



**PENGARUH TINGKAT KARBONASI TERHADAP KUAT TEKAN BETON PADA
ASESMEN STRUKTUR GEDUNG EKSISTING**
*THE INFLUENCE OF CARBONATION LEVEL ON THE CONCRETE COMPRESSIVE
STRENGTH IN EXISTING BUILDING STRUCTURAL ASSESSMENT*

Heri Khoeri^{1,2*}, Galuh Ade Putra², dan Naufal Rafif Rizqullah²

¹ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta

² PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id>

Abstrak

Pada asesmen bangunan gedung dengan struktur utama beton bertulang, tentunya penentuan kuat tekan beton menjadi faktor utama dalam keakuratan hasil analisis. Uji kuat tekan pada beton inti adalah yang paling akurat, namun pada asesmen struktur gedung eksisting umumnya dibatasi karena faktor operasional gedung, sehingga harus dikombinasikan dengan uji tidak merusak (non-destructive test, NDT). Pada gedung tua umumnya proses karbonasi sudah terjadi, dan ketika karbonasi sudah mencapai tulangan baja, akan menginisiasi korosi dan ini menjadi patologis utama pada beton bertulang. Penelitian dilakukan untuk mengetahui kuat tekan beton pada gedung sekolah 3 lantai yang berusia lebih dari 30 tahun, dengan mengambil 10 sampel beton inti yang dibarengi dengan NDT yaitu uji karbonasi, pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik (UPVT) dan palu pantul beton. Dan 30 titik uji lainnya tanpa sampling beton inti. Hasil penelitian menunjukkan kedalaman karbonasi justru meningkatkan kuat tekan dan mengurangi tingkat kesalahan dalam estimasi, dengan: $f'c = 1.7178 + 0.2178C + 10.0455 \ln V$ dan $r^2=0,9241$.

Kata Kunci: beton inti, cepat rambat ultrasonik, karbonasi, palu pantul

Abstract

In the assessment of buildings with reinforced concrete main structures, the determination of concrete compressive strength is certainly a key factor in the accuracy of the analysis results. Compressive strength tests on coredrill samples are the most accurate, but in the assessment of existing building structures, they are generally limited due to building operational factors, thus they must be combined with non-destructive tests (NDT). In older buildings, carbonation process usually occurs, and when carbonation reaches the steel reinforcement, it will initiate corrosion, becoming a major pathology in reinforced concrete. Research was conducted to determine the concrete compressive strength in a 3-story school building over 30 years old, by taking 10 core concrete samples accompanied by NDT such as carbonation tests, rapid ultrasonic pulse velocity (UPVT) measurements, and rebound hammer tests. And 30 other test points without core concrete sampling. The research results show that the depth of carbonation actually increases compressive strength and reduces error rates in estimation, with $f'c = 1.7178 + 0.2178C + 10.0455 \ln V$ dan $r^2=0,9241$.

Keywords: concrete coredrill, ultrasonic pulse velocity, carbonation, rebound hammer

PENDAHULUAN

Pada asesmen bangunan gedung dengan struktur utama menggunakan beton bertulang, tentunya menentukan kuat tekan beton menjadi faktor utama dalam penentuan keakuratan hasil analisis. Namun pada bangunan dengan struktur beton eksisting, faktor pengaruh luar terhadap properti mekanis beton dan tulangan di dalamnya harus diperhitungkan. Pengujian pada sampel beton inti pada proses asesmen biasanya terbatas karena faktor operasional bangunan, sehingga harus dikombinasikan dengan uji tidak merusak (*non-destructive test, NDT*) seperti uji palu beton dan uji cepat rambat ultrasonik (Khoeri, 2016; Ridho & Khoeri, 2015). Faktor yang berpengaruh terhadap ketahanan beton diantaranya tipe beton, selimut beton, kondisi lapangan, dan

tingkat paparan luar (Jena & Panda, 2017). Salah satu paparan luar adalah proses karbonasi.

Untuk mengetahui pengaruh karbonasi pada estimasi kuat tekan beton dengan uji palu beton (*R*) dan uji cepat rambat gelombang ultrasonik (*V*) agar nilai kuat tekan yang diperoleh lebih merepresentasi kondisi aktual maka dilakukanlah penelitian ini.

TINJAUAN PUSTAKA

Proses karbonasi terjadi karena interaksi karbondioksida (CO_2) di atmosfer dengan ion hidroksida dalam beton. Hasil dari interaksi tersebut membuat pH beton turun (<9) dan ini mengakibatkan penurunan ketahanan lapisan pasif pada permukaan tulangan. Karbonasi menginisiasi korosi tulangan yang menjadi penyebab utama kerusakan struktur beton. Mekanisme dasar yang terjadi adalah atmosfer

(*)Corresponding author
Telp : 08158255374
E-mail : heri.khoeri@umj.ac.id, <https://hesa.co.id>
<http://doi.org/10.33506/rb.v10i1.3234>
Received 08 Maret 2024; Accepted 29 April 2024; Available online 31 April 2024
E-ISSN: 2614-4344 P-ISSN: 2476-8928

bereaksi dengan semen hidrat dan menghancurkan sifat alkalinnya. Porositas, permeabilitas, difusi, dan kapilaritas dalam beton berpengaruh terhadap laju karbonasi. Acidifikasi menyebabkan depasivasi tulangan baja, membuatnya rentan terhadap korosi, yang merupakan manifestasi patologis utama dalam struktur beton bertulang (Chen et al., 2018; Costa et al., 2022). Selain itu karbonasi jika tidak diperhitungkan dapat menyebabkan ketidakakuratan dalam analisis (IAEA, 2002).

