

PEMERIKSAAN MUTU BETON TERPASANG MENGGUNAKAN PENGUJIAN NONDESTRUKTIF (NDT) DAN DESTRUKTIF, STUDI KASUS: BANGUNAN BETON BERTULANG 4 LANTAI

Concrete In-place Strength Assessment Utilizing Non-Destructive Test (NDT) and Destructive Test, Case Study: 4 Stories Building

Egi Pratama¹, Yushar Kadir¹, Chandra Afriade Siregar¹, Angga Arief Gumilang S.²

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sangga Buana YPKP,
Jalan PHH Mustopa No. 68 Bandung

²Balai Bahan dan Struktur Bangunan Gedung, Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jalan Panyawungan Cileunyi Wetan Kab. Bandung 40393

Email : egi.pratama@pu.go.id, yushar.kadir@usbypkp.ac.id,
chandra.afriade@usbypkp.ac.id, anggaarieffgs@pu.go.id

Diterima : 28 Februari 2022; Disetujui : 28 April 2022

Abstrak

Pemeriksaan mutu beton terpasang dapat dilakukan dengan menggunakan metode destruktif maupun nondestruktif. Pengujian destruktif mutu beton terpasang yang umum dilakukan adalah pengambilan sampel core drill. Sementara itu pengujian nondestruktif dapat dilakukan dengan beberapa metode seperti hammer test, UPV test, pull out test, dll. Namun demikian pengujian nondestruktif tidak dapat langsung digunakan untuk mengkuantifikasi kuat tekan beton terpasang dilakukan pengkorelasian data secara valid. Dalam penelitian ini dilakukan pemeriksaan mutu beton terpasang dengan menggunakan pengujian destruktif yaitu pengambilan sampel core serta pengujian nondestruktif menggunakan hammer test. Studi kasus dilakukan pada bangunan objek kajian berupa bangunan dengan struktur rangka beton bertulang 4 lantai yang dibangun pada tahun 1987. Jumlah sampel hammer test yang diambil adalah sebanyak 32 buah, dimana 13 diantaranya dilengkapi dengan pengambilan sampel core. Dari 13 data irisan sampel core dan hammer test tersebut dilakukan penyusunan kurva strength relationship yang merupakan hubungan korelasi antara nilai Rebound hammer test terhadap kuat tekan beton. Dari persamaan korelasi yang diperoleh selanjutnya dapat dilakukan pengkonversian seluruh data nilai Rebound hasil hammer test terhadap kuat tekan beton terpasang sehingga jumlah sampel pengujian pada bangunan objek kajian menjadi lebih banyak jika dibandingkan dengan hanya menggunakan sampel core saja. Hasil analisis dan interpretasi terhadap data hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai rata-rata kuat tekan beton ekuivalen terpasang pada bangunan objek kajian adalah sebesar $\bar{f}_c = 12.21$ MPa, dengan nilai kuat tekan pada 10-persentil fractile yang dihitung menggunakan Tolerance factor method (Hindo dan Bergstorm, 1985) dan Alternate method (Bartlett dan MacGregor, 1995) berturut-turut adalah $f'_{c,eq.1} = 5.37$ MPa dan $f'_{c,eq.2} = 8.87$ MPa.

Kata Kunci: Pengujian destruktif, pengujian nondestruktif, core drill, hammer test, korelasi uji nondestruktif

Abstract

Assessment of in-place strength of concrete can be carried out using destructive or non-destructive methods. Taking core drill sample is common type of concrete destructive test. Meanwhile, nondestructive test can be conducted by several methods such as hammer test, UPV test, pull out test, etc. However, nondestructive test cannot be directly used to quantify the compressive in-place strength of the concrete unless a valid correlation is established. In this study, the concrete in-place strength were assessed utilizing core drill as destructive test and hammer test as nondestructive test. A case study was conducted on the object of the study in the form of a 4-story building with reinforced concrete structure built in 1987. The number of hammer test samples taken was 32 units, of which 13 were equipped with core sampling. From the 13 core and hammer test slice data, a strength relationship curve was established as the correlation relationship between the rebound hammer test value and the concrete compressive strength. From the correlation equation obtained, all the rebound value datas from the hammer test then can be converted to the in-place strength of the concrete so that there are more samples obtained in the study than using core samples only. The results of the analysis and interpretation of the test data show that the average value of the concrete equivalent in-place strength in the study object

building is $\bar{f}_c = 12.21 \text{ MPa}$, with its 10% fractile value calculated by Tolerance factor method (Hindo dan Bergstorm, 1985) and Alternate method (Bartlett dan MacGregor, 1995) respectively are $f'_{c,eq,1} = 5.37 \text{ MPa}$ and $f'_{c,eq,2} = 8.87 \text{ MPa}$.

