

Diterima : 21 Oktober 2024 | Selesai Direvisi : 05 November 2024 | Disetujui : 14 November 2024 | Dipublikasikan : Desember 2024
DOI : <http://doi.org/10.24853/jk.16.1.131-141>
Copyright © 2024 Jurnal Konstruksia
This is an open access article under the CC BY-NC licence (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Formulasi Kuat Tekan Perkerasan Landasan Pacu Dari Sampel Acak Terstruktur Transmisi Permukaan Ultrasonik

Heri Khoeri¹, Wisnu Isvara² dan Panji Nugroho³

¹Prodi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl. Cempaka Putih Tengah 27, Jakarta, 10510
Email korespondensi: heri.khoeri@umj.ac.id

²Prodi Teknik Sipil, Universitas Indonesia Jl. Lingkar, Pondok Cina, Depok, Jawa Barat 16424

³ PT. Hesa Laras Cemerlang, Komplek Rukan Mutiara Faza RB 1 Jl. Condet Raya No. 27 Jakarta 13760

ABSTRAK

Landasan pacu (*Runway*) merupakan salah satu penentu keamanan dan keselamatan operasional bandara, kerusakan perkerasan *runway* dapat membahayakan operasi penerbangan. Untuk mengetahui daya dukung perkerasan beton bertulang, maka kuat tekan beton menjadi hal penting untuk diperiksa. Uji tekan pada sampel beton inti merupakan cara yang paling akurat untuk menentukan kuat tekan beton, namun waktu yang tersedia untuk pemeriksaan pada *runway* sangat terbatas, sehingga pengujian tidak merusak (*Non destructive test, NDT*) dengan uji cepat rambat gelombang ultrasonik (*ultrasonic pulse velocity test, UPVT*) dan uji palu pantul (*Rebound Hammer test, RHT*) menjadi alternatif pilihan. Pada landasan pacu pengujian ultrasonik yang memungkinkan adalah dengan metode transmisi langsung (*indirect transmission method, ITM*) atau metode transmisi permukaan (*surface transmission method*), yang dalam banyak penelitian menunjukkan nilai akurasi yang lebih rendah dibandingkan dengan *DTM (Direct Transmission Method)*. Penelitian dilakukan dengan sampel acak terstruktur 1245 data *RHT* disepanjang runway 3645 m, 45 pengukuran *DTM* dan 15 uji sampel beton inti. Hasil pengujian menunjukkan ada hubungan kuat antara hasil *RHT* dengan *ITM*, ditemukan korelasi rendah antara *ITM* dengan kuat tekan beton, f_c' , dan tidak ada hubungan antara *ITM* dan f_c' . Namun secara bersama-sama *ITM* dan *RHT* menunjukkan korelasi yang kuat dengan f_c' , dimana $f_c' = 67.910e^{(0,170V-0,030R)}$ dengan faktor determinasi, $r^2 = 0,761$.

Kata kunci : asesmen, beton, palu, permukaan, uji, ultrasonik

ABSTRACT

Runway is one of the determinants of airport safety and operational security, damage to the runway pavement can jeopardize flight operations. To assess the bearing capacity of reinforced concrete pavement, the compressive strength of concrete is crucial to examine. Compressive strength testing on core concrete samples is the most accurate method to determine concrete compressive strength, but the time available for inspections on the runway is very limited. Hence, NDT (Non-Destructive Testing using rapid UPVT (Ultrasonic Pulse Velocity Testing) and RHT (Rebound Hammer Testing) are alternative options. For runway testing, ultrasonic testing methods that are possible to use is ITM (Indirect Transmission Method) or surface transmission method, which in many studies have shown lower accuracy compared to the DTM (Direct Transmission Method). The research involved by stratified random sampling 1245 RHT data along a 3645 m runway, 45 DTM measurements, and 15 core concrete sample tests. The test results indicate a strong relationship between RHT results and ITM, with a low correlation found between ITM and concrete compressive strength, f_c' , and no relationship between ITM and f_c' . However, collectively ITM and RHT show a strong correlation with f_c' , where $f_c' = 67.910e^{(0,170V-0,030R)}$ with a coefficient of determination, $r^2 = 0,761$.

