

Kajian Penerapan Persamaan Fungsi Regresi Non-Linier untuk Memprediksi Kuat Tekan Beton di Bawah Umur 28 Hari

Sandro Guterres¹, Wibowo², Endah Safitri³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret
sandroguterresic@student.uns.ac.id

ABSTRAK

Saat ini dengan menggunakan metode maturitas lebih relatif sederhana untuk menilai perkembangan kekuatan beton selama konstruksi di tempat. Penelitian untuk menentukan hubungan antara nilai kematangan dan kuat tekan pada beton berumur 1, 3, 7, 14, 21, dan 28 hari dengan variasi faktor air semen 0,4 0,45 0,5 0,55 0,6 dan variasi campuran fly ash 10%, kemudian penerapan persamaan fungsi regresi non linier untuk memprediksi kuat tekan beton berdasarkan temperature-time factor. Penelitian ini mengkaji pengaruh faktor air semen dan bahan tambahan pada campuran beton terhadap tingkat kematangan dan kekuatan beton. Benda uji yang digunakan adalah beton konvensional, berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. tujuan penulisan ini adalah untuk mengetahui implementasi persamaan fungsi regresi non linier untuk memprediksi kuat tekan beton di bawah umur 28 hari berdasarkan temperature-time factor pada beton dengan jenis dan campuran yang sama. Hasil pengukuran suhu beton pada umur awal (0 hingga 1 hari) campuran beton dengan faktor air semen yang lebih kecil menghasilkan suhu awal beton yang lebih tinggi. Sedangkan beton dengan campuran fly ash menunjukkan suhu awal yang lebih rendah dan Hasil nilai kuat tekan beton pada FAS 0,5 hingga FAS 0,6 dihasilkan nilai kuat tekan yang lebih tinggi pada campuran beton dengan faktor air semen yang lebih rendah. Berdasarkan uji regresi linear pada hubungan antara faktor air semen dan maturity, didapatkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 84,9%. Dimana perubahan pada variabel X dapat dijelaskan oleh variabel Y.

Kata kunci:

Metode Maturitas
Peridiksi Kuat Tekan
Beton di Bawah Umur
28 Hari
Beton Konvensional
Fly Ash
Temperature-Time
Factor

Keywords:

Maturity Method
Perception of The
Compressive Strength
of Concrete Under 28
Days of Age
Conventional Concrete
Fly Ash
Temperature-Time
Factor

Currently, using the maturity method is relatively simple to assess the development of concrete strength during on-site construction. The research is to determine the relationship between maturity value and compressive strength in 1, 3, 7, 14, 21, and 28 days old concrete with variation of cement water factor 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 and variation of fly ash mixture 10%, then application of non-linear regression function equation to predict compressive strength of concrete based on temperature-time factor. This study examines the effect of cement water factor and additives in concrete mixtures on the maturity and strength of concrete. The purpose of this paper is to determine the implementation of the non-linear regression function equation to predict the compressive strength of concrete under the age of 28 days based on the temperature-time factor in concrete with the same type and mixture. The results of concrete temperature measurements at the initial age (0 to 1 day) of concrete mixtures with a smaller cement water factor produce higher initial concrete temperatures. Based on the linear regression test on the relationship between cement water factor and maturity, the coefficient of determination (R^2) is 84.9%. Where changes in variable X can be explained by variable Y.

Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

PENDAHULUAN

Beton merupakan bahan konstruksi tertua, yang sering digunakan di seluruh dunia, walau penggunaannya tersebar luas, salah satu faktor pembatas dalam penggunaan beton untuk memprediksi waktu yang diperlukan untuk mencapai kekuatan desain pada waktu tertentu (Artiningsih, 2012). Penggunaan kematangan beton telah muncul menjadi juara untuk memprediksi kekuatan beton (Pane et al., 2015). Beton biasanya terdiri dari agregat kasar, agregat halus, semen dan, jika perlu, bahan tambahan. Berbeda dengan besi dan kayu, semen memiliki masa hidrasi yang mempengaruhi perkembangan kekuatan beton dimana hidrasi

semen menghasilkan panas menyebabkan temperatur beton naik. Ketika permukaan beton kehilangan panas ke atmosfer, perbedaan suhu di bagian luar terlihat dingin dan pusat elemen yang panas (Waller et al., 2004). Akibat periode hidrasi ini, beton akan membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai kekuatan yang cukup sebelum bekisting dilepas (Hermawan, 2018).