Keywords: Destructive test, nondestructive test, core drill, hammer test, nondestructive test correlation

PENDAHULUAN

Beton bertulang merupakan salah satu material yang banyak digunakan sebagai sistem struktur infrastruktur sipil seperti bendungan, jembatan, sistem penahan tanah, serta bangunan gedung. Seiring dengan bertambahnya umur bangunan, terdapat kemungkinan bahwa material beton telah mengalami degradasi mutu. Oleh karena itu, diperlukan suatu pemeriksaan mutu beton pada bangunan eksisting, yang kebutuhannya akan semakin mendesak jika suatu bangunan eksisting akan dilakukan renovasi berkaitan dengan perubahan ataupun penambahan beban layan yang harus ditahan. Selain itu pemeriksaan mutu beton juga biasanya diperlukan untuk keperluan penyusunan Sertifikat Laik Fungsi (SLF) pada bangunan eksisting.

Pemeriksaan mutu beton terpasang suatu konstruksi ini bisa dilakukan dengan nondestruktif (NDT) dan destruktif. Beberapa contoh pengujian NDT antara lain adalah pengujian palu beton (*Hammer Test*), pengujian UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*), *Pull Out Test*, dll. Pengujian secara NDT sifatnya tidak mengukur langsung properti kuat tekan beton, melainkan mengukur beberapa properti tertentu pada material. Sementara itu pengujian destruktif yang umum dilakukan pada material beton adalah pengambilan sampel beton inti (*core drill*) yang memberikan nilai kuat tekan beton terpasang aktual.

Salah satu pedoman yang menerangkan cara pengujian mutu beton terpasang sekaligus metode dalam mengolah dan menganalisis data hasil pengujian destruktif dan nondestruktif diantaranya adalah ACI 214.4R-10 dan ACI 228.1R-19.

Dalam ACI 228.1R-19 dijelaskan bahwa untuk mengkuantifikasi perkiraan mutu beton terpasang menggunakan pengujian nondestruktif, perlu dilakukan pengkorelasikan data yang valid. Secara analisis statistik, hal ini dapat dilakukan dengan membuat kurva korelasi antara nilai hasil pengujian nondestruktif terhadap kuat tekan beton yang diperoleh dari hasil uji tekan sampel *core*.

Banyak peneliti melakukan penelitian terkait metode dalam memperkirakan mutu beton terpasang berdasarkan nilai angka pantul hasil uji palu beton (*hammer test*). Tegangan yang terjadi

pada spesimen beton mutu tinggi dapat mempengaruhi nilai angka pantul pada beton (Brozovsky dan Bodnarova 2019). Perbedaan dari komposisi spesimen beton yang diuji dapat mempengaruhi secara signifikan hasil perkiraan kuat tekan beton terpasang, oleh karena itu dianjurkan agar hubungan korelasi harus dibentuk untuk setiap pekerjaan beton yang berbeda (Atoyabi et al. 2019). Semakin besar nilai angka pantul palu beton menunjukkan perkiraan mutu beton terpasang yang lebih tinggi (Rahim, Shahidan, Lee, Bahari, Rahman, dan Ayob 2020). Pada umumnya, hubungan korelasi antara angka pantul hasil uji palu beton terhadap kuat tekan beton aktual dibentuk secara statistik dengan cara membuat garis regresi (Hajjeh 2012; Rojas-Henao et al. 2012; El Mir dan Nehme 2017; Xu dan Li 2018; Kocab et al. 2019).

Dalam penelitian ini, akan dilakukan pemeriksaan/asesmen mutu beton terpasang pada suatu bangunan dengan struktur rangka beton bertulang empat lantai yang dibangun pada tahun 1987. Pelaksanaan pemeriksaan mutu beton akan dilakukan dengan menggunakan kombinasi pengujian destruktif (pengambilan sampel *core drill*) dan pengujian nondestruktif dengan metode *hammer test*.

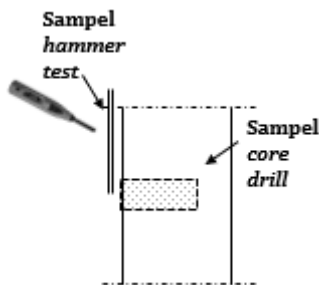
METODE

Penelitian ini diawali dengan penentuan lokasi dan jumlah sampel *core drill* maupun *hammer test* yang akan diambil dengan memperhatikan ketentuan jumlah minimum sampel serta pertimbangan sebaran titik-titik sampel pada struktur bangunan objek kajian. Jumlah sampel *hammer test* diambil sebanyak dua kali jumlah sampel *core drill* dimana seluruh sampel *core drill* dilengkapi dengan sampel *hammer test*.