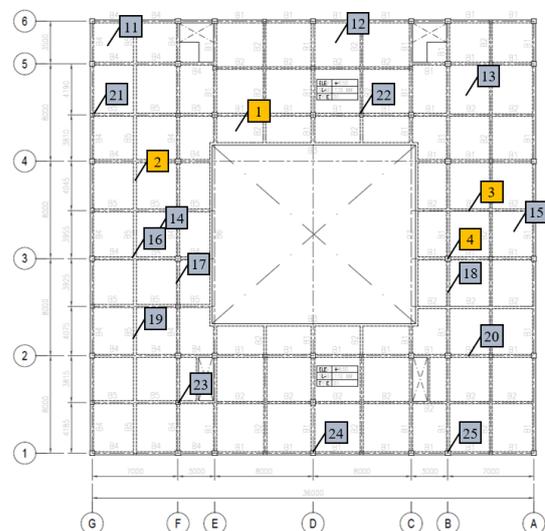
Kedalaman karbonasi dapat diukur dengan menyemprotkan fenoltalein pada bagian beton yang tergores, larutan tersebut adalah indikator yang tidak berwarna yang berubah menjadi ungu ketika pH lebih tinggi dari 13 (Wadile et al., 2023). Dengan perangkat pengujian *ultrasonic pulse velocity*, *UPV* dan permeabilitas udara, kekuatan dan koefisien karbonasi dapat diperoleh secara tidak merusak (Craeye et al., 2023). Kuat tekan kubus beton yang terkarbonasi lebih besar dibanding yang tidak terkarbonasi karena kalsium karbonat menempati volume yang lebih besar daripada kalsium hidroksida (Pravalika & Rao, 2018). Keberadaan CO_2 dapat meningkatkan kuat tekan beton dan mengurangi poripori. Namun, jumlah air dengan adanya CO_2 mengurangi kuat tekan beton (Shafiqah Ramlee et al., 2021). Kuat tekan berkurang dengan peningkatan kandungan laterit namun meningkat dengan curing dan CO_2 (Olufemi, 2020). Penutupan sebagian porositas dengan proses percepatan karbonasi berkontribusi secara parsial pada efek positif kinerja mekanik dan ketahanan, meskipun karbonasi alami 8 bulan juga secara signifikan meningkatkan properti tersebut (Paglia et al., 2022). Efek karbonasi dapat dieksplorasi positif dalam beton bertulang asal ada penutupan nominal yang memadai.

Karbonasi sedikit berkorelasi dengan porositas total. Tetapi proses tersebut tergantung pada adanya kalsium hidroksida. Pada kekuatan beton yang lebih tinggi, karbonasi relatif lebih rendah. Karbonasi maksimum terjadi selama paparan siklik terhadap CO_2 dan kelembaban. Namun luasan karbonasi dalam struktur beton tua tidak hanya bergantung pada kuat tekannya (Paglia & Pader, 2024). Pada beton tua, kedalaman karbonasi bisa mencapai beberapa milimeter, dan dalam kasus ekstrem, bisa mencapai hingga 20 mm, dimana dalam kasus tersebut, angka pantulan bisa mencapai 50% lebih dibanding permukaan beton yang tidak terkarbonasi (IAEA, 2002). Pada beton padat luasan paparan karbonasi terbatas hanya pada permukaan dan lajunyapun lambat, tidak melebihi 20 mm dalam 50 tahun, namun pada beton berpori kedalamannya dapat meningkat menjadi 100 mm dalam 50 tahun karena beton padat

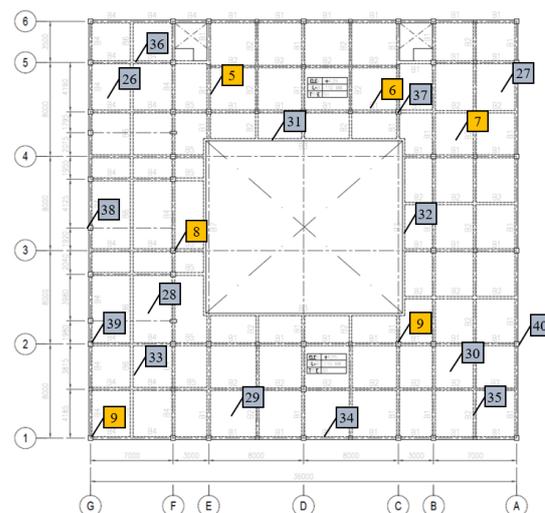
mencegah difusi CO_2 secara efektif dibanding beton berpori (Wadile et al., 2023). Laju kedalaman karbonasi dapat dikurangi dengan penambahan slag (Choi et al., 2020).

METODE

Penelitian ini adalah penelitian *experimental*. Variabel bebas yang digunakan adalah kedalaman karbonasi, C (mm), cepat rambat gelombang ultrasonic, V (km/detik) dan nilai pantulan palu beton, R (mm), sementara variabel terikatnya adalah kuat tekan, $f'c$ (MPa). Pengujian dilakukan di bangunan sekolah yang berumur 30 tahun sebanyak, 10 sampel diuji dengan 4 jenis uji ($f'c$, C , R dan V) dan 30 sampel dengan 3 jenis uji (C , R dan V). Dengan titik uji seperti pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Lokasi uji balok lt. 3, pelat lt. 3 dan kolom lt. 2
Sumber: Hasil penggambaran ulang di lapangan, 2023



Gambar 2. Lokasi uji balok lt. 2 dan kolom lt. 1
Sumber: Hasil penggambaran ulang di lapangan, 2023
Tahapan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Pengambilan data cepat rambat gelombang ultrasonik (*Ultrasonic pulse velocity test, UPVT*)
Pengambilan data cepat rambat gelombang ultrasonik dilakukan dengan Proceq PL200PE (Gambar 3) sesuai ACI 228.1R-19 (American Concrete Institute., 2019). Dokumentasi saat pengambilan data cepat rambat gelombang ultrasonik seperti pada Gambar 4.



