

Analisis Kuat Tekan Berdasarkan Nilai Pantulan Palu Menggunakan Spesimen Kubus Beton Agregat Lokal Bali

I Gusti Ngurah Eka Partama^{*}, Ni Kadek Astariani, I Gusti Made Sudika, Ni Putu Silvi

Prodi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Ngurah Rai,
Jln. Padma, Tembau, Penatih, Denpasar Tinur, Denpasar, Bali, Indonesia 80283

Abstrak

Terdapat dua metode pengujian kuat tekan beton yaitu *Non-Destructive Test (NDT)* dan *Destructive Test (DT)*. DT dilakukan dengan *Compression Testing Machine (CTM)* sedangkan NDT dapat menggunakan *Hammer Test (HT)*. Agregat lokal Bali mempunyai sifat yang spesifik, sehingga metode pengujian yang lazim perlu disesuaikan. Spesimen yang dicetak di lokasi pekerjaan diuji tekan menggunakan CTM di laboratorium pada umur tertentu yang diinginkan, sehingga perlu dimobilisasi untuk mengujinya. Lokasi pekerjaan yang jauh menjadi kendala tatkala informasi kuat tekan harus ditetapkan secepatnya. Alat HT bentuknya kecil, ringan, mudah dioperasikan, hasilnya cepat namun dianggap kurang akurat perlu dioptimalkan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan formulasi memberikan informasi kuat tekan (f'_{ck}) yang representatif, dilakukan dengan metode eksperimen menggunakan spesimen kubus $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$. Nilai pantul (R_n) ditentukan berdasarkan rerata 3 sisi yang tidak dalam satu sumbu, sedangkan f'_{ck} ditentukan menggunakan CTM. Korelasi keduanya ditentukan berdasarkan analisa regresi, untuk r^2 terbesar, f'_{ck} selalu positif serta korelasi R_n - f'_{ck} yang selalu selaras adalah formulasi yang direkomendasikan. Kuat tekan beton agregat lokal Bali dapat ditentukan dengan HT ($\alpha=0^\circ$), spesimen kubus $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ dan formulasi $f'_{ck}=0,0644R_n^2-0,9261R_n+6,0725$; R_n =rerata 5 nilai pantul pada 3 sisi kubus yang tidak satu sumbu. Formulasi tersebut untuk spesimen kubus pada umur 3-28 hari dan diatas 28 hari perlu kajian tersendiri.

Kata kunci: Agregat lokal Bali; beton; hammer test; kuat tekan; non-destructive test

Abstract

[**Title: Compressive Strength Analysis Based on Hammer Rebound Number Using Local Balinese Aggregate Concrete Cube Specimens**] There are two methods for testing concrete compressive strength are the *Non-Destructive Test (NDT)* and *Destructive Test (DT)*. DT uses a *Compression Testing Machine (CTM)* while NDT can use a *Hammer Test (HT)*. Local Bali aggregates have specific properties, so common testing methods need to be adapted. Specimens printed at the job site are compressed using CTM in the laboratory at a certain desired age, so they must be mobilized to test them. Remote work locations become an obstacle when compressive strength information must be determined immediately. The HT tool is small, light, and easy to operate, results are fast but is considered less accurate and needs to be optimized. This research aims to obtain a formulation that provides representative compressive strength (f'_{ck}) information, carried out using experimental methods using $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ cube specimens. The reflectance value (R_n) is determined based on the average of 3 sides that are not on the same axis, while f'_{ck} is determined using CTM. The correlation between the two is determined based on regression analysis, for the largest r^2 , f'_{ck} is always positive and the R_n - f'_{ck} correlation is always in harmony is the recommended formulation. The compressive strength of Balinese local aggregate concrete can be determined using HT ($\alpha=0$), $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ cubes specimen and the formulation $f'_{ck}=0.0644R_n^2-0.9261R_n+6.0725$; R_n =average of 5 reflectance values on 3 sides of a cube that are not on the same axis. This formulation for cube specimens

^{*}) Penulis Korespondensi.

E-mail: epartama@gmail.com

aged 3-28 days and above 28 days requires a separate study.

Keywords: Balinese local aggregate; concrete; compressive strength; hammer test; non-destructive tests

1. Pendahuluan

Pengujian mutu beton merupakan hal yang perlu dilakukan untuk menjaga mutu beton. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa beton yang dikerjakan sudah memenuhi syarat kekuatan yang ditentukan. Pengujian yang sering dilakukan meliputi pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur dan kuat geser.