Selanjutnya data hasil pengujian diobservasi untuk memastikan bahwa semua data yang diperoleh valid dan dapat digunakan. Pelaksanaan observasi data tersebut meliputi identifikasi *outlier* serta pengelompokan data berdasarkan *student's t-test*. Proses identifikasi *outlier* mengikuti prosedur yang ditentukan dalam ASTM E178-16.

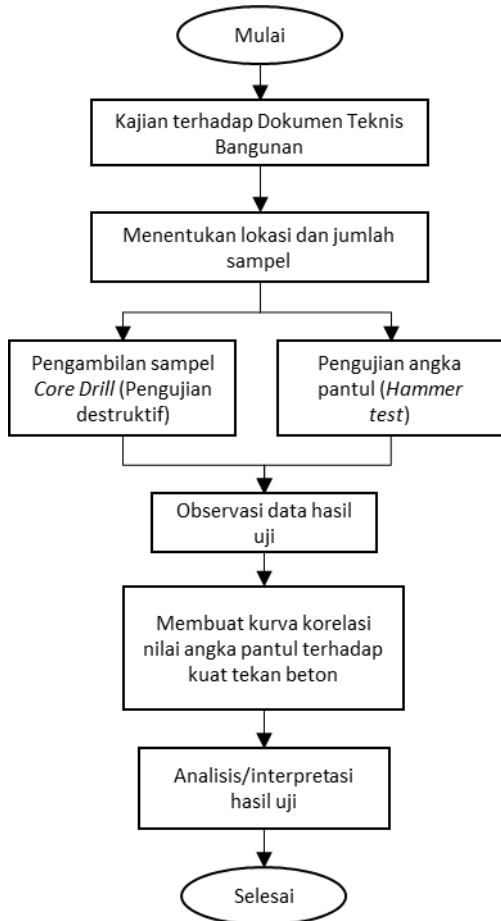
Setelah observasi data dilakukan, maka dilakukan penyusunan kurva *strength relationship* antara hasil

uji *hammer test* terhadap properti kuat tekan beton dengan cara membuat garis regresi hubungan korelasi nilai rata-rata angka *Rebound hammer test* terhadap nilai kuat tekan beton dari hasil uji kuat tekan sampel *core drill* pada titik/lokasi yang bersamaan. Hal ini diilustrasikan pada gambar 1.



Gambar 1 Ilustrasi Lokasi Sampel *Core Drill* dan *Hammer Test* pada Lokasi yang Beririsan untuk Membuat Kurva *Strength Relationship*

Dengan diketahuinya kurva *strength relationship* maka seluruh nilai hasil *hammer test* dapat dikorelasikan terhadap kuat tekan beton. Dengan demikian akan diperoleh jumlah sampel perkiraan



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

kuat tekan beton yang lebih banyak dibandingkan jika hanya mengandalkan jumlah sampel *core drill* saja.

Seluruh data nilai hasil perkiraan mutu beton terpasang (*in-place strength*) kemudian dianalisis untuk menentukan nilai 10-persentil *fractile* (nilai kuat tekan beton *lower-bound*) berdasarkan kaidah dalam ACI 214.4R-10 dan ACI 228.1R-19. Secara umum alur penelitian tersebut dapat diilustrasikan seperti pada gambar 2.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Sampel *Core*

Pengambilan sampel *core drill* dilakukan sesuai metode yang ditentukan dalam SNI 2492:2018. Dalam penelitian ini diambil 13 buah sampel *core* yang terdiri atas 7 sampel pada komponen kolom dan 6 sampel komponen balok. Hasil uji tekan tiap sampel *core* menghasilkan nilai kuat tekan *core*, atau disebut f_{core} . Identifikasi *outlier* terhadap data tersebut dilakukan sesuai metode yang dijelaskan dalam ASTM E178-16. Dari hasil pemeriksaan tersebut diketahui tidak ada *outlier* pada seluruh data hasil uji tekan sampel *core* sehingga semua data dapat digunakan. Uraian pemeriksaan data *outlier* dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1 Pemeriksaan Data *Outlier* pada Sampel *Core*

No.	f_c core (MPa)	T_n	<i>Outlier</i>
1	3.88	1.27	No
2	10.52	0.09	No
3	11.12	0.21	No
4	6.57	0.72	No
5	5.67	0.90	No
6	9.03	0.22	No
7	16.38	1.28	No
8	7.03	0.63	No
9	9.71	0.08	No
10	18.84	1.78	No
11	8.52	0.32	No
12	5.63	0.91	No
13	18.38	1.69	No