Gambar 3. Alat ukur cepat rambat gelombang ultrasonik Proceq PL200 (Proceq, 2022)



Gambar 4. Dokumentasi pengambilan data cepat rambat gelombang ultrasonik dengan direct method
Sumber: Dokumentasi pengujian di lapangan, 2023

2. Uji palu pantul beton (*concrete rebound hammer test*)

Acuan yang digunakan adalah SNI ASTM C805:2012 (BSN, 2012) dan ACI 228.1R-19 (American Concrete Institute., 2019). Alat uji menggunakan Matest C-380 (Gambar 5).

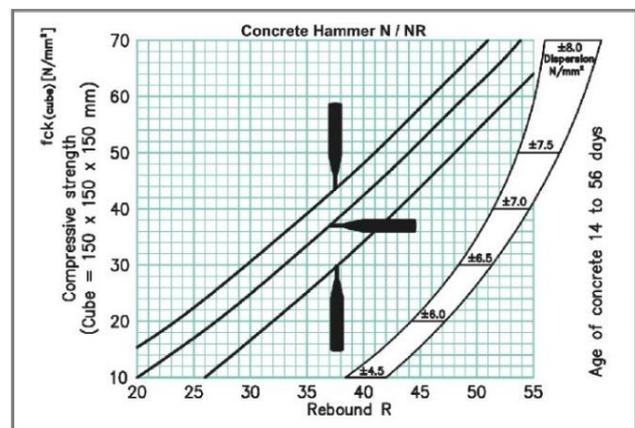


Gambar 5. Palu pantul beton (*concrete rebound hammer*) Matest C-380 (Matest, 2023)

Dokumentasi saat pengambilan data *hammer test* seperti pada Gambar 6. Konversi Nilai pantul (*Rebound*) dalam mm ke kuat tekan kubus seperti pada Gambar 7. f_c' diperoleh dengan faktor konversi 0,83 pada kuat tekan ekuivalen kubus.



Gambar 6. Dokumentasi uji palu beton
Sumber: Dokumentasi pengujian di lapangan, 2023



Gambar 7. Konversi pantulan (*rebound*) ke kuat tekan kubus (Matest, 2023)

3. Pengambilan sampel beton inti
Pengambilan sampel beton inti dilakukan dengan melakukan pengeboran elemen struktur beton menggunakan *concrete core drilling machine*. Sebelum melakukan pengeboran, di sekitar lokasi dilakukan pemindaian tulangan dengan rebar scanner 2D Hilti PS200 dan 3D Hilti PS1000, hal ini dilakukan untuk menghindari tulangan beton

terkena mata bor. Dokumentasi di salah satu lokasi pemindaian seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Pemindaian tulangan
Sumber: Dokumentasi pengujian di lapangan, 2023



Gambar 9. Pengambilan sampel beton inti
Sumber: Dokumentasi pengujian di lapangan, 2023

Pengambilan sampel dan persiapan sampel dilakukan mengacu pada SNI 2492:2018 (BSN, 2018), dengan diameter sampel 4". Dokumentasi pada saat pengeboran di salah satu lokasi uji seperti diberikan pada Gambar 9.

4. Uji karbonasi

Pengukuran kedalaman karbonasi dilakukan dengan menyemprotkan larutan fenolftalein 1% ke permukaan beton. Kalsium hidroksida (bagian yang tidak terkarbonasi) akan berwarna merah muda sedangkan bagian yang terkarbonasi tidak akan berubah berwarna. Larutan *fenolftalein* 1% dibuat dengan melarutkan 1gram *fenolftalein* dalam 90 cc etanol. Kemudian, dibuat menjadi 100 cc dengan menambahkan air suling. Pada inti beton yang baru diekstraksi disemprot dengan larutan *fenolftalein*, kedalaman lapisan tak berwarna (lapisan terkarbonasi) dari permukaan diukur hingga mm terdekat di 4 atau 8 posisi, dan rata-ratanya diambil. Jika dilakukan di lubang bor, debu harus dihilangkan terlebih dulu dengan sikat

udara dan kedalaman lapisan tak berwarna diukur di 4 atau 8 posisi untuk diambil rata-ratanya. Jika beton masih mempertahankan karakteristik alkalisnya, warnanya berubah menjadi ungu. Jika terkarbonasi, pHnya menjadi 7 atau kurang dan tidak berubah warna (IAEA, 2002).



Gambar 10. Pengukuran kedalaman karbonasi sampel beton
Sumber: Dokumentasi pengujian di lapangan, 2023

5. Uji kuat tekan beton

Sampel beton inti diuji sesuai SNI 2492:2018 (BSN, 2018). Pengujian dilakukan di laboratorium beton PT. Hesa Laras Cemerlang, Jakarta, pada waktu 7 (tujuh) hari setelah pengambilan sampel. Data yang diperoleh dari hasil pengujian adalah ukuran, densitas dan kuat tekan beton. Dokumentasi saat pengeboran di salah satu lokasi uji seperti diberikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Pengujian salah satu sampel beton inti
Sumber: Dokumentasi pengujian di laboratorium PT. Hesa Laras Cemerlang, 2023

