

Kajian Kematangan Beton untuk Memprediksi Nilai Kuat Tekan Beton dengan Variasi Kadar Metakaolin

Brilian Nugraheni, Wibowo, Endah Safitri

Universitas Sebelas Maret

Abstrak: Beton massa tidak dapat diukur kuat tekannya dengan metode konvensional karena metode tersebut tidak mampu mencerminkan kondisi *curing* aktual di lapangan yang sering mengalami gradien suhu signifikan akibat volume besar beton. Oleh karena itu, metode kematangan (*maturity method*) menjadi alternatif yang mengestimasi kuat tekan berdasarkan suhu aktual dan waktu *curing* di lapangan, dengan model prediksi persamaan logaritmik karena kemudahannya. Penelitian ini bertujuan mengkaji nilai maturitas beton untuk menentukan kuat tekan pada beton dengan variasi substitusi parsial metakaolin sebesar 0%, 7,5%, 12,5%, dan 20% dari berat binder, yang kemudian dibandingkan dengan hasil kuat tekan menggunakan uji destruktif. Metode yang digunakan adalah uji eksperimental dengan spesimen berupa silinder beton dengan diameter dan tinggi 15 cm dan 30 cm yang dilengkapi sensor suhu pada kedalaman ± 15 cm. Beton diukur suhunya pada umur 0, 1, 3, 7, 14, 21, dan 28 hari, serta uji kuat tekan pada umur 7, 14, dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai maturitas untuk memperoleh kuat tekan beton dengan model prediksi persamaan logaritmik memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) diatas 0,9, dengan perbandingan kuat tekan beton menggunakan metode kematangan dan uji destruktif menunjukkan selisih di bawah 3%.

Kata Kunci: Maturitas Beton, Metakaolin, Kuat Tekan, Prediksi, Persamaan Logaritmik.

DOI: <https://doi.org/10.47134/scbmej.v1i4.3095>

*Correspondence: Brilian Nugraheni
Email: nugrahenibrilian987@gmail.com

Received: 06-06-2024

Accepted: 12-07-2024

Published: 25-08-2024



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Mass concrete cannot be measured for compressive strength by conventional methods because they are unable to reflect actual curing conditions in the field, which often experience significant temperature gradients due to the large volume of concrete. Therefore, the maturity method is an alternative that estimates compressive strength based on actual temperature and curing time in the field, with a logarithmic equation prediction model because of its simplicity. This study aims to assess the maturity value of concrete to determine the compressive strength of concrete with partial substitution variations of metakaolin of 0%, 7.5%, 12.5%, and 20% of the binder weight, which is then compared with the compressive strength results using destructive testing. The method used is an experimental test with specimens in the form of concrete cylinders with a diameter and height of 15 cm and 30 cm equipped with a temperature sensor at a depth of ± 15 cm. Concrete at the age of 0, 1, 3, 7, 14, 21, and 28 days was subjected to temperature measurements, as well as compressive strength tests at the age of 7, 14, and 28 days. The results showed that the maturity value for obtaining concrete compressive strength with the logarithmic equation prediction model has a coefficient of determination (R^2) value above 0.9, with the comparison of concrete compressive strength using the maturity method and destructive tests showing a difference below 3%.

Keywords: Concrete Maturity, Metakaolin, Compressive Strength, Prediction, Logarithmic Equation.

Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur yang masif dan menjadi modal penting untuk meningkatkan perekonomian suatu negara juga mendorong pertumbuhan industri konstruksi yang menghasilkan konstruksi kuat, efisien, dan ekonomis, sehingga memerlukan material konstruksi berkualitas. Salah satu bahan konstruksi yang paling umum adalah beton, karena berbagai keunggulan yang dimiliki beton. Inovasi penggunaan bahan tambahan dalam pembuatan beton telah mendapat perhatian yang besar karena potensinya untuk meningkatkan kinerja, keberlanjutan, dan daya tahan beton. Salah satu bahan tambah yang menjanjikan untuk meningkatkan kualitas beton adalah metakaolin. Metakaolin digunakan sebagai bahan tambah pengganti semen karena sifatnya sebagai pozzolan yang memiliki sifat mengikat seperti semen. Metakaolin merupakan pozzolan yang sangat reaktif yang dapat mempengaruhi kinerja beton. Metakaolin mempengaruhi kinerja beton melalui tiga mekanisme mendasar yaitu efek pengisi, efek percepatan laju hidrasi semen portland, dan aktivitas pozzolan (Poon et al., 2003). Mengacu pada sebuah penelitian, penggunaan metakaolin meningkatkan kekuatan, kedalaman karbonasi dan daya serap air beton dan tingkat penggantian yang optimum ditemukan sebesar 10% (Lenka & Panda, 2017). Hal ini yang menjadi salah satu dasar penggunaan metakaolin dalam campuran beton menjadi topik penelitian yang menarik.

