] R. Othman *et al.*, "Relation between Density and Compressive Strength of Foamed Concrete," *Materials*, vol. 14, no. 11, p. 2967, May 2021, doi: 10.3390/ma14112967.
- [3] D. R. Basri, E. E. Putri, B. M. Adji, and A. Hakam, "The Ratio of Cement and Sand from Lake Binkuang as Aggregate to Create Foam Mortar 2,000 kPa," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1173, no. 1, p. 012010, May 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1173/1/012010.
- [4] Y. L. Lee, C. S. Tan, S. K. Lim, S. Mohammad, and J. H. Lim, "Strength Performance on Different Mix of Cement-Sand Ratio and Sand Condition for Lightweight Foamed Concrete," *E3S Web of Conferences*, vol. 65, p. 02006, Nov. 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20186502006.
- [5] A. Kan and R. Demirboga, "Effect of cement and EPS beads ratios on compressive strength and

- density of lightweight concrete,” *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, vol. 14, pp. 158–162, Apr. 2007.
- [6] N. Hamidi and B. Galloway, “Reprocessing Post-Consumer Expanded Polystyrene: Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Concrete Made With Postconsumer Expanded Polystyrene,” *Journal of Macromolecular Science, Part B*, vol. 61, no. 6, pp. 811–824, Jun. 2022, doi: 10.1080/00222348.2022.2113305.
- [7] J. Wang, B. Hu, and J. H. Soon, “Physical and Mechanical Properties of a Bulk Lightweight Concrete with Expanded Polystyrene (EPS) Beads and Soft Marine Clay,” *Materials*, vol. 12, no. 10, p. 1662, May 2019, doi: 10.3390/ma12101662.
- [8] Y. Xu and L. H. Jiang, “Investigating Mix Proportions of Lightweight Expanded Polystyrene Concrete,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 71–78, pp. 950–953, Jul. 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.71-78.950.
- [9] M. Canbaz and A. C. Türeyen, “Effect of expanded polystyrene beads on the properties of foam concrete containing polypropylene fiber,” *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, vol. 13, no. 1, p. 28, Mar. 2022, doi: 10.20528/cjcr1.2022.01.003.
- [10] S. El Gamal, Y. Al-Jardani, M. S. Meddah, K. Abu Sohel, and A. Al-Saidy, “Mechanical and thermal properties of lightweight concrete with recycled expanded polystyrene beads,” *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 28, no. 1, pp. 80–94, Jan. 2024, doi: 10.1080/19648189.2023.2200830.
- [11] M. Lei, S. Deng, Z. Liu, F. Wang, and S. Hu, “Understanding of EPS beads on mechanical properties and void morphology of a CO₂-solidified foam concrete based on solid wastes,” *Constr Build Mater*, vol. 405, p. 133388, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133388.
- [12] C. Pang, C. Zhang, and P. Li, “Improvement of Core–Shell Lightweight Aggregate by Modifying the Cement–EPS Interface,” *Materials*, vol. 16, no. 7, p. 2827, Apr. 2023, doi: 10.3390/ma16072827.
- [13] H. A. Obaid and A. A. Hilal, “Effect of Expanded Polystyrene Foam Aggregate on Strength and Shrinkage Characteristics of Foamed Concrete,” *Civil Engineering and Architecture*, vol. 10, no. 5, pp. 1788–1797, Sep. 2022, doi: 10.13189/cea.2022.100507.
- [14] N. Ngudiyono *et al.*, “Pengaruh Ukuran Agregat Kasar dan Rasio Semen Terhadap Pasir Pada Kuat Tekan Pre-Placed Aggregate Concrete,” *Konstruksia*, vol. 15, no. 2, p. 49, Nov. 2024, doi: 10.24853/jk.15.2.49-55.
- [15] Anthony, R. Tanbora, and Handoko Sugiharto, “PENELITIAN LIGHTWEIGHT CONCRETE DENGAN MENGGUNAKAN EXPANDED POLYSTYRENE,” 2019.
- [16] D. S. Devi, M. Fauzi, B. Syafitri, and A. Laksono, “Durabilitas Geopolymer Foam Concrete Terhadap Ketahanan Sulfat,” *Jurnal Tekno Global*, vol. 12, no. 01, pp. 24–29, Jul. 2023, doi: 10.36982/jtg.v12i01.3175.