6. Analisis data uji

Hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel yang selanjutnya dianalisis dengan regresi berganda,

dan akan dicari pengaruh hubungan tiap variabel yang signifikan terhadap kuat tekan beton dengan formula linier, logaritmik, eksponensial ataupun power atau kombinasi diantaranya. Adapun persamaan regresi yang akan diuji antara lain seperti pada persamaan (1) sampai dengan persamaan (8).

$$f'c' = c_0 + c_1C + c_2V + c_3R \tag{1}$$

$$f'c' = c_0 + c_1 \ln C + c_2 \ln V + c_3 \ln R \tag{2}$$

$$f'c' = c_0 + c_1 \ln C + c_2 \ln V + c_3R \tag{3}$$

$$f'c' = c_0 + c_1 \ln C + c_2V + c_3R \tag{4}$$

$$f'c' = c_0 + c_1C + c_2 \ln V + c_3 \ln R \tag{5}$$

$$f'c' = c_0 + c_1C + c_2 \ln V + c_3R \tag{6}$$

$$f'c' = c_0 + c_1C + c_2V + \ln R \tag{7}$$

$$f'c' = e^{c_0+c_1C+c_2V+c_3R} \tag{8}$$

dengan,

- $f'c'$ = kuat tekan beton (MPa) merupakan variabel dependen/ variabel terikat
- C = kedalaman karbonasi (mm), yang merupakan variabel bebas-1
- V = cepat rambat gelombang ultrasonik (km/detik), yang merupakan variabel bebas-2
- R = pantulan palu beton (mm), yang merupakan variabel bebas-3
- c_0 = konstanta
- c_1 = koefisien regresi C variabel-1
- c_2 = koefisien regresi V variabel-2
- c_3 = koefisien regresi R variabel-3

Dari beberapa persamaan regresi akan dipilih hubungan terbaik yang menghasilkan faktor determinasi yang paling mendekati 1. Selain itu akan diseleksi secara statistical diantara variabel bebas kedalaman karbonasi (C), cepat rambat gelombang ultrasonik (V) dan pantulan palu beton (R), mana yang memberikan pengaruh signifikan dan mana yang akan dihilangkan dari persamaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian 10 pasangan data rebound hammer, ultrasonic pulse velocity, carbonation dan crushing dari 10 sampel yang diambil pada elemen struktur Gedung, yang mewakili elemen pelat, balok dan kolom secara acak pada lantai-1, lantai-2 dan lantai-3 gedung, juga 30 pasangan data tanpa uji tekan sampel beton inti, seperti diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian rebound hammer, ultrasonic pulse velocity, carbonation dan crushing

No Sampel	Lokasi Uji		C (mm)	U (km/det)	R (mm)	$f'c'$ (MPa)
	Elemen	Lantai				
1	Pelat	3	10	3.09	34.1	16.36
2	Balok	3	3	2.979	29.4	11.45
3	Balok	3	13	2.876	34.4	11.63

No Sampel	Lokasi Uji		C (mm)	U (km/det)	R (mm)	$f'c'$ (MPa)
	Elemen	Lantai				
4	Kolom	2	38	3.51	36.7	22.51
5	Balok	2	48	3.925	40.4	23.63
6	Balok	2	8	3.432	35.8	13.46
7	Pelat	2	6	3.098	34.1	12.46
8	Kolom	1	11	3.186	37	14.45
9	Kolom	1	16	3.244	35.3	15.23
10	Kolom	1	25	3.31	36.5	17.05
11	Pelat	3	5	2.426	29.2	
12	Pelat	3	15	2.584	30.3	
13	Pelat	3	10	2.614	30.6	
14	Pelat	3	5	2.342	28.6	
15	Pelat	3	8	2.418	29.1	
16	Balok	3	12	2.516	29.9	
17	Balok	3	32	2.996	33.4	
18	Balok	3	10	2.459	29.4	
19	Balok	3	14	2.559	30.2	
20	Balok	3	10	2.447	29.3	
21	Kolom	2	30	2.947	33.0	
22	Kolom	2	29	2.929	32.9	
23	Kolom	2	5	2.481	29.6	
24	Kolom	2	5	2.605	30.5	
25	Kolom	2	17	2.634	30.7	
26	Pelat	2	23	2.781	31.8	
27	Pelat	2	15	2.608	30.5	
28	Pelat	2	0	2.205	27.6	
29	Pelat	2	20	2.677	31.0	
30	Pelat	2	17	2.642	30.8	
31	Balok	2	3	2.302	28.3	
32	Balok	2	21	2.73	31.4	
33	Balok	2	21	2.73	31.4	
34	Balok	2	10	2.835	32.2	
35	Balok	2	7	2.378	28.8	
36	Kolom	1	12	2.517	29.9	
37	Kolom	1	15	2.51	29.8	
38	Kolom	1	11	2.476	29.6	
39	Kolom	1	10	2.442	29.3	
40	Kolom	1	9	2.445	29.3	

Uji Normalitas data $f'c'$, C , R dan V

Uji normalitas dipakai untuk mengetahui data berdistribusi normal atau tidak. Karena sampel dengan 4 pasang data hanya 10 (kurang dari 50) maka digunakan uji *Shapiro-Wilk*, yang cenderung memiliki tingkat konsistensi tinggi dari besar sampel 10 sampai 70 (Oktaviani & Notobroto, 2014). Metode Shapiro Wilk menggunakan data dasar yang belum diolah dalam tabel distribusi frekuensi. Data diurut, kemudian dibagi dua kelompok untuk dikonversi dalam *Shapiro Wilk* (Cahyono, 2015).