Pada proyek konstruksi besar seperti bendungan, pondasi, jembatan dan bangunan besar lainnya umumnya menggunakan beton massa. Pengukuran kekuatan awal beton massa sangat penting untuk memastikan kekuatan dan durabilitas struktur. Beton massa tidak dapat menggunakan pengukuran konvensional untuk mengukur kuat tekannya karena metode tersebut tidak mampu merefleksikan kondisi curing sebenarnya di lapangan yang sering kali mengalami gradien suhu signifikan akibat volume besar beton. Metode maturitas menjadi pilihan utama karena menyediakan estimasi kekuatan beton yang akurat berdasarkan suhu aktual dan waktu curing yang dialami beton di lapangan (Elsageer et al., 2018).

Metode kematangan (*maturity method*) ini merupakan salah satu metode pengujian kuat tekan beton secara non destruktif dengan tanpa merusak beton. Perkembangan kekuatan beton dipengaruhi oleh banyak faktor lingkungan. Dalam hal ini dua faktor utama yang mempengaruhi ialah temperatur dan waktu (De Schutter, 2004). Nilai kekuatan beton secara aktual dapat diprediksi menggunakan metode *maturity* (kematangan) berdasarkan nilai indeks *maturity* pada setiap variasi campuran beton. Persamaan yang diperoleh melalui pengujian laboratorium dapat digunakan untuk melakukan prediksi nilai kuat tekan beton. Hasil pengujian ditunjukkan dengan Grafik hubungan kuat tekan-kematangan (Carino et al., 2001).

Langkah awal dalam metode maturitas adalah Penggunaan Persamaan 1. menghitung indeks kematangan (*maturity*) beton.

$$M(t) = \sum_0^t (T - T_0) \Delta T \dots\dots\dots(1)$$

Dimana,

$M(t)$ = faktor temperatur-waktu (*maturity*) pada umur t (°C-jam),

T = temperatur rerata beton selama interval waktu ($^{\circ}\text{C}$),
 T_0 = temperatur datum ($^{\circ}\text{C}$),
 ΔT = interval waktu (jam).

Dengan memasukkan nilai indeks *maturity* (kematangan) beton pada Persamaan 2. nilai kuat tekan beton dapat diperoleh.

$$f_c = a + b \ln(M) \dots\dots\dots(2)$$

Dimana,

f_c = kuat tekan beton (MPa),
 a, b = konstanta,
 M = indeks *maturity* ($^{\circ}\text{C}$ -jam).

Metode

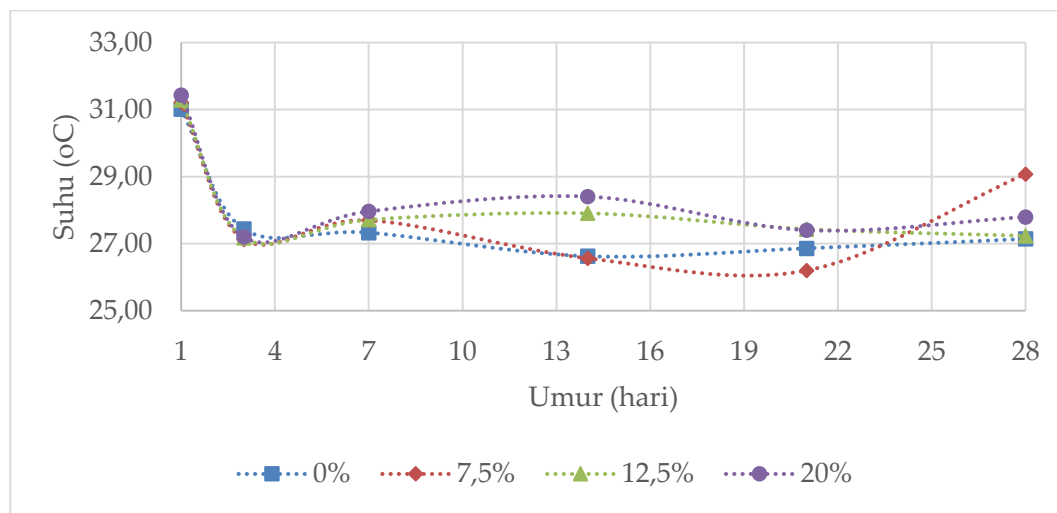
Metode kuantitatif eksperimental dengan pengujian di laboratorium digunakan pada penelitian ini. Penelitian ini menggunakan spesimen berupa beton yang memiliki bentuk silinder 15 cm x 30 cm dengan variasi penggunaan bahan tambah metakaolin sebagai pengganti semen. Variasi kadar metakaolin tersebut adalah 0%; 7,5%; 12,5%; dan 20% dari berat binder. Beton dengan kadar metakaolin 0% digunakan sebagai pembanding atau kontrol. Setiap campuran beton diuji kuat tekannya menggunakan alat *Compression Testing Machine* (CTM) di umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari dan juga diukur suhunya di umur 0, 1, 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Setiap sesi pengujian melibatkan 4 benda uji. Sehingga total benda uji untuk menguji 4 variasi beton adalah 48 buah. Pada Tabel 1. ditampilkan jumlah penggunaan benda uji dalam penelitian ini.