Permasalahan saat ini yang harus diperhatikan adalah untuk mencapai kekuatan beton yang diinginkan, salah satunya adalah pengerasan beton (Sukirman, 2016). Sehingga pekerjaan konstruksi seringkali membutuhkan beton dengan kekuatan awal yang tinggi untuk mempercepat waktu pengerasan dengan mengawetkan beton pada temperatur tinggi (Kullit et al., 2013). Saat ini dengan menggunakan metode maturitas memberikan cara yang relatif sederhana untuk menilai perkembangan kekuatan beton selama konstruksi di tempat. Konsep maturitas untuk memperkirakan peningkatan kekuatan beton yang dijelaskan dalam ASTM C.1074. Prediksi pertumbuhan kekuatan beton pada berbagai suhu yang sesuai dikonfirmasi dalam Studi Kematangan Beton (Nandhini & Karthikeyan, 2021).

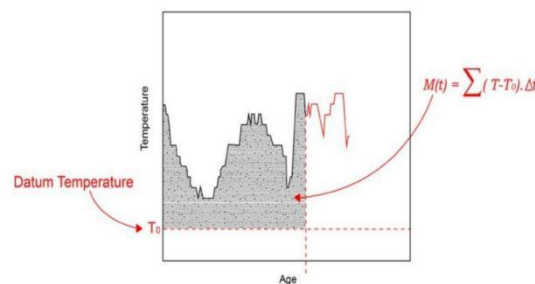
Metode kontrol kualitas beton yang umum digunakan dalam proyek adalah uji kompresi silinder beton. Sifat beton pada umumnya akan lebih baik bila kuat tekannya lebih tinggi, oleh karena itu hanya kuat tekan yang biasanya dipertimbangkan ketika memeriksa mutu beton (Arizki et al., 2015). Secara umum, nilai kuat tekan tidak sebatas membedakan beton mutu tinggi dengan mutu biasa. Menurut SNI-03-2847-2002 (1990), beton didefinisikan sebagai campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk suatu massa padat (Sumajouw et al., 2014).

Metode *Maturity* adalah metode non-destruktif yang digunakan untuk mengevaluasi perkembangan kekuatan beton *in-situ* secara real time. *Maturity* merupakan konsep yang sudah ada sejak tahun 1950-an. Pendekatan *maturity* pertama diusulkan pada awal 1950-an adalah metode faktor suhu-waktu (TTF), sering disebut sebagai fungsi kematangan Nurse-Saul. Fungsi maturitas Nurse-Saul telah distandarisasi dalam ASTM C1074 pada tahun 1987 dan populer sebagai metode maturitas di Amerika Utara karena kesederhanaannya (Miller et al., 2022). *Maturity* dapat dihitung dari riwayat suhu beton menggunakan persamaan:

$$M_{(t)} = \sum_0^t (T - T_0) \Delta T$$

dimana:

- $M(t)$ = faktor temperatur-waktu (*maturity*) pada umur t ($^{\circ}\text{C}$ -jam atau $^{\circ}\text{C}$ -hari),
 Δt = interval waktu (jam atau hari),
 T = temperatur beton rata-rata selama interval waktu ($^{\circ}\text{C}$),
 T_0 = temperatur datum ($^{\circ}\text{C}$).