Dua metode pengujian untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton yaitu pengujian tidak merusak atau *Non-Destructive Test* (NDT) dan pengujian merusak atau *Destructive Test* (DT). DT dilakukan dengan menggunakan mesin uji tekan atau *Compression Testing Machine* (CTM) dengan menyiapkan spesimen silinder, kubus beton segar atau silinder hasil pengeboran inti atau *Core Drilled* (CD) untuk beton yang telah mengeras. NDT dapat dilakukan dengan menggunakan alat uji pantul palu atau *Hammer Test* (HT), uji rambat gelombang ultrasonik atau *Ultrasonic Pulse Velocity Test* (UPV Test) atau kombinasi keduanya.

Beton yang diproduksi di Bali didominasi oleh agregat lokal Bali terutama pasir dan kerikil alami. Agregat lokak ini hasil erupsi Gunung Agung yang memiliki berat jenis lebih kecil dan penyerapan air yang lebih tinggi dibandingkan dengan agregat daerah lain di Indonesia, misalnya dari Jawa dan Kalimantan (Setyawan et al., 2016). Sifat agregat penyusun beton sejatinya unik untuk setiap sumber agregat (*quarry*). Oleh karena itu, pengujian dengan metode NDT maupun DT untuk beton agregat lokal Bali perlu dikaji secara spesifik.

Proyek-proyek pemerintah maupun swasta dari skala kecil sampai besar di Bali banyak dilaksanakan di lokasi yang jauh dari kota. Beton yang dikerjakan harus tetap dievaluasi mutunya, sehingga saat dilakukan asesmen kelayakan spesimen yang dicetak di lokasi pekerjaan diuji tekan menggunakan CTM di laboratorium pada umur tertentu yang diinginkan antara lain: 3, 7, 14, 21 dan 28 hari, sehingga spesimen perlu dimobilisasi untuk mengujinya. Lokasi pekerjaan yang jauh akan menjadi kendala tatkala informasi kuat tekan harus segera

diketahui. Kondisi ini menyebabkan DT dengan CTM menjadi tidak efektif. NDT dengan HT dan atau UPV Test adalah alternatif untuk menjawab kendala dalam DT menggunakan CTM, karena alat HT dan UPV Test relatif kecil, ringan, mudah dioperasikan sehingga mudah dimobilisasi (*portable*), berdampak pada biaya penjaminan mutu lebih murah serta mampu memberi informasi kuat tekan lebih cepat (Saremi et al., 2022).

Metode NDT dengan HT sampai saat ini hasilnya belum akurat karena hanya memberikan informasi nilai kuat tekan pada permukaan beton sehingga hasil pengujian HT tidak direkomendasikan untuk menjadi dasar penentuan nilai kuat tekan beton. Hasil HT yang dianggap tidak akurat namun memiliki kemudahan dalam mobilisasi dan kecepatan hasil diupayakan untuk dioptimalkan, agar hasilnya representatif. Upaya tersebut dilakukan dengan mencari korelasi antara kuat tekan CTM dan nilai pantul palu (*Rebound Number*) hasil HT.

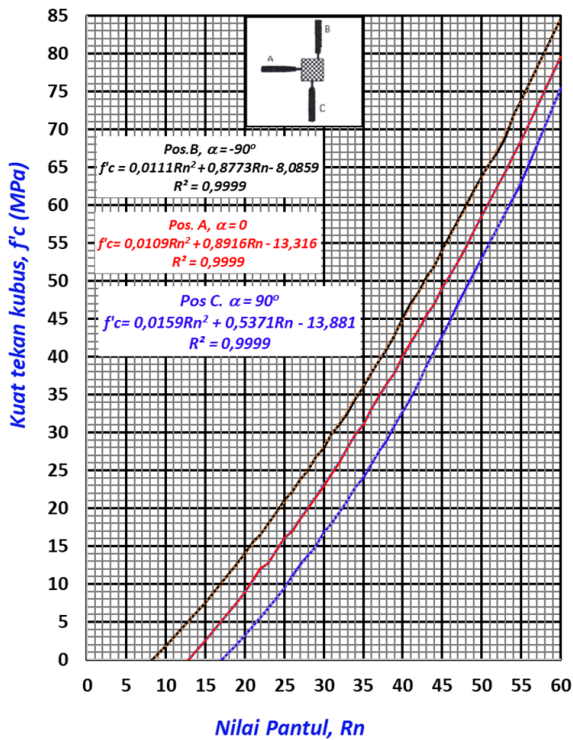
Korelasi nilai kuat tekan dengan nilai pantul telah lama dan banyak dikaji untuk berbagai parameter yang memengaruhinya. Tabel 1 menyajikan formulasi hasil beberapa kajian dalam kurun waktu 10 tahun terakhir yang mempresentasikan kuat tekan dalam fungsi nilai pantul palu.