Keywords : assessment, concrete, hammer, surface, testing, ultrasonic

1. PENDAHULUAN

Landasan pacu (*Runway*) merupakan salah satu penentu keamanan dan keselamatan operasional bandar udara [26]. Elemen dasar runway meliputi perkerasan yang secara struktural cukup untuk mendukung beban pesawat yang dilayaninya [27]. Ketika mempertimbangkan infrastruktur bandara, kejadian kegagalan di *Runway* merupakan masalah yang relevan yang dapat diatasi dengan mendeteksi cacat (*defect*) secara dini yang berarti mengurangi risiko yang bisa timbul, seperti keterlambatan penerbangan karena landasan pacu tidak siap akibat adanya *defect* [24]. Oleh karena itu, metode untuk evaluasi perkerasan *runway* seharusnya diterapkan dalam inspeksi dengan tujuan untuk mendeteksi *defect* secara dini [19].

Menurut SKEP 78 Tahun 2005 jenis kerusakan pada perkerasan *runway* yang dapat membahayakan pelayanan operasi penerbangan meliputi, keretakan (*cracking*), kerontokan (*disintegration*), perubahan permukaan konstruksi (*distortion*), kekesatan (*skid resistance*) [7]. Pemeliharaan permukaan (*surface*) dilaksanakan 1 (satu) kali dalam setahun. Dan pemeliharaan daya dukung perkerasan dilakukan 2 (dua) kali dalam setahun [8]. Dengan menggunakan *Pavement Condition Index*, *PCI* dapat diketahui kondisi perkerasan pada bandara [18]. Lebih lanjut untuk mengetahui daya dukung perkerasan kaku dimana lapisan perkerasan permukaan menggunakan beton bertulang, maka pemeriksaan performa berton menjadi hal yang paling penting untuk diperiksa [22]. Pengambilan sampel beton inti merupakan cara yang paling akurat untuk menentukan kuat tekan beton, namun waktu pemeriksaan hanya tersedia 4 (empat) jam, antara jam 23.00 WIB sampai dengan 03.00 WIB setiap harinya, tentunya akan memakan waktu relatif lama untuk mengambil sampel tiap segmen *runway* sepanjang 2000 m. Sehingga pengujian tidak merusak (*Non destructive test*, *NDT*) dengan *ultrasonic pulse velocity test* (*UPVT*) dan *Rebound Hammer test* (*RHT*) menjadi alternatif pilihan [11].

RHT merupakan uji yang sederhana, cepat, dan murah untuk memeriksa kualitas beton, tetapi memiliki beberapa kekurangan dan batasan yang dapat secara signifikan mempengaruhi keandalannya. Penggunaan *RHT* hanya memungkinkan perkiraan kekuatan beton atau keragamannya. Namun, dalam konteks pemantauan produksi pabrik, pengukuran indeks pantulan tetap menjadi indikator yang baik, jika ada korelasi yang memuaskan. Hasil *RHT* diantaranya dipengaruhi oleh tekstur permukaan, kelembaban beton, jenis agregat, jenis semen, dan karbonasi beton [21], [13]. Ada kebutuhan mendesak untuk mengembangkan/memodifikasi standar uji *NDT*, mempertimbangkan berbagai faktor yang memengaruhi indeks pantulan [16].

UPVT non-invasif dapat diandalkan dalam estimasi kualitas beton *in-situ*, sehingga memungkinkan f_c' beton ditentukan secara langsung pada elemen struktural bangunan dan menghindari penerapan uji invasif yang mengubah sifat fisik atau kimia beton [9]. Dari prinsip perambatan gelombang elastis, cepat rambat gelombang berkorelasi dengan akar kuadrat modulus elastis. Karena modulus elastis dan kekuatan beton tertentu meningkat seiring dengan umurnya, dapat disimpulkan bahwa cepat rambat gelombang dapat menjadi cara untuk memperkirakan kekuatan beton, meskipun tidak ada hubungan fisik langsung antara kedua properti tersebut [2]. Dalam dunia konstruksi modern, *UPVT* telah menjadi bagian penting dalam memperkirakan kualitas struktur beton ([4],[28], [25], [23], [14], dan lainnya).

