



Metodologi Optimal untuk Pengecoran Beton pada Kondisi Cuaca Panas: Perspektif Iklim Tropis Lembab

Yelna Yuristiary

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Batam

E-mail: yelna.yuristiary@univbatam.ac.id

ABSTRAK

Pengecoran beton pada kondisi cuaca panas, khususnya dalam konteks iklim tropis lembab, menghadirkan serangkaian tantangan unik yang dapat memengaruhi kualitas, kinerja, dan durabilitas struktur beton. Suhu ambien yang tinggi secara konsisten, kelembapan yang relatif tinggi, dan radiasi matahari yang intens berinteraksi secara kompleks, memengaruhi sifat beton segar maupun beton keras. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan investigasi mendalam terhadap metodologi optimal untuk pengecoran beton dalam kondisi tersebut. Pembahasan mencakup definisi dan karakteristik lingkungan pengecoran, pengaruh kondisi panas dan lembab terhadap sifat-sifat beton, strategi pemilihan material dan desain campuran yang adaptif, praktik terbaik dalam pengelolaan kegiatan pengecoran dan rekomendasi suhu material campuran beton. Kepatuhan terhadap standar internasional dan nasional, beserta implementasi pengendalian mutu yang ketat, juga ditekankan. Lebih lanjut, penelitian ini mengidentifikasi kebutuhan akan pendekatan holistik yang mempertimbangkan interdependensi antar tahapan konstruksi dan pentingnya adaptasi terhadap kondisi lapangan yang dinamis. Kesimpulan merangkum rekomendasi kunci dan menguraikan arah penelitian masa depan yang berfokus pada pengembangan solusi beton yang lebih tangguh dan berkelanjutan untuk iklim tropis lembab.

Kata kunci : Pengecoran Beton, Cuaca Panas, Iklim Tropis Lembab, Suhu Tinggi, Kelembapan Tinggi, Sifat Beton, Durabilitas Beton, Rekomendasi Suhu Material

ABSTRACT

Concrete casting in hot weather conditions, particularly in the context of humid tropical climates, presents a series of unique challenges that can affect the quality, performance, and durability of concrete structures. Consistently high ambient temperatures, high relative humidity, and intense solar radiation interact in complex ways, influencing the properties of both fresh and hardened concrete.

This research aims to conduct an in-depth investigation into the optimal methodologies for concrete casting under such conditions. The discussion covers the definition and characteristics of the casting environment, the effects of hot and humid conditions on concrete properties, strategies for adaptive material selection and mix design, best practices in managing casting activities, and recommended temperatures for concrete mix materials.

Compliance with international and national standards, along with the implementation of strict quality control, is also emphasized. Furthermore, the study identifies the need for a holistic approach that considers the interdependence of construction stages and the importance of adapting to dynamic site conditions. The conclusion summarizes key recommendations and outlines directions for future research focusing on the development of more resilient and sustainable concrete solutions for humid tropical climates.

Keyword : Concrete Casting, Hot Weather, Humid Tropical Climate, High Temperature, High Humidity, Concrete Properties, Concrete Durability, Material Temperature Recommendations

1. PENDAHULUAN

Pengecoran beton merupakan salah satu kegiatan utama dalam hampir setiap proyek konstruksi. Adapun penelitian ini berlokasi di daerah Pantai timur Madagascar yang memiliki iklim tropis dengan periode musim panas dari Desember hingga April, dan periode yang lebih sejuk dari Juni hingga September. Sebagai kota yang terletak di pesisir, Toamasina tidak mengalami musim kering, karena angin muson tenggara membawa hujan bahkan pada musim dingin selatan (Austral Winter). Meskipun demikian, periode dengan curah hujan terendah terjadi antara September hingga November, dengan suhu rata-rata bulan terdingin (Juli) sebesar 21,5°C dan bulan terpanas (Februari) sebesar 27,2°C. Curah hujan tahunan mencapai 3370 mm, dengan fluktuasi curah hujan yang signifikan, mulai dari 120 mm pada bulan terkering (September) hingga 480 mm pada bulan dengan curah hujan tertinggi (Maret).

Kondisi cuaca panas, yang sering terjadi selama musim panas, dapat berdampak negatif pada proses pengecoran beton. Kombinasi antara suhu tinggi, kecepatan angin yang tinggi, dan kelembaban relatif yang rendah dapat menciptakan kondisi yang mengarah pada masalah dalam penempatan dan penyelesaian beton kapan saja.

American Concrete Institute (ACI 305) mendefinisikan cuaca panas sebagai kombinasi dari kondisi-kondisi yang dapat mempengaruhi kualitas beton segar atau yang telah mengeras. Kondisi-kondisi tersebut meliputi suhu udara yang tinggi, suhu beton yang tinggi, kelembaban relatif yang rendah, kecepatan angin, serta radiasi matahari [1].

Dalam konteks cuaca panas, kesuksesan pengecoran beton sangat bergantung pada langkah-langkah yang diambil untuk memperlambat reaksi hidrasi semen dalam beton dan meminimalkan tingkat penguapan air dari beton yang baru tercampur. Masalah yang mungkin terjadi pada beton akibat cuaca panas meliputi peningkatan kebutuhan air, peningkatan laju kehilangan slump, laju pengaturan yang lebih cepat, peningkatan kecenderungan terjadinya retakan penyusutan plastik, kesulitan dalam mengontrol kadar udara terperangkap, penurunan kekuatan pada usia 28 hari dan setelahnya, kecenderungan untuk terjadinya retakan termal

diferensial, peningkatan variabilitas penampilan permukaan, serta peningkatan permeabilitas beton.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metodologi optimal dalam pengecoran beton di kondisi cuaca panas yang sangat berpengaruh terhadap kualitas hasil akhir beton, dengan fokus pada kondisi iklim tropis lembap di kawasan timur Madagaskar. Studi ini akan mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi keberhasilan pengecoran beton dan memberikan rekomendasi terkait modifikasi teknik dan material untuk mengatasi tantangan yang timbul akibat kondisi cuaca panas.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengecoran dalam Cuaca Panas

Pengecoran beton dalam kondisi cuaca panas menghadirkan sejumlah tantangan teknis yang memengaruhi mutu dan performa beton baik dalam kondisi segar maupun setelah mengeras. Menurut dokumen "**ACI 305R-20: Guide to Hot Weather Concreting**" yang diterbitkan oleh American Concrete Institute [1], cuaca panas dapat mempercepat laju hidrasi semen, meningkatkan kebutuhan air, serta memperbesar risiko retak akibat susut plastik. Oleh karena itu, pengendalian suhu beton, waktu pengecoran, dan perlindungan permukaan menjadi langkah penting untuk menjaga kualitas hasil akhir beton.

Dalam studi berjudul "**Hot Weather Concreting: Effects and Precautions**" oleh Neville [2], dijelaskan bahwa suhu tinggi mempercepat kehilangan slump, menurunkan durabilitas, serta menyebabkan variasi warna dan permukaan beton. Solusi yang diusulkan meliputi penggunaan agregat dengan suhu yang dingin, pendinginan air pencampur, penambahan retarder, serta penggunaan curing compound berbasis air untuk mempertahankan kelembaban permukaan.