Tabel 1. Jumlah Benda Uji

Umur Beton (Hari)	Variasi Beton			
	Metakaolin 0%	Metakaolin 7,5%	Metakaolin 12,5%	Metakaolin 20%
7	4	4	4	4
14	4	4	4	4
28	4	4	4	4
Jumlah Benda Uji Per- Variasi (Buah)	12	12	12	12
Jumlah Seluruh Benda Uji (Buah)	48			

Hasil dan Pembahasan

Pengukuran suhu beton dilakukan secara kontinu untuk setiap variasi benda uji selama periode 28 hari. Data suhu yang tercatat pada setiap interval waktu digunakan untuk menentukan nilai kematangan (*maturity*) beton, yang merupakan parameter penting dalam evaluasi perkembangan kekuatan beton seiring berjalannya waktu. Data rerata suhu yang diperoleh kemudian digunakan dalam perhitungan nilai kematangan beton pada setiap campuran yang diuji. Gambar 1 memperlihatkan hasil suhu yang telah diukur untuk masing-masing beton dengan variasi kadar metakaolin yang berbeda.



Gambar 1. Grafik Suhu Rerata Benda Uji Pada Umur 1 Sampai 28 Hari

Berdasarkan Gambar 1. menunjukkan data rata-rata suhu pada umur awal beton kadar metakaolin 0% adalah 31,02 °C, MK 7,5% adalah 31,22 °C, MK 12,5% adalah 31,29 °C, dan MK 20% adalah 31,44 °C. Data tersebut mengindikasikan bahwa beton yang mengandung kadar metakaolin lebih banyak memiliki suhu awal yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar kadar substitusi parsial metakaolin dalam campuran beton, semakin tinggi suhu awal yang terukur. Peningkatan kadar metakaolin berkontribusi pada kenaikan suhu awal beton, yang mungkin disebabkan oleh reaksi eksotermik yang lebih intensif selama proses hidrasi.

Nilai indeks *maturity* (kematangan) beton dapat dihitung melalui data suhu rata-rata beton yang ditunjukkan pada Gambar 1 dengan menggunakan Persamaan 1. Prediksi nilai kuat tekan beton aktual dilapangan dapat diperoleh dari hasil perhitungan nilai indeks *maturity*. Tabel 2 menunjukkan rekapitulasi nilai indeks *maturity* (kematangan) beton untuk masing-masing variasi kadar metakaolin.

