



## Studi Temperatur Beton Massa pada Masa Pengerasan (*Hardening Time*) Menggunakan Suhu Air Dingin dan Kadar *Fly Ash*

Bagus Nurrohmat<sup>1\*</sup>, Daffa Rozaan Fayyadh<sup>2</sup>, Sumirin<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

\*Penulis Korespondensi: [bagusnurrohmat2@gmail.com](mailto:bagusnurrohmat2@gmail.com)<sup>1</sup>

**Abstract.** Modern infrastructure development often involves the use of mass concrete in large structural elements such as pile caps and foundations. However, massive concrete volumes trigger a significant temperature increase due to the heat of hydration that is difficult to dissipate, posing a risk of thermal stress and structural cracking. This study aims to analyze the temperature rise behavior of mass concrete and evaluate the effectiveness of combining chilled water and fly ash substitution in minimizing these thermal cracking risks. The research method employs a quantitative approach through laboratory testing at PT Adhimix RMC Plant Kaligawe. Specimen blocks measuring 40 x 40 x 100 cm were divided into three variations: normal concrete (BN), concrete with chilled water and 15% fly ash (BAF), and concrete with 25% fly ash (BF). Temperature was monitored using thermocouples at the core and surface for 14 days, then validated using the Portland Cement Association (PCA) formula. The results indicate that the integration of chilled water with 15% fly ash and the use of 25% fly ash significantly controlled extreme temperature surges at the 5th hour. The combination of chilled water and 15% fly ash produced the lowest core temperature of 37.3°C, far below the control concrete which reached 62.4°C. This proves that the combination of precooling methods and fly ash substitution is effective in reducing the heat of hydration during the early hardening period, although the use of 25% fly ash was found to be more stable in maintaining mass concrete temperature.

**Keywords:** Chilled Water; Fly Ash; Heat of Hydration; Mass Concrete; Thermal Cracking

**Abstrak.** Pembangunan infrastruktur modern sering melibatkan penggunaan beton massa (*mass concrete*) pada elemen struktur besar seperti *pile cap* dan fondasi. Namun, volume beton yang masif memicu peningkatan temperatur akibat panas hidrasi semen yang sulit terdissipasi, sehingga berisiko menimbulkan tegangan termal dan retak struktur. Penelitian ini bertujuan menganalisis perilaku kenaikan temperatur beton massa dan mengevaluasi efektivitas kombinasi air dingin serta substitusi *fly ash* dalam meminimalkan risiko retak termal tersebut. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif melalui pengujian laboratorium di PT Adhimix RMC Plant Kaligawe. Benda uji berukuran 40 x 40 x 100 cm dibagi menjadi tiga variasi: beton normal (BN), beton dengan air dingin dan *fly ash* 15% (BAF), serta beton dengan *fly ash* 25% (BF). Suhu dipantau menggunakan *thermocouple* pada bagian inti dan permukaan selama 14 hari, kemudian divalidasi dengan rumus *Portland Cement Association* (PCA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi air dingin dengan *fly ash* 15% serta penggunaan *fly ash* 25% secara signifikan mengendalikan lonjakan suhu ekstrem pada jam ke-5. Campuran air dingin dan *fly ash* 15% menghasilkan suhu inti terendah sebesar 37,3°C, jauh di bawah beton kontrol yang mencapai 62,4°C. Hal ini membuktikan bahwa kombinasi metode *precooling* dan substitusi *fly ash* efektif mereduksi panas hidrasi pada masa awal pengerasan, meski penggunaan *fly ash* 25% ditemukan lebih stabil dalam menjaga temperatur beton massa.

**Kata kunci:** Air Dingin; Beton Massa; *Fly Ash*; Panas Hidrasi; Retak Termal.

### 1. LATAR BELAKANG

Pada pelaksanaan konstruksi struktur dengan volume pengecoran yang besar, seperti fondasi, *pile cap*, dan dinding basement, sering digunakan beton massa (*mass concrete*). Beton massa memiliki karakteristik khusus, yaitu terjadinya peningkatan temperatur yang signifikan selama proses pengerasan akibat panas hidrasi semen *portland*. Peningkatan suhu ini sulit dilepaskan ke lingkungan karena dimensi beton yang besar dan sifat beton yang memiliki konduktivitas termal rendah. Akibatnya, terjadi perbedaan temperatur antara bagian dalam dan bagian luar beton yang dapat menimbulkan tegangan termal.

Salah satu metode pengendalian temperatur beton massa yang dapat diterapkan adalah dengan pengaturan suhu air pencampur serta penggunaan bahan tambah berupa *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen. Penggunaan air pencampur dengan suhu rendah bertujuan untuk menurunkan suhu awal beton sehingga dapat mengurangi temperatur puncak yang terjadi selama proses hidrasi. Sementara itu, pemanfaatan *fly ash* diketahui mampu memperlambat laju reaksi hidrasi semen serta menurunkan panas yang dihasilkan, sehingga distribusi temperatur beton menjadi lebih stabil dan risiko terjadinya retak termal dapat diminimalkan.