Mutu beton rencana pada bangunan objek kajian tidak diketahui karena dokumen teknis bangunan tidak tersedia sehingga tidak diketahui apakah komponen balok dan kolom direncanakan menggunakan mutu beton yang sama atau berbeda. Untuk mengetahui apakah data kekuatan beton sampel *core* memiliki kesamaan secara statistik,

dapat dilakukan analisis *student's t-test*. Analisis tersebut dilakukan dengan cara menghitung nilai statistik *t* yang merepresentasikan perbandingan nilai rata-rata dan standar deviasi dari masing-masing kelompok data yang diuji, sesuai Persamaan (1) dan (2). Hasil perhitungan nilai *t* ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2 Analisis *Student's T-Test* pada Sampel *Core Drill*

	Balok	Kolom
Mean (MPa)	11.46	8.93
Variance	27.02	22.33
Stdv	5.20	4.73
n	6	7
<i>dof</i> = $n_1 + n_2 - 2 = 11$		
<i>t</i> = 0.957		
<i>S_p</i> = 4.735		

Mengacu pada tabel distribusi nilai *critical values of t* seperti ditunjukkan pada tabel 3, dengan jumlah *dof* sebesar 11 dan mengambil nilai *significanel* sebesar 5% maka diperoleh nilai *critical values* adalah sebesar 2.201. Karena nilai $t = 0.957 < Critical\ values = 2.201$, maka dapat disimpulkan bahwa secara statistik tidak ada perbedaan yang signifikan antara data kelompok kuat tekan balok dan kolom, sehingga kedua data tersebut dapat digabung.

$$t = \frac{|\bar{x}_2 - \bar{x}_1|}{S_p \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \dots\dots\dots (1)$$

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{(n_1 + n_2 - 2)}} \dots\dots\dots (2)$$

Tabel 3 *t Distribution : Critical Values of t*

<i>Degrees of freedom</i>	<i>Significance Level</i>					
	20% (0.20)	10% (0.10)	5% (0.05)	2% (0.02)	1% (0.01)	0.1% (0.001)
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.941
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073

dst

Selanjutnya dari nilai kuat tekan sampel *core* tersebut dihitung nilai kuat tekan beton terpasang ekuivalen, *f_c*, menggunakan Persamaan (3) sesuai kaidah dalam ACI 214.4R-10. Pada persamaan tersebut, *F_{l/d}*, *F_{dia}*, dan *F_{mc}*, dan *F_d* berturut-turut adalah faktor koreksi kekuatan untuk pengaruh rasio *l/d*, diameter, kondisi kelembaban, serta pengaruh kerusakan sampel yang timbul akibat proses pengeboran. Hasil perhitungan kuat tekan beton terpasang ekuivalen, *f_c*, ditunjukkan pada tabel 4. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai rata-rata *f_c* dari keseluruhan sampel adalah 10.97 MPa.

$$f_c = F_{l/d} F_{dia} F_{mc} F_d f_{core} \dots\dots\dots (3)$$

Tabel 4 Hasil Uji Tekan Sampel *Core* dan Perhitungan Nilai Kuat Tekan Beton Terpasang Ekuivalen, *f_c*

No.	Komponen	Lantai	Lokasi	<i>f_{core}</i> (MPa)	<i>l/d</i>	<i>F_{l/d}</i>	<i>F_{dia}</i>	<i>F_{mc}</i>	<i>F_d</i>	<i>f_c</i> (MPa)
1	Kolom	4	2-D	3.88	1.79	0.99	1.03	1.00	1.06	4.21
2	Kolom	4	2-C	10.52	1.80	0.99	1.03	1.00	1.06	11.43
3	Balok	Atap	D-2,3	11.12	1.77	0.99	1.03	1.00	1.06	12.06
4	Kolom	3	2-D	6.57	1.81	1.00	1.03	1.00	1.06	7.15
5	Balok	Atap	C-2,3	5.67	1.79	0.99	1.03	1.00	1.06	6.15
6	Kolom	3	2-C	9.03	1.75	0.99	1.03	1.00	1.06	9.79
7	Balok	4	D-2,3	16.38	1.79	0.99	1.03	1.00	1.06	17.79
8	Balok	4	E,F-2	7.03	1.80	0.99	1.03	1.00	1.06	7.63
9	Balok	3	D-2,3	9.71	1.79	0.99	1.03	1.00	1.06	10.54
10	Balok	2	D-2,3	18.84	1.82	1.00	1.03	1.00	1.06	20.49
11	Kolom	2	2-D	8.52	1.79	0.99	1.03	1.00	1.06	9.25
12	Kolom	3	2-F	5.63	1.79	0.99	1.03	1.00	1.06	6.12
13	Kolom	1	2-D	18.38	1.79	0.99	1.03	1.00	1.06	19.96
Mean										10.97
Min										4.21
Max										20.49
Stdev										5.34

