

Analisis Mekanistik Pengaruh Proses Curing terhadap Perkembangan Mikrostruktur dan Durabilitas Beton pada Iklim Panas dan Semi-Arid: Suatu Kajian Sintesis

Mechanistic Analysis of the Influence of Curing Processes on the Microstructural Development and Durability of Concrete in Hot and Semi-Arid Climates: A Synthetic Review

Yohanes Alexander Rupidara ¹, Remigildus Cornelis ²,

^{1,2} Program Studi Magister Rekayasa Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang, Indonesia.

Corresponding Author: Yohanes, yohanesalexanderrupidara@gmail.com

ABSTRAK

Iklim panas dan semi-arid menimbulkan tantangan serius terhadap kualitas beton, terutama dalam hal penguapan air yang cepat dan gangguan pada proses hidrasi semen. Curing sebagai tahapan pasca pengecoran berfungsi mempertahankan kelembapan dan suhu beton agar reaksi hidrasi berlangsung sempurna. Artikel ini menyajikan sintesis mekanistik dari enam penelitian internasional terkemuka yang menelaah pengaruh curing terhadap pembentukan mikrostruktur dan durabilitas beton di lingkungan panas dan semi-arid. Hasil analisis menunjukkan bahwa efektivitas curing sangat bergantung pada kemampuan sistem menjaga stabilitas termal dan kelembapan internal selama 3–7 hari pertama. Metode seperti film curing, moist curing, dan thermal–moisture insulation curing (TMIC) terbukti mampu memperlambat kehilangan air hingga 40% dan meningkatkan kekuatan tekan 20–35% dibanding beton tanpa perawatan. Secara mikrostruktural, curing efektif memfasilitasi pertumbuhan gel Calcium Silicate Hydrate (C–S–H) yang padat, menurunkan porositas total, serta meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi ion klorida. Hasil sintesis ini menegaskan bahwa strategi curing adaptif berbasis iklim perlu diterapkan pada wilayah tropis semi-kering seperti Nusa Tenggara Timur untuk memastikan keberlanjutan infrastruktur beton jangka panjang..

Kata kunci: Curing, Mikrostruktur Beton, Hidrasi Semen, Durabilitas, Iklim Panas–Semi-Arid

ABSTRACT

Hot and semi-arid climates present critical challenges to concrete performance due to rapid water evaporation and the interruption of cement hydration. Curing, as the post-casting phase, functions to maintain adequate temperature and moisture to ensure complete hydration. This paper presents a mechanistic synthesis of six major international studies analyzing the effect of curing on microstructural development and durability of concrete under hot and semi-arid environments. Findings show that curing effectiveness strongly depends on maintaining thermal and moisture stability within the first 3–7 days. Methods such as film curing, moist curing, and thermal–moisture insulation curing (TMIC) effectively reduce water loss by up to 40% and increase compressive strength by 20–35% compared to uncured specimens. Mechanistically, effective curing enhances the formation of dense Calcium Silicate Hydrate (C–S–H) gels, reduces porosity, and improves resistance to chloride ion penetration. The synthesis concludes that adaptive climate-based curing strategies are crucial for ensuring long-term durability of concrete infrastructures, especially in semi-arid regions like East Nusa Tenggara, Indonesia.

Keywords: Curing, Concrete Microstructure, Cement Hydration, Durability, Hot–Semi-Arid Climate

PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi paling banyak digunakan di dunia dan menjadi tulang punggung bagi pembangunan infrastruktur modern. Namun, kualitas akhir beton tidak hanya ditentukan oleh desain campuran dan mutu bahan, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan pada fase awal pengerasan. Pada wilayah dengan iklim panas dan semi-arid,

kombinasi suhu tinggi dan kelembapan udara rendah mempercepat laju penguapan air dari beton segar sehingga mengganggu proses hidrasi semen secara signifikan. Neville (2011) menegaskan bahwa penguapan air yang tidak terkendali pada fase awal pengerasan menjadi penyebab utama meningkatnya porositas dan menurunnya kekuatan tekan beton. Oleh karena itu, pemahaman terhadap perilaku beton dalam kondisi lingkungan ekstrem merupakan aspek fundamental dalam rekayasa material beton.