Penelitian ini mengkaji pengaruh penggunaan suhu air pencampur dan kadar *fly ash* terhadap kenaikan temperatur beton massa guna menghindari terjadinya retak termal serta mengetahui perilaku temperatur beton selama proses pengerasan dan mengevaluasi efektivitas metode pengendalian panas hidrasi dalam menjaga mutu, keawetan, dan kinerja struktur beton massa melalui pengujian laboratorium di Laboratorium PT Adhimix RMC Plant Kaligawe Semarang menggunakan benda uji beton berukuran  $40 \times 40 \times 100$  cm dengan variasi suhu air pencampur dan kadar *fly ash* sebagai bahan pengganti sebagian semen.

## 2. KAJIAN TEORITIS

Beton merupakan material konstruksi utama yang kualitasnya sangat dipengaruhi oleh komposisi campuran, terutama dalam hal kekuatan dan durabilitas (Yang et al., 2024). Pada beton massa (*mass concrete*), seperti pada struktur *raft foundation*, dimensi yang besar menyebabkan terjadinya panas hidrasi (*heat of hydration*) yang signifikan selama proses pengerasan (*curing*) (Handayani et al., 2019). Panas yang dihasilkan dari reaksi hidrasi semen dapat meningkatkan temperatur beton secara drastis, terutama pada bagian inti, sehingga menimbulkan gradien termal antara inti dan permukaan. Apabila perbedaan temperatur ini melebihi batas tertentu, maka dapat terjadi tegangan termal yang berpotensi menyebabkan retak (*thermal cracking*) serta fenomena *Delayed Ettringite Formation* (DEF) yang menurunkan keawetan beton (ACI 207, 2006; Handayani et al., 2019). Secara teoritis, kenaikan temperatur beton dipengaruhi oleh besarnya panas hidrasi, massa jenis, dan kalor jenis beton, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan keseimbangan energi.

Panas hidrasi sangat dipengaruhi oleh jumlah semen dan penggunaan bahan tambah mineral seperti *fly ash*, yang dapat berfungsi sebagai *pozzolanic material* untuk mengurangi laju reaksi hidrasi (Agus Karmadi & Luh Widyasari, 2024; Zakariya et al., 2021). Penggunaan *fly ash* terbukti mampu menurunkan temperatur puncak beton secara signifikan, di mana substitusi sebesar 24,4% dapat menurunkan suhu maksimum hingga  $13,1^{\circ}\text{C}$  dibandingkan beton dengan semen OPC murni (Zakariya et al., 2021). Selain itu, pengendalian suhu juga

dapat dilakukan melalui metode *pre-cooling*, seperti penggunaan air dingin pada campuran beton, yang efektif menurunkan suhu awal dan suhu maksimum beton serta mengurangi perbedaan temperatur antara inti dan permukaan (Fadly, 2025). Dengan demikian, kombinasi penggunaan *fly ash* dan teknik *pre-cooling* menjadi strategi yang efektif dalam mengendalikan panas hidrasi pada beton massa.

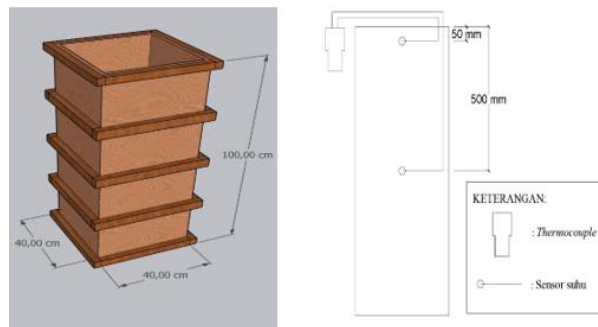
Lebih lanjut, pengendalian temperatur beton massa tidak hanya berfokus pada penurunan suhu maksimum, tetapi juga pada pengurangan gradien termal agar tetap berada dalam batas aman, yaitu perbedaan suhu tidak melebihi 20°C (ACI 207.1R). Penelitian menunjukkan bahwa metode perawatan seperti penggunaan sistem insulasi (*curing system*) mampu menjaga distribusi temperatur tetap merata dan mencegah terjadinya retak termal (Handayani et al., 2019). Selain itu, penggunaan *fly ash* dalam persentase optimum, seperti 12,5%, juga terbukti tidak hanya mampu mengendalikan panas hidrasi tetapi juga meningkatkan kuat tekan beton melalui reaksi *pozzolanic* dan efek pengisian pori (*filler effect*) (Setiawati, 2018). Oleh karena itu, pemilihan material dan metode pengendalian suhu yang tepat menjadi faktor kunci dalam menjaga kinerja termal dan mekanis beton massa.