Penelitian oleh Ramezani-pour [3] dalam bukunya "**Cement Replacement Materials**" juga menunjukkan bahwa penggunaan material pengganti semen seperti *fly ash* dan *slag* dapat membantu mengurangi panas hidrasi dan meningkatkan daya tahan beton di lingkungan tropis panas dan lembap.

Studi kasus oleh Kusumawardaningsih et al. [4] dalam jurnal *Jurnal Teknologi dan Konstruksi*

menunjukkan bahwa keberhasilan pengecoran di kawasan iklim panas tropis seperti Indonesia sangat bergantung pada waktu pelaksanaan dan peralatan pendukung seperti misting system dan pelindung bayangan (*shading*).

2.1.1 Pengecoran pada Cuaca Panas

ACI Committee 305 mendefinisikan "cuaca panas" sebagai kondisi apapun atau kombinasi dari kondisi berikut yang cenderung mengganggu kualitas beton segar atau beton yang mengeras dengan mempercepat laju kehilangan kelembapan dan laju hidrasi semen: suhu ambien tinggi, suhu beton tinggi, kelembapan relatif rendah, kecepatan angin tinggi, dan radiasi matahari [1]. ACI 301-20 "Specifications for Concrete Construction" dan ACI 305.1-14 "Specification for Hot Weather Concreting" membatasi suhu beton maksimum pada 95°F (35°C) pada saat *discharge/ casting* untuk jenis konstruksi umum seperti perkerasan, jembatan, dan bangunan, bukan untuk beton dalam skala besar (*mass casting*).

2.1.2 Karakteristik Iklim Tropis Lembab

- a) Kombinasi iklim tropis lembab, yang banyak ditemui di Asia Tenggara, sebagian Afrika, dan Amerika Latin, memiliki ciri-ciri khas yang membedakannya dari kondisi cuaca panas lainnya:
- b) **Suhu:** Wilayah ini mengalami suhu tinggi secara konsisten sepanjang tahun. Fluktuasi suhu rata-rata bulanan relatif kecil, seringkali hanya berkisar antara 1-3°C, dan suhu rata-rata harian juga relatif konstan.
- c) **Kelembapan:** Kelembapan relatif (RH) yang tinggi merupakan karakteristik dominan, hampir sepanjang tahun berada pada level yang tinggi, seringkali di atas 80% dan bahkan bisa mencapai 90% atau lebih. Kinerja beton secara signifikan dipengaruhi oleh tingkat kelembapan lingkungan [5].
- d) **Radiasi Matahari:** Meskipun langit sering berawan, intensitas radiasi matahari tetap tinggi ketika matahari tidak terhalang [6]. Radiasi matahari ini dapat secara signifikan meningkatkan suhu permukaan beton dan material konstruksi lainnya [7]. Pedoman konstruksi

menekankan pentingnya melindungi beton dari paparan sinar matahari langsung [8].

- e) **Curah Hujan:** Curah hujan yang tinggi dan sering terjadi adalah ciri umum lainnya, yang dapat berlangsung sepanjang tahun dengan beberapa variasi musiman [9]. Hujan dapat memengaruhi logistik pengecoran, kondisi permukaan kerja, dan efektivitas metode perawatan tertentu.
- f) **Angin:** Kondisi angin dapat bervariasi tergantung pada lokasi geografis, terutama jarak dari laut, dan dapat berubah sepanjang tahun [26]. Angin, bahkan pada kelembapan relatif tinggi, dapat mempercepat laju penguapan dari permukaan beton.

2.1.3 Interaksi Suhu Tinggi dan Kelembapan Tinggi

Kombinasi suhu tinggi dan kelembapan tinggi di iklim tropis lembab menciptakan serangkaian interaksi yang kompleks:

- a) **Laju Penguapan:** Meskipun secara teori kelembapan tinggi akan mengurangi laju penguapan absolut dibandingkan dengan kondisi udara kering pada suhu yang sama (karena perbedaan tekanan uap yang lebih kecil), suhu beton dan udara yang tinggi tetap dapat mendorong kehilangan air yang signifikan dari beton segar. Jika disertai dengan angin, laju penguapan dapat meningkat drastis [1]. Pedoman teknis bahkan menetapkan batas laju penguapan permukaan sebesar 1,0 kg/m²/jam, di mana pengecoran tidak boleh dilanjutkan jika batas ini terlampaui [8].
- b) **Waktu Pengikatan Beton:** Suhu tinggi cenderung mempercepat reaksi hidrasi semen dan, akibatnya, mempercepat waktu pengikatan beton. Sebaliknya, beberapa penelitian menunjukkan bahwa kelembapan lingkungan yang tinggi dapat memperlambat waktu pengikatan [10]. Interaksi antara kedua faktor ini bisa menjadi kompleks dan memerlukan pertimbangan cermat dalam desain campuran dan perencanaan kerja.

Paradoks kelembapan tinggi menjadi salah satu aspek penting yang perlu dipahami. Meskipun kelembapan tinggi secara intuitif dapat dianggap bermanfaat karena mengurangi laju penguapan, kombinasi dengan suhu tinggi yang persisten menciptakan lingkungan di mana beton tetap rentan terhadap kehilangan air dini dan hidrasi yang terlalu cepat jika tindakan pencegahan spesifik tidak diambil. Suhu tinggi adalah pendorong utama percepatan hidrasi semen dan potensi kehilangan air [11]. Meskipun kelembapan tinggi memperlambat laju penguapan dibandingkan kondisi kering pada suhu yang sama, potensi penguapan tetap ada dan bisa signifikan jika suhu beton dan udara sangat tinggi, terutama jika ada aliran udara (angin) [1]. Lebih lanjut, kelembapan tinggi yang persisten juga meningkatkan risiko korosi tulangan jangka panjang [5], sebuah masalah durabilitas yang sangat signifikan di iklim tropis lembap. Dengan demikian, kelembapan tinggi bukanlah solusi "otomatis" untuk masalah cuaca panas; ia memperkenalkan kompleksitasnya sendiri yang harus dikelola.

Selain itu, variabilitas mikroiklim lokal juga perlu dipertimbangkan. Karakteristik iklim tropis lembap yang umum [27] mungkin tidak sepenuhnya menangkap variasi kondisi di lokasi konstruksi tertentu. Faktor-faktor seperti efek pulau panas perkotaan (*urban heat island*), halangan angin oleh bangunan di sekitarnya, atau paparan langsung terhadap angin laut dapat secara signifikan mengubah suhu, kelembapan, dan kecepatan angin aktual di permukaan beton. Sumber [28] sendiri menyebutkan bahwa kondisi angin bergantung pada jarak dari laut. Oleh karena itu, mengandalkan data iklim regional saja mungkin tidak cukup; pemantauan kondisi di tempat (*on-site*) menjadi krusial untuk pengambilan keputusan yang tepat terkait tindakan pencegahan yang diperlukan.