Signifikansi dibandingkan dengan tabel Shapiro Wilk. Signifikansi uji nilai, T_3 dibandingkan dengan nilai tabel *Shapiro Wilk*, untuk dilihat posisi nilai probabilitasnya (p). Jika nilai p lebih dari 5%, maka berarti data terdistribusi normal. Nilai tabel p (5%) adalah 0,842, sementara T_3 dihitung dengan persamaan berikut:

$$T_3 = \frac{[\sum_{i=1}^k \alpha_i (Var_{n-i+1} - Var_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (Var_i - \bar{Var})^2} \tag{9}$$

Tabel 2. Uji Normalitas data C , R dan V terhadap data $f'c'$

Deskripsi	$f'c'$	C	V	R
Jumlah Sampel (n)	10	10	10	10
Rata-rata (\bar{Var})	16,023	17,800	2,845	35,370

$\sum_{i=1}^n (Var_i - \overline{Var})^2$	157,442	1959,60	1,252	71,001
$[\sum_{i=1}^k a_i (Var_{n-i+1} - Var_i)]^2$	11,796	40,811	1,084	8,101
T_3	0,884	0,850	0,938	0,924
$p_{tabel} (5\%)$	0,842	0,842	0,842	0,842

Berdasarkan Tabel 2 terlihat bahwa seluruh data terdistribusi normal, ditunjukkan dengan nilai $T_3 > p_{tabel}$. Selanjutnya dilakukan uji heteroskedastisitas untuk mengetahui ada atau tidaknya penyimpangan asumsi klasik heteroskedastisitas. Heteroskedastisitas berarti ada varian variable pada model regresi yang tidak sama sedangkan yang diharapkan dalam model adalah yang konstan. Pengujian heteroskedastisitas pada penelitian ini menggunakan metode *Glejser*. Gejala heteroskedastisitas ditunjukkan oleh koefisien regresi dari variable bebas terhadap nilai absolut residualnya. Indikasi tidak terjadi gejala heteroskedastisitas jika nilai dari sig. variabel bebas terhadap absolut residual > 0.05 .

Tabel 3 menunjukkan bahwa model regresi tidak terjadi heteroskedastisitas yang ditunjukkan oleh nilai sig. variabel C , R dan V terhadap absolut residual berturut-turut adalah 0,1469, 0,1354 dan 0,0735 yang semuanya di atas 0,05.

Tabel 3. Uji Heteroskedastisitas C , V dan R terhadap data fc'

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	3.4302	2.0392	1.6821	0.1435
C	0.0197	0.0118	1.6654	0.1469
V	0.9488	0.5503	1.7243	0.1354
R	-0.1635	0.0755	-2.1655	0.0735

Analisis Regresi Multivariabel dan Pengujian Hipotesis pengaruh C , V dan R

Data kuat tekan, fc' yang didapatkan dianalisis menggunakan regresi multi linier, dengan data yang sebelumnya telah diuji menggunakan uji normalistas dan uji heteroskedastisitas. Dari uji normalistas dan uji heteroskedastisitas yang telah dilakukan menunjukkan bahwa model regresi telah memenuhi persyaratan untuk dilakukan analisis regresi. Analisis regresi dilakukan untuk mengetahui pengaruh C , V dan R terhadap fc' . Hasil analisis data dapat dilihat pada Tabel 4 berikut:

Tabel 4. Signifikansi pengaruh C , R dan V

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	5,1406	6,2769	0,8190	0,4441
C	0,2294	0,0364	6,3002	0,0007
V	6,5895	1,6938	3,8903	0,0081
R	-0,3378	0,2324	-1,4535	0,1963

Nilai-nilai p individual masing-masing variabel menunjukkan apakah setiap variabel secara statistik signifikan atau tidak terhadap nilai kuat tekan beton, fc' . Terlihat bahwa secara statistik kedalaman karbonasi, C paling signifikan ($p = 0.0007$), kemudian cepat rambat gelombang ultrasonik, V ($p = 0.0081$), namun pantulan palu beton, R ($p = 0.1963$) tidak

signifikan secara statistik pada $\alpha = 0,05$. Karena R tidak signifikan pengaruhnya secara statistik, maka akan dihapus dari model pada analisis selanjutnya. Dengan penghilangan variabel C maka bentuk umum persamaan regresi multi linier menjadi:

$$fc' = c_0 + c_1C + c_2V \tag{10}$$

Hasil analisis statistik regresi seperti ditunjukkan pada Tabel 5 dan ANOVA pada Tabel 6, serta koefisien dan signifikansi tiap variabel pada Tabel 7.

Tabel 5. Statistik Regresi

Regression Statistics	
Multiple R	0,9568
R Square	0,9155
Adjusted R Square	0,8914
Standard Error	1,3785
Observations	10

Tabel 6. ANOVA Hasil Analisis Regresi

	df	SS	MS	F	Sig. F
Regression	2	144,1396	72,0698	37,9250	0,0002
Residual	7	13,3023	1,9003		
Total	9	157,4418			

Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa hubungan antara kedalaman karbonasi, C (mm) dan cepat rambat gelombang ultrasonik, V (km/detik) dengan kuat tekan beton, fc' (MPa) adalah sebesar 0,9568. Kontribusi yang disumbangkan C dan V secara bersama-sama adalah 0,9155 atau 91,55%, hal ini berarti variabel C dan V mempengaruhi fc' sebesar 91,55%. Nilai dari *std. Error of the estimate* adalah sebesar 1,3785, hal ini menunjukkan penyimpangan antara persamaan regresi dengan nilai *dependent rill* sebesar 1,3785. semakin kecil nilai *std. Error of the estimate* maka semakin baik persamaan tersebut sebagai prediksi. Dari Tabel 6 diketahui nilai probabilitas (*sig*) adalah 0.0002 dan nilai taraf signifikan adalah 0.05. Kemudian langkah selanjutnya adalah membandingkan F hitung dan F tabel serta sig dan α . Nilai F hitung adalah 37,9250 sedangkan nilai F tabel di dapat 4.74. Maka $F_{hitung} = 37,9250 > F_{tabel} 4.74$, yang artinya ada pengaruh secara simultan terhadap fc' dari C dan V .