Gambar 1 Kurva Faktor Temperatur-Waktu, ASTM C1074

Hubungan antara kekuatan dan kematangan dapat diperoleh bila data riwayat suhu dan perkembangan beton diperoleh melalui uji laboratorium. Untuk mendapatkan data tersebut, perlu dilakukan pencatatan suhu beton dan pengujian kuat tekan pada interval yang telah ditentukan. ASTM C 1074 (2015) merekomendasikan pengujian kuat tekan beton 1-, 3-, 7-, 14-, 21 dan 28 hari. Pada penelitian ini digunakan fungsi regresi non linier untuk menggambarkan hubungan antara kekuatan dan *maturity*.

$$S = \frac{K}{1 + Ka[\log(M - 30)]^b}$$

dimana,

- S = Kuat tekan beton (MPa),
 M = *Maturity* beton ($^{\circ}\text{C}$ - jam atau $^{\circ}\text{C}$ - hari),
 $K, a, \text{ dan } b$ = konstanta numerik.

30 adalah *maturity* di bawah kekuatan efektif 0.

Keunggulan dari persamaan ini adalah; pertama, memberikan persamaan yang kuat dan pendekatannya atau persamaan yang dihasilkan akan terlihat secara langsung dalam sebuah rumus sehingga mudah untuk diinterpretasikan. Kedua, hasil yang diperoleh akan lebih akurat (Ginting, 2019).

Penelitian ini dimaksud untuk menentukan hubungan antara nilai kematangan dan kuat tekan pada beton berumur 1, 3, 7, 14, 21, dan 28 hari dengan variasi faktor air semen 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6 dan variasi campuran berbahan fly ash 10%. Selain itu tujuan penulisan ini adalah untuk mengetahui implementasi persamaan fungsi regresi non linier untuk memprediksi kuat tekan beton di bawah umur 28 hari berdasarkan temperature-time factor pada beton dengan jenis dan campuran yang sama.

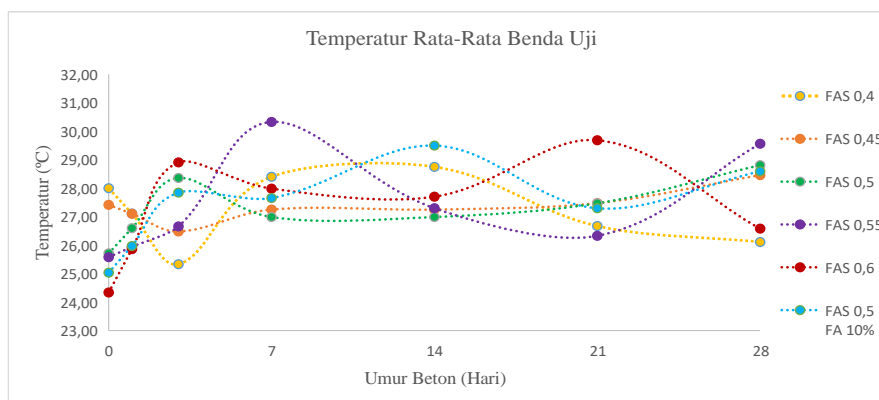
METODE

Penelitian ini mengkaji pengaruh faktor air semen dan bahan tambahan pada campuran beton terhadap tingkat kematangan dan kekuatan beton. Data yang digunakan adalah data primer yang diperoleh melalui metode eksperimental (Sugiyono, 2006). Pengujian dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Struktur Program Studi Teknik Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta. Dari data yang diperoleh pada pengujian yaitu berupa riwayat temperatur rata-rata beton dan kuat tekan beton. Kemudian pada data tersebut dianalisis menggunakan Microsoft Excel untuk menggambarkan hubungan antar variabel-variabelnya. Kurva yang akan diperoleh berupa kurva kematangan beton berdasarkan data riwayat temperatur rata-rata beton dan kurva persamaan regresi non linier yang menggambarkan hubungan antara kematangan dan kuat tekan beton pada setiap campuran beton yang berbeda. Persamaan regresi non linier berupa hasil dari penggambaran hubungan antara kematangan (*maturity*) dan kuat tekan yang dapat digunakan untuk memprediksi kuat tekan beton aktual berdasarkan data kematangan untuk campuran beton dengan spesifikasi yang sama.

