

Penerapan Beton *Precast* Berinsulasi untuk Efisiensi Energi pada Bangunan *Modern*

Kesya Lahea¹, Avril Sepang², Christian Saselah³, Riva Mokodompis⁴,
Stefani Switly Peginusa⁵, Helen Grace Mantiri⁶

Konstruksi Bangunan Gedung, Teknik Sipil, Politeknik Negeri Manado ^{1,2,3,4,5,6}
E-mail: kesyalaha@gmail.com

Abstrak

Konsumsi energi pada bangunan rumah tinggal terus meningkat, terutama untuk kebutuhan pendinginan dan pemanasan, seiring dengan perubahan iklim dan peningkatan standar kenyamanan termal. Kondisi ini menimbulkan tantangan besar dalam upaya efisiensi energi dan pengurangan emisi karbon di sektor perumahan. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah penggunaan beton *precast* berinsulasi. Dari penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas penerapan beton *precast* berinsulasi dalam mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan kenyamanan termal di rumah tinggal. Dengan penambahan aerogel sebesar 8%, suhu ruangan dapat dipertahankan pada kisaran 28–30°C tanpa bantuan pendingin tambahan, dan ketika menggunakan AC, konsumsi energi dapat ditekan hingga 30%. Hal ini menjadikan beton *precast* berinsulasi sebagai solusi efektif untuk menghadapi tantangan perubahan iklim dan kebutuhan bangunan ramah energi. Pencampuran aerogel sebesar 8% ke dalam elemen pracetak (kolom, balok, dan pelat) menjadi strategi baru dalam menciptakan beton berinsulasi yang efisien. Aerogel memiliki konduktivitas termal yang sangat rendah, menjadikannya salah satu material isolasi terbaik di dunia. Dari hasil perbandingan RAB, penggunaan aerogel menyebabkan peningkatan biaya struktur sekitar 17–20%, namun biaya ini dianggap sebanding dengan manfaat jangka panjang berupa efisiensi energi, pengurangan beban pendinginan ruangan, dan peningkatan kenyamanan termal dalam bangunan.

Kata kunci — Efisiensi Energi; Beton *Precast*; Termal

1. PENDAHULUAN

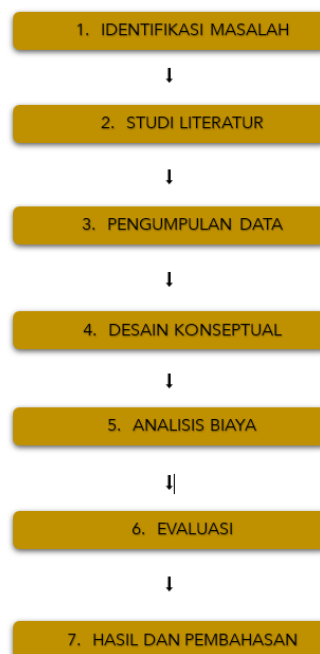
Dalam beberapa dekade terakhir, kebutuhan akan bangunan yang efisien secara energi terus meningkat seiring dengan tumbuhnya kesadaran masyarakat terhadap dampak lingkungan dari konsumsi energi yang berlebihan. Sektor bangunan merupakan salah satu penyumbang terbesar dalam konsumsi energi global, terutama untuk keperluan pendinginan, pemanasan, dan pencahayaan. Kondisi ini menimbulkan tantangan besar dalam upaya efisiensi energi dan pengurangan emisi karbon di sektor perumahan. Oleh karena itu, pengembangan material dan teknologi konstruksi yang mampu menekan penggunaan energi menjadi fokus utama dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan. Berbagai inovasi dalam beton pracetak terus dikembangkan di Indonesia, termasuk studi tentang penerapan dan dampaknya terhadap produktivitas konstruksi dan keberlanjutan lingkungan (Santosa et al., 2023; Wulandari dan Putra, 2022).