Tabel 7. Koefisien dan Signifikansi Variabel

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	2,9387	3,8638	0,7606	0,4718
C	0,2185	0,0369	5,9252	0,0006
V	3,2319	1,4589	2,2153	0,0623

Selanjutnya dari Tabel 7 model regresi untuk memperkirakan fc' (MPa) dari kedalaman karbonasi, C (mm) dan pembacaan kecepatan gelombang ultrasonik, V (km/detik) dapat dinyatakan dengan:

$$fc' = 2,938 + 0,219C + 3,232V \tag{11}$$

Penarikan kesimpulan berdasarkan uji linieritas dilakukan dengan kaidah jika t hitung $>$ t tabel artinya secara statistik variabel bebas tersebut

mempengaruhi variabel terikat. Dari Tabel 7 diketahui nilai t hitung untuk C adalah $2.5603 > t$ tabel $2,262$, maka dapat dinyatakan bahwa terdapat pengaruh yang signifikan antara kedalaman karbonasi, C dengan fc' . Namun nilai t hitung untuk V adalah $2,2153 < t$ tabel $2,262$, artinya tidak terdapat pengaruh yang signifikan antara cepat rambat gelombang ultrasonik, V dengan fc' . Begitupun dari uji signifikansi P -value untuk $C < 0,05$ sedangkan P -value untuk $V > 0,05$ maka dapat dinyatakan bahwa C mempengaruhi secara signifikan fc' , sedangkan V tidak berpengaruh secara signifikan dengan fc' . Untuk meningkatkan kualitas hubungan antar variabel, model regresi dicoba menggunakan:

$$fc' = c_0 + c_1C + c_2 \ln V \quad (12)$$

Hasil analisis statistik regresi persamaan (12) seperti pada Tabel 8, ANOVA pada Tabel 9, serta koefisien dan signifikansi tiap variabel pada Tabel 10.

Tabel 8. Statistik Regresi

Regression Statistics	
Multiple R	0,9613
R Square	0,9241
Adjusted R Square	0,9024
Standard Error	1,3064
Observations	10

Tabel 9. ANOVA Hasil Analisis Regresi

	df	SS	MS	F	Sig. F
Regression	2	145,495	72,748	42,626	0,0001
Residual	7	11,947	1,707		
Total	9	157,442			

Dari Tabel 8 terlihat hubungan kedalaman karbonasi, C (mm) dan cepat rambat gelombang ultrasonik, V (km/detik) dengan kuat tekan beton, fc' (MPa) sebesar 0.9613. Kontribusi C dan V secara bersama-sama adalah 92.41%, berarti variabel C dan V mempengaruhi fc' sebesar 92.41%, faktor determinasi ini lebih besar dibanding dengan yang diperoleh dari regresi multi linier yaitu 91,55%, artinya hubungan antar variabel makin kuat. *Std. Error of the estimate* 1.3064, menunjukkan penyimpangan antara persamaan regresi dengan nilai *dependent rill* lebih kecil dibanding regresi multi linier 1,3785.

Dari Tabel 9 diketahui nilai probabilitas (*sig*) adalah 0,0001 sementara dari persamaan sebelumnya 0,0002 dan nilai taraf signifikan 0.05. Nilai F hitung 42,6258 sedangkan nilai F tabel 4,74. Karena F hitung = 42,6258 > F tabel 4.74, berarti ada pengaruh dari C dan $\ln V$ terhadap fc' .

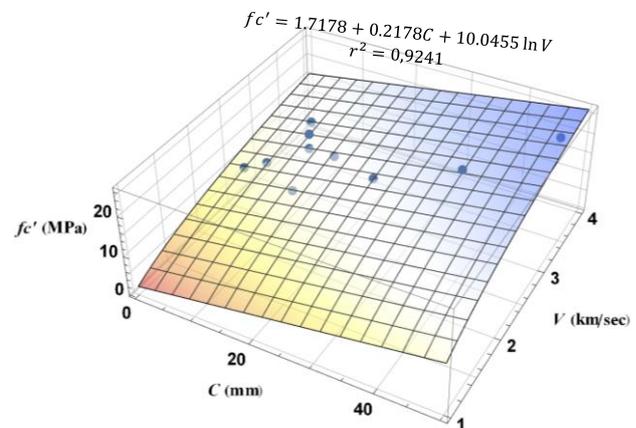
Tabel 10. Koefisien dan Signifikansi Variabel

	Coeff.	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	1,7178	3,9095	0,4394	0,6736
C	0,2178	0,0345	6,3185	0,0004
$\ln V$	10,0455	4,0155	2,5017	0,0409

Dari Tabel 10 model persamaan regresi untuk memperkirakan kuat tekan beton, fc' (MPa) dari kedalaman karbonasi, C (mm) dan cepat rambat gelombang ultrasonik, V (km/detik) dapat dinyatakan:

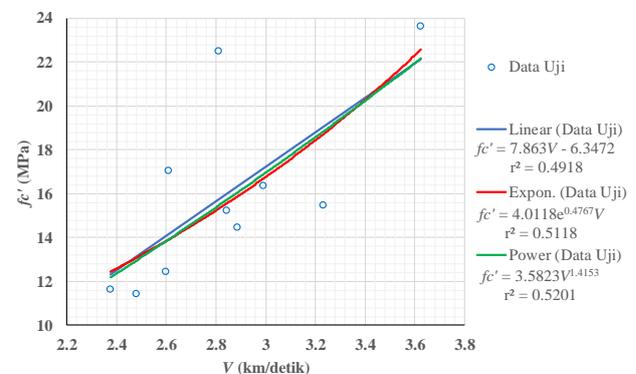
$$fc' = 1.7178 + 0.2178C + 10.0455 \ln V \quad (13)$$