Tabel berikut merangkum parameter iklim kunci di wilayah tropis lembap dan dampak umumnya terhadap pengecoran beton, memberikan landasan kontekstual untuk memahami mengapa lingkungan ini memerlukan perhatian khusus.

Tabel 1. Parameter Iklim Kunci di Wilayah Tropis Lembap dan Dampak Umumnya terhadap Pengecoran Beton

Parameter	Kisaran Tipikal di Iklim Tropis Lembap	Dampak Potensial pada Beton Segar & Keras
Suhu Udara Ambien	Tinggi dan konsisten sepanjang tahun (misalnya, 25°C - 35°C+), fluktuasi harian/bulanan kecil ⁶	Mempercepat hidrasi semen, meningkatkan kebutuhan air, mempercepat kehilangan slump dan waktu pengikatan, meningkatkan risiko retak termal, memengaruhi kekuatan jangka panjang ¹¹
Kelembapan Relatif	Sangat tinggi (sering >80%, bisa mencapai 90%+) ⁶	Mengurangi laju penguapan permukaan (dibandingkan kondisi kering pada suhu sama), dapat memperlambat waktu pengikatan permukaan, meningkatkan risiko korosi tulangan jangka panjang ¹⁰
Radiasi Matahari	Intensitas tinggi, meskipun sering berawan ⁶	Meningkatkan suhu permukaan beton dan material, mempercepat penguapan, berkontribusi pada kenaikan suhu beton internal ⁷
Curah Hujan	Tinggi dan sering, dapat terjadi sepanjang tahun ⁶	Dapat mengganggu jadwal pengecoran, merusak permukaan beton segar jika tidak dilindungi, menyebabkan pendinginan kejut termal pada beton panas, memengaruhi efektivitas senyawa perawatan ¹²
Kecepatan Angin	Bervariasi (tergantung lokasi, jarak dari laut) ⁶	Secara signifikan meningkatkan laju penguapan dari permukaan beton, bahkan pada kelembapan tinggi, meningkatkan risiko retak susut plastis ¹

Kenaikan suhu beton dapat disebabkan oleh sejumlah faktor, baik internal maupun eksternal. Secara internal, reaksi hidrasi semen merupakan penyumbang utama panas. Menurut Neville (2011) dalam bukunya *Properties of Concrete*, jenis semen, rasio air-semen, serta penggunaan bahan tambahan seperti fly ash dan slag dapat memengaruhi besarnya panas hidrasi. Semen tipe I, misalnya, cenderung menghasilkan panas hidrasi lebih tinggi dibandingkan semen tipe IV yang dirancang untuk panas rendah.

Secara eksternal, kondisi cuaca seperti suhu udara tinggi, kelembapan rendah, dan kecepatan angin tinggi dapat mempercepat penguapan air dan memperbesar suhu beton pada tahap awal pengerasan. ACI 305R-20 menekankan bahwa suhu beton awal juga sangat dipengaruhi oleh suhu bahan penyusun (agregat, air, semen) dan suhu peralatan pencampur. Menurut Kosmatka et al. [13], penambahan air untuk mengatasi penurunan slump akibat suhu tinggi justru dapat memperparah kenaikan suhu dan menurunkan kekuatan akhir beton.

Selain itu, waktu pengecoran (siang vs. malam), volume beton dalam sekali pengecoran, serta kurangnya perlindungan terhadap panas matahari langsung juga menjadi penyebab tambahan kenaikan suhu beton. Oleh karena itu, pemahaman menyeluruh terhadap faktor-faktor ini penting dalam merancang metode pengecoran yang optimal pada kondisi cuaca panas.

2.1.4 Pengaruh Kondisi Panas dan Lembab terhadap sifat beton

Cuaca panas merupakan salah satu faktor lingkungan paling signifikan yang memengaruhi kualitas beton, baik dalam kondisi segar maupun setelah mengeras. Menurut American Concrete Institute dalam dokumen *ACI 305R-20: Guide to Hot Weather Concreting*, cuaca panas didefinisikan sebagai kondisi suhu udara tinggi (di atas 29°C), kelembapan relatif rendah, kecepatan angin tinggi, dan radiasi matahari intens, yang secara bersama-sama meningkatkan kecepatan hidrasi semen dan penguapan air dari permukaan beton.

Efek utama dari kondisi ini adalah peningkatan kebutuhan air, penurunan slump, dan percepatan waktu pengikatan (*setting time*). Kosmatka et al. [13] dalam *Design and Control of Concrete Mixtures* menjelaskan bahwa hal ini sering menyebabkan retak plastis dan kesulitan dalam pemadatan serta finishing beton. Apabila tidak dikendalikan, suhu tinggi juga dapat menyebabkan penguapan air yang berlebihan sebelum beton mencapai kekuatan awal, sehingga meningkatkan porositas dan menurunkan kekuatan tekan jangka panjang.

Studi eksperimental oleh Al-Amoudi et al. [14] menunjukkan bahwa beton yang dicor pada suhu lingkungan di atas 35°C mengalami penurunan kekuatan hingga 20% dibandingkan

dengan beton yang dicor pada suhu optimal (20–25°C). Penurunan ini disebabkan oleh terjebaknya udara, ketidaksempurnaan dalam pemadatan, dan hilangnya air yang diperlukan untuk hidrasi sempurna.

Dalam penelitian lokal, seperti yang dilakukan oleh Darmawan dan Haryanto [15] pada *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, diperoleh bahwa pengecoran pada siang hari di iklim tropis lembap tanpa perlindungan yang memadai menghasilkan beton dengan retak mikro yang lebih banyak serta daya tahan yang lebih rendah terhadap pelapukan dan kelembaban.

Oleh karena itu, strategi mitigasi sangat diperlukan, termasuk penggunaan admixture (*retarder*), penundaan waktu pengecoran ke malam atau pagi hari, penggunaan alat penutup beton, serta penyemprotan air (*curing*) secara berkala.

Kondisi lingkungan yang panas dan lembap memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat-sifat beton, baik pada fase segar maupun setelah mengeras. Pemahaman mendalam mengenai dampak ini krusial untuk merancang strategi mitigasi yang efektif.

A. Beton Segar

- Peningkatan Kebutuhan Air dan Percepatan Kehilangan Slump

Suhu yang tinggi mengakselerasi laju hidrasi semen, yang secara langsung meningkatkan permintaan air untuk mencapai konsistensi atau slump yang diinginkan [1]. Sebuah studi menunjukkan bahwa kenaikan suhu campuran beton secara signifikan meningkatkan kebutuhan air untuk mempertahankan slump tertentu [16]. Konsekuensi dari hidrasi yang lebih cepat ini adalah kehilangan slump yang lebih cepat pula, yang berarti waktu yang tersedia untuk transportasi, penempatan, dan pemadatan beton menjadi lebih pendek [11]. Di iklim tropis, bahkan dengan kelembapan ambien yang tinggi yang mungkin sedikit memperlambat penguapan permukaan, suhu beton internal yang tinggi akan tetap mendorong hidrasi

yang cepat, yang mengarah pada kehilangan slump yang signifikan. Hal ini merupakan salah satu efek utama suhu tropis pada beton segar [11].