### 3. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini digunakan metode kuantitatif, di mana pengumpulan data primer dilakukan melalui serangkaian pengujian di laboratorium. Oleh karena itu, diperlukan tahapan pelaksanaan penelitian yang sistematis dan terstruktur agar data yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

#### Bekisting dan Penempatan Sensor Suhu

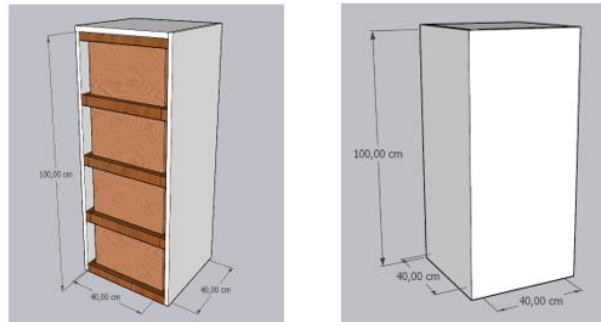
Bekisting digunakan sebagai wadah pencetakan beton segar untuk pembuatan benda uji balok yang digunakan dalam pengujian suhu beton massa. Bekisting yang digunakan memiliki ukuran panjang 40 cm, lebar 40 cm, dan tinggi 100 cm. Sensor suhu dipasang pada kedalaman 5 cm, dan 50 cm dari permukaan beton, di mana setiap titik kedalaman dipasang 1 sensor suhu.



**Gambar 1.** Bekisitng dan Penempatan Sensor Suhu.

## Penutupan Dengan Styrofoam

Menutup bekisting dan beton dengan *styrofoam* untuk menjaga suhu pada beton.



**Gambar 2.** Sketsa Penutupan Sebagian Dan Penutupan Secara Sempurna Dengan *Styrofoam*.

## Analisis Data

Tujuan penerapan metode analisis data dalam penelitian ini yaitu untuk mengkaji data yang diperoleh dari hasil percobaan atau eksperimen yang telah dilakukan, kemudian membandingkannya dengan hasil perhitungan berdasarkan rumus yang digunakan.

$$T_0 = \frac{0.22(T_aW_a + T_cW_c + T_fW_f) + T_wW_w + T_aW_wa}{0.22(W_a + W_c + W_f) + W_w + W_wa}$$

Keterangan:

$T_0$ : temperatur awal beton ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_a$ : temperatur agregat ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_c$ : temperatur semen ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_f$ : temperatur *fly ash* ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_w$ : temperatur air ( $^{\circ}\text{C}$ )

$W_a$ : berat agregat (kg)

$W_c$ : berat semen (kg)

$W_f$ : berat *fly ash* (kg)

$W_w$ : berat air (kg)

$T_{max}$ : temperatur puncak beton ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_0$ : temperatur awal beton ( $^{\circ}\text{C}$ )

$W_c$ : berat semen (kg)

$W_{scm}$ : berat *fly ash* (kg)

Perhitungan temperatur puncak beton normal menggunakan persamaan berikut.

$$T_{max} = T_0 + 14 \frac{W_c}{100}$$

Dalam kasus beton yang terdiri dari semen dan abu terbang, penentuan suhu maksimum beton dilakukan dengan menerapkan persamaan ini.

$$T_{max} = T_0 + 12 \frac{W_c}{100} + 6 \frac{W_{scm}}{100}$$

Keterangan:

$T_{max}$ : temperatur puncak beton ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_0$ : temperatur awal beton ( $^{\circ}\text{C}$ )

$W_c$ : berat semen (kg)

$W_{scm}$ : berat *fly ash* (kg)

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### Hasil Rumus

Berdasarkan hasil pengujian suhu pada ketiga variasi benda uji, diperoleh data yang menunjukkan perbedaan signifikan pada temperatur awal maupun temperatur puncak. Beton normal mencatatkan suhu awal sebesar  $30,5^{\circ}\text{C}$  dengan suhu puncak mencapai  $96,1^{\circ}\text{C}$ . Sementara itu, beton dengan substitusi *fly ash* 15% dan penggunaan air dingin menunjukkan penurunan suhu yang drastis dengan suhu awal  $22,3^{\circ}\text{C}$  dan suhu puncak  $78,38^{\circ}\text{C}$ . Adapun pada variasi beton dengan *fly ash* 25%, suhu awal tercatat sebesar  $29,6^{\circ}\text{C}$  dengan suhu puncak mencapai  $78,87^{\circ}\text{C}$ .

**Tabel 1.** Hasil Analisis Temperatur Awal dan Puncak Pada Benda Uji Menggunakan Rumus.

Benda Uji	Temperatur Awal ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperatur Puncak ( $^{\circ}\text{C}$ )
BN	30,5	91,1
BAF	22,3	74,3
BF	29,6	78,8

##### Pengukuran Suhu



**Gambar 3.** Pengukuran Suhu Menggunakan Alat *Thermocouple*.

Pengukuran suhu menggunakan *thermocouple* dilakukan selama 14 hari. Pengukuran ini dilakukan untuk mendapatkan nilai rata-rata suhu pada beton massa. Hasil pengukuran suhu dapat dilihat pada Tabel 2 sampai Tabel 7.