Bangunan modern, terutama yang berada di wilayah dengan kondisi iklim ekstrem, membutuhkan strategi konstruksi yang tidak hanya kokoh dan estetis, tetapi juga mampu mengurangi beban energi secara signifikan. Salah satu inovasi yang berkembang dalam industri konstruksi adalah pemanfaatan beton pracetak (*precast*) berinsulasi, yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi

termal bangunan. Beton precast menawarkan keunggulan dalam kecepatan pelaksanaan konstruksi, kontrol mutu, serta fleksibilitas desain. Penggunaan beton precast dapat mengurangi limbah konstruksi, meningkatkan efisiensi penggunaan material, dan mengurangi gangguan di lokasi konstruksi, serta dapat mengurangi emisi karbon (Nirma Rahmadia dan Ade Al Muhyi, 2024). Struktur beton precast juga dapat mengurangi penggunaan energi dan material, serta meningkatkan daya tahan bangunan (Nirma Rahmadia dan Ade Al Muhyi, 2024).

Penerapan beton precast berinsulasi merupakan salah satu pendekatan yang menjanjikan, karena mampu meningkatkan performa termal bangunan melalui kombinasi antara elemen struktural beton pracetak dan material isolasi termal. Hal ini menjadikan beton precast berinsulasi sebagai solusi efektif untuk menghadapi tantangan perubahan iklim dan kebutuhan bangunan ramah energi.

2. METODE PENELITIAN



Gambar 1. Bagan alir

Dari gambar 1 di atas metode riset yang akan dilakukan yaitu:

Mengidentifikasi isu terkait efisiensi energi dan performa termal beton *precast* berinsulasi *aerogel* dalam konstruksi rumah *modern*. Lalu mengumpulkan informasi dari berbagai sumber terkait teknologi *aerogel*, beton *precast* berinsulasi, serta metode analisis termal dan efisiensi energi, serta standar teknis terkait. Memperoleh informasi yang dibutuhkan untuk menjawab pertanyaan penelitian, mendukung analisis, dan mencari Solusi dari penelitian yang diusulkan. Selanjutnya membuat desain konseptual rumah *modern* menggunakan aplikasi *AutoCAD* dan *SketchUp* dengan material beton *precast* berinsulasi *aerogel* dan menghitung anggaran biaya yang diperlukan untuk bangunan rumah *modern* menggunakan beton *precast* berinsulasi (*aerogel*). Kemudian mengevaluasi tentang efisiensi energi, karakteristik termal, dan biaya konstruksi untuk menentukan keunggulan penggunaan *aerogel* dalam beton *precast*. Terakhir menentukan hasil akhir penelitian dan membahas faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi energi, performa termal pada rumah *modern*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Beton *precast* berinsulasi merupakan material konstruksi yang terdiri dari lapisan beton pracetak yang dipadukan dengan material insulasi termal di dalamnya. Teknologi ini telah diterapkan di berbagai negara dengan hasil yang menunjukkan penurunan konsumsi energi untuk pemanasan dan pendinginan hingga 30-50%. Penambahan *aerogel* dalam beton *precast* harus diseimbangkan antara efisiensi termal, kekuatan struktural, dan biaya produksi (Bournas, D. 2018). Beton pracetak memiliki mutu yang lebih baik dan lebih terkontrol, karena proses produksi dilakukan di pabrik dengan pengawasan ketat (Landeng, Kevin 2023).

Proporsi ideal *aerogel* dalam campuran beton yaitu 5%, 10%, dan 15% dari volume total beton. Dengan menambahkan *Aerogel* sebesar 5% dapat Mengurangi konduktivitas termal tanpa banyak mempengaruhi kekuatan tekan beton. Penambahan 5% *aerogel* dalam campuran beton dipilih sebagai jumlah optimal karena menyeimbangkan antara isolasi termal dan kekuatan mekanis (Silva, J. et al. 2023).