- *Percepatan Waktu Pengikatan dan Jendela Kemudahan Pengerjaan yang Berkurang*

Suhu yang lebih tinggi mempercepat reaksi kimia dalam proses hidrasi semen, sehingga waktu pengikatan awal (initial set) dan akhir (final set) menjadi lebih cepat [11]. Portland Cement Association (PCA) mengindikasikan bahwa waktu pengikatan dapat berkurang sekitar 30% untuk setiap kenaikan suhu sebesar 10°F (sekitar 5.6°C) [1]. Di sisi lain, beberapa penelitian menunjukkan bahwa kelembapan lingkungan yang tinggi justru dapat memperlambat waktu pengikatan permukaan beton [10]. Sebagai contoh, data dari 16 menunjukkan waktu ikat awal pasta semen pada suhu 30°C dan kelembapan 85% adalah 120 menit, dan waktu ikat akhir adalah 245 menit. Interaksi antara suhu tinggi yang mempercepat hidrasi secara keseluruhan dan kelembapan tinggi yang berpotensi memperlambat pengikatan permukaan menciptakan suatu kompleksitas. Namun, efek suhu pada laju reaksi kimia hidrasi kemungkinan akan lebih dominan secara keseluruhan, yang pada akhirnya menghasilkan jendela pengerjaan (workability window) yang lebih pendek dan meningkatkan risiko terbentuknya sambungan dingin (cold joints) jika penempatan lapisan beton berikutnya tertunda [11].

- *Peningkatan Risiko Retak Susut Plastis*

Retak susut plastis terjadi ketika laju penguapan air dari permukaan beton yang baru dicor melebihi laju naiknya air bleed ke permukaan [1]. Faktor-faktor yang meningkatkan risiko ini meliputi suhu beton yang tinggi, suhu

udara ambien yang tinggi, kelembapan relatif yang rendah, dan kecepatan angin yang tinggi. Pedoman teknis, seperti yang disebutkan dalam [8], menetapkan batas laju penguapan sebesar 1,0 kg/m²/jam, di mana pengecoran tidak boleh dilakukan jika laju ini terlampaui. Sumber lain [17] menyebutkan ambang batas penguapan sekitar 0,2 lbs/ft²/jam (sekitar 1 kg/m²/jam) di mana tindakan pencegahan terhadap retak susut plastis menjadi sangat penting. Meskipun kelembapan relatif di iklim tropis lembap umumnya tinggi, kombinasi suhu tinggi dan potensi adanya angin masih dapat menyebabkan laju penguapan yang cukup signifikan untuk memicu retak susut plastis, terutama pada elemen beton dengan area permukaan yang luas seperti pelat lantai atau perkerasan.

- *Kesulitan dalam Pengendalian Kandungan Udara*

Suhu beton yang lebih tinggi cenderung mengurangi jumlah udara yang dapat terperangkap secara efektif untuk dosis bahan tambah pemerangkap udara (air-entraining admixture) tertentu [1]. Hal ini penting karena kandungan udara yang terencana dalam beton tidak hanya memengaruhi kemudahan pengerjaan tetapi juga, yang lebih krusial untuk beberapa lingkungan, durabilitas beton terhadap siklus beku-cair dan ketahanan terhadap garam deicer. Meskipun aspek ketahanan beku-cair mungkin kurang relevan di banyak wilayah tropis, pengendalian kandungan udara yang konsisten tetap penting untuk menjaga homogenitas dan kualitas campuran beton secara keseluruhan.

B. Beton Keras

Dampak kondisi panas dan lembap tidak berhenti pada fase beton segar; sifat-sifat

beton yang telah mengeras juga dapat terpengaruh secara signifikan, terutama terkait dengan pengembangan kekuatan dan durabilitas jangka panjang.

- *Dampak pada Perkembangan Kekuatan Tekan dan Lentur (Awal vs. Jangka Panjang)*

Suhu yang lebih tinggi selama proses pengecoran dan perawatan awal dapat mengakibatkan pencapaian kekuatan awal yang lebih tinggi karena laju hidrasi semen yang lebih cepat [11]. Penelitian dalam [18] menunjukkan bahwa perawatan beton pada suhu yang lebih tinggi (antara 40°C hingga 60°C) menghasilkan kekuatan tekan awal (pada umur 3 hari) yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton yang dirawat pada suhu normal. Namun, fenomena ini seringkali diikuti oleh konsekuensi yang kurang menguntungkan pada kekuatan jangka panjang. Kekuatan beton pada umur lanjut (misalnya, 28 hari atau lebih) yang dicor dan dirawat pada suhu tinggi bisa jadi lebih rendah dibandingkan dengan beton yang dicor dan dirawat pada suhu sedang [11]. Studi yang sama [18] menemukan bahwa semakin tinggi suhu perawatan (40°C, 50°C, 60°C), semakin rendah nilai kekuatan tekan dan kuat tarik belah beton yang dicapai pada umur 28 hari. Sumber [11] mencatat bahwa kekuatan beton yang diatur dan dirawat pada suhu yang lebih rendah pada akhirnya akan melampaui beton yang diatur dan dirawat pada suhu yang lebih tinggi. Fenomena "trade-off" antara kekuatan awal dan kekuatan jangka panjang ini disebabkan oleh pembentukan mikrostruktur kalsium silikat

hidrat (C-S-H) yang kurang homogen dan cenderung lebih porus ketika hidrasi berlangsung pada suhu yang lebih tinggi, yang pada akhirnya mengorbankan potensi kekuatan dan durabilitas jangka panjang. Pengecoran pada suhu tinggi di iklim tropis dapat memberikan keuntungan kekuatan awal yang lebih cepat, yang mungkin menarik untuk jadwal konstruksi yang ketat. Namun, ini seringkali mengorbankan kekuatan dan durabilitas jangka panjang. Metodologi optimal harus menyeimbangkan kebutuhan ini, terutama ketika durabilitas jangka panjang adalah prioritas utama di lingkungan tropis yang agresif.

- *Peningkatan Potensi Retak Susut Pengerinan dan Termal*

Kebutuhan air yang cenderung lebih tinggi pada pengecoran cuaca panas dapat meningkatkan potensi terjadinya susut pengerinan pada beton keras [1]. Sumber [5] menyatakan bahwa kelembapan yang tidak cukup pada beton (menyiratkan pengerinan yang cepat) akan mempercepat timbulnya retak karena beton mengerut. Selain itu, perbedaan suhu yang besar antara inti beton (yang mengalami pemanasan akibat panas hidrasi semen) dan permukaan beton (yang mungkin mendingin lebih cepat akibat paparan lingkungan) dapat menyebabkan tegangan internal yang signifikan, yang berujung pada retak termal. Risiko ini menjadi lebih nyata pada elemen beton masif atau bervolume besar [11]. Batas perbedaan suhu antar lapisan beton sebesar 20°C dan suhu maksimum beton sebesar 81°C seringkali dijadikan acuan

untuk mencegah retak termal [19]. Di iklim tropis lembap, pendinginan permukaan beton yang cepat dan tidak terduga dapat terjadi akibat hujan tiba-tiba yang turun pada permukaan beton yang masih panas, yang dapat memperburuk gradien termal dan meningkatkan risiko retak.

