

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Pemodelan Matematis Kuat Tekan Beton Menggunakan Regresi Linier Berganda dan Regresi Nonlinier sebagai Dasar Perancangan Material Struktur Pelindung Pertahanan

Mathematical Modeling of Concrete Compressive Strength Using Multiple Linear Regression and Nonlinear Regression as a Basis for Designing Defense Protective Structure Materials

Muhammad Rafi Solaahudin*, Sovian Aritonang

*Program Studi Matematika Militer, Fakultas MIPA Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

rafiarter67@gmail.com* , sovian.aritonang@idu.ac.id

Abstract

Concrete is the primary material used to build defense protective structures, including bunkers, shelters, guard posts, and hangars. Its quality is generally assessed through compressive strength, yet laboratory compression testing can take 28 days or longer. This study develops mathematical models that predict concrete compressive strength based on mix composition and age, using 1,030 samples from the UCI Machine Learning Repository with eight independent variables. The data were divided into 80% training data and 20% test data. Three models are compared, namely multiple linear regression (Model 1), multiple linear regression with a logarithmic transformation of age (Model 2), and nonlinear regression based on Abrams' law. The linear parameters are determined using matrix least squares, while the Abrams parameters are determined using the Levenberg–Marquardt method. The results show that Model 2 yields $R^2 = 0.8157$ on the test data with an RMSE of 6.98 MPa, considerably outperforming Model 1 ($R^2 = 0.5828$; RMSE 10.49 MPa). Model 2 is also simultaneously significant ($F = 460.0$) and shows no serious multicollinearity (VIF < 10). According to Abrams' law, high-strength concrete (≥ 55 MPa) at 28 days requires a water/binder ratio of approximately 0.31. When the other components are fixed at their mean values, Model 2 estimates a cement requirement of about 408.8 kg/m^3 to reach 55 MPa. The resulting models can be used as an early tool for designing concrete mixes for defense protective structures.

Keywords **:** *Concrete Compressive Strength, Multiple Linear Regression, Least Squares Method, Abrams' Law, Defense Materials*

Abstrak

Beton merupakan material utama dalam pembangunan struktur pelindung di sektor pertahanan, misalnya bunker, shelter, pos jaga, dan hanggar. Mutu beton umumnya diukur melalui kuat tekannya, namun pengujian tekan di laboratorium membutuhkan waktu hingga 28 hari atau lebih. Penelitian ini menyusun model matematis untuk memprediksi kuat tekan beton berdasarkan komposisi campuran dan umurnya. Data yang digunakan berjumlah 1.030 sampel beton dari UCI Machine Learning Repository dengan delapan variabel bebas. Data tersebut dibagi menjadi 80% data latih dan 20% data uji. Tiga model dibandingkan, yakni regresi linier berganda (Model 1), regresi linier berganda dengan transformasi logaritma pada umur (Model 2), serta regresi nonlinier hukum Abrams. Parameter regresi linier ditentukan dengan metode kuadrat terkecil dalam bentuk matriks, sementara parameter hukum Abrams ditentukan dengan metode Levenberg–Marquardt. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Model 2 menghasilkan $R^2 = 0{,}8157$ pada data uji dengan RMSE 6,98 MPa, jauh lebih unggul daripada Model 1 ($R^2 = 0{,}5828$; RMSE 10,49 MPa). Model 2 juga signifikan secara simultan ($F = 460{,}0$) dan tidak mengalami multikolinearitas serius (VIF < 10). Berdasarkan hukum Abrams, beton mutu tinggi (≥ 55 MPa) pada umur 28 hari memerlukan rasio air/binder sekitar 0,31. Apabila komponen lain ditetapkan pada nilai rata-ratanya, Model 2 memperkirakan kebutuhan semen sekitar 408,8 kg/m^3 untuk mencapai 55 MPa. Model yang dihasilkan dapat digunakan sebagai alat bantu awal dalam perancangan campuran beton untuk struktur pelindung pertahanan.

Author@ This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/



e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Kata Kunci: Kuat Tekan Beton, Regresi Linier Berganda, Metode Kuadrat Terkecil, Hukum Abrams, Material Pertahanan

Penulis Korespondensi : Muhammad Rafi Solaahudin

I. PENDAHULUAN

Banyak fasilitas vital di sektor pertahanan, seperti bunker, ruang perlindungan (shelter), gudang logistik, pos pengamanan, serta hanggar pesawat, dibangun menggunakan beton bertulang. Bangunan jenis ini harus memiliki kekuatan dan ketahanan yang lebih tinggi daripada bangunan umum karena dirancang untuk tetap kokoh ketika menerima beban yang besar. Oleh sebab itu, beton bermutu tinggi lazim digunakan pada struktur pelindung (ACI Committee 363, 2010; U.S. Department of Defense, 2008). Penelitian terkini juga menunjukkan bahwa beton berkinerja sangat tinggi terus dikembangkan untuk konstruksi sipil maupun militer agar mampu menahan tumbukan proyektil dan beban ledakan (Liu *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2024).