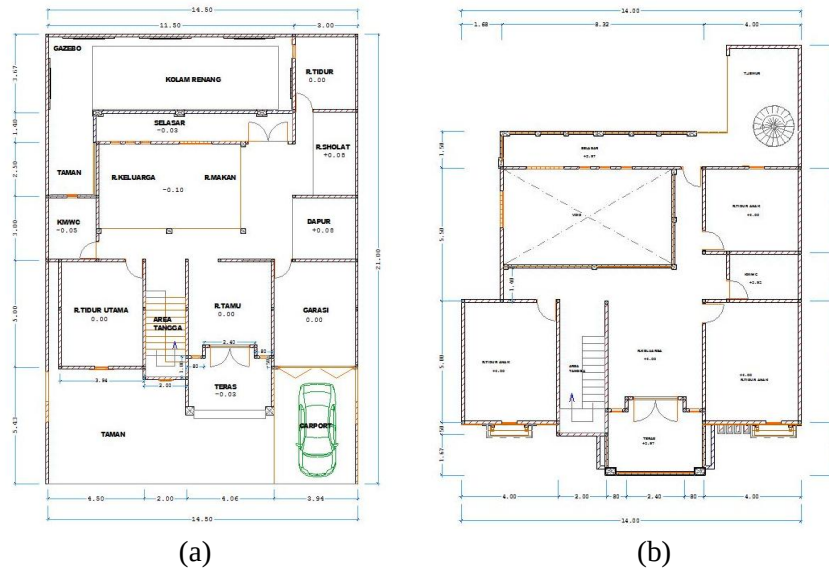
Panel beton *precast* berinsulasi *aerogel* mampu menekan perbedaan suhu pada struktur bangunan hingga 30% lebih baik dibandingkan dengan insulasi konvensional karena beberapa faktor utama. Salah satu penyebab utamanya adalah konduktivitas termal *aerogel* yang sangat rendah, berkisar antara 0,013–0,03 W/m·K, jauh lebih kecil dibandingkan dengan insulasi tradisional seperti poliuretan (0,022–0,028 W/m·K) atau wol mineral (0,032–0,040 W/m·K). Penggunaan *aerogel* dalam berbagai aplikasi arsitektur menunjukkan bahwa *aerogel* tetap efektif bahkan dalam kondisi cuaca ekstrem (Demirörs, T.A., dan Çınar, K. 2024).

Aerogel dapat diaplikasikan dalam berbagai bentuk, termasuk dalam celah kecil dan sambungan struktur beton, sehingga menghilangkan titik-titik lemah yang biasanya menyebabkan kebocoran energi (Afsoosbiria, H., et al. 2024). Dalam elemen fasad ultra-tipis ditemukan bahwa penggunaan *aerogel* secara drastis dapat mengurangi perpindahan panas tanpa meningkatkan ketebalan struktur secara signifikan (Bentland, S. 2015). Ada peneliti yang mengatakan bahwa *aerogel* silika dikenal sebagai bahan isolasi termal yang sangat efisien karena porositas internalnya yang tinggi, terdiri dari struktur mikro dan mesopori. Dalam penelitian metode sintesis *aerogel* berbasis tekanan ambient digunakan insulasi termal bangunan, dan disimpulkan bahwa pendekatan ini dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi energi bangunan masa depan (Sair, S., et al. 2022).

Dari penelitian ini telah diambil rujukan dari beberapa jurnal yang ada, dan idealnya penggunaan *aerogel* dalam campuran lapisan beton *precast* yaitu sebesar 8% dikarenakan dengan menggunakan *aerogel* sebesar 8% tidak terlalu ekstrem sehingga kekuatan tekan masih relatif tinggi. Ini sudah cukup memberikan pengaruh positif terhadap isolasi termal. Estimasi konduktivitas termal beton yang telah dihitung adalah sebesar 1,02 W/m·K, semakin rendah nilai W/m·K, maka semakin baik material sebagai isolator panas. Jika dilihat dari penelitian yang sudah ada sebelumnya dengan menggunakan *aerogel* Penambahan *aerogel* 5% hanya menurunkan kekuatan tekan beton sekitar 5-7% tetapi konduktivitas termalnya kurang. Sedangkan penambahan lebih dari 10% menyebabkan penurunan kekuatan tekan hingga 15-25%, yang bisa berisiko bagi struktur bangunan. Hasil dari penelitian ini merupakan pengembangan desain rumah *modern* dua tingkat yang menggunakan beton *precast* berinsulasi *aerogel* sebagai solusi konstruksi efisien dan ramah energi. Selain itu, dilakukan perhitungan anggaran biaya pembangunan (RAB) untuk menjadi perbandingan antara harga beton konvensional dan beton pracetak berinsulasi.