Pada *runway* *UPVT* hanya bisa dilakukan dengan metode transmisi tidak langsung/*ITM* (*Indirect Transmission Methods*), dimana pada *ITM* untuk panjang transmisi yang sama dengan metode transmisi langsung/*DTM* (*Direct Transmission Methods*), menghasilkan sinyal di penerima transduser dengan amplitudo hanya sekitar 2% atau 3% dari yang dihasilkan *DTM*. Selain itu, *ITM* memberikan hasil cepat rambat gelombang, V yang dipengaruhi oleh beton

di dekat permukaan. Area ini seringkali memiliki komposisi yang berbeda dari beton inti dan hasil tes mungkin tidak mewakili beton tersebut. V_{ITM} umumnya lebih rendah dari V_{DTM} pada elemen beton yang sama. Perbedaan ini dapat bervariasi dari 5% hingga 20% tergantung pada kualitas beton yang diuji [11], [5].

Hasil pengujian kuat tekan beton normal menunjukkan nilai deviasi pengujian *semi-direct* dibandingkan uji *direct* pada jarak minimal 100 mm memiliki deviasi dengan kisaran tidak lebih dari 20% [10]. Konversi hasil pengukuran untuk *DTM* dari *ITM* [20].

$$V_{DTM} = 0,0195 V_{ITM} + 4341,8 \quad (1)$$

Urutan Akurasi *UPVT* dari yang terbesar hingga yang terkecil adalah *DTM*, *SDTM* dan *ITM* [15]. *ITM* lebih sensitif dibanding *DTM* untuk penilaian kekuatan tekan karena sangat tergantung pada pembacaan permukaan [3]. Penggunaan penstabil transduser-penerima terbukti meningkatkan akurasi pengukuran dan mengurangi tingkat kesalahan relatif dalam mengukur kecepatan gelombang dan waktu tempuh gelombang [12]. Untuk memastikan hal-

hal tersebut pada assessment *runway* tetap perlu dilakukan pengambilan sampel dan uji kuat tekan beton inti.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan pada *runway* utara bandara Soekarno Hatta (Gambar 1). *Runway* utara berdimensi panjang 3645 m dan lebar 50 m, dengan struktur perkerasan *rigid pavement*, pelat beton bertulang modul 15 m x 15 m. Total terdapat 729 modul pelat sepanjang *runway*, dengan penomoran seperti pada Gambar 2. Investigasi untuk menentukan kuat beton diawali dengan melakukan *RHT* pada pelat beton. Jumlah sampel *RHT* 1215 uji, yang terdistribusi 3 uji pada pelat 03 dan 1 uji pada pelat 02 dan 04 diseluruh modul pelat sepanjang *runway*.

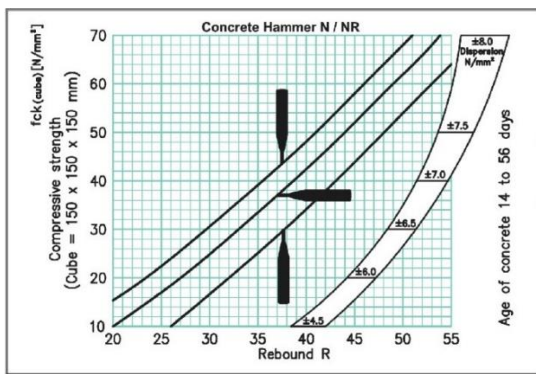
Metode yang digunakan mengacu pada SNI ASTM C805:2012 [6] dan ACI 228.1R-19 [1]. Konversi Nilai pantul (*Rebound*) dalam mm ke kuat tekan kubus seperti pada Gambar 3. fc' diperoleh dengan faktor konversi 0,83 pada kuat tekan ekuivalen kubus.