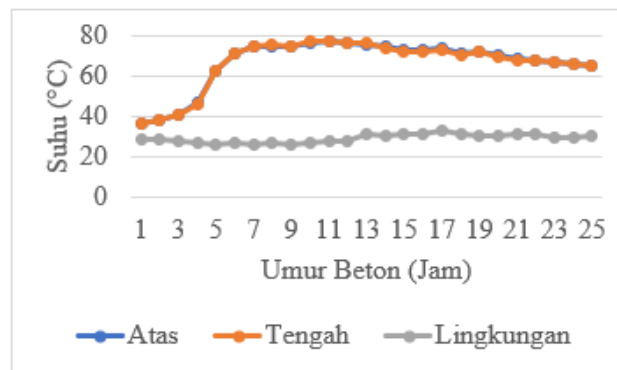
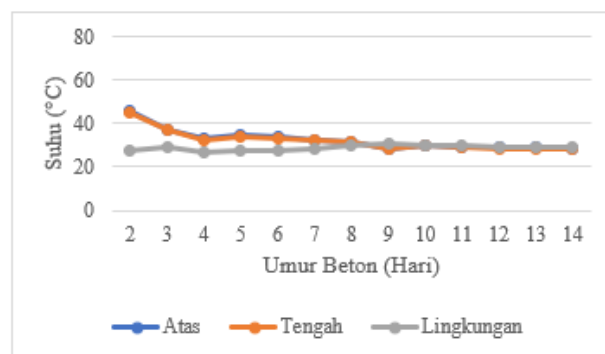
### Beton BN Kontrol

**Tabel 2.** Hasil Suhu Beton BN Dalam Jam.

Umur Beton (Jam)	Permukaan Atas Suhu (°C)	Inti Tengah Suhu (°C)	Lingkungan Suhu (°C)
1	36,2	36,1	28,8
2	37,9	38,0	28,6
3	40,9	40,9	28,0
4	46,6	46,3	27,1
5	62,8	62,4	26,0
6	71,3	71,7	26,8
7	74,5	74,6	26,1
8	74,9	75,6	27,2
9	74,6	74,5	26,1
10	76,9	77,2	26,7
11	77,1	77,5	27,4
12	76,7	76,8	27,9
13	76,0	76,2	31,4
14	74,7	74,0	30,1
15	73,1	72,4	31,7
16	73,4	72,4	31,0
17	74,0	72,8	33,2
18	71,7	70,8	30,9
19	72,3	71,8	30,7
20	70,2	69,5	30,8
21	68,8	67,9	31,2
22	67,9	67,5	30,9
23	67,0	67,3	29,8
24	66,1	66,0	30,0
25	65,5	65,5	30,3

**Tabel 3.** Hasil Suhu Beton BN Dalam Hari.

Umur Beton (Hari)	Permukaan Atas Suhu (°C)	Inti Tengah Suhu (°C)	Lingkungan Suhu (°C)
2	44,7	45,7	27,5
3	37,0	37,0	28,8
4	33,0	32,7	26,5
5	34,5	34,0	27,2
6	33,8	33,2	27,8
7	32,5	32,0	28,5
8	31,2	31,2	29,8
9	28,7	28,7	30,7
10	29,8	29,6	30,2
11	29,3	29,0	29,8
12	29,0	28,7	29,4
13	28,8	28,6	29,1
14	28,5	28,3	28,8

**Gambar 4.** Suhu Beton BN Kontrol Pada Hari Ke-1.**Gambar 5.** Suhu Beton BN Kontrol Pada Hari Ke-2 Sampai Hari Ke-14.

Berdasarkan hasil pengamatan pada beton massa kontrol, temperatur maksimum sebesar 77,5°C terdeteksi pada bagian inti struktur, sedangkan pada permukaan mencapai 77,1°C. Perbedaan suhu antara kedua titik tersebut berpotensi membentuk gradien termal yang lebar, sehingga meningkatkan risiko terjadinya retak termal akibat ketidakseimbangan pemuaian

antar lapisan beton. Temperatur puncak pada inti beton teramati pada hari ke-2 hingga hari ke-14, kemudian mengalami penurunan secara bertahap seiring berkurangnya aktivitas hidrasi semen. Pada fase ini, suhu rata-rata permukaan tercatat sebesar 44,7°C, sedangkan suhu inti sebesar 45,7°C. Selanjutnya, pada fase pendinginan, suhu beton terus menurun hingga mendekati temperatur lingkungan, dengan suhu permukaan sebesar 28,5°C dan suhu inti sebesar 28,3°C, yang menunjukkan tercapainya kondisi kesetimbangan termal (*thermal equilibrium*). Berdasarkan analisis grafik, dapat disimpulkan bahwa pada fase awal temperatur inti beton lebih tinggi dibandingkan permukaannya, dan stabilitas termal baru tercapai setelah hari ke-4. Kondisi ini menegaskan bahwa pengendalian suhu selama periode awal pengerasan sangat krusial untuk memitigasi risiko retak internal serta menjaga integritas struktural beton massa.