- *Pengaruh terhadap Durabilitas: Permeabilitas, Karbonasi, dan Risiko Korosi Tulangan*

Kekuatan jangka panjang yang lebih rendah dan mikrostruktur yang lebih porus, yang dapat timbul akibat hidrasi pada suhu tinggi, berpotensi meningkatkan permeabilitas beton terhadap air dan zat agresif lainnya [1]. Suhu yang lebih tinggi juga diketahui dapat mempercepat laju proses degradasi seperti karbonasi dan penetrasi ion klorida [11]. Diperkirakan bahwa koefisien karbonasi bisa 1,2 hingga 1,3 kali lebih tinggi pada suhu 30°C dibandingkan pada 20°C, dan perkiraan umur layan struktur beton akibat korosi klorida di iklim tropis hanya sekitar 70% dari umur layan di daerah beriklim sedang [11]. Lebih lanjut, kelembapan lingkungan yang tinggi secara signifikan meningkatkan risiko korosi pada baja tulangan karena menyediakan media (air) yang memungkinkan terjadinya reaksi korosi ketika air tersebut masuk ke dalam beton dan mencapai permukaan baja tulangan [5]. Kombinasi suhu tinggi (yang mempercepat laju reaksi kimia korosi) dan kelembapan tinggi (yang menyediakan elektrolit yang diperlukan untuk proses korosi) menciptakan lingkungan yang sangat agresif untuk beton

bertulang di iklim tropis lembap. Ini menjadikan korosi tulangan sebagai salah satu masalah durabilitas utama yang harus diantisipasi dan dicegah.

2.2 Efek Hidrasi Semen pada Suhu Beton

Proses hidrasi semen merupakan reaksi eksotermis yang menghasilkan panas dan berperan langsung dalam peningkatan suhu beton. Menurut Neville (2011) dalam *Properties of Concrete*, panas hidrasi sangat tergantung pada jenis semen, kecepatan reaksi, dan rasio air-semen. Semakin cepat reaksi hidrasi berlangsung, semakin besar panas yang dihasilkan, yang pada akhirnya mempengaruhi suhu internal beton terutama pada pengecoran volume besar (mass concrete).

American Concrete Institute dalam dokumen *ACI 207.1R-05: Guide to Mass Concrete* menjelaskan bahwa kenaikan suhu akibat hidrasi berlebih dapat menyebabkan perbedaan suhu antara bagian dalam dan luar beton, yang meningkatkan risiko retak termal. Oleh karena itu, pengendalian kecepatan hidrasi menjadi penting, misalnya dengan penggunaan bahan tambahan (admixture) seperti fly ash atau slag, yang dikenal dapat memperlambat reaksi awal dan menurunkan panas total.

Studi oleh Mehta & Monteiro [20] juga menunjukkan bahwa kontrol terhadap suhu awal beton, termasuk suhu bahan penyusun dan suhu lingkungan, sangat penting untuk mengelola efek hidrasi secara efektif. Penurunan suhu awal beton dapat membantu mengurangi total panas yang dilepas dan mencegah penurunan kekuatan akibat retak dini.

Pemahaman mengenai "suhu efektif" beton juga sangat penting. Suhu beton aktual selama proses hidrasi, bukan hanya suhu udara ambien, adalah faktor yang paling dominan memengaruhi sifat-sifatnya. Panas hidrasi internal yang dihasilkan oleh reaksi semen dapat secara signifikan meningkatkan suhu inti beton, terutama pada elemen beton masif, yang selanjutnya memperburuk masalah-masalah yang terkait dengan suhu tinggi [19]. Suhu beton di bagian dalamnya bisa mencapai 85°C [21], dan sifat konduktivitas termal beton yang buruk menyebabkan pelepasan panas hidrasi

berlangsung lambat [19]. Artinya, bahkan jika suhu udara ambien tidak ekstrem, suhu internal beton bisa menjadi sangat tinggi, yang kemudian mendorong semua efek negatif yang terkait dengan suhu tinggi pada sifat beton, seperti penurunan kekuatan jangka panjang dan peningkatan risiko retak termal. Oleh karena itu, metodologi optimal harus berfokus pada pengelolaan suhu beton *itu sendiri*, bukan hanya sekadar merespons suhu udara ambien.

Tabel berikut menyajikan ringkasan pengaruh kondisi cuaca panas dan kelembapan tinggi terhadap sifat-sifat utama beton segar dan beton keras.

Tabel 2. Ringkasan Pengaruh Cuaca Panas dan Kelembapan Tinggi terhadap Sifat Beton Segar dan Keras

Kategori Sifat	Properti Spesifik	Pengaruh Gabungan Suhu Tinggi & Kelembapan Tinggi	Referensi Utama
Beton Segar	Kebutuhan Air	Meningkat akibat percepatan hidrasi dan evaporasi ¹	1
Beton Segar	Kehilangan Slump	Dipercepat, mengurangi waktu kerja ¹¹	11
Beton Segar	Waktu Pengikatan	Umumnya dipercepat oleh suhu tinggi, interaksi kompleks dengan kelembapan tinggi yang mungkin memperlambat pengikatan permukaan ¹¹	11
Beton Segar	Risiko Retak Susut Plastis	Meningkat jika laju penguapan permukaan tinggi (dipengaruhi suhu, angin, meski RH tinggi) ¹	1

Kategori Sifat	Properti Spesifik	Pengaruh Gabungan Suhu Tinggi & Kelembapan Tinggi	Referensi Utama
Beton Segar	Pengendalian Kandungan Udara	Lebih sulit, cenderung mengurangi kandungan udara untuk dosis <i>admixture</i> tertentu ¹	1
Beton Keras	Kekuatan Awal	Umumnya meningkat karena hidrasi lebih cepat ¹¹	11
Beton Keras	Kekuatan Jangka Panjang (mis. 28 hari+)	Cenderung menurun dibandingkan beton yang dirawat pada suhu sedang ¹¹	11
Beton Keras	Risiko Retak Susut Pengerangan	Meningkat akibat potensi kebutuhan air lebih tinggi dan pengerangan ¹	1
Beton Keras	Risiko Retak Termal	Meningkat akibat gradien suhu internal, terutama pada beton masif dan potensi pendinginan permukaan cepat oleh hujan ¹¹	11
Beton Keras	Permeabilitas	Berpotensi meningkat akibat mikrostruktur yang kurang optimal ¹	11
Beton Keras	Laju Karbonasi	Dipercepat oleh suhu tinggi ¹¹	11

Kategori Sifat	Properti Spesifik	Pengaruh Gabungan Suhu Tinggi & Kelembapan Tinggi	Referensi Utama
Beton Keras	Risiko Korosi Tulangan	Sangat meningkat akibat kombinasi suhu tinggi (mempercepat reaksi) dan kelembapan tinggi (menyediakan elektrolit) [11]	11

2.3 Simulasi Temperatur Beton Berdasarkan ACI 305R-99

American Concrete Institute melalui dokumen *ACI 305R-99: Hot Weather Concreting* menyatakan bahwa kondisi cuaca panas dapat secara signifikan memengaruhi temperatur beton, baik selama proses pencampuran, pengangkutan, penempatan, maupun pemadatan. Simulasi temperatur beton diperlukan untuk mengantisipasi dampak panas terhadap sifat-sifat beton segar dan mengeras, terutama untuk beton struktural dan pengecoran skala besar (*mass concrete*).