3.1. Denah dan Tampak Rumah Dua Lantai

Dalam penelitian ini, telah digunakan *AutoCAD* untuk menyusun gambar teknis seperti denah, tampak depan, belakang, dan samping bangunan dua lantai yang menggunakan beton *precast* berinsulasi aerogel. *AutoCAD* mempermudah penyusunan desain modular yang presisi, terutama dalam menentukan dimensi panel pracetak dan sambungannya. Menurut (Siregar dan Saputra, 2021). Selain itu, (Prakoso dan Fadillah, 2020) menjelaskan bahwa gambar kerja yang dihasilkan dari *AutoCAD* dapat langsung digunakan untuk keperluan fabrikasi panel, pengaturan sistem sambungan, dan estimasi biaya konstruksi. Berikut ini menunjukkan gambar denah dua lantai dan tampak bangunan.



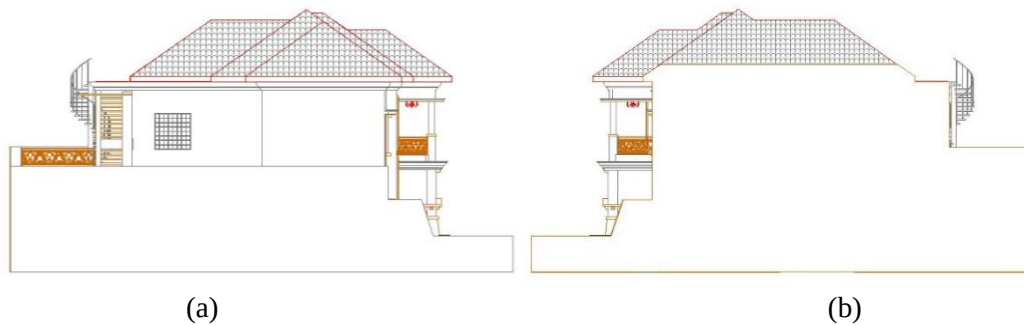
Gambar 2. Denah rumah (a) lantai satu (b) lantai dua

Denah lantai satu menggambarkan tata letak ruang dasar rumah modern dua lantai yang dirancang menggunakan beton pracetak berinsulasi. Dan denah lantai dua menunjukkan pembagian ruang pada lantai atas.



Gambar 3. Tampak bangunan (a) tampak depan (b) tampak belakang

Tampak depan memperlihatkan fasad utama rumah dengan komposisi simetris, jendela besar, dan kemungkinan penggunaan panel beton pracetak modular. Elemen estetika seperti kanopi, roster, atau bentuk geometri khas rumah modern bisa ditonjolkan di sini. Sedangkan tampak belakang bangunan, biasanya lebih sederhana. Area ini bisa menunjukkan akses ke halaman belakang, pintu servis, atau jendela ventilasi dari dapur dan kamar mandi.



Gambar 4. Tampak bangunan (a) tampak kiri (b) tampak kanan

Tampak kiri memberikan pandangan dari sisi kiri bangunan, memperlihatkan panjang bangunan, posisi jendela samping, serta potensi adanya ventilasi silang. Bisa juga menunjukkan desain atap miring atau pelindung panas matahari di sisi barat. Sedangkan tampak kanan bangunan, mirip dengan kiri tapi tergantung penempatan fungsi ruang. Tampak samping membantu mengilustrasikan bentuk massa bangunan, ketinggian lantai, dan sistem panel pracetak vertikal.

3.2. Desain 3D Rumah Dua Lantai

Dalam penelitian ini juga telah digunakan aplikasi *SketchUp* dimana, *SketchUp* digunakan untuk membuat model 3D rumah dua lantai yang dirancang menggunakan beton *precast* berinsulasi *aerogel*. *SketchUp* bisa dipakai untuk menyusun model 3D bangunan tropis dengan tujuan mengintegrasikan strategi efisiensi termal seperti dinding insulasi, atap reflektif, dan ventilasi silang. Model tersebut kemudian diekspor ke perangkat lunak energi lain (Sulistyo, R., et al, 2019). Penggunaan *SketchUp* dalam perancangan 3D bangunan efisien energi telah banyak didukung penelitian. (Paramita dan Sari, 2020) menunjukkan bahwa *SketchUp* sangat membantu dalam menyusun desain modular berbasis panel pracetak secara rinci dan cepat. Gambar 5. Di bawah ini menunjukkan desain 3D rumah 2 lantai menggunakan *SketchUp*.