Tabel 5 Data Nilai Angka *Rebound* Hasil *Hammer Test*

No.	R rata2	Komponen	Lt	Lokasi	No.	R rata2	Komponen	Lt	Lokasi
1	31.70	Kolom	4	D-2	17	38.60	Balok	4	D-2,3
2	35.79	Kolom	4	A-2	18	34.58	Kolom	3	C-2 (2)
3	26.85	Kolom	4	C-2	19	39.85	Balok	3	D-2,3
4	32.58	Balok	Atap	D-2,3	20	39.53	Balok	3	D-1,2
5	36.42	Balok	Atap	C-1,2	21	41.25	Balok	3	D,E-2
6	35.00	Kolom	4	H-1	22	37.89	Balok	3	C,D-2
7	33.56	Balok	Atap	H,G-1	23	44.63	Kolom	2	A-2
8	34.00	Balok	Atap	C-2,3	24	35.76	Kolom	2	D-2
9	37.18	Balok	4	D-1,2	25	45.29	Kolom	1	D-2
10	37.30	Kolom	3	F-1	26	42.65	Kolom	1	E-2
11	29.65	Kolom	3	F-2	27	44.53	Balok	2	D-1,2
12	35.45	Balok	4	F-1,2	28	41.63	Balok	2	D-2,3
13	37.17	Balok	4	D,E-2	29	44.77	Kolom	2	C-2
14	36.24	Balok	4	E,F-2	30	28.53	Kolom	3	E-2
15	39.35	Kolom	3	D-2 (2)	31	41.19	Balok	2	F-2,3
16	36.18	Balok	4	F,G-1	32	45.82	Kolom	1	G-2

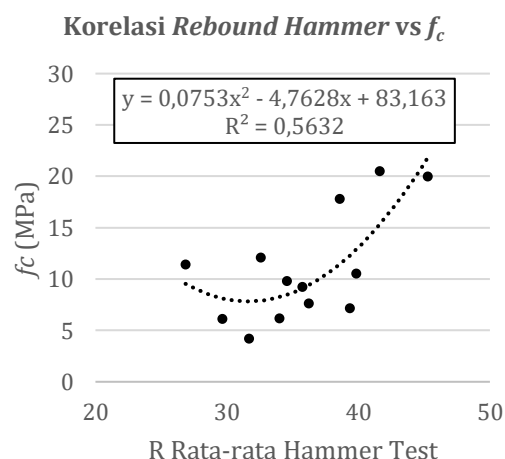
Hasil *Hammer Test*

Pengujian nilai pantul permukaan beton/*hammer test* dilakukan terhadap 32 titik sampel yang meliputi komponen balok dan kolom dimana 13 diantaranya merupakan titik pengambilan sampel *core drill*. Pelaksanaan *hammer test* dilakukan sesuai metode dalam SNI ASTM C805:2012. Pemeriksaan data *outlier* dilakukan dengan cara yang sama seperti yang dilakukan terhadap sampel *core drill*. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa tidak ada *outlier* pada data hasil *hammer test*. Data hasil *hammer test* tersebut dapat dilihat pada tabel 5.

Korelasi Nilai *Rebound Hammer* terhadap Kuat Tekan Beton

Sebagaimana dijelaskan dalam ACI 228.1R-19, agar nilai hasil pengujian beton secara nondestruktif dapat digunakan untuk memperkirakan mutu beton terpasang secara kuantitatif, maka perlu dibuat suatu kurva *strength relationship*. Dengan menggunakan irisan data nilai kuat tekan sampel *core* dan nilai *Rebound hammer test* pada titik yang sama, dapat disusun kurva *strength relationship* berupa garis regresi/korelasi hubungan antara nilai *Rebound hammer test* terhadap nilai kuat tekan beton. Dalam penelitian ini, diperoleh kurva korelasi berupa garis regresi nonlinear kuadratik seperti ditunjukkan pada gambar 3 dimana sumbu-x menunjukkan nilai rata-rata *Rebound hammer* tiap titik sampel dan sumbu-y menunjukkan nilai f_{core} yang sudah dikonversi menjadi f_c menggunakan Persamaan (3).

Selanjutnya dari kurva korelasi/persamaan regresi yang telah diperoleh, maka seluruh data nilai



Gambar 3 Korelasi Nilai *Rebound Hammer* vs f_c

Rebound hammer test dapat dikonversikan menjadi nilai kuat tekan beton sebagaimana ditunjukkan pada tabel 6. Dari seluruh data nilai *Rebound hammer test* yang sudah dikorelasikan terhadap kuat tekan beton, diperoleh nilai rata-rata perkiraan f_c sebesar 12.21 MPa.