Lingkungan panas dan semi-arid, sebagaimana ditemukan di banyak wilayah Timur Tengah, Afrika Utara, dan Asia Tenggara termasuk Indonesia bagian timur, memiliki karakteristik suhu rata-rata di atas 30–35°C serta kelembapan relatif yang sering berada di bawah 50%. Kondisi ini menyebabkan waktu kritis hidrasi semen menjadi lebih pendek sehingga proses pembentukan gel *Calcium Silicate Hydrate* (C–S–H) komponen utama yang menentukan kekuatan beton tidak berlangsung optimal (Mehta & Monteiro, 2014). Selain itu, suhu tinggi mempercepat reaksi awal hidrasi, tetapi justru menghambat perkembangan struktur mikro jangka panjang, menghasilkan beton dengan densitas rendah dan jumlah pori yang lebih besar (Liu et al., 2020). Dampak kumulatif dari kondisi tersebut adalah peningkatan kerentanan beton terhadap retak awal, penurunan kekuatan, serta degradasi durabilitas..

Dalam konteks infrastruktur, tantangan ini memiliki implikasi serius. Beton yang mengalami dehidrasi dini tidak hanya kehilangan sebagian kekuatannya, tetapi juga menjadi lebih permeabel terhadap ion agresif seperti klorida dan sulfat. Yu et al. (2015) menunjukkan bahwa beton yang tidak dirawat dengan baik pada lingkungan kering mengalami peningkatan permeabilitas ion klorida hingga lebih dari 40%, mempercepat risiko korosi tulangan dan memperpendek umur layan struktur. Temuan ini menegaskan bahwa *curing* bukan sekadar prosedur tambahan, tetapi merupakan elemen kunci yang menentukan keberlanjutan performa beton, terutama di wilayah dengan intensitas panas tinggi.

Curing berfungsi menjaga kelembapan dan suhu beton agar reaksi hidrasi berlangsung optimal. Pada iklim semi-arid, kehilangan air pada 48 jam pertama dapat mencapai 10–20%, sehingga memicu retak plastis dan penyusutan dini (Al-Nuaimi et al., 2020). Untuk mencegah hal ini, berbagai metode *curing* telah dikembangkan, mulai dari *moist curing* tradisional, *film curing* berbasis membran, hingga metode lebih canggih seperti *thermal–moisture insulation curing* (TMIC). Menurut Yu et al. (2015), metode TMIC mampu menjaga kestabilan kelembapan internal beton dan menurunkan kehilangan air hingga 40% dibandingkan kondisi tanpa *curing*, sekaligus meningkatkan kekuatan tekan secara signifikan. Efektivitas metode tersebut terutama terlihat pada kondisi iklim dengan fluktuasi suhu ekstrem.

Di sisi lain, penelitian mikrostruktur menunjukkan peran krusial *curing* dalam membentuk jaringan C–S–H yang rapat dan terdistribusi merata dalam pasta semen. Xu et al. (2022) mengungkapkan bahwa *curing* efektif dapat mengurangi ukuran pori serta memperbaiki densitas zona transisi antar-agregat (*Interfacial Transition Zone/ITZ*). Gong et al. (2022) menambahkan bahwa stabilitas kelembapan internal memiliki korelasi kuat terhadap indeks durabilitas beton berdasarkan analisis grey relational, menunjukkan bahwa pengendalian lingkungan selama proses *curing* merupakan prasyarat utama bagi beton berkinerja tinggi. Dengan demikian, hubungan antara *curing*, perkembangan mikrostruktur, dan durabilitas merupakan mekanisme yang saling terkait dan tidak dapat dipisahkan.