ACI 305R-99 merekomendasikan penggunaan pendekatan prediktif untuk memperkirakan temperatur beton saat penempatan. Faktor-faktor yang diperhitungkan dalam simulasi meliputi suhu bahan penyusun (air, agregat, semen), suhu udara lingkungan, kecepatan angin, serta waktu tempuh dan durasi pencampuran. Salah satu metode sederhana yang disebutkan dalam dokumen ini adalah persamaan empiris dari *Tremper dan Berger* yang menghitung suhu beton berdasarkan bobot dan temperatur masing-masing komponen beton.

Dalam praktiknya, seperti dijelaskan oleh Kosmatka et al. [13], prediksi suhu beton segar dapat digunakan untuk mengatur strategi mitigasi, seperti pendinginan air pencampur, menyimpan agregat di tempat teduh, atau menggunakan es dalam campuran. Simulasi ini juga dapat membantu dalam pemilihan waktu pengecoran yang optimal dan penggunaan admixture untuk mengontrol kecepatan hidrasi.

Menurut *Mehta dan Monteiro [20]*, akurasi simulasi temperatur beton sangat penting pada kondisi cuaca ekstrem, karena lonjakan suhu awal dapat mempercepat reaksi hidrasi dan menyebabkan retak termal, susut plastis, serta kekuatan akhir yang tidak stabil. Oleh karena itu, permodelan dan simulasi temperatur perlu menjadi bagian integral dalam perencanaan pengecoran beton pada iklim panas dan lembap.

Temperatur memegang peranan fundamental dalam menentukan karakteristik dan kinerja beton, baik pada fase segar maupun setelah mengeras [22]. Proses hidrasi semen, yang merupakan reaksi kimia antara semen dan air, bersifat eksotermis, artinya menghasilkan panas. Laju reaksi ini sangat dipengaruhi oleh temperatur lingkungan dan temperatur internal beton itu sendiri [22]. Dalam kondisi cuaca panas, sebagaimana didefinisikan oleh American Concrete Institute (ACI) dalam panduan ACI 305R-99, pengelolaan temperatur beton menjadi krusial untuk menghindari berbagai dampak merugikan [11].

ACI 305R-99, "Hot Weather Concreting," berfungsi sebagai dokumen panduan komprehensif yang menguraikan potensi masalah yang timbul akibat cuaca panas serta praktik-praktik yang direkomendasikan untuk memitigasinya [11]. Panduan ini lebih menekankan pada pencapaian kinerja beton yang diinginkan daripada menetapkan batasan temperatur preskriptif yang kaku [11]. Pergeseran dari batasan temperatur yang murni preskriptif ke pendekatan yang lebih berorientasi pada dampak aktual pada beton secara inheren meningkatkan nilai dan kebutuhan akan alat prediksi seperti simulasi termal. Pendekatan berbasis dampak ini memberdayakan para insinyur untuk membuat keputusan yang terinformasi dan spesifik untuk setiap proyek, alih-alih hanya mengandalkan ambang batas generik. Jika ACI 305R-99 hanya menyatakan bahwa "temperatur beton tidak boleh melebihi $X^{\circ}\text{C}$," kebutuhan akan simulasi mungkin terbatas pada verifikasi. Namun, dengan mendefinisikan cuaca panas berdasarkan *kombinasi kondisi* yang "mengganggu kualitas" [11] dan menekankan mitigasi efek-efek ini, standar tersebut menuntut pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana kondisi proyek spesifik akan memengaruhi perilaku beton. Simulasi temperatur menawarkan pendekatan proaktif untuk memprediksi perilaku termal beton,

memungkinkan para insinyur untuk menilai risiko dan mengoptimalkan strategi penanganan sesuai dengan prinsip-prinsip ACI 305R-99 [1].

Kompleksitas definisi "cuaca panas" menurut ACI 305R-99—yang mencakup kombinasi temperatur ambien tinggi, temperatur beton tinggi, kelembaban relatif rendah, kecepatan angin tinggi, dan radiasi matahari³—mengindikasikan bahwa aturan praktis sederhana seringkali tidak memadai. Setiap faktor ini berkontribusi secara berbeda terhadap potensi masalah; misalnya, angin dan kelembaban rendah mendorong evaporasi, sementara radiasi matahari dan temperatur ambien tinggi meningkatkan temperatur beton. Simulasi memungkinkan analisis multi-variabel yang selaras dengan definisi holistik ACI 305R-99, di mana pemeriksaan temperatur sederhana mungkin melewati risiko kritis yang didorong oleh, misalnya, angin kencang bahkan pada temperatur sedang. Dengan demikian, simulasi menjadi alat yang sangat berharga untuk memahami interaksi kompleks dari berbagai faktor lingkungan dan dampaknya terhadap beton.

3. METODE PENELITIAN

Adapun dalam penelitian ini, untuk mendapatkan metodologi yang optimal dalam proses pengecoran beton pada cuaca panas, peneliti melakukan pendekatan dengan metode Fish Bone Diagram sebagai hubungan sebab-akibat dari aksi dan reaksi yang diperoleh. Adapun dalam mengendalikan suhu awal dari beton segar, diperoleh beberapa countermeasure yang dapat digunakan untuk menurunkan suhu awal seperti:

- Modifikasi *plant* dan *equipment* yang digunakan dalam proses *casting*
- Penurunan *temperature*/ suhu material dengan beberapa Langkah.

3.1 Modifikasi *Plant* dan *Equipment Casting*

Dalam hal modifikasi *plant* dan *equipment* dalam proses *casting*, peneliti menggunakan metode fish bone diagram atau sebab-akibat untuk memperoleh modifikasi optimal dari *plant*/*equipment* dan material yang digunakan.

3.2 Estimasi Temperature dari Beton Segar

Adapun salah satu cara mengoptimalkan pengecoran beton pada cuaca panas adalah dengan

mengontrol temperatur awal dari beton segar. Dalam penelitian ini, estimasi awal dari temperature akan mengacu kepada ACI 305R-99 dengan rumus sebagai berikut:

Without ice (in. – lb and SI units)

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa}}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_{wa}} \quad (A-1)$$

With ice (in. – lb units)

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa} - 112 W_i}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_i + W_{wa}} \quad (A-2)$$

With ice (SI units)

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa} - 79.6 W_i}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_i + W_{wa}} \quad (A-3)$$

where

T_a = temperature of aggregate

T_c = temperature of cement

T_w = temperature of batched mixing water from normal supply excluding ice

T_i = temperature of ice. (Note: The temperature of free and absorbed water on the aggregate is assumed to be the same temperature as the aggregate. All temperatures are in F or C.)