Gambar 5. Desain 3D bangunan (a) tampak depan (b) tampak belakang

Desain 3D tampak depan menampilkan fasad rumah dua lantai bergaya modern dengan susunan panel pracetak yang rapi. Bukaan jendela besar digunakan untuk pencahayaan alami dan ventilasi silang. Dan tampak belakang menunjukkan bagian belakang rumah yang lebih sederhana, dengan akses ke area servis seperti dapur dan halaman. Terdapat bukaan untuk ventilasi dan pencahayaan, serta area teknis seperti unit AC atau tempat cuci.

3.3. Perhitungan RAB Rumah 2 Lantai Menggunakan Beton Precast Berinsulasi

Dalam desain bangunan dua lantai berbasis beton pracetak berinsulasi *aerogel*, dilakukan penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) sebagai bagian dari evaluasi kelayakan finansial proyek. RAB mencakup elemen utama struktur seperti kolom, balok, dan pelat lantai, yang dihitung berdasarkan volume elemen pracetak yang akan diproduksi dan dipasang. Pada penelitian ini, dua RAB disusun: satu menggunakan beton konvensional dan satu lagi

menggunakan panel pracetak + *aerogel* (8%). Hasilnya menunjukkan perbedaan biaya total sebesar $\pm 4,8\%$ lebih tinggi untuk sistem *precast*, namun dengan manfaat efisiensi energi jangka panjang. Dalam perhitungan dimensi disesuaikan agar kompatibel dengan sistem panel pracetak dan mempermudah sambungan antar elemen di lapangan, serta mempertimbangkan beban kerja yang sesuai dengan SNI 2847:2019 tentang struktur beton.

Penelitian oleh (Landeng et al. 2023) menunjukkan bahwa dalam desain bangunan modular berbasis beton pracetak, dimensi struktur harus mempertimbangkan efisiensi fabrikasi dan kemudahan pemasangan, tanpa mengurangi kekuatan struktur.

Berikut ini menunjukkan tabel HSP dan RAB untuk rumah *modern* 2 lantai menggunakan beton pracetak sesuai desain yang ada.

Tabel 1. HSP Beton Pracetak Biasa

NO.	URAIAN PEKERJAAN	SATUAN	KOEFISIEN	HARGA SATUAN (Rp)	JUMLAH HARGA (Rp)
A. TENAGA KERJA					
1	Pekerja	OH	0.130	34,750	4,518
2	Tukang Beton	OH	0.035	41,000	1,435
3	Kepala Tukang	OH	0.004	47,140	189
4	Mandor	OH	0.006	53,330	320
Sub Total Tenaga					6,462
B. BAHAN					
1	Semen	Kg	38.000	1,450	55,100
2	Pasir	Kg	70.000	650	45,500
3	Kerikil	Kg	105.000	520	54,600
4	Air	Ltr	23.000	20	460
Sub Total Bahan					155,660

Tabel 2. HSP Beton Pracetak + Aerogel 8%

NO.	URAIAN PEKERJAAN	SATUAN	KOEFISIEN	HARGA SATUAN (Rp)	JUMLAH HARGA (Rp)
A. TENAGA KERJA					6,462
B. BAHAN					
1	Semen	Kg	38.000	1,450	55,100
2	Pasir	Kg	70.000	650	45,500
3	Kerikil	Kg	105.000	520	54,600
4	Air	Ltr	23.000	20	460
5	Aerogel 8%	Kg	5.500	18,000	99,000
Sub Total Bahan					254,660

Tabel 3. Kuantitas Pekerjaan Struktur Rumah 2 Lantai (Per BH / M²)

No.	Elemen Struktur	Ukuran / Jenis	Satuan	Volume
1	Kolom K1	300 × 500	bh	36
2	Kolom K2	300 × 600	bh	12
3	Balok B1	250 × 450	bh	20
4	Balok B2	250 × 450	bh	16
5	Balok B3	250 × 500	bh	12
6	Balok B4	300 × 500	bh	6
7	Pelat Lantai	120 mm	m ²	130
8	Tangga Beton	-	bh	2
9	Erection & Jointing	Lump sum pekerjaan	ls	1

