

KAJIAN PENERAPAN PERSAMAAN FUNGSI LOGARITMIS UNTUK MEMREDIKSI KUAT TEKAN BETON DI BAWAH UMUR 28 HARI

Wibowo^{1*}, Endah Safitri¹, Teuku Rafi Baihaqi¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret Surakarta
Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta, Jawa Tengah 57126

*Corresponding author: wibowotsipil87@ft.uns.ac.id

Abstract

The use of the maturity method to predict the actual compressive strength of concrete in construction projects is limited to same concrete mix designs that have undergone laboratory calibration tests. In the application of this method logarithmic equations are commonly used as model predictions because of their ease of use. Several studies has been done to compare logarithmic equation with other prediction model on concrete with binder substitute. This experimental study aims to determine the suitability of using logarithmic equations in describing the compressive strength-maturity relationship in conventional concrete design mixes with different water-cement ratio (0.4; 0.45; 0.5; 0.55; 0.6) and with use of admixture in the form of 10% fly ash. The test object used is a concrete cylinder with a height of 30 cm and a diameter of 15 cm. Temperature measurements and concrete compressive strength tests were carried out at the ages of 1, 3, 7, 14, 21, and 28 days. The test data is depicted in the logarithmic equation curve and compared with the hyperbolic equation. The results showed that the logarithmic equation resulted in a higher coefficient of determination or lower error in 5 of the 6 mix designs used. Thus, the logarithmic equation has a good suitability for data testing and can be used to predict the compressive strength of concrete for the mix design used in this study.

Keywords: Fly Ash, Logarithmic Equation, Maturity, Prediction, Strength, Water to Cement Ratio.

Abstrak

Penggunaan metode maturitas untuk memprediksi kuat tekan beton aktual pada proyek konstruksi terbatas pada *mix design* beton yang sama yang telah melalui uji kalibrasi di laboratorium. Dalam aplikasi metode ini persamaan logaritmik umum digunakan sebagai model prediksi karena kemudahan penggunaannya. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui perbandingan persamaan logaritmik dan model prediksi lainnya pada beton dengan substitusi semen. Penelitian eksperimental ini bertujuan untuk mengetahui kesesuaian penggunaan persamaan logaritmik dalam menggambarkan hubungan kuat tekan-maturitas pada *mix design* beton konvensional dengan tingkat faktor air semen berbeda (0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6) dan dengan penggunaan admixture berupa *fly ash* 10%. Benda uji yang digunakan adalah beton silinder dengan tinggi 30 cm dan diameter 15 cm. Pengukuran suhu dan uji kuat tekan beton dilakukan pada umur 1, 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Data pengujian digambarkan dalam kurva persamaan logaritmik dan dibandingkan dengan model prediksi lainnya. Hasil penelitian menunjukkan persamaan logaritmik menghasilkan koefisien determinasi yang lebih tinggi atau error yang lebih rendah pada 5 dari 6 *mix design* yang digunakan. Maka, persamaan logaritmik memiliki kesesuaian yang baik terhadap data pengujian dan dapat digunakan untuk memprediksi kuat tekan beton untuk *mix design* yang digunakan pada penelitian ini.

Kata Kunci : faktor air semen, fly ash, kuat tekan, maturitas, persamaan logaritmik, prediksi.

PENDAHULUAN

Saat ini beton merupakan material yang paling banyak digunakan sebagai material struktur bangunan. Setidaknya, beton dipilih karena 3 alasan utama. Pertama, beton dapat dibentuk menjadi berbagai jenis dan bentuk struktur. Kedua, bahan-bahan penyusun beton seperti agregat, pasir, dan semen mudah ditemukan dan memiliki harga yang relatif murah. Ketiga, beton memiliki ketahanan yang baik terhadap air (Mehta & Monteiro, 2014)

Tidak seperti material kayu, besi, atau yang lainnya, beton membutuhkan waktu untuk mencapai kekuatan rencananya. Hal ini disebabkan karena adanya reaksi hidrasi antara air dan semen yang berpengaruh terhadap perkembangan kekuatan beton. Proses hidrasi tersebut cenderung berjalan secara perlahan sehingga durasi pelaksanaan pekerjaan pada proyek konstruksi merupakan aspek yang penting untuk diperhatikan. Pada proyek konstruksi sering terjadi kebutuhan untuk mempercepat pelaksanaan pekerjaan. Pada sisi pemilik proyek hal ini bertujuan untuk kepentingan bisnis dan operasional. Sedangkan untuk pihak penyedia jasa hal tersebut bertujuan untuk mencegah kendala akibat cuaca dan kondisi yang tak terduga, menghindari kerugian akibat denda, dan meraih keuntungan (Bakry et al., 2014). Percepatan pekerjaan untuk struktur dengan material beton harus memperhatikan kekuatan aktual beton. Kesalahan pengambilan keputusan dapat berakibat fatal pada kerusakan struktur bangunan.