Gambar 1. Posisi *Runway* Utara di Bandar Udara Soekarno Hatta

04.01	04.02	04.03	04.04	04.05	04.06	04.07		04.237	04.238	04.239	04.240	04.241	04.242	04.243	
03.01	03.02	03.03	03.04	03.05	03.06	03.07		03.237	03.238	03.239	03.240	03.241	03.242	03.243	
02.01	02.02	02.03	02.04	02.05	02.06	02.07		02.237	02.238	02.239	02.240	02.241	02.242	02.243	
STA 0+000	STA 0+015	STA 0+030	STA 0+045	STA 0+060	STA 0+075	STA 0+090	STA 1+050	STA 3+555	STA 3+555	STA 3+570	STA 3+585	STA 3+600	STA 3+615	STA 3+630	STA 3+645

Gambar 2. Penomoran Pelat Runway Utara



Gambar 3. Konversi Rebound ke Kuat Tekan Kubus

Selanjutnya dari *range* maksimum dan minimum nilai $f'c$ hasil interpretasi RHT diklasifikasikan menjadi 5 katagori seperti pada

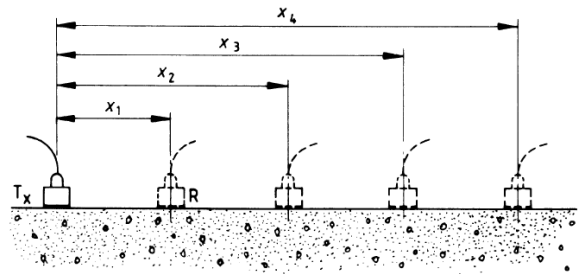
Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Kualitas Beton Berdasarkan RHT

Kuat tekan interpretasi RHT	Klasifikasi kualitas	
$f'c > 40$ MPa	Sangat bagus	■
$35 \text{ MPa} < f'c < 40$ MPa	Bagus	■
$30 \text{ MPa} < f'c < 35$ MPa	Cukup	■
$25 \text{ MPa} < f'c < 30$ MPa	Jelek	■
$f'c < 25$ MPa	Sangat jelek	■

Untuk memverifikasi nilai $f'c$ dari interpretasi hammer dilakukan UPVT sebanyak

45 uji pada pelat dengan distribusi sampel merata pada masing-masing katagori. UPVT dilakukan mengacu pada BS 1881-203:1986 untuk *surface transmission/ITM* (Indirect Transmission Method) [5].



Gambar 4. Pengambilan Data Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik dengan Transmisi Permukaan (ITM)

Tabel 2. Klasifikasi Kualitas Beton Berdasarkan Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik, V [25]

V km/detik	Kualitas Beton	
$>4,5$	Sangat bagus	■
$3,50 - 4,50$	Bagus	■
$3,00 - 3,50$	Diragukan	■
$2,00 - 3,00$	Jelek	■
$< 2,00$	Sangat jelek	■

Cepat rambat gelombang ultrasonik, V yang didapat diklasifikasikan mengacu pada Tabel 2.

Verifikasi lebih lanjut dilakukan dengan

melakukan pengambilan sampel beton inti dan uji tekan pada sampel tersebut. Sampel yang diambil sejumlah 15 (lima belas), dengan distribusi merata pada masing-masing katagori.

Dari ketiga data yang diperoleh dilakukan analisis statistik, analisis pertama untuk mendapatkan hubungan antara (1) *RHT* sebagai variabel bebas dengan *V* sebagai variabel terikat, (2) *V* sebagai variabel bebas dengan $f'c'$ sebagai variabel terikat, (3) *V* sebagai variabel bebas dengan $f'c'$ sebagai variabel terikat, dan (4) *V* dan *RHT* sebagai variabel bebas dengan $f'c'$ sebagai variabel terikat.