Tabel 4. Rekapitulasi RAB Beton Pracetak Biasa

No.	Uraian Pekerjaan	Volume	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1	Kolom K1	36 bh	1.400.000	50,400,000
2	Kolom K2	12 bh	2.000.000	24,000,000
3	Balok B1	20 bh	1.300.000	26,000,000
4	Balok B2	16 bh	1.250.000	20,000,000
5	Balok B3	12 bh	1.350.000	16,200,000
6	Balok B4	6 bh	1.500.000	9,000,000
7	Pelat Lantai	130 m ²	750.000	97,500,000
8	Tangga Beton	2 bh	6.000.000	12,000,000
9	Erection & Joint	1 ls	-	44,150,000
TOTAL				299,250,000

Tabel 5. Rekapitulasi Beton Pracetak + Aerogel 8%

No.	Uraian Pekerjaan	Volume	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1	Kolom K1 + Aerogel	36 bh	1.680.000	60,480,000
2	Kolom K2 + Aerogel	12 bh	2.400.000	28,800,000
3	Balok B1 + Aerogel	20 bh	1.534.000	30,680,000
4	Balok B2 + Aerogel	16 bh	1.475.000	23,600,000
5	Balok B3 + Aerogel	12 bh	1.593.000	19,116,000
6	Balok B4 + Aerogel	6 bh	1.770.000	10,620,000
7	Pelat Lantai	130 m ²	900.000	117,000,000
8	Tangga Beton	2 bh	7.000.000	14,000,000
9	Erection & Joint	1 ls	-	44,150,000
TOTAL				348,446,000

Peningkatan biaya akibat penggunaan aerogel 8% terjadi pada seluruh elemen pracetak utama:

- Kolom dan pelat mengalami peningkatan sekitar 20%.
- Balok mengalami peningkatan sekitar 17,2%, bergantung pada variasi dimensi dan harga dasar.

Elemen yang paling terdampak secara biaya absolut adalah:

- Pelat lantai, karena luas dan volume materialnya yang besar, dengan selisih mencapai Rp 19,5 juta.

Total kenaikan biaya keseluruhan struktur utama (kolom, balok, pelat) berdasarkan pendekatan borongan pabrikan dan pemasangan adalah:

- RAB Pracetak Biasa: Rp 299.250.000
- RAB Pracetak + Aerogel: Rp 348.446.000
- Selisih Total: Rp 49.196.000 (+16,4% rata-rata)

Berdasarkan hasil analisis Harga Satuan Pekerjaan (HSP), struktur beton pracetak biasa memiliki nilai sebesar Rp 213.122 per meter persegi, sementara struktur beton pracetak dengan penambahan aerogel 8% mengalami kenaikan menjadi Rp 261.122 per meter persegi. Kenaikan ini terutama disebabkan oleh mahalnya harga bahan aerogel dan kebutuhan campuran tambahan dalam proses produksi. Perbedaan HSP ini kemudian berdampak langsung terhadap total Rencana Anggaran Biaya (RAB) struktur. Catatan Teknis:

- Kenaikan harga satuan hanya diterapkan pada panel pracetak utama (kolom, balok, pelat).
- Biaya erection dan join tetap karena tidak terpengaruh aerogel.
- Harga aerogel dihitung termasuk pencampuran dan pengaruh ke volume beton.

Kenaikan ini menunjukkan bahwa penerapan aerogel sebagai material tambahan memang berdampak terhadap pembiayaan, namun dapat dianggap sebagai investasi jangka panjang untuk mendukung efisiensi energi dan keberlanjutan bangunan.

4. KESIMPULAN

Penerapan beton *precast* berinsulasi *aerogel* pada desain rumah *modern* dua lantai menunjukkan hasil yang signifikan dalam peningkatan efisiensi energi dan kenyamanan termal bangunan. Dengan penambahan *aerogel* sebesar 8%, suhu ruangan dapat dipertahankan pada kisaran 28–30°C tanpa bantuan pendingin tambahan, dan ketika menggunakan AC, konsumsi energi dapat ditekan hingga 30%. Hal ini menjadikan beton *precast* berinsulasi sebagai solusi efektif untuk menghadapi tantangan perubahan iklim dan kebutuhan bangunan ramah energi.