American Standart Testing Material (ASTM) memberikan grafik korelasi kuat tekan dan nilai pantul untuk spesimen kubus seperti pada Gambar 1 yang sudah dimodifikasi untuk dapat disajikan dalam persamaan regresi. Grafik ASTM lazimnya digunakan pada beton dengan umur melampaui 28 hari, sedangkan saat pelaksanaan kuat tekan diharapkan bisa diketahui pada kisaran 3-14 hari untuk mengontrol mutu beton yang disyaratkan dalam spesifikasi teknis. Penggunaan HT untuk menentukan kuat tekan dibawah 28 hari dipandang perlu dilakukan kajian tersendiri sehingga hasilnya representatif.

Serangkaian eksperimen yang dilakukan bertujuan untuk menyiapkan data kuat tekan dan nilai pantulan palu. Data kuat tekan dan nilai pantulan palu selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan korelasi antara keduanya

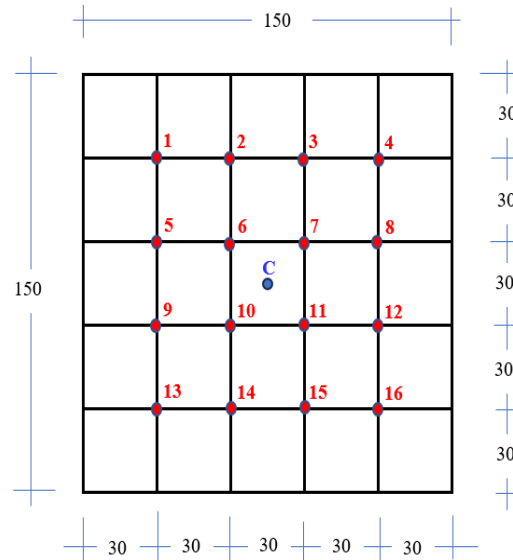
Tabel 1. Korelasi $f'ck$ dan Rn penelitian 10 tahun terakhir

Peneliti	Persamaan regresi	Jenis
Kumavat et al., 2021	$f'ck=0,9807Rn+2,6124$	Linear
Balakrishna et al., 2017	$f'ck=2,6723e^{0,0479Rn}$	Eksponensial
Brozovsky & Bodnárová, 2016	$f'ck=0,0107Rn^2+0,9073Rn-12,935$	Kwadratik
Szilágyi et al., 2015	$f'ck=0,1104Rn^{1,739}$	Geometrik
Brozovsky, 2014	$f'ck=5,1523e^{0,0521Rn}$	Eksponensial
Samson et al., 2014	$f'ck=0,011Rn^2+1,282Rn-2,844$	Kwadratik
Brencich et al., 2013	$f'ck=0,0152Rn^{2,119}$	Geometrik



Gambar 1. Korelasi $f'c$ dan Rn menurut ASTM

yang dinyatakan dalam suatu formulasi matematis. Formulasi ini diharapkan dapat digunakan untuk



Gambar 2. Titik pantul *Hammer Test*

menentukan kuat tekan berdasarkan nilai pantulan palu pada spesimen kubus beton 3-28 hari.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini dilaksanakan dengan metode eksperimen yang bertujuan untuk mendapatkan kuat tekan dan nilai pantul *hammer test* menggunakan spesimen kubus beton 15x15x15 cm³ yang dicetak dan dirawat sampai perendaman 1 hari sebelum diuji (Badan

Tabel 2. Jenis dan sifat material komponen spesimen

Material	Jenis	Sifat material	Besaran
Semen	PCC	Berat Jenis	3,15
Pasir	Pasir alam	Zona gradasi	I
		MHB	3,39
		Berat Jenis	2,50
		penyerapan	2,35%
Kerikil	Batu pecah	Butir maks.	20 mm
		MHB	6,42
		Berat Jenis	2,58
		penyerapan	3,67%

Tabel 3. Batasan penentuan jumlah titik pantul

No.	Jumlah titik pantul	Keterangan
1	16	17 nilai pantul yang diambil, abaikan nilai pantul pusat
2	10	17 nilai pantul yang diambil, abaikan nilai pantul pusat serta 3 nilai pantul tertinggi dan 3 terendah
3	8	Nilai pantul pada titik nomor 1,4,6,7,10,11, 13 dan 16
4	5	Nilai pantul pada titik nomor 6,7,10,11 dan C
5	4	Nilai pantul pada titik nomor 6,7,10 dan 11
6	1	Nilai pantul pada C

Standardisasi Nasional, 2011), (Badan Standardisasi Nasional, 2018). Setiap umur pengujian disiapkan 3 spesimen, sehingga jumlah spesimen yang dicetak sebanyak 15 buah, diuji pada umur 3, 7, 14, 21 dan 28 hari. Lokasi titik pantul disajikan pada Gambar 1, dengan bidang pengujian sebanyak 3 sisi yang tidak dalam satu sumbu bidang untuk arah pantul vertikal dan horisontal.