Relevansi persoalan ini sangat besar bagi wilayah seperti Nusa Tenggara Timur, Indonesia, yang memiliki karakteristik iklim semi-arid tropis dengan suhu tinggi dan curah hujan rendah. Kondisi ini menciptakan tantangan tersendiri dalam pengerjaan beton di lapangan, di mana ketersediaan air terbatas dan laju penguapan sangat tinggi. Studi-studi internasional telah memberikan bukti kuat bahwa beton yang diproduksi di wilayah panas–kering membutuhkan pendekatan *curing* yang berbeda dari standar konvensional. Namun, kajian yang memadukan

temuan global ke dalam konteks lokal Indonesia masih sangat terbatas, sehingga menuntut adanya sintesis ilmiah yang mengintegrasikan hasil penelitian terkini.

Oleh karena itu, artikel ini bertujuan menyajikan analisis mekanistik mengenai pengaruh metode *curing* terhadap perkembangan mikrostruktur dan durabilitas beton di lingkungan panas dan semi-arid. Dengan mensintesis enam penelitian internasional terkemuka, artikel ini mengeksplorasi bagaimana *curing* memengaruhi proses hidrasi, struktur internal beton, dan ketahanannya terhadap serangan kimia. Selain itu, kajian ini memberikan perspektif penerapan *curing* adaptif berbasis iklim yang relevan untuk wilayah semi-arid di Indonesia, sehingga dapat menjadi rujukan bagi para peneliti, praktisi konstruksi, dan pengambil kebijakan dalam merancang beton yang lebih tahan dan berumur panjang.

METODE PENELITIAN

Kajian ini menggunakan pendekatan sintesis mekanistik komparatif, yang mengintegrasikan hasil penelitian eksperimental dan numerik dari enam sumber ilmiah utama:

1. Gong et al. (2022) – *Durability Evaluation of Concrete in Cold and Arid Regions Based on Grey Relational Theory*.
2. Al-Nuaimi et al. (2020) – *Effect of Initial and Final Curing on Performance of Concrete in Hot and Arid Climates*.
3. Liu et al. (2020) – *Mechanical Performances of Concrete Produced with Desert Sand After Elevated Temperature*.
4. Xu et al. (2022) – *Improvement of Mechanical Properties and Microstructure of Cementitious Materials in a Hot-Dry Environment*.
5. Yu et al. (2015) – *Experimental Research on Effect of Curing Methods on Strength and Resistance to Chloride Ion Permeability in Arid Climates*.
6. Altimimi & Sultan (2025) – *Impact of Curing on Structural Performance of Reinforced Concrete Members: A Comprehensive Review*.

Keenam studi tersebut memiliki kesamaan konteks, yaitu meneliti beton pada suhu lingkungan antara 30–60°C dan kelembapan 30–50%. Analisis difokuskan pada tiga aspek:

1. Pengaruh *curing* terhadap reaksi hidrasi dan pembentukan C–S–H,
2. Dampak mikrostruktur terhadap porositas dan kekuatan tekan,
3. Hubungan kondisi *curing* dengan durabilitas terhadap penetrasi ion dan korosi tulangan.

Hasil-hasil penelitian tersebut kemudian dibandingkan untuk menemukan pola mekanistik yang menjelaskan hubungan antara proses *curing*, struktur internal beton, dan ketahanannya terhadap lingkungan yang ekstrem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Hasil penelitian ini disajikan dalam bentuk rangkuman data analisis mengenai pengaruh berbagai metode *curing* terhadap perkembangan mikrostruktur, kekuatan mekanis, dan durabilitas beton pada lingkungan panas–semi-arid. Data diringkas dalam Tabel 1 berikut untuk memperjelas perbedaan kinerja antar-metode *curing*.

Tabel 1 Ringkasan Hasil Analisis Pengaruh Metode Curing pada Beton di Iklim Panas–Semi-Arid

No.	Parameter Analisis	Tanpa <i>Curing</i>	<i>Moist Curing</i>	<i>Film Curing</i>	<i>TMIC (Thermal Moisture Insulation Curing)</i>
1	Penguapan air (0-72 jam)	Tinggi (30-40 %)	Sedang (15-20%)	Rendah (10-15%)	Sangat rendah (5-10%)
2	Kekuatan tekan	Rendah (-30% s.d -50%)	Meningkatkan (10-20%)	Meningkat (20-25%)	Meningkat (30-35%)
3	Porositas total	Tinggi	Menurun	Menurun signifikan	Menurun paling besar
4	Densitas gel C-S-H	Tidak merata	Cukup baik	Baik	Sangat baik
5	Ketahanan klorida	Rendah	Sedang	Baik	Sangat tinggi (difusi turun hingga $\pm 40\%$)
6	Stabilitas suhu internal	Tidak stabil	Relatif stabil	Stabil	Sangat stabil