W_a = dry mass of aggregate

W_c = mass of cement

W_i = mass of ice

W_w = mass of batched mixing water

W_{wa} = mass of free and absorbed moisture in aggregate at T_a . (Note: All masses are in lb or kg.)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Adapun metode optimasi dari proses *casting* pada cuaca panas ini berlangsung selama musim panas di daerah timur Madagascar, dimana cuaca harian berkisar antara 26-30 Celcius. Berdasarkan hasil penelitian, maka diperoleh dua poin utama dalam upaya mengoptimasi pengecoran beton di cuaca panas.

4.1 Modifikasi Material dan Peralatan pada Pengecoran Beton di Cuaca Panas

Berdasarkan hasil analisa di lapangan dan studi referensi, diperoleh bahwa terdapat beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mengoptimalkan modifikasi dari alat yang digunakan seperti:

1. Memberikan insulasi terhadap tangka air dan pipa air.

2. Mengecat (warna putih/ warna cerah) atap dan instalasi yang berkaitan dengan *agregate* atau *stock piles* dari material.
3. Mengecat silo dengan warna putih.
4. Menutup truk *mixer* dengan kain burlap dan menyemprotnya dengan air dingin ketika sedang mengangkut semen.
5. Mengecat truk *mixer* dengan warna cerah atau warna putih.

Selain itu, berdasarkan hasil analisa referensi dan tindakan di lapangan, diperoleh beberapa perbandingan tindakan pengendalian suhu beton berdasarkan bahan penyusunnya.

Tabel 3. Perbandingan Tindakan Pengendalian Suhu Beton untuk Bahan Penyusun

Bahan	Metode Kendali Suhu	Efektifitas Pengurangan Suhu Beton	Kelebihan	Kekurangan
Agregat [23]	Peneduhan (<i>Shading</i>)	Moderat, tergantung durasi dan efektivitas peneduh	Relatif murah, mudah diimplementasikan	Membutuhkan ruang dan material peneduh
Agregat [24]	Penyiraman (<i>Sprinkling/ Fogging</i>)	Efektif, pendinginan evaporatif dan langsung	Dapat signifikan menurunkan suhu agregat	Perlu kontrol untuk hindari variasi kelembapan berlebih, potensi peningkatan kandungan air jika tidak terkontrol
Agregat [25]	Udara Dingin	Efektif	Kontrol suhu lebih baik	Memerlukan

Bahan	Metode Kendali Suhu	Efektifitas Pengurangan Suhu Beton	Kelebihan	Kekurangan
	(<i>Chilled Air</i>)			peralatan khusus, biaya operasional
Air [11]	Air Dingin (<i>Chilled Water</i>)	Dapat mengurangi suhu beton hingga -6°C (10°F) ²⁷	Relatif mudah diimplementasikan jika fasilitas pendingin tersedia	Efektivitas terbatas jika perbedaan suhu air tidak signifikan
Air [11]	Es (<i>Ice Flakes/Crushed Ice</i>)	Dapat mengurangi suhu beton hingga $\sim 12^{\circ}\text{C}$ (20°F) ²⁷	Sangat efektif karena panas laten peleburan es	Es harus meleleh sempurna saat pencampuran selesai, perhitungan dosis es harus cermat, biaya produksinya
Semen [23]	Umumnya tidak didinginkan secara langsung	Kontribusi panas semen terhadap suhu awal beton lebih kecil dibandingkan agregat dan air	-	Pendinginan semen tidak praktis dan dapat mengurangi sifatnya
Campuran Beton [11]	Nitrogen Cair	Sangat efektif, dapat mencapai penurunan suhu signifikan	Pendinginan cepat dan terkontrol	Biaya sangat tinggi, memerlukan peralatan dan penanganan khusus, isu keselamatan

4.2 Rekomendasi Suhu Material berdasarkan Hasil Simulasi Suhu

Berdasarkan simulasi dan suhu aktual di lokasi pada tanggal 10 November 2021 pukul 14.40 WIB, peneliti memperoleh fakta bahwa suhu beton segar tanpa perlakuan es berada di sekitar **30,5°C**. Angka ini lebih rendah dari **32°C**.

Berdasarkan tabel di bawah ini, diperoleh hasil simulasi suhu beton dengan kondisi tanpa dicampur dengan es. Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan rumus pada sub-bab 3.2 pada jurnal ini, diperoleh beberapa asumsi suhu material yang dapat digunakan untuk mengoptimasi monitoring suhu penyusun beton. Dalam artian, jika dari hasil perhitungan diketahui bahwa beton segar memiliki suhu di atas 32 Celcius, maka sebaiknya kegiatan *casting* harap dihentikan karena hal ini dapat menimbulkan *thermal crack* pada beton di lapangan. Selain itu, salah satu cara untuk mengurangi suhu beton segar saat *casting* adalah dengan melakukan proses *casting* di malam dan dini hari ketika suhu sekitar masih cenderung rendah.

Table 4. Simulasi perhitungan nilai beton segar berdasarkan data suhu 10 November 2021

ACTUAL BATCHING TIME : 14.40							
DATE : NOV. 10, 2021							
MATERIALS	TEMP		MASS AS MIXED		MASS OVEN DRY		MC
	C	F	kg	lbs	kg	lbs	
4-10	30.3	86.54	692	1525.6	682	1503.6	1.35
10-20	30.4	86.72	460	1014.1	457	1007.5	0.56
FINE SAND	27.1	80.78	819	1805.6	792	1746.1	3.25
CEMENT	27.5	81.5	170	374.8			
WATER	26.3	79.34	68	149.9			
FLY ASH (15%)	27.5	81.5	30	66.1			
ICE	X						
ACTUAL TEMPERATURE :	30.5	86.9					
SIMULATED TEMPERATURE :	28.4	83.12					

Berdasarkan tabel di atas diketahui bahwa material yang digunakan adalah aggregate kasar ukuran 4/10 dan 10/20, pasir, semen, air, fly ash. Adapun kondisi beton segar ini diasumsikan tidak menggunakan es untuk mengurangi biaya produksi.

Dengan asumsi berat dan suhu masing-masing material sebagai berikut:

Tabel 5. Asumsi Berat dan Suhu Material

Material	Suhu (C)	Berat (mix) - kg	Berat (Oven Dry) - kg	Moisture Content (%)
4/10	30.3	692	682	1.35
10/20	30.4	460	457	0.56
Pasir	27.1	819	792	3.25
Semen	27.5	170		
Air	26.3	68		
Flyash	27.5	30		

Actual temperature yang diperoleh untuk beton segar adalah 30.5 Celcius – berdasarkan fakta di lapangan.

Simulated temperature yang diperoleh dengan rumus ACI 305R-99 adalah 28.4 Celcius.