Variasi data yang disiapkan menggunakan spesimen kubus 15x15x15 cm³ untuk 1 sisi dan rerata 3 bidang dengan 16, 10, 8, 5, 4 dan 1 titik pantul. Dalam rangka memenuhi kebutuhan data nilai pantul, 1 spesimen akan diuji dengan HT sebanyak 17 titik pantul tiap sisi yang tidak dalam satu sumbu bidang dalam arah vertikal dan horizontal. Enambelas titik pantul sesuai nomor titik pantul pada Gambar 2 ditetapkan untuk memenuhi persyaratan jarak titik pantul tidak kurang dari 25 mm (Badan Standardisasi Nasional, 2010). Penentuan jumlah titik pantul diatur sesuai yang disajikan pada Tabel 3. Data kuat tekan kubus (f'_{ck}) ditentukan dengan uji tekan menggunakan CTM. Visual pengumpulan nilai pantul dan kuat tekan ditampilkan pada Gambar 3.

Komposisi campuran beton untuk membuat spesimen dalam perbandingan berat 1PCC:2,697Ps: 2,201Kr, *Slump* 8-12 cm hasil analisa rancangan campuran (*job mix design*) sesuai SNI 2834:2000

berdasarkan jenis dan sifat material seperti pada Tabel 2 (Badan Standardisasi Nasional, 2000).

Spesimen yang akan diuji tekan diukur dimensi dan ditimbang beratnya terlebih dahulu dan selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan luas penampang (A , mm²) dan berat volume (γ) spesimen. Uji tekan menggunakan CTM dimaksudkan untuk mengetahui beban maksimum (P , Newton) yang dapat ditahan sehingga kuat tekan (f'_{ck}) dapat ditentukan menggunakan prinsip tegangan akibat Gaya Normal sentris seperti Persamaan 1 (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 1990); (Pawirodikromo, 2014); (Soemono, 1985); (Cheng, 1998); (Gere *et al.*, 2000); (Partama, 2023).

$$f'_{ck} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dimana f'_{ck} adalah kuat tekan (MPa), P adalah beban yang ditahan spesimen (N), dan A adalah luas penampang spesimen (mm²).

Pasangan data f'_{ck} dan R_n selanjutnya dianalisis menggunakan regresi sesuai Persamaan 2-6 (Sudjana, 2005) yaitu:

- a. Regresi linear sederhana

$$y = a + bx \quad (2)$$

- b. Regresi eksponensial

$$y = ae^{bx} \quad (3)$$



Gambar 3. Proses penyiapan data R_n dan f'_{ck}

- c. Regresi Logaritma
 $y = a + b \ln(x)$ (4)
- d. Regresi polinom kwadratik
 $y = ax^2 + bx + c$ (5)
- e. Regresi geometrik
 $y = ax^b$ (6)

Dimana y merupakan kuat tekan spesimen kubus ($f'ck$), x adalah nilai pantul palu (Rn), a, b adalah koefesien regresi, dan c merupakan konstanta.

Persamaan regresi dengan indeks determinasi (r^2) terbesar, $f'ck$ meningkat seiring Rn (Kumavat *et al.*, 2020) dan selalu positif, ditetapkan sebagai persamaan terpilih yang menyatakan korelasi kuat tekan dengan HT pada spesimen kubus.

3. Hasil dan Pembahasan

Uji tekan spesimen dengan CTM dilakukan setelah mengambil 17 nilai pantul untuk tiga sisi spesimen yang tidak dalam sumbu. Hasil uji tekan spesimen untuk masing-masing umur disajikan pada Tabel 4. Pasangan data kuat tekan ($f'ck$) dengan rerata nilai pantul (Rn) dan ditentukan korelasinya dalam bentuk persamaan regresi. Persamaan regresi dengan r^2 untuk masing-masing pasangan data dan arah pantul disajikan pada Tabel 5 dan 6.

Pada Tabel 5 dapat disimak indeks determinasi berkisar dari 0,5594-0,7501 mengindikasikan penentuan nilai pantul hasil HT arah vertikal memberi kontribusi (55,94-75,01)% terhadap kuat tekan dan sisanya sebesar (44,06-24,99)% masih dipengaruhi oleh faktor lain, seperti suhu, kelembaban spesimen dan tingkat karbonisasi. Indeks determinasi terbesar $r^2=0,7501$ terjadi pada persamaan regresi $f'ck=1,9031e^{0,1225Rn}$, yang

menunjukkan kuat tekan dapat ditentukan berdasarkan rerata 10 nilai pantul vertikal pada 3 sisi spesimen kubus yang tidak dalam 1 sumbu bidang. Pada Tabel 6 dapat disimak indeks determinasi berkisar dari 0,5634-0,8926 mengindikasikan penentuan nilai pantul hasil HT arah horizontal memberi kontribusi 56,34%-89,26% terhadap kuat tekan pada spesimen kubus dan sisanya sebesar (43,64-10,74)% masih dipengaruhi oleh faktor lain, seperti suhu, kelembaban spesimen dan tingkat karbonisasi. Indeks determinasi terbesar $r^2=0,8926$ terjadi pada persamaan regresi $f'ck=0,0009Rn^{3,2523}$, yang menunjukkan kuat tekan dapat ditentukan berdasarkan rerata 5 nilai pantul horizontal pada 3 sisi spesimen kubus yang tidak dalam 1 sumbu bidang.