3. HASIL PEMBAHASAN

Data hasil pengujian

Hasil *RHT* pada 1215 titik uji sepanjang runway dengan 3 titik uji pada tiap modul pelat 03 (03a, 03b dan 03c) dan 1 titik uji pada modul pelat 02 dan 04. Dokumentasi *RHT* seperti Gambar 5.

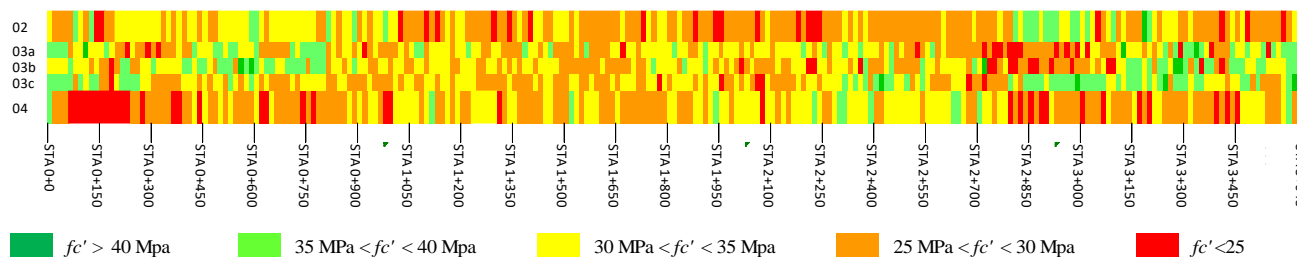
Secara grafis nilai *R* yang dikonversi ke $f'c'$

mengacu pada Gambar 3 dan konversi dari kuat tekan kubus ke silinder, juga gradasi warna menurut

Tabel 1 dapat dilihat pada Gambar 6. Dimana $Range f'c'_{RHT}$ (kuat tekan beton hasil interpretasi dari uji rebound hammer, *RHT*) antara 19,31 MPa – 49,9 MPa, rata-rata 36,71 MPa ± 5,06 MPa, dengan distribusi seperti pada Tabel 3.



Gambar 5. Dokumentasi Pengambilan Data RHT



Gambar 6. Nilai R Dari Hasil RHT

Tabel 3. Distribusi Frekuensi $f'c'_{RHT}$

$f'c'_{RHT}$	Frekuensi (%)
> 40 MPa	25.02%
35 MPa-40 MPa	36.21%
30 MPa-35 MPa	31.11%
25 MPa-30 MPa	6.75%
<25 Mpa	0.91%

Uji ITM pada sampel yang diambil dengan proporsi yang sama pada setiap range nilai RHT, dengan 10 sampel tiap range dalam klasifikasi Tabel 2. Dokumentasi UPVT

dengan ITM seperti dalam Gambar 7.



Gambar 7. Dokumentasi Pengambilan Data UPVT

Hasil pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik dengan ITM memperoleh

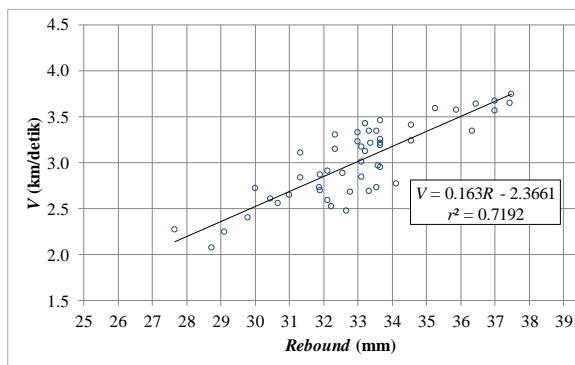
nilai V dalam *range* 2,07 km/detik - 3,75 km/detik, dengan rata-rata 3,02 km/detik \pm 0,41 km/detik, dengan distribusi nilai V seperti pada

Tabel 4.