Parameter yang paling umum digunakan untuk menilai mutu beton adalah kuat tekan, yakni besarnya tegangan maksimum yang mampu ditahan beton sebelum mengalami kehancuran, dinyatakan dalam megapascal (MPa). Kendalanya, nilai kuat tekan hanya dapat dipastikan melalui pengujian benda uji di laboratorium yang biasanya dilakukan pada umur 28 hari. Apabila hasilnya tidak memenuhi target, campuran perlu dirancang kembali sehingga banyak waktu terbuang. Kondisi ini tentu merugikan bagi proyek pertahanan yang umumnya memiliki tenggat waktu ketat.

Permasalahan tersebut dapat dibantu diselesaikan dengan pendekatan matematika. Kuat tekan beton ditentukan oleh beberapa komponen secara bersamaan, yaitu semen, *blast furnace slag*, *fly ash*, air, *superplasticizer*, agregat kasar, agregat halus, serta umur beton. Keterkaitan antara banyak variabel bebas dan satu variabel terikat seperti ini dapat dimodelkan menggunakan regresi linier berganda, yang berlandaskan aljabar linier (operasi matriks) dan kalkulus (pencarian nilai minimum) (Montgomery, Peck and Vining, 2012). Metode ini masih banyak dipakai dalam penelitian beton di Indonesia, misalnya untuk menganalisis pengaruh substitusi metakaolin dan metode perawatan terhadap kuat tekan beton (Salsabilla, Hermawan and Utami, 2025). Di samping itu, sejak tahun 1918 telah dikenal hukum Abrams, yaitu model eksponensial yang menjelaskan bahwa kuat tekan beton menurun ketika rasio air terhadap semen meningkat (Abrams, 1918). Karena bersifat nonlinier, parameter model ini harus ditentukan dengan metode numerik.

Penelitian Yeh (1998) telah memodelkan data kuat tekan beton yang sama dengan jaringan saraf tiruan dan memperoleh tingkat akurasi yang tinggi. Sejak itu, berbagai metode pembelajaran mesin diterapkan untuk memprediksi kuat tekan beton, seperti *adaptive boosting* (Feng *et al.*, 2020), jaringan saraf tiruan yang dioptimasi dengan algoritma *sparrow search* (Li, Zhang and Gu, 2024), serta kerangka regresi berbasis *machine learning* dengan visualisasi kontribusi fitur (Zhen *et al.*, 2025). Di Indonesia, Setiyorini dan Asmono (2018) membandingkan *neural network*, *support vector machine*, dan regresi linier pada data kuat tekan beton UCI, sedangkan Darusman dan Rumbyarso (2025) membandingkan regresi linier, *neural network*, dan *multi-layer perceptron* untuk prediksi kekuatan beton. Akan tetapi, model jaringan saraf tiruan sukar diinterpretasikan karena tidak menghasilkan persamaan yang sederhana. Bagi perancang struktur, persamaan yang eksplisit lebih praktis untuk digunakan dan diverifikasi. Atas dasar itu, penelitian ini berfokus pada model matematis dengan bentuk yang jelas serta koefisien yang memiliki makna fisik.

Penelitian ini bertujuan menyusun dan membandingkan ketiga model tersebut, kemudian memanfaatkannya sebagai dasar perhitungan awal dalam perancangan beton untuk struktur pelindung pertahanan. Adapun batasan penelitian ini adalah: data yang digunakan merupakan data sekunder, beton diasumsikan hanya

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik
Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

menerima beban tekan statis, dan pengaruh beban dinamis (misalnya ledakan atau tumbukan) tidak termasuk dalam pemodelan.

II. METODE

Jenis penelitian ini adalah kuantitatif dengan memanfaatkan data sekunder. Sumber data adalah *Concrete Compressive Strength Data Set* pada UCI Machine Learning Repository yang dikontribusikan oleh Prof. I-Cheng Yeh (Yeh, 1998, 2007). Data terdiri atas 1.030 sampel hasil pengujian laboratorium dan tidak memiliki nilai yang hilang. Daftar variabel penelitian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel penelitian

Simbol	Variabel	Satuan	Jenis
x_1	Semen (C)	kg/m^3	Bebas
x_2	*Blast furnace slag* (S)	kg/m^3	Bebas
x_3	*Fly ash* (F)	kg/m^3	Bebas
x_4	Air (W)	kg/m^3	Bebas
x_5	*Superplasticizer* (SP)	kg/m^3	Bebas
x_6	Agregat kasar (CA)	kg/m^3	Bebas
x_7	Agregat halus (FA)	kg/m^3	Bebas
x_8	Umur (t)	hari	Bebas
y	Kuat tekan	MPa	Terikat

Regresi linier berganda. Dalam regresi linier berganda, variabel terikat y dinyatakan sebagai kombinasi linier dari k variabel bebas yang ditambah dengan galat (Montgomery, Peck and Vining, 2012):

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i, \qquad i = 1,2, \ldots, n$$

Dalam notasi matriks, persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

di mana **y** adalah vektor berukuran n × 1, **X** adalah matriks rancangan berukuran n × (k+1) dengan kolom pertama bernilai 1, **β** adalah vektor parameter berukuran (k+1) × 1, dan **ε** adalah vektor galat.