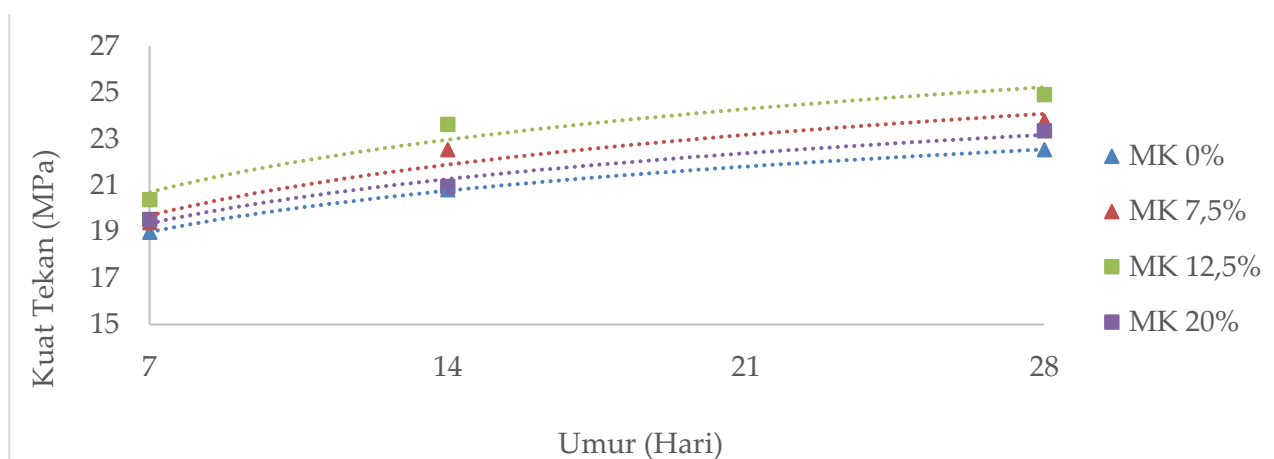
Tabel 2. Rekapitulasi Nilai Indeks *Maturity* (Kematangan) Beton

Umur (Jam)	<i>Maturity</i> (°C-jam)			
	Metakaolin 0,00%	Metakaolin 7,50%	Metakaolin 12,50%	Metakaolin 20%
0	-	-	-	-
24	247,92	279,78	273,69	279,87

Umur (Jam)	Maturity (°C-jam)			
	Metakaolin 0,00%	Metakaolin 7,50%	Metakaolin 12,50%	Metakaolin 20%
72	690,9	720,06	716,79	727,05
168	1399,74	1431,3	1431,27	1454,73
336	2571,75	2628,93	2743,14	2829,6
504	3704,49	3700,98	4031,7	4157,43
672	4880,49	4984,29	5263,77	5434,02

Nilai indeks *maturity* mengintegrasikan pengaruh waktu dan suhu terhadap proses pengerasan beton. Semakin lama beton dibiarkan mengeras, semakin banyak hidrasi yang terjadi antara semen dan air, yang pada akhirnya meningkatkan kekuatan beton. Pada Tabel 2. menunjukkan bahwa nilai *maturity* yang dihasilkan pada setiap variasi kadar metakaolin akan semakin bertambah besar seiring bertambah lamanya umur beton dengan selisih yang cukup jauh. Hal ini berarti beton akan mencapai kekuatan optimalnya seiring bertambahnya umur, menunjukkan bahwa lamanya umur beton berhubungan langsung dengan peningkatan nilai *maturity*.

Sampel beton selanjutnya diuji kuat tekannya di umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Mengacu ASTM C 1074, dimana pada tiap pengujian *destructive test* memerlukan sedikitnya 2 benda uji pada setiap usia pengujian, selanjutnya dilakukan perhitungan kuat tekan rata-rata. Jika perbedaan antara dua nilai kuat tekan melebihi 10% dari rata-rata, maka harus dilakukan pengujian pada benda uji ketiga. Kemudian dari hasil pengujian ini, rata-rata kuat tekan dari ketiga benda uji dihitung. Alat *Compression Testing Machine* (CTM) digunakan untuk menguji kuat tekan secara *destructive test*, yang mengukur beban maksimum (kN) dan kemudian dilakukan konversi menjadi nilai kuat tekan (MPa). Gambar 2 menampilkan hasil uji kuat tekan pada beton.