Interpretasi Hasil Pengujian

Analisis atau interpretasi hasil pengujian mutu beton terpasang di lapangan tidak hanya sebatas perhitungan nilai rata-rata saja. Data hasil pengujian tersebut dapat dianalisis lebih jauh salah satunya dengan menentukan nilai *lower-bound* atau 10-persentil *fractile* yang ekuivalen dengan properti mutu beton rencana *specifeied*, f_c' .

Dalam penelitian ini perhitungan nilai mutu beton *lower-bound* mengacu pada ACI 214.4R-10 yang

Tabel 6 Perkiraan Nilai f_c Berdasarkan Nilai *Rebound Hammer*

No.	R rata2	f_c (MPa)	No.	R rata2	f_c (MPa)
1	31.70	7.85	17	38.60	11.51
2	35.79	9.16	18	34.58	8.51
3	26.85	9.57	19	39.85	12.94
4	32.58	7.92	20	39.53	12.56
5	36.42	9.58	21	41.25	14.83
6	35.00	8.71	22	37.89	10.80
7	33.56	8.13	23	44.63	20.59
8	34.00	8.27	24	35.76	9.14
9	37.18	10.17	25	45.29	21.92
10	37.30	10.27	26	42.65	17.00
11	29.65	8.14	27	44.53	20.39
12	35.45	8.95	28	41.63	15.39
13	37.17	10.16	29	44.77	20.86
14	36.24	9.45	30	28.53	8.57
15	39.35	12.35	31	41.19	14.73
16	36.18	9.41	32	45.82	23.02
			Mean	12.21	
			Min	7.85	
			Max	23.02	
			Stdev	4.64	

didalamnya menjelaskan dua metode analisis yaitu *Tolerance factor method* (Hindo dan Bergstorm, 1988) yang diuraikan pada Pasal 9.4.1 dan *Alternate method* (Bartlett dan MacGregor, 1995) yang diuraikan dalam Pasal 9.4.2. Dalam ACI 214.4R-10 nilai mutu *lower-bound* ini disebut dengan terminologi kuat tekan beton desain ekuivalen, $f'_{c,eq}$. Dalam proses perhitungan $f'_{c,eq}$ untuk kedua metode diperlukan nilai standar deviasi sampel, s_c serta standar deviasi yang timbul dari pengaruh empat faktor koreksi yang digunakan perhitungan nilai kuat tekan beton ekuivalen (f_c), yang dinotasikan dengan s_a . Perhitungan s_a dan s_c ditunjukkan pada tabel 7.

Perhitungan nilai $f'_{c,eq}$ berdasarkan *Tolerance Factor Method* diuraikan pada tabel 8. Parameter K dan Z diketahui dari tabel 9.2 dan tabel 9.3 ACI 214.4R-10 dengan mengambil angka tingkat kepercayaan 75%. Pengambilan angka tingkat kepercayaan tersebut dilakukan berdasarkan rekomendasi Hindo dan Bergstorm (1985) bahwa untuk bangunan biasa (*ordinary structure*) maka cukup mengambil tingkat kepercayaan 75%. Dari hasil perhitungan diperoleh nilai $f'_{c,eq}$ berdasarkan *Tolerance Factor Method* adalah sebesar 5.37 MPa.

Sementara itu perhitungan nilai $f'_{c,eq}$ berdasarkan *Alternate Method* diuraikan pada tabel 9. Pendekatan yang dilakukan pada metode ini adalah menghitung terlebih dahulu nilai perkiraan *lower-*

bound dari rata-rata data kuat tekan beton, $(\bar{f}_c)_{CL}$ kemudian dikalikan dengan suatu faktor C berdasarkan Tabel 9.5 ACI 214.4R-10. Nilai tingkat kepercayaan yang digunakan dalam metode ini adalah 90% karena mempertimbangkan rekomendasi dari Bartlett dan MacGregor (1995) untuk kondisi konservatif dan penggunaan umum (*general use*). Dari hasil perhitungan diperoleh nilai $f'_{c,eq}$ berdasarkan *Alternate Method* adalah sebesar 8.87 MPa. Rekap data statistik dan analisis hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 10. Dalam penelitian ini, nilai f_c rata-rata dapat diambil dari hasil *hammer test* yang sudah dikorelasikan terhadap kuat tekan beton. Penggunaan nilai dari hasil *hammer test* ini memberikan keuntungan yaitu jumlah sampel yang lebih banyak sehingga lebih mewakili kondisi beton dari objek kajian.