Pada penelitian ini benda uji yang digunakan adalah beton konvensional dengan 5 variasi faktor air semen yaitu 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6 dan 1 variasi bahan tambahan berupa fly ash 10% merupakan variabel bebas, sedangkan kematangan beton dan kekuatan beton merupakan variabel terikat. Dari 6 variasi campuran tersebut diambil dari variasi campuran yang paling optimum atau yang sering digunakan. Benda uji berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Jumlah benda uji yang digunakan pada setiap campuran beton adalah 24 buah, dimana setiap periode pengujian terdapat 4 buah. Pengujian dilakukan pada umur beton 1, 3, 7, 14, 21 dan 28 hari. Maka jumlah total seluruh benda uji yang digunakan untuk 6 variasi campuran beton yang diuji adalah 144 buah benda uji.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran suhu beton bertujuan untuk mengetahui riwayat suhu beton rata-rata yang akan digunakan untuk menghitung nilai *maturity* (kematangan) beton. Data riwayat suhu beton didapatkan dari pengukuran suhu 2 sampel beton di setiap jenis campuran beton selama 28 hari. Pengukuran dilakukan di Laboratorium Bahan dan Struktur Program Studi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret Surakarta.



Gambar 2 Temperatur Rata-Rata Benda Uji

Data pada Gambar 2 menunjukkan data suhu awal beton dengan FAS 0,4 adalah 28,00 °C, FAS 0,45 adalah 27,42 °C, FAS 0,5 adalah 25,71 °C, FAS 0,55 adalah 25,58 °C, dan FAS 0,6 adalah 24,34 °C. Pada beton FAS 0,5 FA 10% suhu awalnya adalah 25,03 °C. Data tersebut menunjukkan beton dengan campuran faktor air semen yang lebih kecil cenderung menghasilkan suhu awal beton (0 hingga 1 hari) yang lebih tinggi. Sehingga semakin kecil FAS yang digunakan maka semakin besar suhu awalnya. Sedangkan perbandingan

pada beton FAS 0,5 FA 10% menunjukkan bahwa beton dengan campuran *fly ash* menghasilkan suhu awal yang lebih rendah.

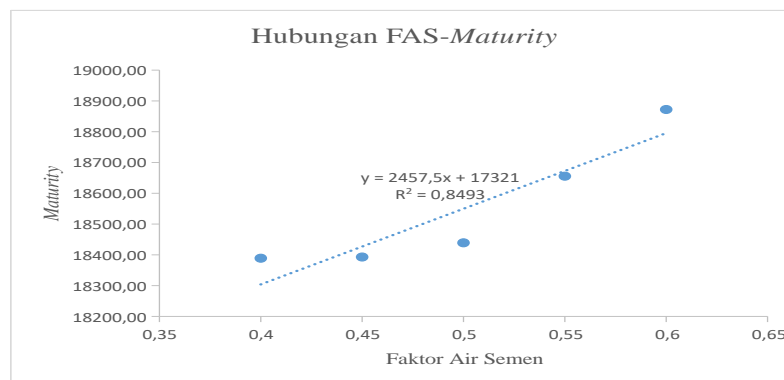
Hasil perhitungan Nilai *Maturity* (Kematangan)

Nilai *maturity* (kematangan) beton digunakan untuk mengestimasi kuat tekan aktual struktur beton di lapangan berdasarkan riwayat suhu beton.