Pada Tabel 6 dapat disimak indeks determinasi berkisar dari 0,5634-0,8926 mengindikasikan penentuan nilai pantul hasil HT arah horizontal memberi kontribusi 56,34%-89,26% terhadap kuat tekan pada spesimen kubus dan sisanya sebesar (43,64-10,74)% masih dipengaruhi oleh faktor lain, seperti suhu, kelembaban spesimen dan tingkat karbonisasi. Indeks determinasi terbesar $r^2=0,8926$ terjadi pada persamaan regresi $f'ck=0,0009Rn^{3,2523}$, yang menunjukkan kuat tekan dapat ditentukan berdasarkan rerata 5 nilai pantul horizontal pada 3 sisi spesimen kubus yang tidak dalam 1 sumbu bidang

Tujuh korelasi berdasarkan hasil penelitian 10 tahun terakhir yang tersaji pada Tabel 1, jika rerata nilai kuat tekan dengan simulasi $Rn=5-35$, maka didapat suatu korelasi baru yang menyatakan hubungan $f'ck$ dengan Rn seperti pada Persamaan 7. Formulasi baru hasil simulasi ini selanjutnya dikomparasi dengan formulasi pendekatan berdasarkan grafik ASTM dan korelasi berdasarkan data penelitian ini.

$$f'ck = 0,0128Rn^2 + 0,4304Rn + 1,4423 \quad (7)$$

Grafik pada Gambar 4 dan 5 menyajikan kompilasi dan komparasi yang menyatakan hubungan $f'ck$ dan Rn berdasarkan ASTM, rerata hasil penelitian 10 tahun terakhir, hasil penelitian saat ini dan rerata dari ketiganya. Dua Grafik tersebut juga menunjukkan hasil penelitian mempunyai $f'ck$ lebih besar dari grafik ASTM maupun rerata dari penelitian 10 tahun terakhir. Fenomena ini dapat dijelaskan, bahwa saat pengujian dengan *Hammer Test*, spesimen masih mengandung air yang cukup tinggi atau spesimen dalam kondisi lembab. Keberadaan air dalam spesimen bersifat sebagai peredam (*damping*) sehingga energi pantulan tidak dapat ditransfer sepenuhnya ke alat dan menyebabkan nilai pantul (Rn) yang terbaca menjadi lebih rendah. Kondisi ini sejalan dengan laporan hasil penelitian dimana semakin tinggi kelembaban spesimen maka semakin rendah kuat tekan

Tabel 4. Kuat tekan hasil pengujian dengan CTM

Kode benda uji	Umur (Hari)	Kuat tekan, $f'ck$ (MPa)
03H-1	3	8,44
03H-2	3	6,67
03H-3	3	6,67
07H-1	7	14,00
07H-2	7	13,78
07H-3	7	13,33
14H-1	14	14,00
14H-2	14	14,22
14H-3	14	15,56
21H-1	21	20,00
21H-2	21	19,56
21H-3	21	20,89
28H-1	28	21,11
28H-2	28	21,11
28H-3	28	21,33

yang terinformasi melalui *Hammer test* (Mujahadah et al., 2023).

Hasil simulasi juga menunjukkan grafik ASTM dengan $Rn < 25$ kuat tekan yang didapat lebih besar dan untuk $Rn > 25$ lebih kecil, jika dibandingkan dengan hasil penelitian 10 tahun terakhir walaupun dengan deviasi yang lebih kecil dibandingkan dengan hasil penelitian ini. Untuk meningkatkan akurasi hasil pengujian HT dalam penelitian ini, maka persamaan regresi yang didapat dikoreksi dengan mengambil rerata berdasarkan data rerata hasil penelitian 10 tahun terakhir, grafik ASTM dan berdasarkan data penelitian saat ini. Hasil kompilasi ketiga data tersebut didapat suatu formulasi matematika seperti Persamaan 8 yang direkomendasikan penggunaannya dalam menentukan kuat tekan beton agregat lokal Bali dengan *Hammer Test* arah vertikal ($\alpha = -90^\circ$), dengan Rn adalah rerata rerata 10 nilai pantul pada 3 sisi kubus yang tidak dalam satu sumbu bidang