Metode kuadrat terkecil. Nilai **β** ditentukan sedemikian rupa sehingga jumlah kuadrat galat (JKG) bernilai paling kecil:

$$S(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{X\beta})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X\beta})$$

Selanjutnya, fungsi S(β) diturunkan terhadap β dan hasilnya disamakan dengan nol, sama seperti langkah mencari titik minimum dalam kalkulus:

$$\frac{\partial S}{\partial \boldsymbol{\beta}} = -2\mathbf{X}^T\mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T\mathbf{X\beta} = \mathbf{0}$$

Langkah ini menghasilkan persamaan normal. Apabila matriks X^TX memiliki invers, maka penaksir kuadrat terkecilnya adalah:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{y}$$

Titik tersebut dipastikan merupakan minimum karena turunan keduanya, yaitu $2X^TX$, adalah matriks definit positif.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Uji signifikansi dan ukuran kebaikan model. Ketepatan model dinilai menggunakan koefisien determinasi R^2, R^2 terkoreksi, *root mean square error* (RMSE), serta *mean absolute error* (MAE):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum\left(y_i - \hat{y}_i\right)^2}{\sum\left(y_i - \bar{y}\right)^2}, \qquad \bar{R}^2 = 1 - \left(1 - R^2\right)\frac{n-1}{n-k-1}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}, \qquad \text{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\,y_i - \hat{y}_i|$$

Signifikansi model secara keseluruhan diuji dengan uji F, sementara signifikansi masing-masing koefisien diuji dengan uji t:

$$F = \frac{R^2/k}{(1-R^2)/(n-k-1)}, \qquad t_j = \frac{\hat{\beta}_j}{\text{SE}(\hat{\beta}_j)}, \qquad \text{SE}(\hat{\beta}_j) = \sqrt{\hat{\sigma}^2[(\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}]_{jj}}$$

Adanya multikolinearitas (korelasi tinggi di antara variabel bebas) diperiksa menggunakan *Variance Inflation Factor*. Nilai VIF yang kurang dari 10 masih dapat diterima (Kutner *et al.*, 2005):

$$\text{VIF}_j = \frac{1}{1 - R_j^2}$$

di mana R_j^2 merupakan koefisien determinasi ketika variabel ke-j diregresikan terhadap seluruh variabel bebas lainnya.

Transformasi logaritma**.** Kuat tekan beton bertambah dengan cepat pada hari-hari pertama, kemudian laju kenaikannya semakin lambat seiring bertambahnya umur (Neville, 2011). Pola tersebut menyerupai kurva fungsi logaritma. Dengan mengubah variabel umur t menjadi ln t, hubungan yang semula melengkung dapat didekati oleh garis lurus, namun model tetap linier terhadap parameternya sehingga metode kuadrat terkecil tetap dapat diterapkan.

Hukum Abrams dan regresi nonlinier. Menurut Abrams (1918), kuat tekan beton f berbanding terbalik secara eksponensial terhadap rasio air dan semen:

$$f = \frac{A}{B^{\,w/b}}$$

di mana A dan B merupakan konstanta positif yang dipengaruhi oleh bahan dan umur beton, sedangkan w/b menyatakan rasio air terhadap binder (semen + slag + fly ash). Karena model ini nonlinier terhadap parameter B, nilai A dan B diperoleh dengan meminimumkan JKG secara iteratif melalui algoritma Levenberg–Marquardt (Marquardt, 1963). Algoritma tersebut merupakan gabungan dari metode Gauss–Newton dan metode *gradient descent*:

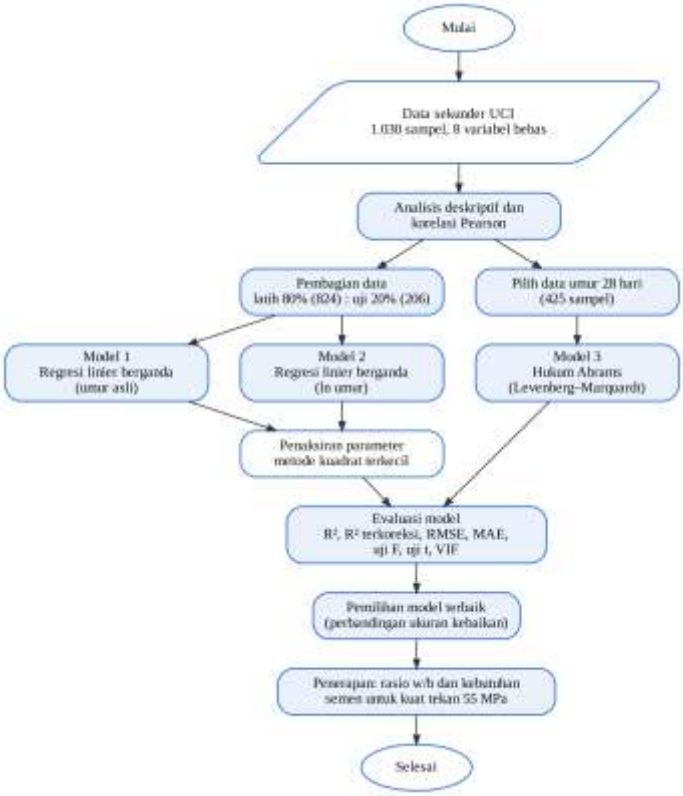
$$\boldsymbol{\theta}^{(m+1)} = \boldsymbol{\theta}^{(m)} + \left(\mathbf{J}^T\mathbf{J} + \lambda\mathbf{I}\right)^{-1}\mathbf{J}^T\left(\mathbf{y} - f\left(\boldsymbol{\theta}^{(m)}\right)\right)$$