### Beton BAF

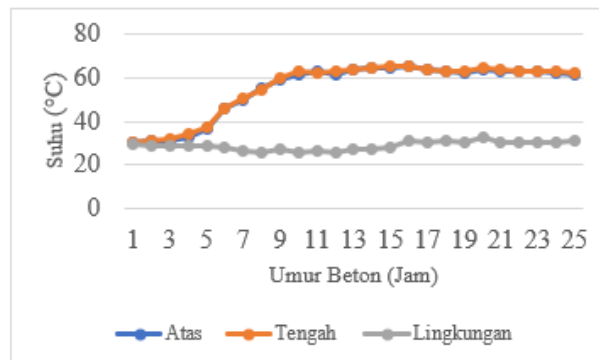
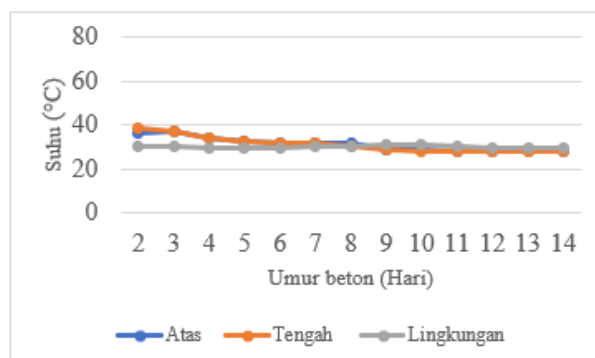
**Tabel 4.** Hasil Suhu Beton BAF Dalam Jam.

Umur Beton (Jam)	Permukaan Atas Suhu (°C)	Inti Tengah Suhu (°C)	Lingkungan Suhu (°C)
1	30,1	30,5	29,7
2	30,8	31,2	28,5
3	31,3	31,5	28,8
4	32,8	33,9	28,7
5	36,8	37,3	28,4
6	45,8	46,2	27,8
7	49,8	50,6	26,4
8	54,9	54,6	26,0
9	59,2	60,2	26,8
10	61,4	62,6	25,8
11	62,7	62,5	26,6
12	61,4	62,6	25,8
13	63,4	63,8	26,9
14	64,8	64,6	27,5
15	64,5	65,1	27,9
16	65,2	65,1	31,2
16	63,5	63,6	30,6
18	62,8	63,0	30,9
19	62,3	63,3	30,5
20	63,6	64,2	32,8
21	63,1	63,5	30,5
22	63,0	63,3	30,0
23	62,8	62,9	30,2
24	62,2	62,6	30,6
25	61,6	62,3	31,2

**Tabel 5.** Hasil Suhu Beton BAF Dalam Hari.

Umur Beton (Hari)	Permukaan Atas Suhu (°C)	Inti Tengah Suhu (°C)	Lingkungan Suhu (°C)
2	36,0	38,5	30,1
3	37,1	37,2	29,9
4	34,0	33,7	29,2
5	32,8	32,5	29,5
6	32,1	31,8	29,8
7	31,9	31,4	30,0
8	31,6	30,6	30,0
9	28,7	28,7	31,3
10	28,4	28,3	30,9
11	28,1	28,0	30,4
12	27,9	27,8	29,8
13	27,8	27,7	29,4
14	27,8	27,7	29,4

Berdasarkan data yang tersaji pada Tabel 4, pengukuran suhu beton massa dengan penggunaan air dingin dan penambahan *fly ash* sebesar 15% dilakukan pada hari pertama dengan interval waktu setiap satu jam selama 24 jam. Selanjutnya, pada Tabel 5 ditampilkan hasil pengukuran suhu yang dilakukan setiap satu hari sekali pada periode pengamatan berikutnya.

**Gambar 6.** Suhu Beton BAF Pada Hari Ke-1.**Gambar 7.** Suhu Beton BAF Pada Hari Ke-2 Sampai Hari Ke-14.

Pada Gambar 6 dalam kurun waktu 24 jam pertama, beton BAF mencapai suhu puncak sebesar 65,2°C pada permukaan dan 65,1°C pada bagian inti, yang menandakan periode intensitas tertinggi dari reaksi hidrasi. Meskipun suhu tersebut tergolong tinggi, temperatur maksimum pada inti beton BAF tercatat tetap lebih rendah dibandingkan dengan beton kontrol. Fenomena ini membuktikan bahwa integrasi air dingin dan substitusi *fly ash* sebesar 15% efektif dalam mereduksi panas puncak yang dihasilkan. Sedangkan Gambar 7, teramati bahwa temperatur beton mengalami penurunan secara berkelanjutan mulai hari ke-2 hingga hari ke-14. Penurunan ini menunjukkan bahwa suhu beton secara bertahap bergerak menuju titik kesetimbangan dengan suhu lingkungan sekitarnya.