Tabel 4. Distribusi Frekuensi V

V (km/detik)	Frekuensi (%)
>4,5	0.0%
3,50 - 4,50	14.0%
3,00 - 3,50	38.0%
2,00 - 3,00	48.0%
< 2,00	0.0%

RHT dan V memiliki korelasi positif (Pers. **Error! Reference source not found.**) dengan $r^2 = 0,719$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Korelasi Antara R dengan V

$$V = 0,163 R + 2,366 \quad (2)$$

Dengan V adalah cepat rambat gelombang ultrasonik dengan transmisi permukaan (km/detik) dan R adalah *rebound* (mm).

$r^2 = 0,719$ pada pers. menunjukkan bahwa ada hubungan anatar R dengan V sebesar 71,9%, sedangkan sisanya 28,1% dipengaruhi oleh variabel lain.

Tabel 5. ANOVA Variabel Terikat V Terhadap R

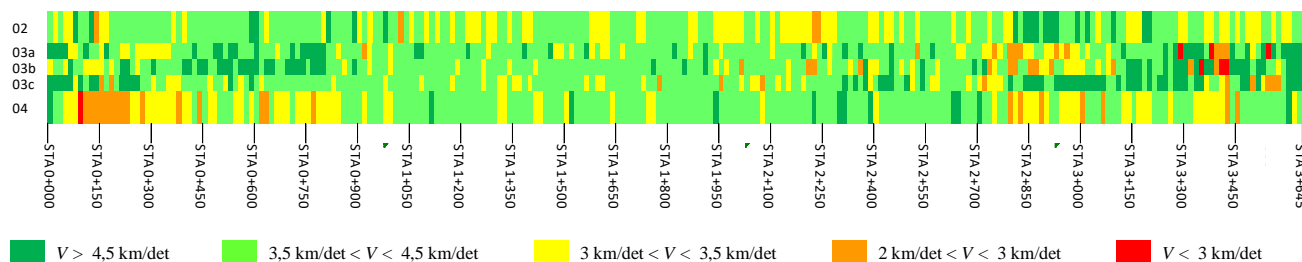
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	6.053	6.053	122.938	7,75.10 ⁻¹⁵
Residual	48	2.363	0.049		
Total	49	8.416			

Tabel 6. Uji t Statistik pada Variabel V dan R

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-2.3661	0.487	4.86	1,29.10 ⁻⁰⁵
R	0.1630	0.015	11.0	7,75.10 ⁻¹⁵

Tabel 5 menunjukkan nilai signifikasi pada uji F sebesar $7,75.10 - 15 < 0,05$ yang artinya variabel R mempengaruhi nilai V . Diperkuat dari hasil Uji t statistik (Tabel 6), dengan nilai $P < 0,05$.

Dengan pers. **Error! Reference source not found.**, gambaran kondisi perkerasan beton sepanjang *runway* seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Kondisi Beton Berdasarkan V dari R

Sementara hasil uji kuat tekan dari 15 sampel beton inti menunjukkan distribusi kuat tekan yang berbeda dibandingkan kuat tekan dari interpretasi R dan V (Tabel 7). Dokumentasi pengambilan sampel beton inti seperti pada Gambar 10.

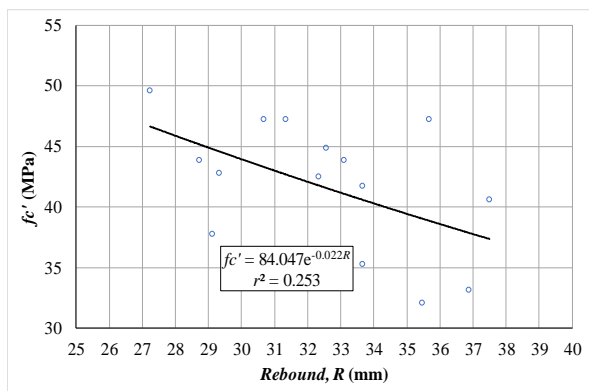


Gambar 10. Pengambilan Sampel Beton Inti

Tabel 7. Distribusi Frekuensi f_c' dari Kuat Tekan Beton Inti

$f_c'_{scd}$	Frekuensi
> 40 MPa	73.3%
35 MPa-40 MPa	13.3%
30 MPa-35 MPa	13.3%
25 MPa-30 MPa	0%
<25 Mpa	0%

Dari hasil analisis regresi R dengan f_c' tidak menunjukkan korelasi yang positif, seperti ditunjukkan pada Gambar 11.