di mana θ = (A, B), J adalah matriks Jacobian (turunan parsial fungsi terhadap A dan B), dan λ adalah parameter peredam.

Gambaran umum tahapan penelitian disajikan dalam diagram alir pada Gambar 1, lalu setiap tahapannya diuraikan sebagai berikut.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan



Gambar 1. Diagram alir tahapan penelitian

Analisis deskriptif. Menghitung nilai rata-rata, simpangan baku, minimum, dan maksimum dari setiap variabel, kemudian menghitung korelasi Pearson di antara variabel.

Pembagian data. Data diacak menggunakan *seed* 42, kemudian dipisahkan menjadi data latih sebesar 80% (824 sampel) dan data uji sebesar 20% (206 sampel). Data latih digunakan untuk menaksir parameter, sedangkan data uji digunakan untuk menguji kemampuan model dalam memprediksi data baru.

Model 1 (regresi linier berganda). Kedelapan variabel bebas dimasukkan ke dalam model dalam bentuk aslinya:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 C + \beta_2 S + \beta_3 F + \beta_4 W + \beta_5 SP + \beta_6 CA + \beta_7 FA + \beta_8 t$$

Model 2 (regresi linier berganda dengan transformasi logaritma). Variabel umur t diganti menjadi ln t:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 C + \beta_2 S + \beta_3 F + \beta_4 W + \beta_5 SP + \beta_6 CA + \beta_7 FA + \beta_8 \ln t$$

Model 3 (hukum Abrams). Data yang digunakan hanya data berumur 28 hari (425 sampel) karena umur tersebut merupakan umur standar pengujian kuat tekan (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Parameter A dan B ditaksir menggunakan algoritma Levenberg–Marquardt dengan nilai awal A = 100 dan B = 5.

Evaluasi model. Ketiga model dibandingkan berdasarkan R^2, R^2 terkoreksi, RMSE, MAE, uji F, uji t (α = 0,05), dan VIF.

Penerapan. Model terbaik digunakan untuk menghitung komposisi campuran yang diperlukan agar beton mencapai mutu tinggi, yaitu kuat tekan paling sedikit 55 MPa sesuai batas beton mutu tinggi pada ACI 363R (ACI Committee 363, 2010).

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Semua perhitungan dilakukan dengan Python 3 dan pustaka NumPy (operasi matriks), SciPy (uji statistik dan optimasi nonlinier), pandas, serta Matplotlib.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

Rata-rata kuat tekan beton pada data ini adalah 35,82 MPa dengan rentang nilai yang cukup luas, yaitu dari 2,33 MPa hingga 82,60 MPa (Tabel 2). Terdapat 147 sampel (14,3%) yang sudah termasuk beton mutu tinggi (≥ 55 MPa), sehingga data ini cukup representatif untuk beton struktur pelindung. Sebagian besar sampel berumur 28 hari (425 sampel), meskipun terdapat pula sampel berumur 1 hingga 365 hari. Ditemukan 25 baris data yang identik; baris tersebut tetap digunakan karena kemungkinan merupakan pengujian ulang pada campuran yang sama.

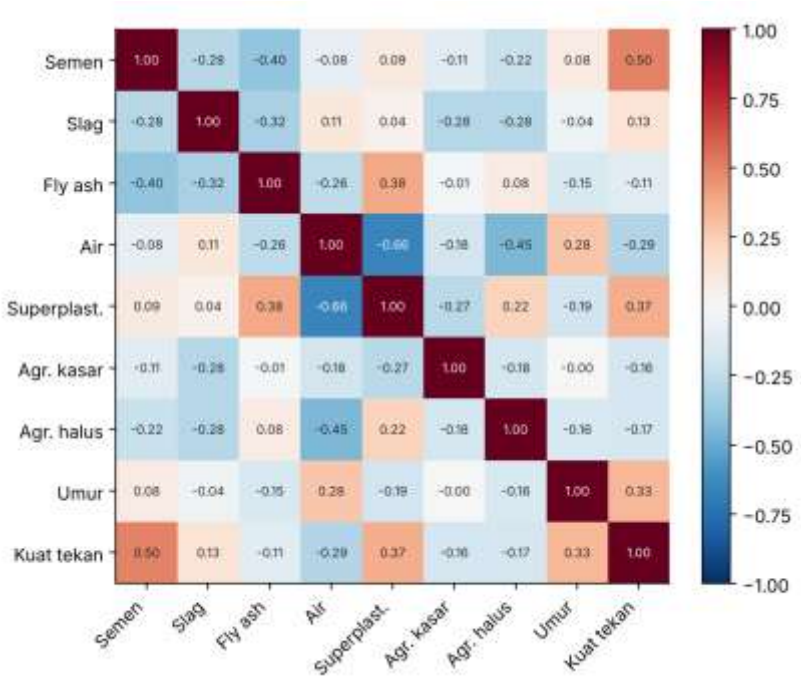
Tabel 2. Statistik deskriptif data (n = 1.030)