Sumber: Penelitian, (2025)

PEMBAHASAN

1. Interpretasi Umum dari Hasil Penelitian

Hasil sintesis menunjukkan bahwa performa *curing* di iklim panas–semi-arid secara langsung memengaruhi kontinuitas hidrasi semen dan kestabilan mikrostruktur beton. Data pada Tabel 1 memperlihatkan konsistensi bahwa kehilangan kelembapan pada 3–7 hari pertama menyebabkan gangguan pembentukan gel C–S–H yang merupakan pengikat utama kekuatan beton. Hal ini selaras dengan teori dasar yang disampaikan Mehta & Monteiro (2014), bahwa C–S–H adalah kontributor terbesar terhadap kekuatan dan durabilitas. Dalam lingkungan yang suhunya melebihi 35°C, air menguap 3–5 kali lebih cepat (Neville, 2011), sehingga tanpa *curing*, beton mengalami dehidrasi internal yang menghambat perkembangan mikrostruktur.

2. Perbandingan Antara Metode *Curing*

Berdasarkan hasil penelitian, metode *curing* memberikan kinerja yang berbeda pada iklim panas–semi-arid:

- Moist curing* efektif secara teori, tetapi sulit dipertahankan karena evaporasi sangat cepat (Al-Nuaimi et al., 2020).
- Film curing* mampu menjaga kelembapan hingga 72 jam, menghasilkan porositas lebih rendah 20% (Xu et al., 2022).
- TMIC adalah metode terbaik karena menjaga suhu beton tetap lebih rendah 10–15°C dan menekan kehilangan air 40% (Yu et al., 2015).

Perbedaan ini menunjukkan bahwa keberhasilan *curing* bukan hanya mempertahankan air, tetapi juga mengontrol gradien termal. Semakin stabil suhu dan kelembapan, semakin padat gel C–S–H terbentuk sehingga durabilitas meningkat.

3. Pembahasan Kelembapan dan Hidrasi

Moist curing mampu menurunkan laju penguapan, tetapi kestabilan suhunya masih rendah. *Film curing* memberikan performa lebih baik karena lapisan membran menahan evaporasi

sehingga hidrasi sekunder dapat berlangsung lebih lama. Xu et al. (2022) membuktikan bahwa *film curing* mampu mempertahankan kelembapan hingga 72 jam dan menurunkan porositas 20%, dan temuan ini konsisten dengan data pada Tabel 1.

4. Kinerja TMIC sebagai Metode *Cure* yang Paling Efektif

TMIC menunjukkan kinerja terbaik karena mampu menjaga kelembapan dan suhu secara simultan. Yu et al. (2015) melaporkan bahwa TMIC mengurangi difusi klorida sebesar $\pm 42\%$, sementara tabel hasil penelitian ini juga menunjukkan penurunan porositas paling signifikan pada metode TMIC. Mekanisme isolasi termal pada TMIC memperlambat peningkatan temperatur beton, sehingga reaksi hidrasi tidak terhenti secara dini akibat pemanasan berlebih.

5. Hubungan Mikrostruktur dan Porositas

Variasi porositas antara metode *curing* berkaitan langsung dengan kepadatan gel C–S–H yang terbentuk. Pada beton tanpa *curing*, pori-pori besar dan tidak terhubung menyebabkan difusi ion klorida meningkat, sesuai hasil analisis Gong et al. (2022) yang menunjukkan korelasi tinggi ($r = 0,87$) antara stabilitas kelembapan internal dan indeks durabilitas. Pada TMIC, penurunan porositas mengindikasikan terbentuknya jaringan C–S–H yang lebih rapat dan berkesinambungan.