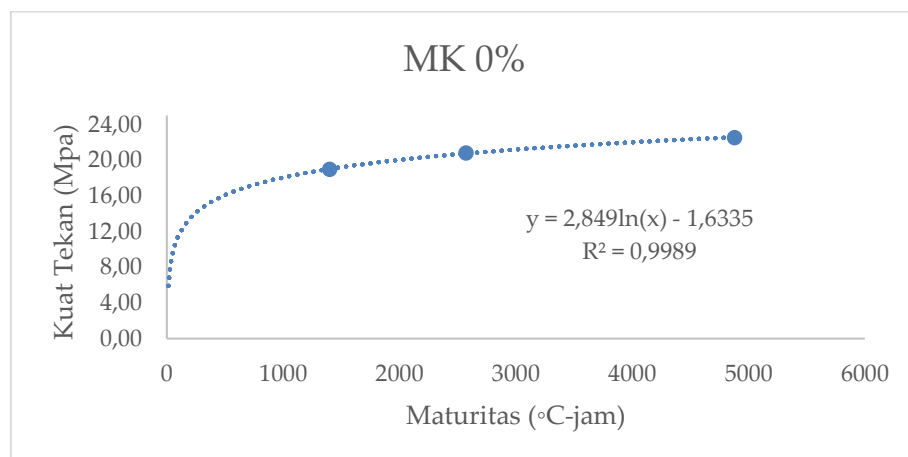


Gambar 2. Grafik Kuat Tekan Beton

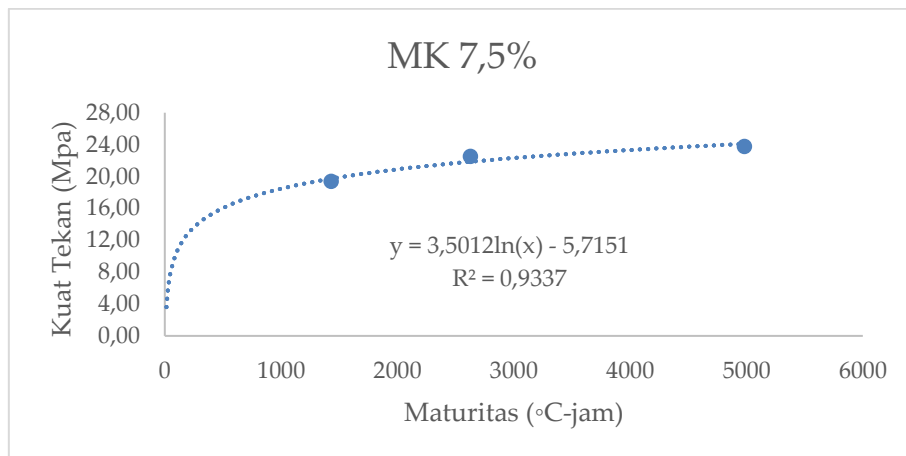
Gambar 2. membuktikan bahwa substitusi metakaolin dapat menambah nilai kuat tekan beton pada penambahan kadar tertentu. Semua beton yang ditambahkan metakaolin menunjukkan nilai kuat tekan yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan beton tanpa metakaolin. Kuat tekan beton bertambah sejalan dengan peningkatan kadar metakaolin sampai mencapai nilai optimum, setelah itu nilai kuat tekan mulai menurun ketika kadar

metakaolin melebihi batas optimum. Berdasarkan hasil penelitian pada beton normal tanpa substitusi metakaolin diperoleh nilai kuat tekan pada umur 28 hari 22,53 MPa. Pada substitusi semen dengan metakaolin dengan kadar 7,5%, kuat tekan pada umur 28 hari meningkat sebesar 5,49% dengan nilai kuat tekan 23,77 MPa. Pada substitusi semen dengan metakaolin dengan kadar 12,5% kuat tekan pada umur 28 hari meningkat sebesar 10,51% yang merupakan peningkatan terbesar dan menghasilkan nilai kuat tekan tertinggi dari seluruh kadar substitusi parsial metakaolin pada penelitian ini yaitu sebesar 24,90 MPa. Pada substitusi semen dengan metakaolin dengan kadar 20% kuat tekan pada umur 28 hari meningkat sebesar 3,61% yaitu diperoleh nilai kuat tekan 23,34 MPa. Penemuan ini selaras dengan studi sebelumnya oleh Kamal dkk. (2019), yang menunjukkan bahwa penambahan metakaolin memberikan efek pengisian serta reaksi pozzolanik dengan kalsium hidroksida, yang dapat meningkatkan kepadatan beton dan meningkatkan kuat tekan beton. Namun, ketika kadar metakaolin melebihi nilai optimal, kuat tekan beton cenderung menurun. Ini terjadi karena persentase semen yang berperan sebagai binder utama beton berkurang, yang kemudian menyebabkan kurang efektifnya reaksi hidrasi yang terjadi antara semen dan metakaolin. (Wibowo dkk., 2020).