Pada tahun 1973, sebuah gedung dengan struktur beton bertulang di Amerika Serikat mengalami keruntuhan yang mengakibatkan 14 pekerja meninggal dunia dan 34 lainnya luka-luka. Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa penyebab keruntuhan tersebut adalah pelepasan bekisting yang terlalu awal sehingga beban tidak dapat ditahan oleh beton yang masih muda (Carino & Lew, 2001). Maka pengambilan keputusan penting yang berkaitan dengan struktur pada proyek dengan material beton harus disertai dengan hasil uji kekuatan beton aktual untuk mengetahui berapa kekuatan yang telah tersedia.

Pengujian kuat tekan *in-situ* yang akurat dibutuhkan untuk mengestimasi kekuatan beton secara langsung dan memberikan peluang untuk mengoptimalkan operasi konstruksi penting, seperti waktu pelepasan bekisting, membuka jembatan lalu lintas, waktu pengencangan kabel pra-tekan, dan mengoptimalkan desain campuran beton (Carufel et al., 2018). Terdapat beberapa metode pengujian kuat tekan beton secara *in-situ*. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah metode maturitas/kematangan.

Maturitas merupakan metode pengujian non-destruktif yang digunakan untuk memprediksi kuat tekan beton berdasarkan riwayat suhu beton (ASTM, 2015). Metode maturitas mengasumsikan bahwa campuran beton yang sama akan mencapai kekuatan yang sama apabila memiliki nilai maturitas yang sama berapa pun kombinasi suhu-waktu yang digunakan untuk menghasilkan nilai maturitas tersebut. Kombinasi pengaruh suhu dan waktu pada perkembangan kekuatan beton dikuantifikasi melalui persamaan fungsi maturitas (Carino, 2004). Persamaan fungsi maturitas diperoleh melalui uji kalibrasi laboratorium. Terdapat beberapa jenis persamaan fungsi maturitas yang dapat digunakan, salah satu yang paling umum adalah persamaan logaritmik yang diusulkan oleh Plowman (1956).

Penelitian-penelitian terdahulu terkait metode maturitas telah dilakukan untuk mengetahui kesesuaian berbagai model prediksi termasuk persamaan logaritmik terhadap data pengujian (Geng et al., 2021). Namun, analisis terkait metode maturitas tampaknya lebih sering dilakukan pada beton dengan penggunaan berbagai bahan substitusi semen (Kamkar & Eren, 2018; Ji et al., 2017; Mariak et al., 2019). Penelitian terhadap beton dengan kadar *fly ash* tinggi juga telah dilakukan oleh Upadhyaya et al. (2015) dan Pendharkar (2015). Berdasarkan informasi tersebut, penelitian terhadap beton konvensional dengan berbagai tingkat faktor air semen dan pada beton dengan penggunaan *fly ash* kadar rendah perlu dilakukan mengingat penggunaan fungsi maturitas terbatas pada campuran beton yang sama. Persamaan fungsi maturitas yang diperoleh dari penelitian tersebut selanjutnya dapat digunakan untuk memprediksi kekuatan beton sesuai dengan faktor air semen yang digunakan. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kesesuaian persamaan fungsi logaritmik dalam aplikasi metode maturitas terhadap beton dengan faktor air semen 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6 dan beton dengan penggunaan *fly ash* 10%.