Tabel 1 Rekapitulasi Nilai *Maturity*

FAS	<i>Maturity</i>
0,4	18389,07
0,45	18392,98
0,5	18439,14
0,55	18655,5
0,6	18872,175
FA 10%	18833,52

Rekapitulasi nilai *maturity* yang terdapat pada Tabel 1 menunjukkan campuran beton dengan faktor air semen yang lebih besar cenderung menghasilkan nilai *maturity* yang lebih besar juga walaupun perbedaan nilainya tidak terlalu signifikan. Sedangkan campuran beton dengan bahan tambah *fly ash* menghasilkan nilai *maturity* yang lebih besar daripada campuran beton biasa. Namun, untuk mengetahui hubungan antara FAS dan nilai *maturity* secara lebih lanjut, maka data tersebut digambarkan dalam grafik regresi yang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Hubungan Faktor Air Semen dan *Maturity*

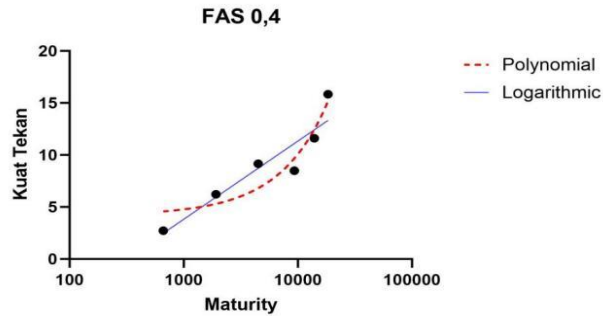
Dari grafik hubungan faktor air semen dan *maturity* di atas didapatkan konstanta yang bernilai positif. Hal ini menunjukkan pertambahan nilai faktor air semen mempengaruhi pertambahan nilai *maturity*. Kemudian didapatkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8493. Dapat disimpulkan bahwa 84,9% perubahan variasi variabel Y (*maturity*) dapat dijelaskan oleh variabel X (faktor air semen). Sedangkan 15,1% lainnya dijelaskan oleh variabel lain diluar penelitian ini.

Hasil Uji Kuat Tekan

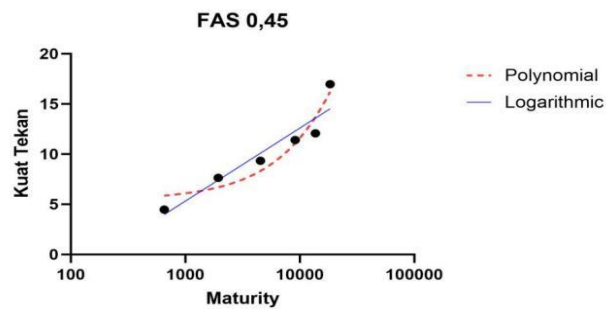
Pengujian kuat tekan beton dilaksanakan pada umur 1, 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Pengujian dilakukan menggunakan alat Compression Testing Machine (CTM) di Laboratorium Bahan dan Struktur Program Studi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret Surakarta. Pengujian ini menghasilkan data beban maksimum (kN) yang kemudian dikonversi kedalam 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.

Hubungan Kuat Tekan-Maturity

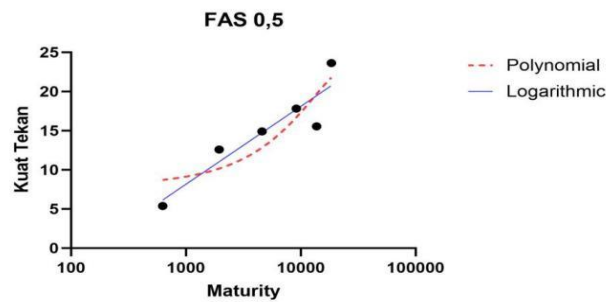
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui apakah model prediksi menggunakan persamaan regresi non linier dapat digunakan dengan baik untuk mengestimasi nilai kuat tekan berdasarkan nilai *maturity* dari setiap jenis campuran beton. Untuk mencapai tujuan tersebut dapat dilakukan perbandingan model prediksi persamaan polinomial terhadap model prediksi persamaan logaritmis. Hasil perbandingan 2 metode ini disajikan pada Gambar 4 hingga Gambar 9.