### Beton BF

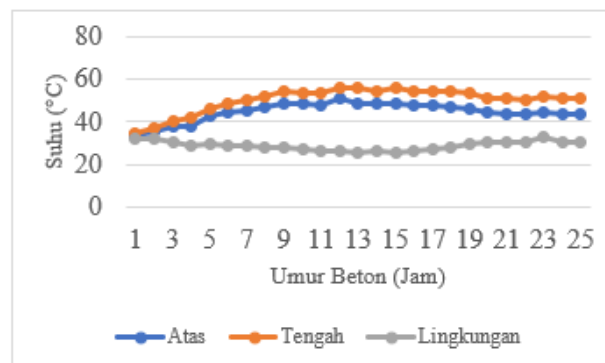
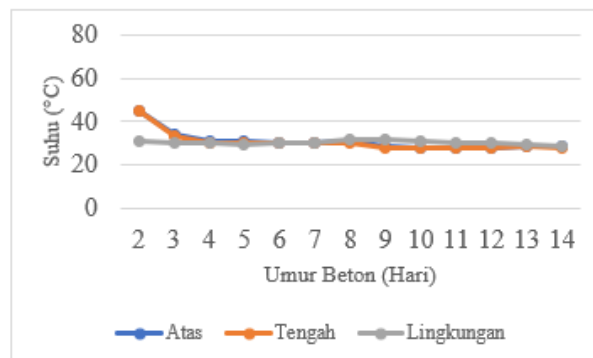
**Tabel 6.** Hasil Suhu Beton BF Dalam Jam.

Umur Beton (Jam)	Permukaan Atas Suhu (°C)	Inti Tengah Suhu (°C)	Lingkungan Suhu (°C)
1	33,6	34,8	32,1
2	35,7	37,0	32,3
3	37,9	40,0	30,2
4	38,1	41,6	29,0
5	42,8	46,4	29,4
6	44,8	48,7	28,9
7	45,7	50,6	28,7
8	46,7	51,8	28,0
9	48,7	54,0	28,0
10	48,6	53,8	26,8
11	48,0	53,3	26,1
12	51,1	56,4	26,4
13	49,0	55,9	25,4
14	48,4	54,7	26,5
15	49,0	55,9	25,4
16	48,0	54,6	26,5
17	47,4	54,4	27,0
18	47,1	54,2	27,8
19	46,2	53,7	29,7
20	44,2	51,3	30,1
21	44,0	51,1	30,8
22	43,7	50,3	30,2
23	44,8	52,0	32,8
24	43,8	50,8	30,8
25	44,0	51,0	30,4

**Tabel 7.** Hasil Suhu Beton BF Dalam Hari.

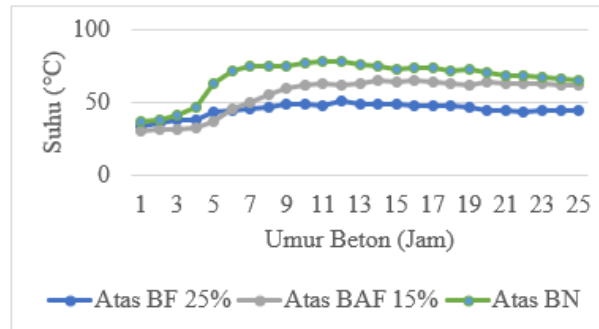
Umur Beton (Hari)	Permukaan Atas Suhu (°C)	Inti Tengah Suhu (°C)	Lingkungan Suhu (°C)
2	44,6	45,3	31,2
3	33,8	33,3	30,5
4	30,6	30,4	30,0
5	30,6	30,4	29,8
6	30,3	30,1	30,1
7	30,2	30,0	30,5
8	30,9	30,4	31,7
9	28,3	27,8	31,9
10	28,1	27,9	30,8
11	28,1	27,7	30,4
12	27,9	27,6	29,9
13	28,6	28,3	29,5
14	28,4	27,8	28,3

Data yang disajikan menunjukkan bahwa penggunaan substitusi *fly ash* sebesar 25% efektif dalam mereduksi suhu puncak beton massa. Penurunan suhu ini teramati secara konsisten selama periode pengamatan hari ke-1 hingga hari ke-14, yang membuktikan kemampuan material tersebut dalam mengendalikan panas hidrasi.

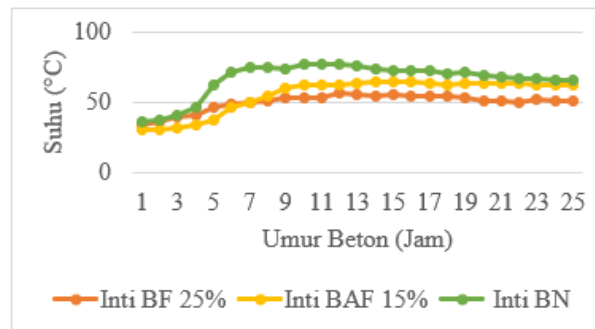
**Gambar 8.** Suhu Beton BF Pada Hari Ke-1.**Gambar 9.** Suhu Beton BF Pada Hari Ke-2 Sampai Hari Ke-14.