Maturitas

Berdasarkan SNI-03-6809-2002, maturitas didefinisikan sebagai suatu metode yang digunakan untuk mengestimasi kekuatan beton berdasarkan asumsi bahwa sampel uji dari suatu campuran beton akan mencapai kekuatan yang sama apabila mencapai nilai indeks maturitas yang sama. Metode ini menyajikan pendekatan yang relatif sederhana untuk mendapatkan estimasi kekuatan beton di lapangan selama proses konstruksi dibandingkan dengan metode pengujian *in-situ* lainnya. Persamaan fungsi maturitas yang telah diperoleh dapat digunakan untuk mengkonversi riwayat suhu aktual menjadi faktor yang mengindikasikan berapa besar kekuatan beton yang telah tersedia secara langsung. Maturitas dapat dihitung dari riwayat suhu beton menggunakan persamaan:

$$M_{(t)} = \sum_0^t (T - T_0)\Delta t \quad [1]$$

keterangan:

$M_{(t)}$ = maturitas (°C-jam atau °C-hari)

Δt = interval waktu (jam atau hari)

T = temperatur beton rata-rata selama interval waktu (°C)

T_0 = temperatur datum (°C)

Kemudian untuk menggambarkan hubungan kuat tekan-maturitas, Plowman (1956) merumuskan persamaan:

$$f_c = a + b \ln \ln (M) \quad [2]$$

keterangan:

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

Ia mengobservasi bahwa ketika kuat tekan diplot sebagai fungsi dari log maturitas maka data akan sangat mendekati garis lurus. Sementara Chin (1971) merumuskan persamaan hiperbolik:

$$S = \frac{M}{\frac{1}{A} + \frac{M}{S_{\infty}}} \quad [3]$$

keterangan:

S = kuat tekan beton (MPa)
 M = indeks maturitas ($^{\circ}\text{C}$ -jam atau $^{\circ}\text{C}$ -hari)
 A = kemiringan awal kurva
 S_{∞} = batasan kuat tekan

METODE

Pengujian dilakukan di Laboratorium dengan metode eksperimental. Sampel benda uji yang digunakan berupa beton silinder dengan dimensi 15 cm x 30 cm. Pengukuran suhu beton dan pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 1 hari, 3 hari, 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari. Jumlah benda uji yang digunakan untuk setiap campuran beton adalah 24 buah dengan rincian per waktu uji berjumlah 4 buah. Maka total seluruh benda uji yang digunakan untuk 6 variasi campuran beton yang akan diuji berjumlah 144 buah benda uji. Rincian jumlah benda uji dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Rincian jumlah benda uji

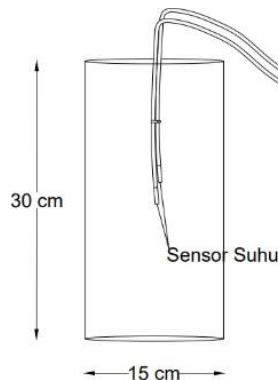
Umur Beton (Hari)	Jenis Campuran					
	FAS 0,4	FAS 0,45	FAS 0,5	FAS 0,55	FAS 0,6	FAS 0,5 FA 10%
1	4	4	4	4	4	4
3	4	4	4	4	4	4
7	4	4	4	4	4	4
14	4	4	4	4	4	4
21	4	4	4	4	4	4
28	4	4	4	4	4	4
Jumlah Benda Uji Per-Jenis Campuran (Buah)	24	24	24	24	24	24
Jumlah Seluruh Benda Uji (Buah)	144					

Benda uji silinder pada penelitian ini direncanakan dengan spesifikasi beton K-200 atau setara dengan kuat tekan rencana 16,6 MPa. Campuran beton yang akan digunakan terdiri dari semen portland tipe I, agregat kasar, agregat halus, dan air. *Fly ash* digunakan sebagai bahan tambah dan menjadi salah satu dari 6 variasi campuran beton. Ketentuan terkait material yang digunakan dan perhitungan rancang campur beton merujuk pada ketentuan yang terdapat pada SNI. Hasil perhitungan rancang campur beton dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Material penyusun masing-masing jenis campuran

Campuran	Air (Liter)	Semen (kg)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)	Fly ash (kg)
FAS 0,4	39,3035	98,2857	150,5352	176,7011	-
FAS 0,45	39,3035	87,3411	150,5352	176,7011	-
FAS 0,5	39,3035	78,6070	150,5352	176,7011	-
FAS 0,55	39,3035	71,4609	150,5352	176,7011	-
FAS 0,6	39,3035	65,5058	150,5352	176,7011	-
FAS 0,5 <i>Fly ash</i> 10%	39,3035	78,6070	150,5352	176,7011	7,8607

Sensor suhu dimasukkan ke dalam cetakan pada saat proses pembuatan benda uji dengan kedalaman 15 cm dari permukaan cetakan benda uji silinder. Pada penelitian ini digunakan rangkaian 2 buah sensor yang diikat dengan tujuan untuk menghindari resiko akibat rusak atau tidak berfungsinya salah satu sensor yang ditanam. Ilustrasi benda uji dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi benda uji

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Maturitas

Nilai maturitas beton digunakan untuk mengestimasi kuat tekan aktual struktur beton di lapangan berdasarkan riwayat suhu beton. Nilai maturitas pada penelitian ini dihitung menggunakan Persamaan 1. Hasil perhitungan maturitas dapat dilihat pada Tabel 3.