$$f'ck = 2,449e^{0,0959Rn} \tag{8}$$

Pada Gambar 5 hasil simulasi menunjukkan grafik ASTM dengan $Rn < 35$ kuat tekan yang didapat lebih rendah dibandingkan dengan hasil penelitian 10 tahun terakhir walaupun dengan deviasi semakin kecil dibandingkan dengan hasil penelitian ini. Persamaan 9 adalah persamaan hasil koreksi yang direkomendasikan untuk pengujian *Hammer Test* arah vertikal ($\alpha = 0^\circ$) pada spesimen kubus beton agregat lokal Bali. Rn adalah rerata 5 nilai pantul pada 3 sisi kubus yang tidak dalam satu sumbu bidang, lima titik pantul yang dimaksud yaitu: 1 pada pusat bidang dan 4 lainnya pada garis diagonal berjarak minimal 25 mm dari titik pusat

$$f'ck = 0,0644Rn^2 - 0,9261Rn + 6,0725 \tag{9}$$

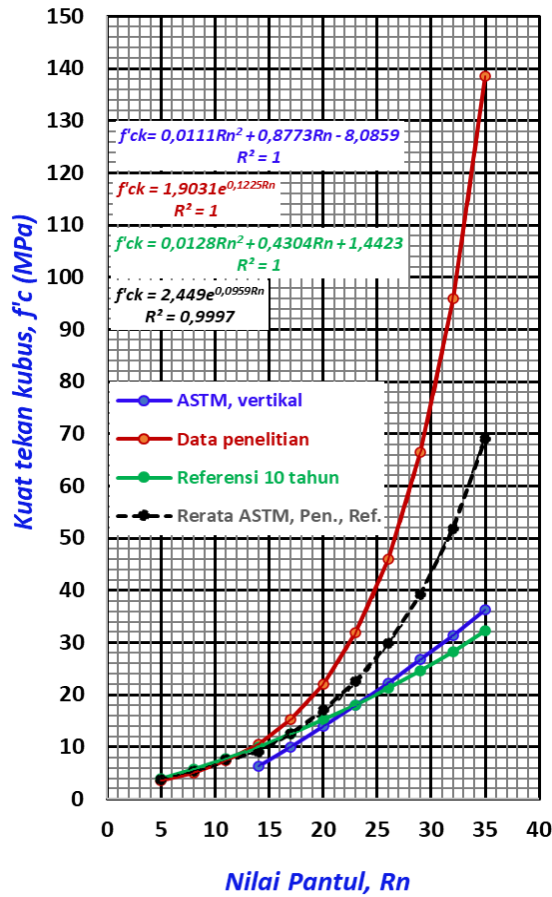
Dua formulasi yang direkomendasikan untuk masing-masing arah pengujian, maka Persamaan 8 adalah formulasi yang lebih tepat untuk mempresentasikan hasil penelitian ini. Alasan yang mendukung hal ini yaitu:

Tabel 5. Persamaan regresi arah pantul vertikal

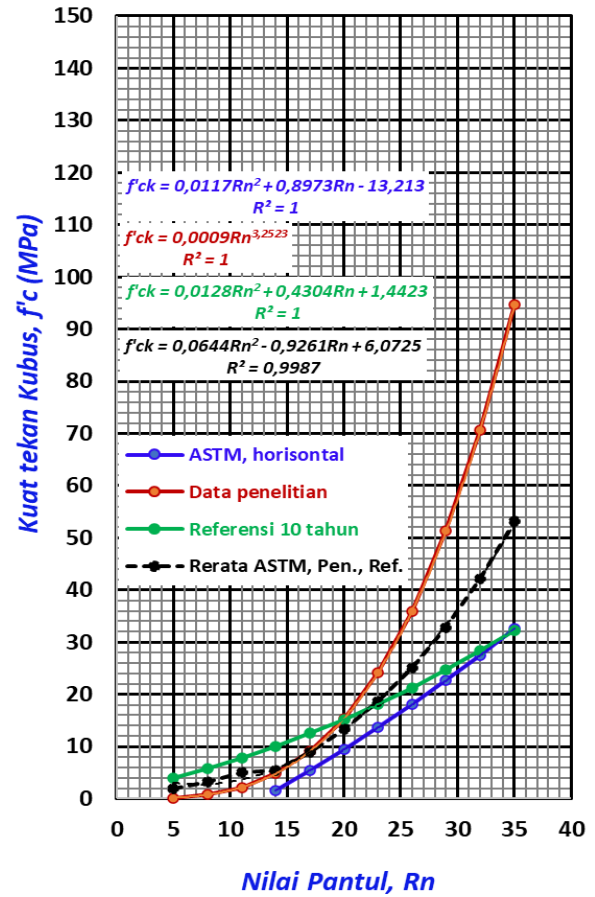
Jumlah titik	Sumber data Rn	Persamaan regresi	Jenis	r^2
16	1 sisi	$f'ck = 0,3086Rn^{1,3872}$	Geometrik	0,5845
	3 sisi	$f'ck = 1,9788e^{0,1213Rn}$	Eksponensial	0,7445
10	1 sisi	$f'ck = 0,0282Rn^2 + 0,3824Rn + 1,1071$	Kwadrat	0,5872
	3 sisi	$f'ck = 1,9031e^{0,1225Rn}$	Eksponensial	0,7501
8	1 sisi	$f'ck = 0,2375Rn^{1,4808}$	Polinom Power	0,5992
	3 sisi	$f'ck = 1,9498e^{0,1224Rn}$	Eksponensial	0,7172
5	1 sisi	$f'ck = 0,437Rn^2 - 0,0926Rn + 2,9635$	Polinom kwadrat	0,5975
	3 sisi	$f'ck = 1,707e^{0,1172Rn}$	Eksponensial	0,7220
4	1 sisi	$f'ck = 0,1521Rn^{1,5831}$	Geometrik	0,6158
	3 sisi	$f'ck = 1,7499e^{0,11767Rn}$	Eksponensial	0,7253
1	1 sisi	$f'ck = 1,0766x - 4,3127$	Linear	0,5594
	3 sisi	$f'ck = 0,1816Rn^2 - 4,9597Rn + 39,369$	Kwadrat	0,6737