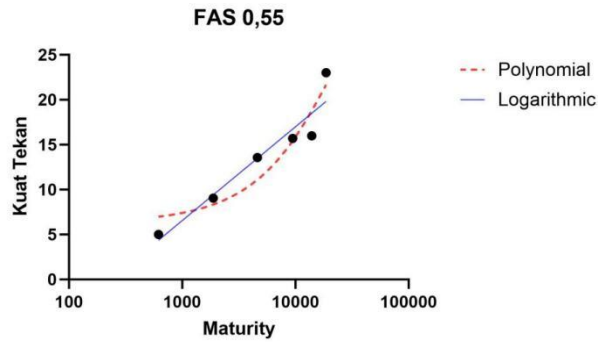
Gambar 4 Hubungan Kuat Tekan-Maturity FAS 0,4



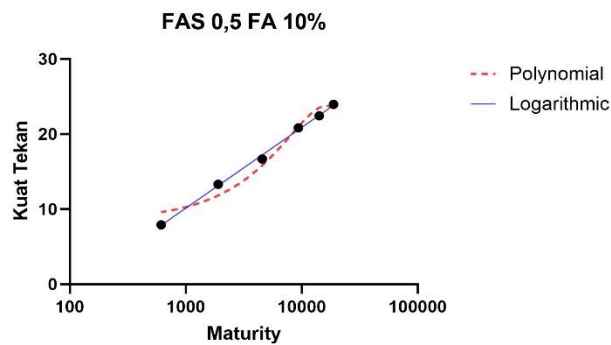
Gambar 5 Hubungan Kuat Tekan-Maturity FAS 0,45



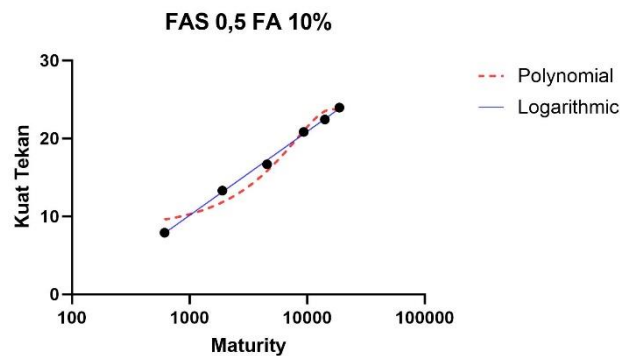
Gambar 6 Hubungan Kuat Tekan-Maturity FAS 0,5



Gambar 7 Hubungan Kuat Tekan-*Maturity* FAS 0,55



Gambar 8 Hubungan Kuat Tekan-*Maturity* FAS 0,6



Gambar 9 Hubungan Kuat Tekan-*Maturity* FAS 0,5 FA 10%

Berdasarkan kurva regresi non linear menggunakan dua metode yang terdapat pada Gambar 4 -Gambar 9, kesesuaian model prediksi terhadap data penelitian ini perlu dianalisis lebih lanjut. Untuk menentukan model prediksi yang paling sesuai dengan data kuat tekan dan *maturity*, maka dilakukan perbandingan koefisien determinasi antara dua model prediksi tersebut yang terdapat pada Tabel 2.

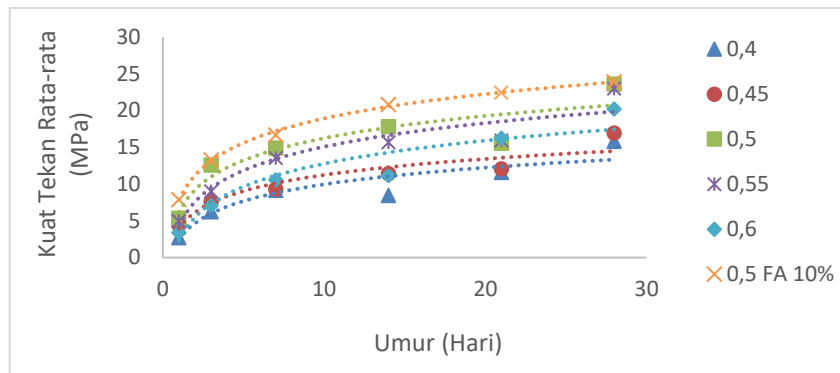
Tabel 2 Konstanta dan Koefisien Determinasi Dua Model Prediksi