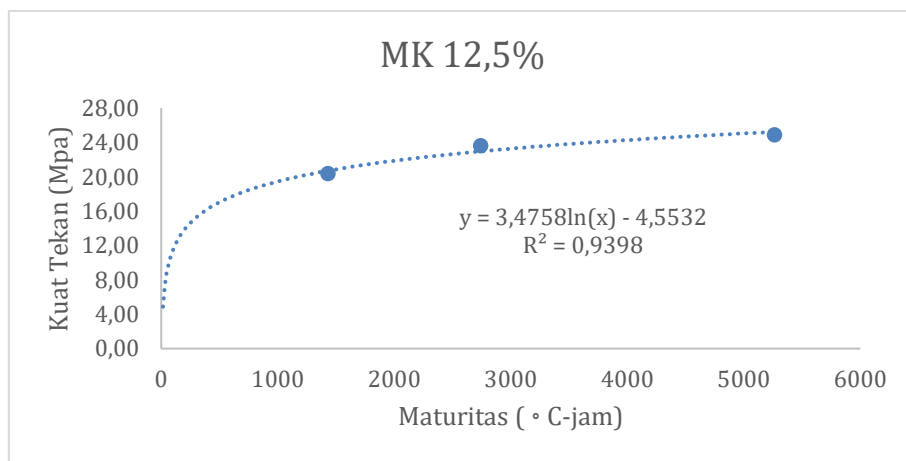
Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk melakukan prediksi nilai kuat tekan pada beton dengan menggunakan metode *maturity* atau *non destructive test*. Model prediksi dengan persamaan logaritmis digunakan dalam perhitungan metode *maturity* (kematangan) pada penelitian ini. Berdasarkan nilai indeks *maturity*, persamaan logaritmis dianggap efektif untuk memperkirakan kekuatan tekan beton. Langkah pertama adalah menemukan konstanta persamaan logaritmis yang kemudian digunakan untuk melakukan prediksi nilai kuat tekan beton. Dari analisis Grafik hubungan antara kuat tekan dan *maturity* diperoleh konstanta serta koefisien determinasi, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3 sampai Gambar 6.



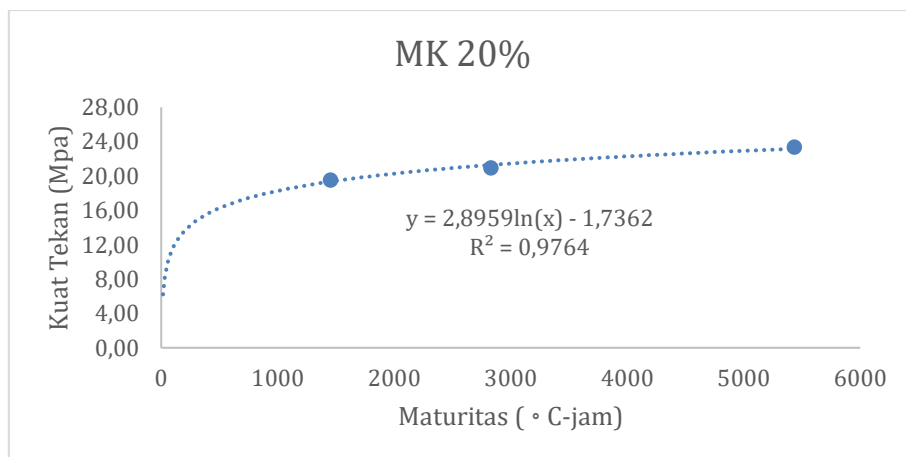
Gambar 3. Grafik Hubungan Kuat Tekan dan *Maturity* pada Beton Kadar MK 0%



Gambar 4. Grafik Hubungan Kuat Tekan dan *Maturity* pada Beton Kadar MK 7,5%



Gambar 5. Grafik Hubungan Kuat Tekan dan *Maturity* pada Kadar MK 12,5%



Gambar 6. Grafik Hubungan Kuat Tekan dan *Maturity* pada Kadar MK 20%

Tabel 3. Rekapitulasi Konstanta dan Koefisien Determinasi

		MK			
		0%	7,5%	12,5%	20%
Persamaan Logaritmis	a	-1,6335	-5,7151	-4,5532	-1,7362
	b	2,849	3,5012	3,4758	2,8959
	R ²	0,9989	0,9337	0,9398	0,9764

Berdasarkan Tabel 3. koefisien determinasi (R^2) yang dihasilkan dari Grafik hubungan kuat tekan dan *maturity* dengan persamaan logaritmis memperoleh nilai yang besar pada tiap variasi. Hasil ini membuktikan bahwa model prediksi persamaan logaritmis efektif untuk memperkirakan kuat tekan beton berdasarkan indeks *maturity* pada umur di bawah 28 hari. Model ini mampu memberikan estimasi yang sesuai selama periode tersebut. Namun, untuk umur beton yang melebihi 28 hari, penggunaan persamaan logaritmis tidak disarankan. Hal ini karena model tersebut cenderung terus memprediksi peningkatan kuat tekan seiring dengan bertambahnya nilai *maturity*, tanpa menetapkan batas maksimum.