Berdasarkan data pada Gambar 8 dan Gambar 9, temperatur puncak beton BF di hari pertama tercapai pada jam ke-11 dengan nilai 51,1°C di permukaan dan 56,4°C di bagian inti. Memasuki hari ke-2 hingga hari ke-14, profil suhu beton ini cenderung lebih rendah dan stabil jika dibandingkan dengan varian beton BN serta BAF.

#### Perbandingan Beton BN, BAF, BF



Gambar 10. Perbandingan Temperatur Permukaan Atas Beton BN, BAF, BF.



Gambar 11. Perbandingan Temperatur Inti Beton BN, BAF, BF.

Berdasarkan data pada Gambar 10 dan Gambar 11, integrasi air dingin dengan variasi *fly ash* 15% serta penggunaan *fly ash* 25% menunjukkan pengaruh signifikan dalam mengendalikan lonjakan suhu ekstrem pada jam ke-5, baik pada bagian inti maupun permukaan beton. Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu inti beton dengan campuran air dingin dan *fly ash* 15% hanya mencapai 37,3°C dan suhu permukaan 36,8°C, sedangkan beton dengan *fly ash* 25% mencatat suhu 46,4°C pada inti dan 42,8°C pada permukaan. Nilai tersebut jauh lebih rendah dibandingkan beton kontrol yang mencapai 62,4°C pada inti dan 62,8°C pada permukaan. Selisih suhu yang signifikan ini membuktikan bahwa kombinasi metode *precooling* dan substitusi *fly ash* efektif dalam mereduksi panas hidrasi serta meminimalkan risiko retak termal pada beton massa. Dengan demikian, penggunaan air dingin bersama *fly ash* 15% maupun *fly ash* 25% dapat dinyatakan sebagai strategi pengendalian suhu yang efektif selama proses pengerasan beton massa dan sangat relevan untuk diterapkan pada proyek konstruksi berskala besar, khususnya di lingkungan bersuhu tinggi.

### **Analisis Komparatif Perilaku Termal terhadap Standar ACI**

Berdasarkan tinjauan teoritis dari American Concrete Institute (ACI), beton massa yang tidak mendapatkan pengendalian suhu berpotensi mengalami kenaikan temperatur hingga 65°C–70°C, bahkan dapat melampaui 80°C pada kondisi adiabatik tanpa sistem pendinginan. Sebaliknya, penerapan metode *cooling pipes* terbukti mampu menstabilkan suhu beton pada kisaran 22°C–24°C sebelum tahap *joint grouting*. Hasil penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan teori tersebut, di mana beton kontrol (BN) mencapai suhu puncak 77,5°C dari suhu awal 36,1°C, mendekati batas atas prediksi ACI dan berisiko mengalami retak termal. Sementara itu, variasi beton dengan kombinasi air dingin dan *fly ash* 15% (BAF) mampu menurunkan suhu maksimum menjadi 65,2°C dengan suhu awal 30,5°C, dan variasi *fly ash* 25% (BF) menghasilkan performa termal paling optimal dengan suhu puncak 56,4°C dari suhu awal 34,8°C. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan *fly ash* dan metode *precooling* efektif dalam meredam panas hidrasi, menjaga suhu beton tetap berada dalam batas aman, serta memenuhi kriteria termal ACI sehingga integritas struktural beton massa tetap terjamin.

### **Analisis Kepatuhan Termal Terhadap Spesifikasi Umum Bina Marga**

Berdasarkan Spesifikasi Umum Konstruksi Jalan dan Jembatan Tahun 2018 (Revisi 2) yang diterbitkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga, temperatur maksimum beton massa tidak boleh melebihi 71°C dengan perbedaan suhu antara inti dan permukaan maksimal 21°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton kontrol (BN) mencapai suhu puncak 77,5°C sehingga melampaui batas yang diizinkan dan berpotensi menimbulkan kerusakan termal. Sebaliknya, variasi beton dengan kombinasi air dingin dan *fly ash* 15% (BAF) mampu menurunkan suhu maksimum menjadi 65,2°C, sedangkan penggunaan *fly ash* 25% (BF) menghasilkan suhu puncak paling stabil sebesar 56,4°C. Kedua variasi tersebut juga menunjukkan selisih temperatur inti dan permukaan yang tetap berada di bawah 21°C. Dengan demikian, integrasi air dingin dan *fly ash* terbukti efektif dalam mengendalikan panas hidrasi, memenuhi ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2), serta aman diterapkan untuk meminimalisir risiko retak termal pada konstruksi beton massa.