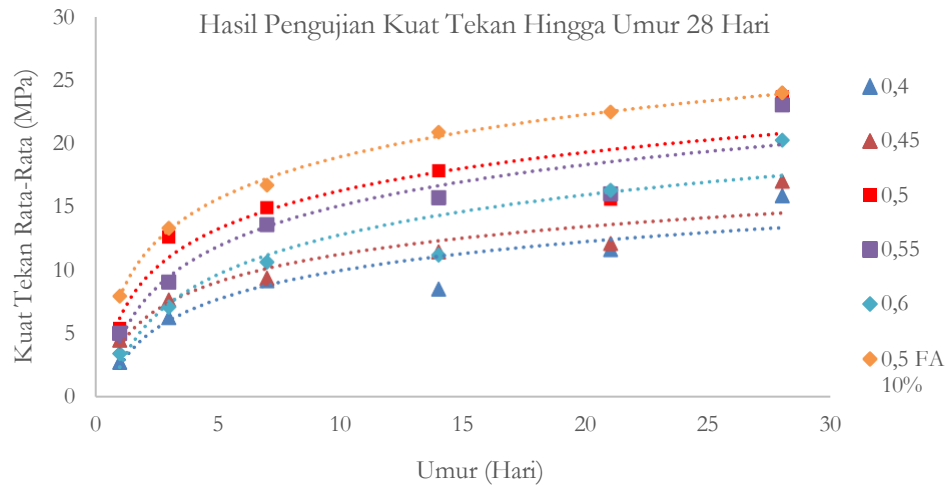
Tabel 3. Hasil perhitungan maturitas

Umur beton (jam)	Maturitas (°C-jam)					
	FAS 0,4	FAS 0,45	FAS 0,5	FAS 0,55	FAS 0,6	FAS 0,5 FA 10%
0	-	-	-	-	-	-
24	661,32	654,22	627,69	618,18	602,36	612,03
72	1919,88	1940,22	1946,61	1880,46	1916,78	1903,59
168	4499,04	4519,26	4603,29	4615,74	4647,62	4567,59
336	9299,85	9097,26	9137,19	9456,24	9325,37	9368,40
504	13955,34	13694,30	13711,62	13960,74	14145,92	14138,97
672	18389,07	18392,98	18439,14	18655,50	18872,18	18833,52

Berdasarkan Tabel 3. di atas, nilai maturitas untuk campuran beton dengan faktor air semen yang lebih kecil menghasilkan nilai maturitas yang lebih kecil. Seiring bertambahnya faktor air semen, maka nilai maturitas juga bertambah meskipun tidak berbeda secara signifikan. Sedangkan untuk campuran beton dengan penambahan *fly ash* menghasilkan nilai maturitas yang lebih besar dibandingkan dengan campuran beton biasa.

Hasil Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton dilaksanakan pada umur 1, 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Pengujian dilakukan menggunakan alat Compression Testing Machine (CTM) di Laboratorium Bahan dan Struktur Program Studi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret Surakarta. Pengujian ini menghasilkan data beban maksimum (kN) yang kemudian dikonversi ke dalam nilai kuat tekan (MPa). ASTM C 1074 mensyaratkan minimal pengujian 2 sampel pada setiap umur beton dan kemudian dihitung rata-ratanya. Apabila range dari 2 nilai tekan tersebut melebihi 10% dari rata-rata kuat tekan, maka dilakukan pengujian ketiga lalu dihitung rata-rata nilai kuat tekan dari 3 sampel uji. Hasil pengujian kuat tekan disajikan pada Gambar 2.