Variabel	Rata-rata	Simpangan baku	Minimum	Maksimum
Semen (kg/m^3)	281,17	104,51	102,00	540,00
Slag (kg/m^3)	73,90	86,28	0,00	359,40
Fly ash (kg/m^3)	54,19	64,00	0,00	200,10
Air (kg/m^3)	181,57	21,36	121,75	247,00
Superplasticizer (kg/m^3)	6,20	5,97	0,00	32,20
Agregat kasar (kg/m^3)	972,92	77,75	801,00	1.145,00
Agregat halus (kg/m^3)	773,58	80,18	594,00	992,60
Umur (hari)	45,66	63,17	1	365
Kuat tekan (MPa)	35,82	16,71	2,33	82,60

Korelasi Pearson antarvariabel ditampilkan pada Gambar 2. Semen memiliki korelasi positif terbesar terhadap kuat tekan (r = 0,50), disusul *superplasticizer* (r = 0,37) dan umur (r = 0,33). Air menunjukkan korelasi negatif (r = −0,29), yang sesuai dengan teori bahwa kelebihan air menyebabkan beton lebih berpori. Hubungan antara air dan *superplasticizer* tergolong kuat (r = −0,66) karena *superplasticizer* berfungsi mengurangi kebutuhan air.

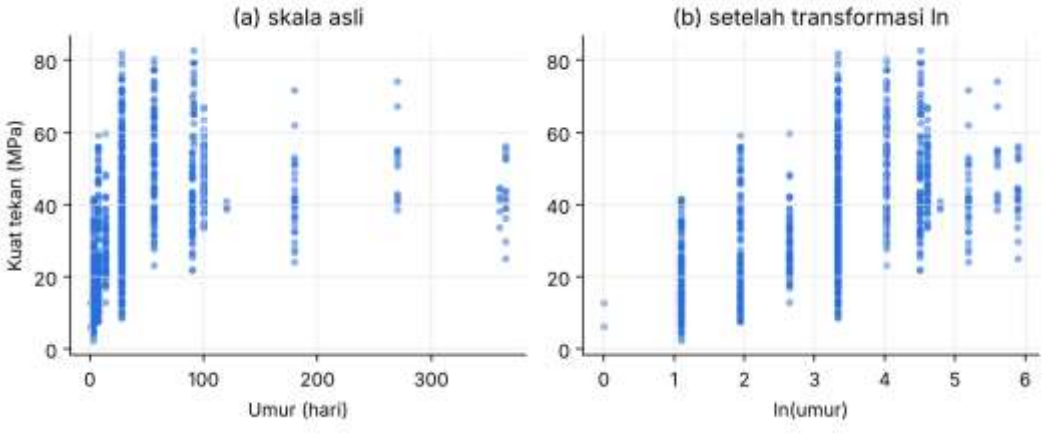
e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan



Gambar 2. Matriks korelasi Pearson antarvariabel

Berdasarkan Gambar 3(a), kuat tekan meningkat pesat pada umur 3–28 hari, lalu peningkatannya mulai melambat. Pola yang melengkung seperti ini kurang tepat jika dimodelkan dengan garis lurus. Setelah umur ditransformasi menjadi ln t (Gambar 3(b)), sebaran data tampak lebih mengikuti pola linier. Hal inilah yang menjadi alasan matematis penggunaan Model 2.



Gambar 3. Hubungan umur beton dengan kuat tekan: (a) skala asli, (b) setelah transformasi logaritma

Berdasarkan Tabel 3, Model 2 unggul secara signifikan dibandingkan Model 1 pada seluruh ukuran. R^2 data uji meningkat dari 0,5828 menjadi 0,8157, yang berarti Model 2 dapat menjelaskan kurang lebih 81,6% variasi kuat tekan beton. RMSE menurun dari 10,49 MPa menjadi 6,98 MPa, atau berkurang kira-kira 33,5%. Selain itu, R^2 data latih dan data uji pada Model 2 nilainya hampir sama (0,8187 dan 0,8157), sehingga model tidak mengalami *overfitting*.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 3. Perbandingan kinerja Model 1 dan Model 2