6. Hubungan antara Struktur Mikro dan Kinerja Makro Elemen Beton Bertulang

Altimimi & Sultan (2025) menunjukkan bahwa degradasi mikrostruktur akibat *curing* yang buruk menyebabkan percepatan korosi tulangan hingga pada tingkat 300%. Ketika ion klorida menembus beton lebih mudah, lapisan pasif pada tulangan hilang dan laju korosi meningkat. Hal ini mengakibatkan penurunan kekakuan elemen struktural dan pengurangan umur layanan secara signifikan. Dengan demikian, mikrostruktur bukan hanya menentukan durabilitas material, tetapi juga performa struktural elemen beton bertulang pada level makro.

7. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan bahwa *curing* merupakan faktor penentu ketahanan beton pada lingkungan ekstrem. Namun, masing-masing penelitian memiliki fokus berbeda yang saling melengkapi. Penelitian Yu et al. (2015) misalnya menekankan perbedaan efektivitas berbagai metode *curing* dan menunjukkan bahwa TMIC memberikan hasil terbaik untuk mengendalikan kehilangan air dan meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi klorida. Studi ini memberikan dasar kuat bahwa pengendalian termal dan kelembapan secara simultan adalah kunci keberhasilan *curing*.

Di sisi lain, Xu et al. (2022) memberikan perspektif mikrostruktural yang memperlihatkan bagaimana *film curing* dan penggunaan bahan pozzolan seperti *fly ash* mampu memperhalus dan memperpadat struktur pori, terutama pada zona ITZ. Temuan ini melengkapi penelitian Yu et al. dengan menunjukkan mekanisme mikro dari efektivitas *curing*.

Penelitian Liu et al. (2020) menambahkan dimensi baru dengan melihat dampak *curing* terhadap beton setelah paparan suhu tinggi. Hasilnya menunjukkan bahwa beton yang dirawat mengalami penurunan kekuatan jauh lebih kecil dibanding beton tanpa *curing*. Penelitian ini memperluas pemahaman tentang bagaimana *curing* memengaruhi stabilitas struktur dalam kondisi termal ekstrem.

Gong et al. (2022) berfokus pada analisis durabilitas menggunakan pendekatan *grey relational theory* dan menemukan bahwa stabilitas kelembapan merupakan variabel yang paling berpengaruh terhadap durabilitas. Temuan ini mendukung dua studi sebelumnya dan menunjukkan bahwa mekanisme *curing* bekerja terutama melalui kontrol kelembapan internal.

Altimimi & Sultan (2025) kemudian menghubungkan kualitas *curing* dengan respons struktural elemen beton bertulang, terutama terhadap korosi tulangan dan penurunan kekakuan. Ini memperlihatkan bahwa *curing* tidak hanya penting pada skala material, tetapi juga pada performa struktural.

Jika dibandingkan dengan penelitian-penelitian tersebut, penelitian ini menyintesis temuan mekanistik dari seluruh studi tersebut dan menekankan bahwa *curing* di daerah semi-arid tropis seperti Nusa Tenggara Timur (NTT) memerlukan pendekatan adaptif berbasis iklim lokal. Kajian ini melengkapi penelitian sebelumnya dengan memberikan interpretasi komprehensif mengenai interaksi antara lingkungan panas-semi-arid, perkembangan mikrostruktur, dan durabilitas beton, serta relevansinya terhadap kebutuhan infrastruktur di Indonesia.

8. Implikasi terhadap Durabilitas Beton di Iklim Semi-Arid

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa TMIC dan film *curing* dapat diterapkan sebagai solusi praktis untuk kondisi panas-semi arid seperti Nusa Tenggara Timur. Pengendalian suhu dan kelembapan selama 7 hari pertama dapat meningkatkan kekuatan beton hingga 30–35%, sejalan dengan data literatur (Yu et al., 2015; Xu et al., 2022). Penerapan metode ini di lapangan dapat memperpanjang umur layan struktur, khususnya pada bangunan publik dan infrastruktur pesisir yang terpapar lingkungan agresif. %.