Dari Tabel 7 nilai t hitung untuk C adalah 6.3185 > t tabel 2,262, begitupun nilai t hitung untuk $\ln V$ yaitu 2.5017 > t tabel 2,262, artinya variabel C dan $\ln V$ mempengaruhi secara signifikan nilai kuat tekan beton, fc' . Begitupun dari uji signifikansi P -value untuk C dan V nilainya kurang dari 0,05, maka dapat dinyatakan bahwa C dan V berpengaruh secara signifikan dengan kuat tekan, fc' . Dalam bentuk grafik persamaan (12) seperti yang diberikan pada Gambar 12.

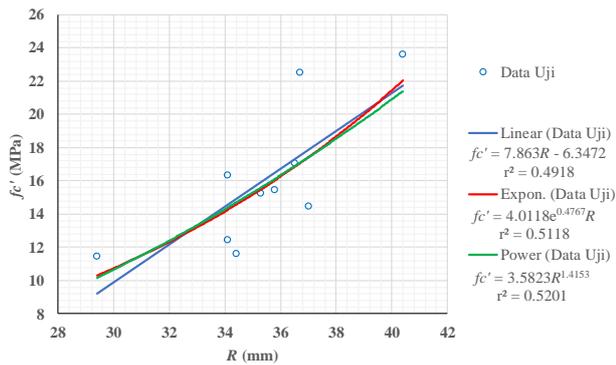


Gambar 12. Grafik kuat tekan, fc' berdasarkan kedalaman karbonasi, C dan cepat rambat gelombang ultrasonik, V

Persamaan (13) jauh lebih baik untuk memprediksi kuat tekan beton, fc' pada asesmen Gedung sekolah pada penelitian ini dibandingkan persamaan regresi antara fc' dengan V maupun dengan R , dengan acuan faktor determinasi, r^2 , seperti pada Gambar 13 dan Gambar 14.



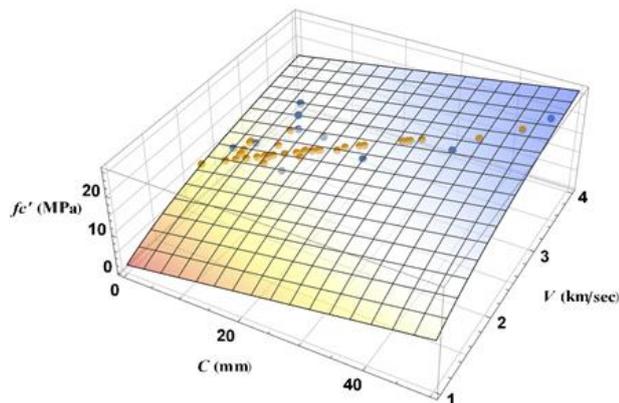
Gambar 13. Grafik kuat tekan, fc' berdasarkan cepat rambat gelombang ultrasonik, V



Gambar 14. Grafik kuat tekan, f_c' berdasarkan pantulan palu beton, R

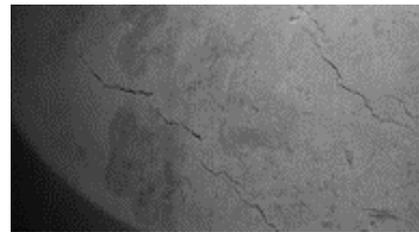
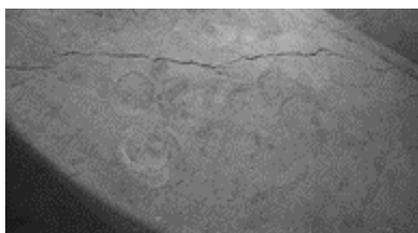
Estimasi f_c' dengan memasukkan variabel C dan penerapannya

Dengan menambahkan variabel kedalaman karbonasi, C , tingkat kesalahan dalam estimasi mutu beton, f_c' saat asesmen bangunan gedung eksisting dapat dikurangi, dan dengan persamaan (13), f_c' pada lokasi uji yang tidak dilakukan *coredrill* (lihat Tabel 1, no sampel 11 sd 40) dapat diestimasi (Gambar 15).



Gambar 15. Plot hasil uji dan estimasi pada grafik kuat tekan, f_c' berdasarkan kedalaman karbonasi, C dan cepat rambat gelombang ultrasonik, V

Namun temuan di lapangan kendatipun dengan bertambahnya C nilai f_c' meningkat, proses kerusakan beton banyak terlihat, seperti pada Gambar 16.