Dari kedua metode perhitungan $f'_{c,eq}$ yang digunakan, terlihat bahwa *Alternate Method* memberikan hasil yang lebih besar. Berkaitan dengan hal ini, Bartlett dan MacGregor (1995) menjelaskan bahwa *Tolerance Factor Method* bisa jadi terlalu konservatif karena pengujian sampel *core* di lapangan menaksir terlalu tinggi variabilitas kuat tekan beton terpasang yang sesungguhnya. Dengan demikian $f'_{c,eq}$ menjadi terlalu rendah karena parameter s_c yang digunakan terlalu tinggi.

Tabel 7 Parameter s_a dan s_c untuk Menghitung $f'_{c,eq}$

Parameter s_a dan s_c		
Keterangan Sampel :	Hasil korelasi hammer test	
Standar deviasi sampel, s_c (MPa)	=	4.64
Berdasarkan Tabel 9.1 ACI 214.4R-10		
Koefisien variansi, $V_{l/d}$	l/d	= 1.75
	$V_{l/d}$	= 0.16%
Koefisien variansi, V_{dia}	=	5.90%
Koefisien variansi, V_{mc}	=	2.50%
Koefisien variansi, V_d	=	2.50%
Standar deviasi pengaruh koreksi, s_a	=	0.84

Tabel 8 Perhitungan $f'_{c,eq}$ dengan *Tolerance Factor Method*

Nilai $f'_{c,eq}$ (<i>Tolerance factor method</i>)		
ACI 214.4R-10 (Ch 9.4.1)		
Keterangan Sampel :	Hasil korelasi hammer test	
Utk n = 32	, tingkat kepercayaan	75% , K = 1.47
Z-factor (Natrella, 1963)		, Z = 0.67
$f'_{c,eq} = \bar{f}_c - \sqrt{(Ks_c)^2 + (Zs_a)^2}$ (MPa) = 5.37		

Tabel 9 Perhitungan $f'_{c,eq}$ dengan *Alternate Method*

Nilai $f'_{c,eq}$ (<i>Alternate method</i>)	
ACI 214.4R-10 (Ch 9.4.2)	
Keterangan Sampel :	<i>Hasil korelasi hammer</i>
Untuk n = 32, tingkat kepercayaan 90%,	T = 1.32
Asumsi : Many batches of concrete,	C = 0.83
Rekomendasi Bartlett untuk General Use,	Z = 1.28
$(\bar{f}_c)_{CL} = \bar{f}_c - \sqrt{\frac{(Ts_c)^2}{n} + (ZS_a)^2}$ (MPa)	= 10.69
$f'_{c,eq} = C(\bar{f}_c)_{CL}$ (MPa)	= 8.87

Tabel 10 Rekapitulasi Data Hasil Analisis Pengujian

	f_c CD* (MPa)	f_c HT** (MPa)	Catatan
n sampel	13	32	<i>Hasil hammer test diperoleh dari kurva korelasi nilai R rata2 terhadap kuat tekan.</i>
Maks	20.49	23.02	
Min	4.21	7.85	
Std. Dev.	5.34	4.64	
Rata-rata	10.97	12.21	
Analisis $f'_{c,eq}$ (Nilai 10-persentil <i>fractile</i>)			
$f'_{c,eq,1}$	-	5.37	ACI 214R-10 (Ch 9.4.1)
$f'_{c,eq,2}$	-	8.87	ACI 214R-10 (Ch 9.4.2)

Keterangan :

* Rekapitulasi nilai f_c berdasarkan sampel *core drill*

** Rekapitulasi nilai f_c berdasarkan sampel *hammer test*

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian *core drill* dan *hammer test*, dapat diambil nilai kuat tekan beton ekivalen terpasang rata-rata sebesar $\bar{f}_c = 12.21$ MPa dengan nilai 10-persentil *fractile* yang dihitung berdasarkan *Tolerance factor method* dan *Alternate method* masing-masing sebesar $f'_{c,eq,1} = 5.37$ MPa dan $f'_{c,eq,2} = 8.87$ MPa. Dari proses observasi data seluruh hasil pengujian, diketahui tidak ada data *outlier* sehingga semua data dapat digunakan. Hasil pengujian menunjukkan nilai mutu beton eksisting pada bangunan objek kajian tergolong cukup rendah sehingga diperlukan analisis struktur bangunan lebih lanjut menggunakan data properti material beton hasil dari penelitian ini untuk menjamin keandalan strukturnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat terlaksana dengan baik berkat bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu peneliti