Penggunaan beton pracetak dalam konstruksi *modern* memberikan keunggulan dalam hal efisiensi waktu pelaksanaan, kualitas produksi yang lebih terkontrol di pabrik, serta minimnya limbah di lokasi proyek. Sebagai inovasi untuk meningkatkan performa termal bangunan. Pencampuran *aerogel* sebesar 8% ke dalam elemen pracetak (kolom, balok, dan pelat) menjadi strategi baru dalam menciptakan beton berinsulasi yang efisien. *Aerogel* memiliki konduktivitas termal yang sangat rendah, menjadikannya salah satu material isolasi terbaik di dunia. Dari hasil perbandingan RAB, penggunaan *aerogel* menyebabkan peningkatan biaya struktur sekitar 17–20%, namun biaya ini dianggap sebanding dengan manfaat jangka panjang berupa efisiensi energi, pengurangan beban pendinginan ruangan, dan peningkatan kenyamanan termal dalam bangunan. Meskipun menawarkan banyak kelebihan, penggunaan *aerogel* pada beton pracetak juga memiliki beberapa kekurangan yang perlu dipertimbangkan. Pertama, *aerogel* memiliki harga yang relatif mahal dan belum tersedia secara luas di pasar lokal, sehingga berpengaruh langsung pada peningkatan biaya konstruksi. Selain itu, *aerogel* cenderung memiliki sifat rapuh dan mudah rusak jika tidak dilindungi oleh matriks beton yang tepat, sehingga perlu dilakukan modifikasi campuran dan pengujian material terlebih dahulu. Oleh karena itu, meskipun penggunaan *aerogel* menjanjikan dari segi kinerja termal, penerapannya dalam skala besar masih memerlukan studi kelayakan teknis dan ekonomi secara menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

- Afsoosbiria, H., et al. (2024). *Energy Efficiency of Aerogel-Insulated Walls*. *Energies*, MDPI
- Bentland, S. (2015). *Towards Ultra-Thin Façade Elements with Aerogel Insulation*. *Chalmers University of Technology*.
- Bournas, D. (2018). *Innovative Materials for Energy Retrofitting*. *Publications Office of the EU*.
- Demirörs, T.A., dan Çınar, K. (2024). *Applications of Silica Aerogel in Architecture*. *ResearchGate*.
- Landeng, K.D, Jesia M. Mewo, Gabriella C. Exan, Gusnirania Paramata, Stefani. S Switly Peginusa, SST. MT. (2023). Implementasi Beton *Precast* pada Desain Bangunan Hotel sebagai *Laboratorium Housekeeping* Politeknik Negeri Manado.
- Nirma Rahmadia dan Ade Al Muhyi (2024) "Optimasi Penggunaan Beton *Precast*: Meningkatkan Keberlanjutan dan Kecepatan Konstruksi".
- Paramita, A.D. dan Sari, A.P. (2020). "Penggunaan SketchUp untuk Pemodelan Panel Modular dalam Perancangan Bangunan Rumah Sederhana Sehat." *Jurnal Arsitektur Komposit*, 8(1), 45–54.
- Pratama, A., dan Nugroho, R.A. (2021). "Pemanfaatan SketchUp dan eQUEST untuk Simulasi Konsumsi Energi pada Bangunan Rumah Tinggal." *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), D75–D80.
- Prakoso, A., dan Fadillah, H. (2020). Integrasi *AutoCAD* dan BIM dalam Perencanaan Panel *Precast* Bangunan Vertikal. *Jurnal Konstruksi*, 12(1), 65–72.



Sair, S., et al. (2022). *Ambient Pressure Drying for Silica Aerogel Synthesis*. *Journal of Natural Fibers*, Taylor & Francis.

Santosa, H. D., Sumarsono, D., dan Kholiq, I. (2023). Studi Penerapan Elemen Struktur Pracetak pada Proyek Konstruksi di Indonesia: Tinjauan Manfaat dan Tantangan. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*.

Silva, J. et al. (2023). *Concrete with Aerogel: Thermal and Mechanical Performance*. *ResearchGate*.

Siregar, A., dan Saputra, D. (2021). Pemanfaatan *AutoCAD* dalam Perancangan Struktur Modular Beton Pracetak untuk Rumah Tahan Gempa. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 8(2), 110–118.

Sulistyo, R., et al. (2019). “Penggunaan SketchUp dalam Simulasi Thermal Rumah Tropis.” *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain*, 6(1), 12-20.

SNI 2847:2019. Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung.

Wulandari, R., dan Putra, R. E. (2022). Inovasi Material Beton Pracetak Ramah Lingkungan untuk Pembangunan Berkelanjutan. *Jurnal Teknologi Konstruksi*.