## **5. KESIMPULAN DAN SARAN**

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data, dapat disimpulkan bahwa metode *precooling* menggunakan air dingin dan substitusi *fly ash* efektif dalam mengendalikan kenaikan temperatur beton massa. Pada masa kritis jam ke-5, terjadi penurunan suhu signifikan hingga 48%, di mana beton kontrol mencapai 62,4°C, sedangkan variasi uji mampu menekan suhu hingga 32,5°C. Penggunaan *fly ash* 25% menunjukkan stabilitas termal yang lebih baik

selama fase pengerasan, sementara variasi *fly ash* 25% (BF) dan kombinasi air dingin dengan *fly ash* 15% (BAF) berhasil menekan suhu puncak masing-masing menjadi 56,4°C dan 65,2°C. Nilai tersebut memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2) dengan batas maksimum 71°C dan selisih suhu inti-permukaan di bawah 21°C, serta sejalan dengan standar ACI dalam mitigasi risiko retak termal.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa rekomendasi penting yang dapat dijadikan acuan untuk pengembangan maupun penelitian lanjutan. Pertama, disarankan untuk menambah titik pemasangan sensor *thermocouple* sebagai bentuk redundansi data, sehingga potensi kerusakan sensor saat proses pengecoran dapat diminimalisasi dan distribusi suhu pada beton massa dapat terpetakan lebih detail serta akurat. Kedua, memperbanyak jumlah sampel sekaligus memperluas variasi kombinasi antara persentase *fly ash* dan suhu air dingin akan membantu menemukan karakteristik beton massa yang paling stabil dalam berbagai kondisi lingkungan, sehingga hasil penelitian dapat lebih representatif dan aplikatif.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan dan penyusunan penelitian ini, khususnya kepada institusi, dosen pembimbing atas bimbingan dan arahan yang konstruktif, serta rekan-rekan dan keluarga atas dukungan moral dan teknis.

## DAFTAR REFERENSI

- ACI. (2006). *ACI 207.1R-05 guide to mass concrete*.
- ACI. (2006). *ACI 207.1R-96 mass concrete*.
- Agus Karmadi, K., & Luh Widyasari, N. (2024). Pemanfaatan fly ash sebagai pengganti sebagian semen portland untuk mengurangi emisi karbon.
- ASTM-C.40. (2020). *Test method for organic impurities in fine aggregates for concrete*. ASTM International.
- ASTM-C128. (n.d.). *Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate 1*.
- ASTM-C136. (2019). *Test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. ASTM International.
- Fadly, M. I. (2025). Pengaruh penggunaan air dingin terhadap perbedaan suhu inti dan permukaan pada beton massa.
- Firmansyah, E. T., Desandana, W., & Nauli, A. R. (2026). Analisis perkembangan suhu beton massa pada pekerjaan raft foundation menggunakan sistem thermocouple. *Future*

*Academia: The Journal of Multidisciplinary Research on Scientific and Advanced.*  
<https://doi.org/10.61579/future.v4i1.810>

- Hamdi, F., & Raafidiani, R. (2025). Eksplorasi beton dalam arsitektur dan teknik sipil.
- Handayani, J., Lutfi, M., Chayati, N., Muhammad, F., & Taqwa, L. (2019). Studi pengaruh temperatur beton massa pada raft foundation ketebalan 3 meter (Studi Kasus: Proyek MCC Tower-Jakarta). *Jurnal Komposit*, 3(1).  
<https://doi.org/10.32832/komposit.v3i1.3743>
- Setiawati, M. (2018). *Fly ash sebagai bahan pengganti semen pada beton* (Vol. 17).
- Simanjuntak, G. A., & Simangunsong, I. A. (2023). Kajian korelasi campuran 123 terhadap kuat beton dengan FAS (faktor air semen) yang berbeda. *Journal of Social Science Research*.
- SNI-2460-2014. (2014). *Spesifikasi abu terbang batu bara dan pozzolan compress*.
- SNI-2834-2000. (2000). *Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal ICS*.
- SNI-7656-2012. (2012). *Badan Standarisasi Nasional 7656-2012: Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa*.
- Yang, F.-F., Beton, C., Beton, R., Beton, K., Karakteristik, D., Septiani, V., Suryan, V., Amalia, D., & Author, C. (2024). Faktor-faktor yang mempengaruhi campuran beton: Rancangan beton kekuatan beton, dan karakteristik beton. *Journal of Engineering and Transportation (JET)*, 2(1).
- Zakariya, A., Yudhono, G., Rosyadi, S., Pembangunan Jembatan, D., Kerja Pembangunan Jalan Tol Manado-Bitung Provinsi Sulawesi Utara, S., Pattimura No, J., Baru, K., Selatan, J., SBY No, J., Airmadidi, K., & Minahasa Utara, K. (2021). Kajian temperatur beton saat hardening time menggunakan fly ash sebagai bahan tambah semen (Study of concrete temperature during hardening time using fly ash as supplementary cementitious material). *Jurnal Jalan-Jembatan*, 38(2)