Dari hasil analisis pada Gambar 3. sampai dengan Gambar 6. dihasilkan konstanta persamaan logaritmis dengan menggunakan Persamaan 2. yang selanjutnya digunakan untuk melakukan prediksi nilai kuat tekan beton. Persamaan yang dihasilkan selanjutnya disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Persamaan Logaritmis

Kadar Metakaolin (%)	Persamaan Logaritmis
0	$fc = -1,6335 + 2,8490 \ln(M)$
7,5	$fc = -5,7151 + 3,5012 \ln(M)$
12,5	$fc = -4,5532 + 3,4758 \ln(M)$
20	$fc = -1,7362 + 2,8959 \ln(M)$

Nilai indeks *maturity* yang telah diperoleh kemudian dihitung menggunakan persamaan yang tercantum di Tabel 4. sehingga diperoleh prediksi nilai kuatnya. Rekapitulasi nilai kuat tekan yang telah dihitung dengan indeks *maturity* disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Kuat Tekan Beton Menggunakan Metode *Maturity*

Umur (Hari)	Kadar Metakaolin							
	0%		7,5%		12,5%		20%	
	<i>Maturity</i> (°C-jam)	Kuat Tekan (Mpa)	<i>Maturity</i> (°C-jam)	Kuat Tekan (Mpa)	<i>Maturity</i> (°C-jam)	Kuat Tekan (Mpa)	<i>Maturity</i> (°C-jam)	Kuat Tekan (Mpa)
7	1399,74	19,00	1431,30	19,73	1431,27	20,70	1454,73	19,35
14	2571,75	20,74	2628,93	21,85	2743,14	22,96	2829,60	21,28
28	4880,49	22,56	4984,29	24,09	5263,77	25,04	5434,02	23,17

Menurut Tabel 5. dapat ditarik kesimpulan bahwa kandungan metakaolin dalam beton mempengaruhi nilai indeks *maturity*. Dengan meningkatnya jumlah metakaolin yang ditambahkan, nilai indeks *maturity* yang diperoleh juga meningkat. Seiring dengan kenaikan nilai indeks *maturity* metakaolin, nilai kuat tekan beton pun akan bertambah tinggi.

Prediksi nilai kuat tekan beton berdasarkan nilai indeks *maturity* yang ditampilkan pada Tabel 5. yang dihitung melalui persamaan logaritmis kemudian dibandingkan dengan kuat tekan beton yang didapatkan melalui *destructive test* menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM). Tabel 6. menampilkan perbandingan nilai kuat tekan beton yang diperoleh dari metode *non destructive test* dan *destructive test*.

Tabel 6. Perbandingan Nilai Kuat Tekan Beton

Umur (Hari)	Metode Pengujian	Kadar Metakaolin			
		0%	7,5%	12,5%	20%
7 Hari	<i>Non Destructive Test</i> (Mpa)	19,00	19,73	20,70	19,35
	<i>Destructive Test</i> (Mpa)	18,97	19,38	20,37	19,52
	Selisih (%)	0,18	1,78	1,63	0,87
14 Hari	<i>Non Destructive Test</i> (Mpa)	20,74	21,85	22,96	21,28
	<i>Destructive Test</i> (Mpa)	20,81	22,53	23,63	20,94
	Selisih (%)	0,32	2,98	2,80	1,64
28 Hari	<i>Non Destructive Test</i> (Mpa)	22,56	24,09	25,04	23,17
	<i>Destructive Test</i> (Mpa)	22,53	23,77	24,90	23,34
	Selisih (%)	0,15	1,38	0,57	0,74

Tabel 6. Menunjukkan bahwa selisih kuat tekan beton dengan kadar metakaolin 0%; 7,5%; 12,5%; dan 20% menggunakan metode *destructive test* dan *non destructive test* adalah dibawah 3%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan model prediksi dengan persamaan logaritmis untuk memprediksi nilai kuat tekan beton dibawah umur 28 hari sangatlah baik.

Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan metakaolin pada beton memberikan pengaruh terhadap indeks *maturity* beton. Peningkatan kadar metakaolin yang

digunakan menyebabkan indeks maturitas yang dihasilkan lebih tinggi, yang menunjukkan bahwa nilai kuat tekan beton juga akan lebih tinggi. Beton dengan variasi kadar metakaolin 0%, 7,5%; 12,5%; dan 20% memiliki koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9989, 0,9337, 0,9398, dan 0,9764. Hal tersebut menunjukkan penggunaan persamaan logaritmis untuk memprediksi kuat tekan beton dengan metode *maturity* (kematangan) dibawah umur 28 hari sangatlah baik. Hal ini ditunjukkan dengan perbedaan antara hasil kuat tekan beton dengan menggunakan metode *non destructive test* dan metode *destructive test* adalah di bawah 3%.

Daftar Pustaka

- ASTM International, 1998. *ASTM C1074: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Methods*.
- Badan Standardisasi Nasional, 2011. *SNI 1947:2011: Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional, 2002. *SNI 03-6809-2002: Tata Cara Estimasi Kekuatan Beton dengan Metode Maturity*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional, 2012. *SNI 7656:2012: Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa*. Badan Standardisasi Nasional, 52.
- Badan Standardisasi Nasional, 2019. *SNI 2847:2019: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- Carino, by N., & Lew, H. 2001. *The Maturity Method: From Theory to Application*.
- Departemen Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik., 1971, *Peraturan Beton Bertulang Indonesia*, Departemen Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik.
- De Schutter, G. 2004. *Applicability of Degree of Hydration Concept and Maturity Method for Thermo-Visco-Elastic Behaviour of Early Age Concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 437–443. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00067-2)
- Elsageer, M., Mansour, W., & Abulaaj, H. (2018). *Prediction of local concretes compressive strength using the maturity method*. <https://doi.org/10.21467/proceedings.4.32>
- Guterres, S., Wibowo, Safitri, E. 2023. Kajian Penerapan Persamaan Fungsi Regresi Non-Linier untuk Memprediksi Kuat Tekan Beton di Bawah Umur 28 Hari. *Action Research Literate*, 7(9). <https://arl.ridwaninstitute.co.id/index.php/arl>
- Kamal, I. M. M., Wibowo, & Safitri, E. 2019. Pengaruh Kadar Metakaolin Terhadap Kuat Tekan Pada *High Strength Self Compacting Concrete* (HSSCC) Usia 14 Dan 28 Hari. Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Lenka, S., & Panda, K. C. 2017. *Effect of Metakaolin on The Properties of Conventional and Self Compacting Concrete*. *Advances in Concrete Construction*, 5(1), 31–48. <https://doi.org/10.12989/acc.2017.5.1.31>
- Plowman, J. M., 1956, *Maturity and the Strength of Concrete*. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 8, No. 22, March, pp. 13-22.
- Poon, C.-S., Azhar, S., Anson, M., & Wong, Y.-L. (2003). *Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures*. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 83–89. doi:10.1016/s0958-9465(01)00061-0

- Rayhan, M. 2023. Kajian Penerapan Persamaan Fungsi Eksponensial Untuk Memprediksi Kuat Tekan Beton Di Bawah Umur 28 Hari. Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Sambowo, K. A. 2002. *Engineering Properties and Durability Performance of Metakaolin and Metakaolin PFA Concrete*.
- Saul, A. G. A. 1951, *Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure. Magazine of Concrete Research*, Vol. 2, No. 6, March, pp. 127-140.
- Shen, P., Lu, L., Chen, W., Wang, F., & Hu, S. (2017). Efficiency of metakaolin in steam cured high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 152, 357–366. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.07
- Wibowo, Baihaqi, T. R., & Safitri, E. 2023. Kajian Penerapan Persamaan Fungsi Logaritmis Untuk Memprediksi Kuat Tekan Beton Di Bawah Umur 28 Hari. 8(4). <https://doi.org/10.20961/mateksi.v8i3>
- Wibowo , Safitri, E., & Deni, D.P. Kajian Karbonasi Pada Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri Dengan Variasi Komposisi Metakaolin. *J Ris Rekayasa Sipil*. 2020;4(1):1.