9. Hubungan Mekanistik Berantai

Curing yang efektif mempengaruhi beton melalui suatu rangkaian mekanisme bertingkat. Ketika kelembapan internal dipertahankan, reaksi hidrasi semen dapat berlangsung secara optimal. Reaksi ini menghasilkan gel C–S–H yang berfungsi sebagai pengikat utama dalam beton (Mehta & Monteiro, 2014). Semakin optimal hidrasi berlangsung, semakin banyak gel C–S–H terbentuk, dan semakin padat mikrostruktur beton. Mikrostruktur yang padat berkontribusi pada menurunnya porositas total dan menurunkan konektivitas pori. Dengan pori yang lebih kecil dan tidak saling terhubung, difusivitas ion agresif seperti klorida akan berkurang drastis. Ketika difusi ion klorida menurun, risiko korosi tulangan juga ikut menurun, sehingga durabilitas dan umur layanan beton meningkat. Dengan demikian, hubungan mekanistik berantai dapat dijelaskan sebagai proses ilmiah bertahap yang dimulai dari perawatan awal hingga menentukan ketahanan jangka panjang elemen struktural.

10. Implikasi Hasil Penelitian terhadap Kondisi Iklim Semi-Arid di Nusa Tenggara Timur

NTT memiliki suhu rata-rata 32–36°C dan kelembapan rendah (<55%), maka risiko kehilangan kelembapan pada beton sangat tinggi. Berdasarkan temuan penelitian internasional, penerapan metode *curing* konvensional seperti penyiraman tidak cukup efektif dalam iklim tersebut. Oleh karena itu, strategi *curing* adaptif seperti *film curing* atau TMIC lebih relevan untuk menjamin keberlanjutan beton dalam jangka panjang. Penggunaan bahan pozzolan seperti *fly ash* yang memperpanjang fase hidrasi sekunder juga memiliki potensi besar untuk meningkatkan kinerja beton di NTT, sebagaimana dibuktikan Xu et al. (2022).

KESIMPULAN

Curing merupakan tahapan yang sangat menentukan kualitas beton di iklim panas dan semi-arid karena berperan langsung dalam menjaga stabilitas kelembapan dan suhu selama proses hidrasi. Hasil sintesis menunjukkan bahwa metode *curing* seperti *film curing* dan terutama TMIC mampu memperlambat kehilangan air, menjaga suhu internal beton, memperpanjang fase hidrasi sekunder, serta menghasilkan gel C–S–H yang lebih rapat dan homogen.

Mikrostruktur yang lebih padat ini mengurangi porositas, menurunkan difusivitas ion klorida, dan secara signifikan meningkatkan durabilitas serta ketahanan korosi pada elemen beton bertulang. Dengan demikian, penerapan *curing* adaptif berbasis kondisi iklim lokal sangat penting untuk memastikan performa beton jangka panjang di wilayah tropis kering seperti Nusa Tenggara Timur.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Nuaimi, N., Irshidat, M. R., & Salim, S. (2020). Effect of Initial and Final Curing on Performance of Concrete in Hot and Arid Climates. *Structural Concrete*. DOI: 10.1002/suco.201900340.
- Altimimi, H. A., & Sultan, A. A. (2025). Impact of Curing on Structural Performance of Reinforced Concrete Members: A Comprehensive Review. *Rafidain Journal of Engineering Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.61268/brbdyb60>.
- Gong, L., et al. (2022). Durability Evaluation of Concrete in Cold and Arid Regions Based on Grey Relational Theory. *Advances in Civil Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/6287810>.
- Liu, H., et al. (2020). Mechanical Performances of Concrete Produced with Desert Sand After Elevated Temperature. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00402-3>.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education.
- Xu, Z., et al. (2022). Improvement of Mechanical Properties and Microstructure of Cementitious Materials in a Hot-Dry Environment. *Crystals*. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst12070981>.
- Yu, B., et al. (2015). Experimental Research on Effect of Curing Methods on Strength and Resistance to Chloride Ion Permeability of Concrete in Simulated Arid Climates. *Key Engineering Materials*. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.229.