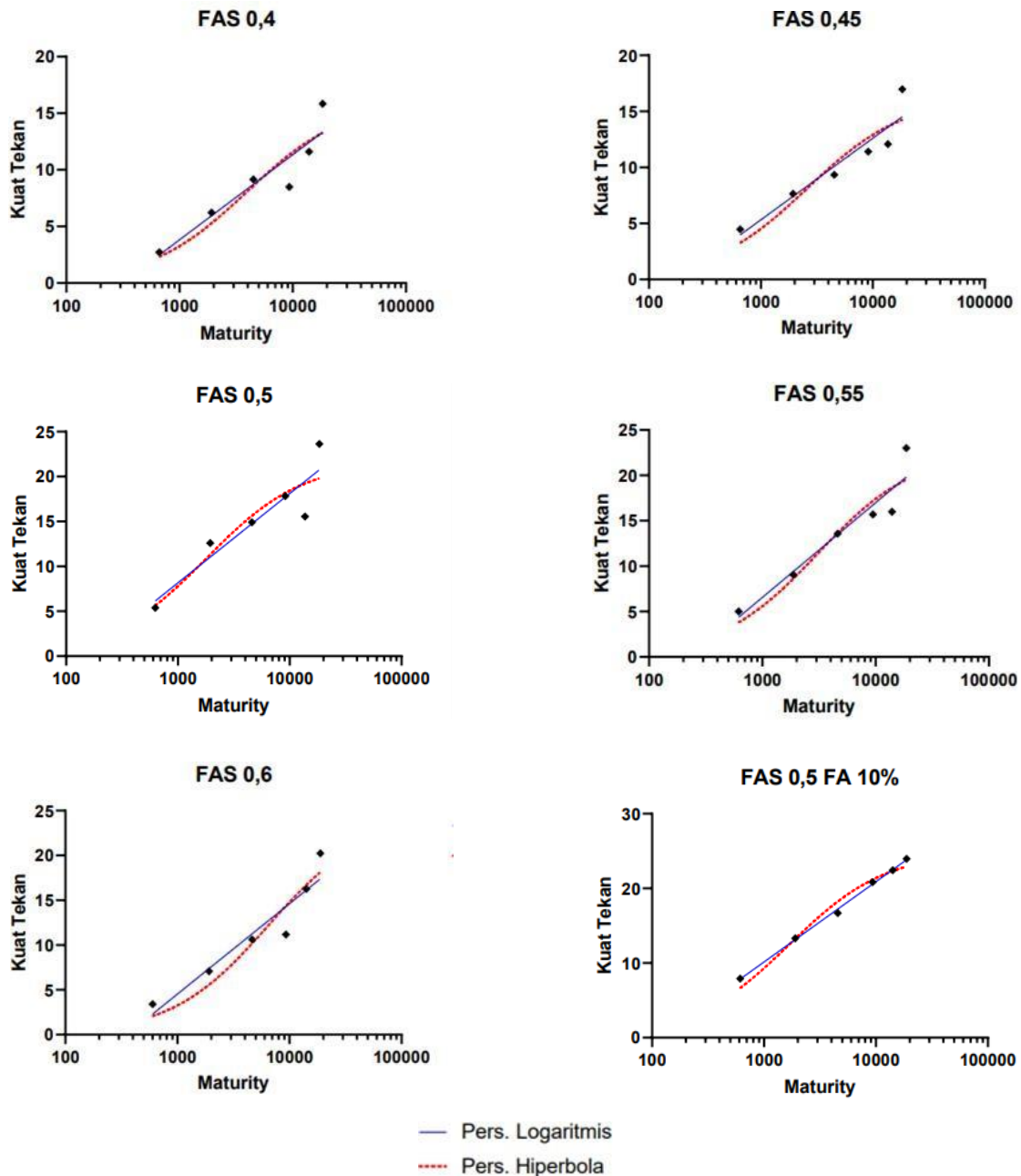
Gambar 2. Hasil pengujian kuat tekan

Grafik pada Gambar 2. diatas menunjukkan perbandingan hasil uji kuat tekan pada berbagai jenis campuran beton. Pada FAS 0,5 - 0,6, campuran beton dengan faktor air semen yang lebih kecil menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih besar. Namun, pada FAS 0,4 dan 0,45 nilai kuat tekan bernilai lebih kecil. Hal ini kemungkinan terjadi karena kesalahan saat pembuatan benda uji silinder. Sedangkan campuran beton dengan penggunaan bahan tambah *fly ash* (FAS 0,5 FA 10%) menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih besar dibandingkan dengan beton tanpa penggunaan bahan tambah (FAS 0,5).