Tabel 6. Persamaan regresi arah pantul horizontal

Jumlah titik	Sumber data Rn	Persamaan regresi	Jenis	r^2
16	1 sisi	$f'ck = 0,0475Rn^2 + 0,1475Rn - 2,0179$	Kwadrat	0,5749
	3 sisi	$f'ck = 0,5294Rn^{3,0198}$	Geometrik	0,8472
10	1 sisi	$f'ck = 0,0212Rn^2 + 1,0141Rn - 9,0512$	Kwadrat	0,5634
	3 sisi	$f'ck = 0,0026Rn^{3,0028}$	Geometrik	0,8332
8	1 sisi	$f'ck = 0,1888Rn^2 - 3,9516Rn + 27,954$	Kwadrat	0,6110
	3 sisi	$f'ck = 0,0034Rn^{2,921}$	Geometrik	0,8833
5	1 sisi	$f'ck = 1,5802Rn - 15,733$	Linear	0,6403
	3 sisi	$f'ck = 0,0009Rn^{3,2523}$	Geometrik	0,8926
4	1 sisi	$f'ck = 0,0194Rn^{2,233}$	Geometrik	0,5970
	3 sisi	$f'ck = 0,0467Rn^2 + 0,4547Rn - 11,333$	Kwadrat	0,8713
1	1 sisi	$f'ck = 0,0161Rn^{2,2468}$	Geometrik	0,6081
	3 sisi	$f'ck = 0,0006Rn^{3,3262}$	Geometrik	0,8889



Gambar 4. Korelasi f'_{ck} dan R_n arah pantul vertikal



Gambar 5. Korelasi f'_{ck} dan R_n arah pantul horizontal

formulasi yang dihasilkan adalah hasil koreksi dari formulasi dengan indeks determinasi yang paling tinggi (r^2)=0,8926, jumlah titik pengujian yang diambil relatif sedikit yaitu 5 titik pantul dan pola 1 pada pusat bidang dan 4 lainnya pada garis diagonal berjarak minimal 25 mm dari titik pusat sejalan dengan hasil penelitian terkait dengan variasi titik pantul (Partama et al., 2023)

4. Kesimpulan

Kuat tekan beton agregat lokal Bali dapat ditentukan berdasarkan hasil *Hammer Test* arah horizontal pada spesimen kubus $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ dengan formulasi $f'_{ck} = 0,0644Rn^2 - 0,9261Rn + 6,0725$, R_n adalah rerata 5 nilai pantulan palu pada 3 sisi kubus yang tidak dalam satu sumbu bidang.

Ucapan Terima Kasih

Artikel ini merupakan luaran penelitian Skema Penelitian Dasar yang dibiayai melalui Dana Penelitian Kompetitif Hibah Dana Internal Universitas Ngurah Rai Program Unggulan Tahun 2023 pada Lembaga Penelitian Pengabdian Kepada Masyarakat dan Pusat Kajian

Universitas Ngurah Rai (LPPMPK UNR), dengan Surat Perjanjian Nomor: 205.1/01.05.1/1.09/2022, Tanggal: 28 Oktober 2023. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Ngurah Rai melalui LPPMPK UNR yang telah mendanai penelitian ini beserta mahasiswa dan tenaga pelaksana laboratorium yang telah membantu selama proses penelitian.