Ukuran	Model 1 (umur asli)	Model 2 (ln umur)
R^2 data latih	0,6223	0,8187
R^2 terkoreksi	0,6186	0,8169
Statistik F	167,8	460,0
R^2 data uji	0,5828	0,8157
RMSE data uji (MPa)	10,494	6,975
MAE data uji (MPa)	8,065	5,521

Penaksir kuadrat terkecil Model 2 diperoleh melalui rumus $\hat{\beta} = (X^TX)^{-1}X^Ty$ dan hasilnya disajikan pada Tabel 4. Bentuk persamaan Model 2 adalah:

$$\hat{y} = -80{,}84 + 0{,}1376\,C + 0{,}1209\,S + 0{,}0982\,F - 0{,}1277\,W + 0{,}0930\,SP + 0{,}0302\,CA + 0{,}0379\,FA + 8{,}7538\ln t$$

Tabel 4. Koefisien Model 2 (data latih, n = 824)

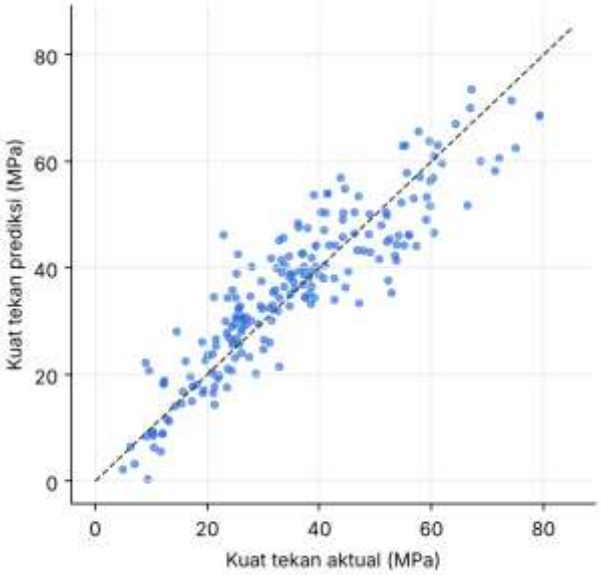
Variabel	Koefisien	Galat baku	t hitung	Nilai-p	VIF
Konstanta	−80,8413	21,2107	−3,811	0,0001	–
Semen	0,1376	0,0069	19,915	< 0,0001	8,10
Slag	0,1209	0,0081	15,005	< 0,0001	7,52
Fly ash	0,0982	0,0102	9,607	< 0,0001	6,81
Air	−0,1277	0,0319	−3,998	0,0001	7,34
Superplasticizer	0,0930	0,0733	1,268	0,2051	3,06
Agregat kasar	0,0302	0,0074	4,090	< 0,0001	5,32
Agregat halus	0,0379	0,0085	4,481	< 0,0001	7,57
ln(umur)	8,7538	0,2191	39,956	< 0,0001	1,05

Hasil uji F memberikan F = 460,0 dengan nilai-p yang jauh lebih kecil dari 0,05, sehingga model signifikan secara simultan. Berdasarkan uji t, tujuh dari delapan variabel bebas berpengaruh signifikan pada α = 0,05. Seluruh nilai VIF kurang dari 10 (tertinggi 8,10 pada semen), sehingga multikolinearitas masih dalam batas yang dapat diterima.

Perbandingan antara nilai prediksi Model 2 dan nilai aktual pada data uji ditunjukkan pada Gambar 4. Titik-titik data mengumpul di sekitar garis y = x, yang menandakan bahwa prediksi cukup mendekati nilai sebenarnya. Simpangan yang lebih besar tampak pada kuat tekan tinggi (di atas 60 MPa), sehingga model cenderung kurang akurat untuk beton dengan mutu sangat tinggi.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

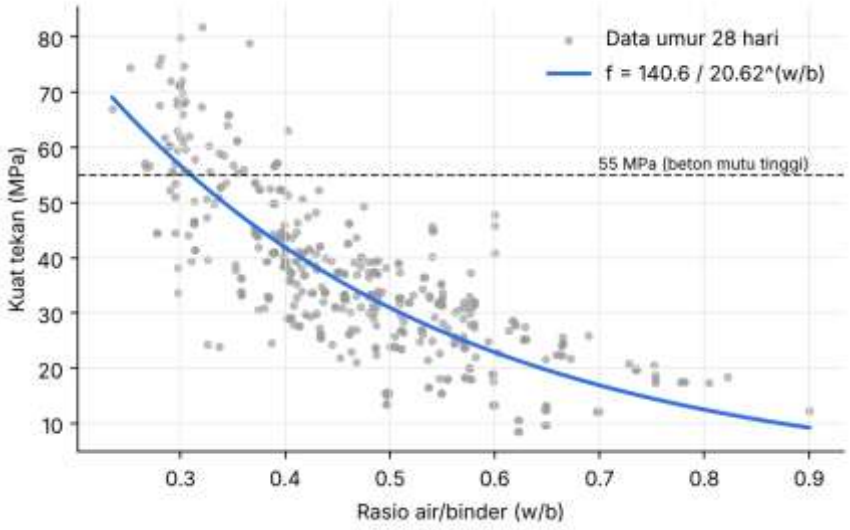


Gambar 4. Kuat tekan prediksi Model 2 terhadap kuat tekan aktual pada data uji

Regresi nonlinier menggunakan algoritma Levenberg–Marquardt terhadap 425 sampel berumur 28 hari menghasilkan persamaan berikut:

$$f_{28} = \frac{140{,}618}{20{,}623^{w/b}}, \qquad R^2 = 0{,}6471$$

Apabila rasio yang digunakan hanya air/semen (w/c), nilai R^2 menurun menjadi 0,4828 dengan A = 75,027 dan B = 2,573. Hal ini menunjukkan bahwa slag dan fly ash memang perlu diperhitungkan sebagai bagian dari bahan pengikat. Kurva pada Gambar 5 memperlihatkan bahwa kuat tekan berkurang secara eksponensial seiring meningkatnya rasio w/b.



Gambar 5. Kurva hukum Abrams hasil regresi nonlinier untuk beton umur 28 hari

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

2. Pembahasan

Interpretasi Koefisien Model 2

Makna dari beberapa koefisien utama dijelaskan sebagai berikut:

- **Semen (0,1376).** Penambahan semen sebanyak 10 kg per m^3 akan meningkatkan kuat tekan kira-kira 1,38 MPa, dengan asumsi variabel lain konstan.
- **Slag dan fly ash (0,1209 dan 0,0982).** Kedua bahan tersebut turut meningkatkan kekuatan beton, meskipun pengaruhnya sedikit lebih kecil daripada semen. Temuan ini sejalan dengan perannya sebagai bahan pengikat tambahan (*pozzolan*).
- **Air (−0,1277).** Penambahan air sebanyak 10 kg per m^3 akan menurunkan kuat tekan kira-kira 1,28 MPa.
- **ln(umur) (8,7538).** Karena berbentuk logaritma, setiap kali umur beton bertambah menjadi dua kali lipat, kuat tekan meningkat kira-kira 8,7538 × ln 2 ≈ 6,07 MPa. Sebagai contoh, kenaikan dari umur 7 ke 14 hari besarnya sama dengan kenaikan dari 14 ke 28 hari.
- **Superplasticizer (0,0930).** Koefisien ini tidak signifikan (p = 0,2051). Hal ini tidak berarti *superplasticizer* tidak bermanfaat, melainkan pengaruhnya sebagian besar telah "diwakili" oleh variabel air karena keduanya memiliki korelasi yang cukup kuat (r = −0,66).

Penerapan untuk Perancangan Beton Struktur Pelindung

Kedua model dapat digunakan untuk menentukan komposisi campuran yang diperlukan agar beton mencapai mutu tinggi (f = 55 MPa) pada umur 28 hari.

Menggunakan hukum Abrams. Persamaan $f = A / B^{w/b}$ diselesaikan terhadap w/b dengan cara mengambil logaritma pada kedua ruas:

$$\frac{w}{b} = \frac{\ln(A/f)}{\ln B} = \frac{\ln(140{,}618/55)}{\ln 20{,}623} \approx 0{,}310$$

Dengan demikian, agar kuat tekan mencapai 55 MPa, rasio air/binder sebaiknya tidak melebihi sekitar 0,31. Sebagai perbandingan, beton 40 MPa cukup menggunakan w/b ≈ 0,415.

Menggunakan Model 2. Apabila seluruh komponen selain semen ditetapkan sama dengan nilai rata-ratanya dan umur t = 28 hari, persamaan Model 2 berubah menjadi persamaan linier satu variabel dalam C. Dari penyelesaiannya diperoleh kebutuhan semen sekitar 408,8 kg/m^3.

Kedua hasil tersebut saling mendukung: beton untuk struktur pelindung memerlukan campuran dengan kadar bahan pengikat yang tinggi dan kadar air yang rendah. Meski demikian, hasil perhitungan ini masih merupakan perkiraan awal. Rancangan akhir tetap perlu diverifikasi melalui pengujian laboratorium serta mengacu pada standar yang berlaku, misalnya SNI 2847:2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Di samping itu, struktur pertahanan juga menerima beban dinamis seperti ledakan dan tumbukan (U.S. Department of Defense, 2008; Hao *et al.*, 2016), yang belum tercakup dalam model kuat tekan statis ini.

IV. KESIMPULAN

Model regresi linier berganda yang menggunakan delapan variabel asli (Model 1) hanya mampu menjelaskan 58,3% variasi kuat tekan pada data uji (RMSE 10,49 MPa) karena hubungan antara umur dan kuat tekan bersifat tidak linier. Penerapan transformasi logaritma pada umur (Model 2) berhasil meningkatkan R^2 data uji menjadi 0,8157 dan menurunkan RMSE menjadi 6,98 MPa; model ini signifikan secara simultan (F = 460,0), tujuh dari delapan koefisiennya signifikan, serta tidak mengalami multikolinearitas serius (VIF < 10). Hukum Abrams yang ditaksir menggunakan metode Levenberg–Marquardt menghasilkan $f_{28} = 140{,}618 / 20{,}623^{w/b}$ dengan R^2 = 0,6471, sehingga beton mutu tinggi 55 MPa pada umur 28 hari memerlukan rasio air/binder sekitar 0,31 atau lebih rendah. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa konsep matematika seperti

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

operasi matriks, turunan untuk mencari nilai minimum, fungsi logaritma, dan metode numerik dapat diterapkan secara langsung untuk mendukung perancangan material struktur pelindung pertahanan.