Hubungan Kuat Tekan-Maturitas

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui apakah model prediksi menggunakan persamaan logaritmis dapat digunakan dengan baik untuk mengestimasi nilai kuat tekan berdasarkan nilai maturitas dari setiap jenis campuran beton. Untuk mencapai hal tersebut dilakukan perbandingan model prediksi persamaan logaritmis terhadap model prediksi persamaan hiperbolik. Persamaan logaritmis dan hiperbolik dipilih karena kemudahan dalam penggunaannya dibandingkan dengan persamaan lain pada metode maturitas. Hubungan kuat tekan-maturitas untuk masing-masing campuran beton disajikan pada Gambar 3. Axis x pada masing-masing kurva digambarkan dalam skala log.

Kurva-kurva hubungan kuat tekan-maturitas pada Gambar 3 memperlihatkan perbandingan antara persamaan logaritmis dan persamaan hiperbolik. Ketika axis x digambarkan dalam skala log, model prediksi persamaan logaritmis menghasilkan garis regresi yang lurus. Hal ini sesuai dengan apa yang disampaikan oleh Plowman (1956). Sementara persamaan hiperbolik menghasilkan garis regresi melengkung yang melandai di bagian ujungnya. Karena membentuk garis regresi yang lurus, penggunaan persamaan logaritmis untuk memprediksi umur beton di atas 28 hari tidak dianjurkan karena model tersebut tetap memprediksi pertambahan nilai kuat tekan seiring bertambahnya nilai maturitas sehingga tidak terdapat batasan pertambahan nilai kuat tekan. Sedangkan pada persamaan hiperbolik kurva akan melandai yang menandai adanya batasan pertumbuhan kekuatan beton. Parameter dan koefisien determinasi dari kurva persamaan logaritmis dan hiperbolik dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 3. Kurva hubungan kuat tekan-maturitas persamaan logaritmis dan hiperbolik

Tabel 4. Parameter dan koefisien determinasi kurva persamaan logaritmis dan hiperbolik

		FAS					
		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,5 FA 10%
Pers. Logaritmis	a	-18,73	-16,51	-21,68	-24,76	-25,72	-22,11
	b	3,265	3,161	4,32	4,533	4,379	4,669
	R ²	0,8601	0,8902	0,8531	0,9062	0,8944	0,9978
Pers. Hiperbolik	A	0,0041	0,0062	0,0121	0,0074	0,0037	0,0148
	S _∞	16,12	16,25	21,73	22,75	24,34	24,99
	R ²	0,8327	0,8414	0,8324	0,8815	0,8973	0,9722

Tabel 4. menyajikan hasil analisis regresi persamaan logaritmik dan hiperbolik. Berdasarkan tabel tersebut, persamaan logaritmik dan hiperbolik menghasilkan koefisien determinasi di atas 0,83 pada semua jenis campuran. Namun, kurva hubungan kuat tekan-maturitas dengan persamaan logaritmik menghasilkan koefisien determinasi (R^2) yang lebih besar pada setiap jenis campuran beton kecuali pada FAS 0,6. Hal ini menunjukkan model prediksi kuat tekan untuk umur beton di bawah 28 hari berdasarkan nilai maturitas yang paling sesuai untuk data penelitian ini adalah persamaan logaritmik. Persamaan logaritmik menghasilkan nilai error yang lebih kecil dibandingkan persamaan hiperbolik. Persamaan regresi hubungan kuat tekan-maturitas dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Persamaan regresi untuk setiap jenis campuran beton

FAS	Logaritmik	Hiperbolik
0,4	$fc = -18,73 + 3,265 \ln \ln M$	$S = \frac{M}{1 + \frac{M}{0,0041 + 16,12}}$
0,45	$fc = -16,51 + 3,161 \ln \ln M$	$S = \frac{M}{1 + \frac{M}{0,0062 + 16,25}}$
0,5	$fc = -21,68 + 4,32 \ln \ln M$	$S = \frac{M}{1 + \frac{M}{0,0121 + 21,73}}$
0,55	$fc = -24,76 + 4,533 \ln \ln M$	$S = \frac{M}{1 + \frac{M}{0,0074 + 22,75}}$
0,6	$fc = -25,72 + 4,379 \ln \ln M$	$S = \frac{M}{1 + \frac{M}{0,0037 + 24,34}}$
0,5 FA 10%	$fc = -22,11 + 4,669 \ln \ln M$	$S = \frac{M}{1 + \frac{M}{0,0148 + 24,99}}$