Daftar Pustaka

- Badan Standardisasi Nasional. (2000). SNI 03-2834-2000: Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*, 1–34.
- Badan Standardisasi Nasional. (2010). RSNI 4803:20xx Metode Uji Angka Pantul Beton Keras (ASTM C 805-02). In *Badan Standardisasi Nasional Indonesianal*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 1974-2011 : Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder. *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*, 20.

- Badan Standardisasi Nasional. (2018). *Metode Pengambilan dan Pengujian Inti Beton Hasil Pemboran dan Balok Beton Hasil Pemotongan*.
- Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (1990). *SNI 03-1974-1990: Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*.
- Balakrishna, M. N., Mohammad, F., Evans, R., & Rahman, M. M. (2017). *Interpretation of Concrete Mix Designs by Surface Hardness Method*. 29(2), 227–238.
<https://doi.org/https://journals.utm.my/mjce/article/view/15600/7093>
- Brencich, A., Cassini, G., Pera, D., & Riotta, G. (2013). Calibration and Reliability of the Rebound (Schmidt) Hammer Test. *Civil Engineering and Architecture*, 1(3), 66–78.
<https://doi.org/10.13189/cea.2013.010303>
- Brozovsky, J. (2014). High Strength Concrete NDT with Rebound Hammer: Influence of Aggregate on Test Results. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 29(3), 255–268.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10589759.2014.926897>
- Brozovsky, J., & Bodnárová, L. (2016). Contribution to the issue of evaluating the compressive strength of concrete exposed to high temperatures using the Schmidt rebound hammer. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 52(1), 47–52.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1134/S1061830916010046>
- Cheng, F.-H. (1998). *Statics and Strength of Material* (Second). Glencoe/McGraw-Hill.
- Gere, J. M., Timoshenko, S. P., & Suryoatmono, B. (2000). *Mekanika Bahan Jilid 1 (Terjemahan: Mechanics of Material, Fourth Edition)* (Hardanai Wibi (ed.); Edisi ke-4). Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Kumavat, H. R., Chandak, N., & Jadhav, D. (2020). Experimental Investigation on Relationships Between Rebound Index and Compressive Strength of Cement Concrete Spesimen Influenced by Physical Factors. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, 1–5.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1109/ASET48392.2020.9118246>
- Kumavat, H. R., Chandak, N. R., & Patil, I. T. (2021). Factors influencing the Performance of Rebound hammer used for non-Destructive Testing of Concrete Members: A Review. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00491.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00491>
- Mujahadah, N., Hariyadi, Kencanawati, N. N., & Ngudiyono. (2023). The 6th International Conference on Science and Technology (ICST21). In Sugiman (Ed.), *Analysis the Effect of Moisture Content of Normal Concrete Using Hammer Test* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1063/5.0123716>
- Partama, I. G. N. E. (2023). *Mekanika Bahan* (T. H. Pamungkas (ed.); 1st ed.). Dewa Publishing, Nganjuk.
- Partama, I. G. N. E., Silvi, N. P., & Sudika, I. G. M. (2023). Kajian Penentuan Kuat Tekan Beton Berdasarkan Nilai Pantul Palu Dengan Memvariasikan Pola Titik Pantul. *Teras Jurnal*, 13(1), 235–244.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.29103/tj.v13i1.838>
- Pawirodikromo, W. (2014). *Analisis Tegangan Bahan*. Pustaka Pelajar.
- Samson, D., Omoniyi, & Moses, T. (2014). Correlation between Non-Destructive Testing (NDT) and Destructive Testing (DT) of Compressive Strength of Concrete Correlation between Non-Destructive Testing (NDT) and Destructive Testing (DT) of Compressive Strength of Concrete. *International Journal of Engineering Science Invention*, 3(9), ISSN (Online): 2319 – 6734, ISSN (Print): 2319 – 6.
- Saremi, S. G., Goulias, D. G., & Akhter, A. A. (2022). Non-Destructive Testing in Quality Assurance of Concrete for Assessing Production Uniformity. *Sage Journals*, 2677(1).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1177/03611981221103871>
- Setyawan, M. K., Wulandari, P. S., & Patmadjaja, H. (2016). Perbandingan Karakteristik Agregat Kasar Pulau Jawa Dengan Agregat Luar Pulau Jawa Ditinjau dari Kekuatan Campuran Perkerasan Lentur. *Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 5(1), 1–8.
<https://publication.petra.ac.id/index.php/teknik-sipil/article/view/4270/3919>
- Soemono. (1985). *Ilmu Gaya* (Keenam). Penerbit Djambatan.
- Sudjana. (2005). *Metoda Statistika* (Edisi 6). PT. Tarsito Bandung.
- Szilágyi, K., Borosnyói, A., & Zsigovics, I. (2015). Understanding the Rebound Surface Hardness of Concrete. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(2), 185–192.
<https://doi.org/10.3846/13923730.2013.802722>