Gambar 16. Kondisi balok yang berdekatan dengan lokasi uji 5
Sumber: Hasil observasi lapangan, 2023

Beton yang terkarbonasi volume kalsium karbonatnya akan lebih besar dibanding kalsium hidroksidanya, sehingga kuat tekannya meningkat. Namun sejalan dengan itu acidifikasi berjalan, dimana acidifikasi menyebabkan depasivasi tulangan yang membuatnya rentan terkorosi. Ketika proses korosi berlangsung, tulangan mengembang dan menyebabkan retak bahkan spalling. Ini yang menyebabkan pantulan uji palu beton tidak mempunyai pengaruh signifikan dengan kuat tekan beton, karena hanya mengindikasikan kekerasan permukaan sementara pada uji kuat tekan beton inti, permukaan beton umumnya dipotong. Sementara pembacaan cepat rambat gelombang dengan metode transmisi langsung, transmisi merambat dari satu sisi ke sisi lain melalui beton inti, sehingga nilai signifikansinya lebih tinggi dibandingkan pantulan hasil uji palu beton. Nilai estimasi f_c' tetap dapat digunakan dalam analisis struktur, dengan catatan merekomendasikan untuk men-*chipping* bagian beton yang terkarbonasi dan melakukan *grouting* atau *patching* kembali lapisan permukaan beton dengan mortar grout yang *low shrinkage* dan *high viscosity*.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, diperoleh kesimpulan kedalaman karbonasi, C (mm) berpengaruh terhadap kuat tekan beton, dimana berdasarkan analisis statistik bersama cepat rambat gelombang ultrasonik, V (km/detik) signifikan mempengaruhi kuat tekan beton, $f_c' = 1.7178 + 0.2178C + 10.0455 \ln V$, dengan faktor determinasi $r^2 = 0,9241$, yang nilainya lebih besar dari faktor determinasi persamaan regresi antara C dan atau R terhadap f_c' . Dengan memasukkan kedalaman karbonasi, C akan meningkatkan estimasi f_c' , namun bagaimanapun proses karbonasi akan menginisiasi kerusakan lebih lanjut pada beton bertulang dengan

terjadinya korosi pada tulangan, sehingga penggunaan fc' dengan formula yang diperoleh dari penelitian ini untuk analisis struktur harus dibarengi dengan rekomendasi perbaikan permukaan beton.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id>, yang mendukung penuh penelitian ini.

REFERENSI

- American Concrete Institute. (2019). *ACI 228.1R-19 Report on Methods for Estimating In-Place Concrete Strength*. American Concrete Institute.
- Cahyono, T. (2015). *Statistik Uji Normalitas* (1st ed.). Yasamas.
- Chen, Y., Liu, P., & Yu, Z. (2018). Effects of Environmental Factors on Concrete Carbonation Depth and Compressive Strength. *Materials*, 11(11), 2167. <https://doi.org/10.3390/ma11112167>
- Choi, S.-J., Kim, Y.-U., Oh, T.-G., & Cho, B.-S. (2020). Compressive Strength, Chloride Ion Penetrability, and Carbonation Characteristic of Concrete with Mixed Slag Aggregate. *Materials*, 13(4), 940. <https://doi.org/10.3390/ma13040940>
- Costa, R., Franchetto, A., Gouveia, A., Ziegler, F., Pessoa, K., & Garcez, M. (2022). Service life prediction for concrete structures based on carbonation front depth models. *Revista Alconpat*, 12(1), 47–60. <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.558>
- Craeye, B., Renne, N., & De Maeijer, P. K. (2023). Effect of carbonation on non-destructive strength and durability assessment of limestone based concrete. *International Conference on Non-Destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications*, 164–171.
- IAEA. (2002). *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. International Atomic Energy Agency.
- Jena, T., & Panda, K. C. (2017). Compressive Strength and Carbonation of Sea Water Cured Blended Concrete. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 8(2), 153–162. <http://iaeme.com/Home/journal/IJCIET153edit or@iaeme.comhttp://iaeme.com/Home/issue/IJCIET?Volume=8&Issue=2http://iaeme.com>
- Khoeri, H. (2016). Non-Destructive Test Terhadap Semi Destructive Test pada Shear Wall Beton Bertulang. *Konstruksia*, 7(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.24853/jk.7.2.%25p>
- Matest. (2023). *Matest Catalogue 2023 Material testing equipment* (10th ed.). Matest.
- Oktaviani, M. A., & Notobroto, H. B. (2014). Perbandingan Tingkat Konsistensi Normalitas Distribusi Metode Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, Shapiro-Wilk, dan Skewness-Kurtosis. *Jurnal Biometrika Dan Kependudukan*, 3(2), 127–135.
- Olufemi, S. (2020). Effect of Carbonation on the Compressive Strength Development of Laterized Concrete. *Civil and Environmental Research*. <https://doi.org/10.7176/ce/12-4-04>
- Paglia, C., Antonetti, S., & Mosca, C. (2022, May 21). The relationship between compressive strength and carbonation for in service concrete elements. *Advanced Engineering and Technology*.
- Paglia, C., & Pader, M. (2024, February 12). Concrete with accelerated natural carbonated recycled cementitious aggregates. *Pioneering the Emerging Trends in Materials Science*.
- Pravalika, A., & Rao, V. (2018). Effect of Carbonation on the Properties of Concrete. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 9(7), 1606–1622. <http://iaeme.com/Home/journal/IJCIET1605editor@iaeme.comhttp://iaeme.comhttp://iaeme.com>
- Proceq. (2022). *Pundit PL200, Ultrasonic Pulse Velocity*.
- Ridho, F., & Khoeri, H. (2015). Perbandingan Mutu Beton Hasil Upvt Metode Indirect Terhadap Mutu Beton Hasil Hammer Test dan Core Drill. *Konstruksia*, 6(2). <https://doi.org/10.24853/jk.6.2.%p>
- Shafiqah Ramlee, N., Hussein Abo Sabah, S., & Irwan Juki, M. (2021). Effect of Carbonation on Concrete Strength: A Systematic Review. *Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment*, 2(1), 388–396. <https://doi.org/10.30880/rtcebe.2021.02.01.018>
- Wadile, M., Joshi, Prof. H., & Pawar, Prof. R. (2023). A Review on Experimental Study to Reduce Carbonation Effect on Concrete. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(2), 591–594. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.49099>