mengucapkan terimakasih kepada Balai Bahan dan Struktur Bangunan Gedung, Kementerian PUPR dan segenap tim teknis pelaksana investigasi lapangan yang telah berkontribusi dalam pengumpulan data dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI. 2010. ACI 214.4R-10 Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results. Michigan: ACI.
- ACI. 2019. ACI 228.1R-19: Report on Methods for Estimating In-Place Concrete Strength. ACI 228.1R-19: Report on Methods for Estimating In-Place Concrete Strength. Michigan: ACI.
- ASTM. 2016. ASTM E178-16 Standard Practice for Dealing With Outlying Observations. Pennsylvania : ASTM.
- Atoyebi, Ayanrinde, Oluwafemi. 2019. "Reliability Comparison of Schmidt Rebound Hammer as a Non-Destructive Test wit Compressive Strength Tests for different Concrete Mix." International Conference on Engineering for Sustainable World. doi:10.1088/1742-6596/1378/3/032096
- Bartlett, F. Michael, dan James G. MacGregor. 1994. "Effect of Core Length-to-Diameter Ratio on Concrete Core Strengths." ACI Materials Journal 91 (4): 339-48. <https://doi.org/10.14359/4042>.
- Brozovsky, Bodnarova, Brozovsky jr. 2019 "Rebound Hammer Tests of High-Strengt Concrete: Effects of Internal Stress and the Shape of the Impact Area of the Tes Specimens on the Measurement Results."
- BSN. 2019. SNI 2847 : 2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung. Jakarta: BSN.
- BSN. 2012. SNI ASTM C805:2012 Metode Uji Angka Pantul Beton Keras (ASTM C 805-02, IDT). Jakarta: BSN.
- BSN. 2018. SNI 2492:2018 Metode Pengambilan Dan Pengujian Inti Beton Hasil Pemboran Dan Balok Beton Hasil Pemotongan (ASTM C42/C42M-13, IDT). Jakarta: BSN.
- Cook, James E, David J Akers, William L Barringer, F Michael Bartlett, Jerrold L Brown, Alejandro Graf, dan Jerry Parnes. 2003. "Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results." Society, 1-16.
- El Mir, A., dan Nehme, S. G. (2017). "Repeatability of the rebound surface hardness of concrete with alteration of concrete parameters."

- Construct. Build. Mater. 131: 317–326.
doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.085
- Hindo, K.R., dan W.R Bergstorm. 1985. “Statistical Evaluation of the In-Place Compressive Strength of Concrete.” *Concrete International* 7 (2, Feb): 44–48.
- Kocáb, D., Misák, P., dan Cikrle, P. (2019). “Characteristic curve and its use in determining the compressive strength of concrete by the rebound hammer test.” *Materials* 12 (17): 2705. doi:10.3390/ma12172705
- Parman, Vatukiya, Zala, dan Gohil. 2017. “NON-DESTRUCTIVE TESTING BY REBOUND HAMMER METHOD.” *International Journal for Research Trends and Innovation Vol 2, Issue 4. Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(1): 215–221. <https://doi.org/10.3311/PPci.11966>
- Rahim, Shahidan, Onn, Bahari, Rahman, dan Ayob. 2020. “The Behavior of Non-Destructive Test for Different Grade of Concrete.” *The International Journal of Integrated Engineering Vol 12 No 9* : 1-8. <https://doi.org/10.30880/ijie.2020.12.09.001>
- Rastandi, Sjah, Handika, Sentosa, dan Sunandar. 2013. “Assessment Mutu Beton Eksisting Berdasarkan SNI 2847 : 2013 , ACI 318-11, ACI 214.4R-10 Dan ACI 228.1R-03.”
- Rojas-Henao, L., Fernández-Gómez, J., dan López-Agüí, J. C. 2012. “Rebound hammer, pulse velocity, and core tests in self-consolidating concrete.” *ACI Mater. J.* 109 (2): 235–243. doi:10.14359/51683710
- Shariati, Ramli-Sulong, Arabnejad, dan Sinaei. 2011. “Assessing the strength of reinforced concrete structures through Ultrasonic Pulse Velocity and Schmidt Rebound Hammer tests.” *Scientific Research and Essays Vol. 6(1)*: 213-220. <http://www.academicjournals.org/SRE>
- Taranza dan Sanchez. 2014. “Reliability of Rebound Hammer Test in Concrete Compressive Strength Estimation.” *Int'l Journal of Advances in Agricultural & Environmental Engg. (IJAAEE) Vol. 1*. <http://dx.doi.org/10.15242/IJAAEE.C1114040>
- Xu, T., dan Li, J. 2018. “Assessing the spatial variability of the concrete by the rebound hammer test and compression test o drilled cores.” *Construct. Build. Mater.* 188: 820–832. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.138.