		FAS					
		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,5 FA 10%
Pers. Polinomial	a	$1,119 \times 10^{-9}$	$-3,63 \times 10^{-9}$	$-2,212 \times 10^{-8}$	$-1,532 \times 10^{-8}$	$-6,585 \times 10^{-9}$	$-5,758 \times 10^{-8}$
	b	0,0006	0,0007	0,0012	0,0011	0,0009	0,0018
	K	4,1949	5,4484	7,9977	6,3144	4,3849	8,4665
	R ²	0,8782	0,921	0,7633	0,8941	0,9493	0,962
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

Dari kurva hubungan kuat tekan-*maturity* diperoleh persamaan regresi non linier dan logaritmis yang dapat digunakan untuk mengestimasi kuat tekan beton berdasarkan nilai *maturity* untuk jenis campuran beton yang sama. Persamaan-persamaan tersebut disajikan pada Tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3 Persamaan Regresi Non Linier dan Logaritmis

FAS	Regresi Non Linier	Logaritmis
	$S = \frac{K}{1 + K \cdot a [\log(M - 30)]^b}$	$fc = a + b \cdot \ln(M)$
0,4	$S = \frac{4,1949}{1 + 4,1949 \times 1,119 \times 10^{-9} [\log(M - 30)]^{0,0006}}$	$fc = -18,73 + 3,265 \ln M$
0,45	$S = \frac{5,4484}{1 + 5,4484 \times -3,63 \times 10^{-9} [\log(M - 30)]^{0,0007}}$	$fc = -16,51 + 3,161 \ln M$
0,5	$S = \frac{7,9977}{1 + 7,9977 \times -2,212 \times 10^{-8} [\log(M - 30)]^{0,0012}}$	$fc = -21,68 + 4,32 \ln M$
0,55	$S = \frac{6,3144}{1 + 6,3144 \times -1,532 \times 10^{-8} [\log(M - 30)]^{0,0011}}$	$fc = -24,76 + 4,533 \ln M$
0,6	$S = \frac{4,3849}{1 + 4,3849 \times -6,585 \times 10^{-9} [\log(M - 30)]^{0,0009}}$	$fc = -25,72 + 4,379 \ln M$
0,5 FA 10%	$S = \frac{8,4665}{1 + 8,4665 \times -5,758 \times 10^{-8} [\log(M - 30)]^{0,0018}}$	$fc = -22,11 + 4,669 \ln M$



Gambar 10 Kuat Tekan Beton Hingga Umur 28 Hari

Grafik pada Gambar 10 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 dapat disebabkan oleh kesalahan proses pencampuran beton saat pembuatan benda uji. 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-*maturity* menggunakan model prediksi persamaan logaritmis mendekati garis lurus apabila diplot dalam skala log. Hal ini sesuai dengan teori yang disebutkan oleh Plowman (1956). Kemudian persamaan polinomial dan persamaan logaritmis sama-sama menghasilkan nilai koefisien determinasi yang lebih tinggi pada setiap campuran beton yang menunjukkan bahwa kedua persamaan merupakan model prediksi yang sama-sama sesuai pada penelitian ini. Hal ini dapat disebabkan karena kesesuaian model prediksi bergantung pada hasil data pengujian yang berbeda-beda di setiap penelitian.