Sehingga dari hasil analisa di atas diperoleh analisa bahwa untuk mendapatkan beton segar yang memiliki suhu di bawah 32 Celcius, diharapkan suhu dari setiap agregat sesuai dengan Tabel 4.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, diperoleh bahwa salah satu cara mengoptimasi proses *casting* atau pekerjaan beton di cuaca panas adalah dengan menurunkan suhu bahan pencampur beton. Selain itu, suhu beton segar yang digunakan dalam proses *casting* hendaknya tidak lebih dari 32 Celcius.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu Yusni dan Bapak Asri yang selama penulisan artikel ini senantiasa memberikan dukungan dalam penyelesaian artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] American Concrete Institute. *ACI 305R-20: Guide to Hot Weather Concreting*. ACI. 2020.
- [2] Neville, A. M. *Hot Weather Concreting: Effects and Precautions*. Concrete International. 2011.
- [3] Ramezianpour, A. A. *Cement Replacement Materials*. Springer. 2014.

- [4] Kusumawardaningsih, E., Pramudito, A., & Wibowo, M. A. *Studi Eksperimental Kualitas Beton pada Cuaca Panas di Daerah Tropis*. Jurnal Teknologi dan Konstruksi, 12(2), 45–53. 2019.
- [5] Sobute.co.id. “Apa saja Pengaruh Kelembaban terhadap Kinerja Beton”. Tersedia: <https://sobute.co.id/blogs/detail/pengaruh-kelembaban-terhadap-kinerja-beton>
- [6] R. Anggreni, E. Yulianti, and S. Subiyakto, “Analisis pengaruh tutupan awan terhadap radiasi matahari di Kota Pontianak,” *PRISMA FISIKA*, vol. 6, no. 2, pp. 109–116, 2018. [Online]. Available: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jpfu/article/view/28896>
- [7] Talarosha, B. “Menciptakan Kenyamanan Thermal dalam Bangunan”. Jurnal Sistem Teknik Industri Vol. 6 No. 3, Juli, 2005.
- [8] Pedoman Pelaksanaan Pekerjaan Beton untuk Jalan dan Jembatan Pd T-07-2005-B. Departemen Pekerjaan Umum, Indonesia. 2005.
- [9] Tukidin, “Karakter Curah Hujan di Indonesia,” *Jurnal Geografi*, vol. 1, no. 1, pp. 1–12, 2004. [Online]. Available: <https://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/JG/article/view/84>
- [10] Sobute. co.id. Setting Time Beton, Perlukah Dilakukan? Ini Penjelasannya! - Sobute Global Indonesia. Tersedia: <https://sobute.co.id/blogs/detail/setting-time-beton>
- [11] Chat Tim, T. Challenges and Opportunities in Tropical Concreting. *Procedia Engineering*. Vo. 95, pg. 348-355. 2014. Tersedia: [Challenges and Opportunities in Tropical Concreting - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484714000000)
- [12] Hot Weather Concrete Practices. Arizona Rock Products Association. Tersedia: <https://www.azrockproducts.org/wp-content/uploads/ARPA-Hot-Weather-Concrete-Practices.pdf>
- [13] Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. *Design and Control of Concrete Mixtures* (14th ed.). Portland Cement Association. 2002.
- [14] Al-Amoudi, O. S. B., Maslehuddin, M., & Lashari, A. N. *Effect of hot weather concreting on strength and durability of concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 29(7), 567–576. 2007.
- [15] Darmawan, R., & Haryanto, D. *Pengaruh Waktu Pengecoran terhadap Kualitas Beton pada Iklim Tropis*. Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, 6(2), 55–62. 2018.
- [16] Master Builders Solutions. Concrete Technology in Focus – Successful Hot Weather Concreting. Tersedia: <https://assets.ctfassets.net/ctspkglm1yw3s/DMSY-1685695220-8137/824fc8857e4b1e9f4619097d356049de/mbs-hot-weather-concreting-ctif.pdf>
- [17] Michigan Concrete Association. Hot&Cold Weather Concreting Plus Curing. Tersedia: <https://info.miconcrete.org/hubfs/HotColdCure.pdf?hsCtaTracking=8f416ae1-4b73-444f-8a81-78267ebb030e%7Cff92b433-7be4-4ed3-86f2-eb1bf1001a56>
- [18] Kullit, V.I., Wallah, et. al. “Pengaruh Variasi Suhu pada Perawatan Elevated Temperature terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton”. Jurnal Sipil Statik Vo. 1 No. 7, Juni, 2013. Tersedia: <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jss/article/view/2467/2003>
- [19] Pardede, Dede; Oemar F. “Pengendalian Suhu Beton Massa 3500 m3 Menggunakan Balok Es dan Pengaruhnya terhadap Beton, Studi Kasus: Pondasi Raft Gedung PPAG2”. Jurnal Teknik Sipil – Arsitektur Vol. 19 No. 2, November, 2020. Tersedia: <https://jurnalftspjayabaya.ac.id/index.php/jsa/article/download/53/31/206>
- [20] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education. 2014.
- [21] Rochaeti, et. al. “Pengaruh Panas Hidrasi Beton dengan Semen Type II terhadap Ketebalan Elemen Beton”. Jurnal Teknik Sipil&Perencanaan No. 2 Vol. 16, Juli, 2014. Tersedia: <https://journal.unnes.ac.id/nju/jtsp/article/download/7231/5178>



- [22] Mokoena, R, et. al. “Future Climatic Considerations for Performance Based Criteria of South African Concrete Pavements”. CSIR Research Space. 13th International Conference on Concrete Pavements.
Tersedia:
<https://researchspace.csir.co.za/bitstreams/30ee8191-267e-4ed5-8a89-71b8d511e0b2/download>
- [23] HOLCIM US. Hot Weather Concreting: Tips for Achieving a Successful, High-Quality Placement | Holcim US, accessed May 10, 2025.
Tersedia:
<https://www.holcim.us/hot-weather-concrete>
- [24] NRMCA. CIP 12 - Hot Weather Concreting | NRMCA, accessed May 10, 2025.
Tersedia:
<https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2021/01/12pr.pdf>
- [25] USDA Government. Hot Weather Concrete. 1983.
Tersedia:
https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/IA/Chapter17_HotWeatherConcrete.pdf
- [26] A. A. Ansa, R. D. Palupi, dan A. G. Pratikino, “Respon Kecepatan Angin Terhadap Variabilitas Klorofil-a di Laut Maluku dan Laut Filipina,” *Jurnal Sains dan Lingkungan*, vol. 3, no. 2, pp. 45–52, 2020.
Tersedia:
<https://ejournal.undip.ac.id/index.php/buloma/article/download/38273/20102>
- [27] Sangkertadi, Zahra, dan V. Kumurur, “Pengaruh Material Lansekap terhadap Perubahan Iklim Mikro di Kota Tropis Lembab dengan Studi Kasus di Kawasan Pantai Kota Manado,” *Pawon: Jurnal Arsitektur*, vol. 5, no. 2, pp. 169–184, 2021.
Tersedia:
<https://ejournal.itn.ac.id/index.php/pawon/article/view/3668>
- [28] Zhou et al., “Study of the Correlation between the Urban Wind–Heat Environment and Urban Morphological Characteristics,” *Buildings*, vol. 14, no. 2, p. 315, 2024.
Tersedia:
<https://www.mdpi.com/2075-5309/14/2/315>