Untuk penelitian berikutnya, disarankan untuk menambahkan suku interaksi atau suku kuadrat (regresi polinomial) guna menangkap hubungan nonlinier lainnya, misalnya antara semen dan air; menerapkan metode regularisasi seperti regresi Ridge atau LASSO untuk menangani korelasi antarvariabel bebas; melengkapi data dengan beton yang diuji terhadap beban dinamis (ledakan atau tumbukan) agar model lebih relevan dengan kebutuhan struktur pertahanan; serta mengembangkan model ini ke dalam bentuk masalah optimasi, contohnya menentukan komposisi campuran dengan biaya termurah yang tetap memenuhi kuat tekan minimal.

DAFTAR PUSTAKA

Abrams, D. A. (1918) *Design of Concrete Mixtures*. Bulletin 1. Chicago: Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute.

ACI Committee 363 (2010) *Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

Badan Standardisasi Nasional (2019) *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: BSN.

Darusman and Rumbyarso, Y. P. A. (2025) 'Penerapan Machine Learning untuk Prediksi Kekuatan Beton', *PETIR: Jurnal Pengkajian dan Penerapan Teknik Informatika*, 18(1), pp. 61–74. doi: 10.33322/petir.v18i1.2777.

Feng, D.-C., Liu, Z.-T., Wang, X.-D., Chen, Y., Chang, J.-Q., Wei, D.-F. and Jiang, Z.-M. (2020) 'Machine Learning-Based Compressive Strength Prediction for Concrete: An Adaptive Boosting Approach', *Construction and Building Materials*, 230, p. 117000. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117000.

Hao, H., Hao, Y., Li, J. and Chen, W. (2016) 'Review of the Current Practices in Blast-Resistant Analysis and Design of Concrete Structures', *Advances in Structural Engineering*, 19(8), pp. 1193–1223. doi: 10.1177/1369433216656430.

Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J. and Li, W. (2005) *Applied Linear Statistical Models*. 5th edn. New York: McGraw-Hill/Irwin.

Li, P., Zhang, Z. and Gu, J. (2024) 'Prediction of Concrete Compressive Strength Based on ISSA-BPNN-AdaBoost', *Materials*, 17, p. 5727. doi: 10.3390/ma17235727.

Liu, J., Li, J., Fang, J., Su, Y. and Wu, C. (2022) 'Ultra-High Performance Concrete Targets against High Velocity Projectile Impact – A-State-of-the-Art Review', *International Journal of Impact Engineering*, 160, p. 104080. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104080.

Liu, J., Wei, J., Li, J., Su, Y. and Wu, C. (2024) 'A Comprehensive Review of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Behaviour under Blast Loads', *Cement and Concrete Composites*, 148, p. 105449. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105449.

Marquardt, D. W. (1963) 'An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters', *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), pp. 431–441.

Montgomery, D. C., Peck, E. A. and Vining, G. G. (2012) *Introduction to Linear Regression Analysis*. 5th edn. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Neville, A. M. (2011) *Properties of Concrete*. 5th edn. Harlow: Pearson Education.

Salsabilla, N. S., Hermawan, O. H. and Utami, M. Y. (2025) 'Analisis Nilai Kuat Tekan Beton akibat Subtitusi Metakaolin dengan Variasi Metode Perlakuan Perawatan Beton', *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 20(1), pp. 49–57. doi: 10.21009/jmenara.v20i1.50305.

Setiyorini, T. and Asmono, R. T. (2018) 'Komparasi Metode Neural Network, Support Vector Machine dan Linear Regression pada Estimasi Kuat Tekan Beton', *Jurnal TECHNO Nusa Mandiri*, 15(1), pp. 51–56. doi: 10.33480/techno.v15i1.58.

U.S. Department of Defense (2008) *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (UFC 3-340-02)*. Washington, DC: U.S. Department of Defense.

Yeh, I.-C. (1998) 'Modeling of Strength of High-Performance Concrete Using Artificial Neural Networks', *Cement and Concrete Research*, 28(12), pp. 1797–1808.

Yeh, I.-C. (2007) *Concrete Compressive Strength* – UCI Machine Learning Repository. doi: 10.24432/C5PK67.

Zhen, L., Qu, C., Tang, M.-L. and Yin, J. (2025) 'High-Performance Concrete Strength Regression Based on Machine Learning with Feature Contribution Visualization', *Mathematics*, 13, p. 3965. doi: 10.3390/math13243965.