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penggunaan persamaan logaritmik untuk memprediksi kuat tekan di bawah umur 28 hari dengan metode maturitas. Kesimpulan dari penelitian tersebut adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan metode prediksi persamaan logaritmik dalam kurva hubungan kuat tekan-maturitas pada FAS 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6 dan FAS 0,5 FA 10% menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) secara berturut-turut yaitu: 0,8601; 0,8902; 0,8531; 0,9062; 0,8944; 0,9978. Sedangkan nilai R^2 model prediksi menggunakan persamaan hiperbolik sebagai berikut: 0,8327; 0,8414; 0,8324; 0,8815; 0,8944; 0,9722. Dari perbandingan nilai R^2 pada keenam jenis campuran beton, persamaan logaritmik menghasilkan nilai R^2 yang lebih tinggi pada 5 dari 6 campuran beton. Sehingga dapat disimpulkan persamaan logaritmik merupakan model prediksi yang lebih sesuai untuk data hasil pengujian pada penelitian ini.
2. Meskipun persamaan logaritmik menghasilkan koefisien determinasi (R^2) yang lebih besar, tetapi persamaan logaritmik tidak dianjurkan untuk digunakan untuk mengestimasi kuat tekan beton di atas umur 28 hari. Karena persamaan logaritmik menghasilkan garis regresi yang lurus, sehingga tidak mempunyai batasan pertumbuhan kuat tekan. Dengan bertambahnya nilai maturitas, kuat tekan juga akan terus bertambah. Sedangkan pada persamaan hiperbolik terdapat batasan kekuatan. Ketika nilai kuat tekan mendekati nilai batasan maka kurva akan melandai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada tim peneliti yang sudah bekerja sama untuk mewujudkan terlaksananya penelitian ini. Terima kasih juga kami sampaikan kepada seluruh pihak yang terlibat dalam membantu selama pelaksanaan penelitian ini di Laboratorium Bahan Konstruksi dan Stuktur program studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta.

REFERENSI

- ASTM, 2015, "ASTM C 1074: Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", 1–10.
- Badan Standarisasi Nasional, 2002, "SNI-03-6809-2002: Tata Cara Estimasi Kekuatan Beton Dengan Metode Maturity".
- Bakry, I., Moselhi, O., & Zayed, T., 2014, "Optimized acceleration of repetitive construction projects". *Automation in Construction*, 39, 145–151.
- Carino, N. J., 2004, "The Maturity Method", *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. CRC Press.
- Carino, N. J., & Lew, H., 2001, "The Maturity Method : From Theory to Application", *2001 Structures Congress & Exposition*, 19.
- Carufel, S. De, Fahim, A., Ghods, P., & Alizadeh, A., 2018, "Concrete Maturity From Theory to Application", In *Giater Scientific Inc.*
- Chin, F. K., 1971, "Relation between strength and maturity of concrete", *ACI Journal*, 68(3), 196–203.
- Geng, D. J., Dai, N., Jin, X. S., & Miao, E. X., 2021, "Comparison of calculating methods and applications of different concrete maturity", *Journal of Physics: Conference Series*, 2011(1).
- Ji, N., Seung, I., Sang, Y., & Yeon, J., 2017, "Prediction of early-age compressive strength of epoxy resin concrete using the maturity method", *Construction and Building Materials*, 152, 990–998.
- Kamkar, S., & Eren, Ö., 2018, "Evaluation of maturity method for steel fiber reinforced concrete" *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(1), 213–221.
- Mariak, A., Kurpińska, M., & Wilde, K., 2019, "Maturity curve for estimating the in-place strength of high performance concrete", *MATEC Web of Conferences*, 262.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M., 2014, "Concrete Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.)".
- Pendharkar, S., 2015, "Enhanced maturity modeling for sustainable concrete mixtures using high volume fly ash", University of Maryland.
- Plowman, M., 1956, "Maturity and the strength of concrete", 4, 13–22.
- Upadhyaya, S., Goulias, D., & Obla, K., 2015, "Maturity-Based Field Strength Predictions of Sustainable Concrete Using High-Volume Fly Ash as Supplementary Cementitious Material", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1–8.