KESIMPULAN

Berdasarkan pengukuran suhu beton pada umur 0, 1, 3, 7, 14, 21, dan 28 hari, faktor air semen berpengaruh pada besaran nilai suhu awal beton. Beton dengan faktor air semen yang lebih rendah menghasilkan suhu awal beton yang lebih tinggi. Sedangkan beton dengan bahan tambah *fly ash* menghasilkan suhu awal yang lebih rendah dibanding beton konvensional. Berdasarkan uji regresi linear pada hubungan antara faktor air semen dan *maturity*, didapatkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 84,9%. Dapat disimpulkan 84,9% perubahan pada variabel X dapat dijelaskan oleh variabel Y. Sedangkan 15,1% lainnya dijelaskan oleh variabel diluar penelitian ini. Penggunaan metode prediksi persamaan polinomial dalam kurva hubungan kuat tekan-*maturity* 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: 0,8782; 0,921; 0,7633; 0,8941; 0,9493; 0,962. Sedangkan nilai R^2 model prediksi menggunakan persamaan logaritmis sebagai berikut: 0,8601; 0,8902; 0,8531; 0,9062; 0,8944; 0,9978. Dari perbandingan nilai R^2 pada keenam jenis. campuran beton, persamaan polinomial dan persamaan logaritmis sama-sama menghasilkan nilai koefisien determinasi yang lebih tinggi pada setiap campuran beton yang menunjukkan bahwa kedua persamaan merupakan model prediksi yang sama-sama sesuai pada penelitian. Sehingga dapat disimpulkan kedua persamaan merupakan model prediksi yang sama-sama sesuai untuk data hasil pengujian pada penelitian ini.

REFERENSI

- Arizki, R., Sari, I., Wallah, S. E., & Windah, R. S. (2015). Pengaruh Jumlah Semen Dan Fas Terhadap Kuat Tekan Beton Dengan Agregat Yang Berasal Dari Sungai. *Jurnal Sipil Statik*, 3(1).
- Artiningsih, N. K. A. (2012). Pemanfaatan bambu pada konstruksi bangunan berdampak positif bagi lingkungan. *Metana*, 8(1).
- ASTM, C. 1074. (2015). *The maturity concept for estimating the strength*.
- Departemen, P. U. (1990). *SK SNI-T-15-1990-03 (Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal)*.
- Ginting, A. (2019). Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan dengan Kuat Lentur pada Berbagai Umur Beton. *Jurnal Teknik Sipil*, 7(2). <https://doi.org/10.28932/jts.v7i2.1345>
- Hermawan, O. H. (2018). Pengaruh Perawatan Terhadap Kuat Tekan Beton. *Engineering : Jurnal Bidang Teknik*, 9(1).

- Kullit, V. I., Wallah, S. E., Tamboto, W. J., & Pandaleke, R. (2013). Pengaruh Variasi Suhu Pada Perawatan Elevated Temperature Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Beton. *Jurnal Sipil Statik*, 1(7).
- Miller, D., Ho, N. M., & Talebian, N. (2022). Monitoring of in-place strength in concrete structures using maturity method – An overview. In *Structures* (Vol. 44). <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.077>
- Nandhini, K., & Karthikeyan, J. (2021). The early-age prediction of concrete strength using maturity models: a review. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s41024-020-00102-1>
- Pane, F. P., Tanudjaja, H., & Windah, R. S. (2015). PENGUJIAN KUAT TARIK LENTUR BETON DENGAN VARIASI KUAT TEKAN BETON. *Jurnal Sipil Statik*, 3(5).
- Plowman, J. M. (1956). Discussion: Maturity and the strength of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 8(24). <https://doi.org/10.1680/mac.1956.8.24.169>
- Sugiyono. (2006). Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif Dan R&D. In Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif Dan R&D. In *Koleksi Buku UPT Perpustakaan Universitas Negeri Malang*.
- Sukirman, S. (2016). Beton Aspal Campuran Panas. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Sumajouw, M. D. J., Teknik, F., Sam, U., Manado, R., & Windah, R. S. (2014). PENGUJIAN KUAT TEKAN BETON MUTU TINGGI. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 4(4).
- Waller, V., D'Aloia, L., Cussigh, F., & Lecrux, S. (2004). Using the maturity method in concrete cracking control at early ages. *Cement and Concrete Composites*, 26(5). [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00080-5)