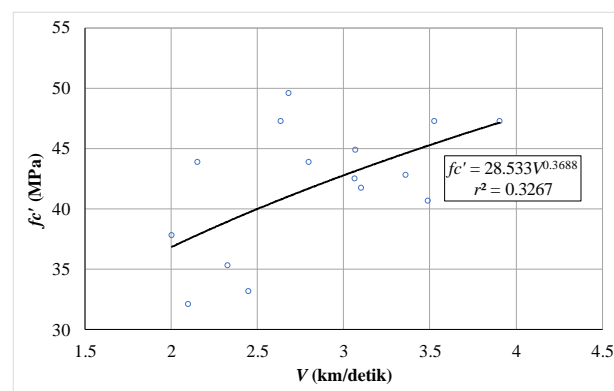
Gambar 11. Korelasi Antara R dengan f_c'

Nilai $r^2 = 0,253$ pada Gambar 11 menunjukkan hubungan yang lemah antara R dengan f_c' , dimana pengaruhnya hanya 25,3%, sedangkan sisanya 74,1% dipengaruhi oleh variabel lain.

Tabel 8. ANOVA Variabel Terikat $\ln(f_c')$ Terhadap R

	Df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	0,06	0,06	4,40	0,056
Residual	3	0,18	0,01		
Total	4	0,24			

Tabel 8 menunjukkan nilai signifikansi pada uji F sebesar $0,063 > 0,05$ yang artinya variabel R tidak mempengaruhi $\ln(f_c')$. Hasil analisis regresi V dengan f_c' menunjukkan korelasi positif seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Korelasi Antara V dengan f_c'

Namun persamaan regresi V dengan f_c' memiliki faktor determinasi, $r^2 = 0,327$ (Gambar 11) yang jauh dari angka 1. Hal ini menunjukkan hubungan yang lemah antara V dengan f_c' , dimana pengaruhnya hanya 32,7%, sedangkan sisanya 67,3% dipengaruhi oleh variabel lain.

Tabel 9. ANOVA Variabel Terikat $\ln(fc')$ Terhadap V

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	0.07	0.07	5.80	0.031
Residual	3	0.17	0.01		
Total	4	0.24			

Tabel 9 menunjukkan nilai signifikansi pada uji F sebesar $0,031 < 0,05$ yang artinya variabel V berpengaruh terhadap $\ln(fc')$. Walaupun demikian karena nilai faktor determinasi r^2 relatif kecil, masih terlalu jauh dengan nilai 1, maka persamaan regresi dalam Gambar 12 belum dapat digunakan untuk memprediksi fc' . Selanjutnya dicari hubungan antara fc' , V dan R menggunakan regresi ganda.

Hasil analisis regresi ganda antara variabel terikat $\ln(fc')$ dengan variabel bebas V dan R , adalah seperti pada

Tabel 10 berikut

Tabel 10. Parameter Statistik Regresi Variabel Bebas V dan R Terhadap Variabel Terikat $\ln(fc')$

Regression Statistics	
Multiple R	0.872167
R Square	0.760675
Adjusted R Square	0.720788
Standard Error	0.070275
Observations	15

Dengan faktor determinasi, $r^2 = 0,761$ menunjukkan bahwa secara Bersama-sama variable cepat rambat gelombang, V dan $Rebound$, R mempengaruhi $\ln(fc')$ sebesar 76,1 %.

Tabel 11. ANOVA Variabel Bebas V dan R

Terhadap Variabel Terikat $\ln(fc')$

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	2	0.18	0.09	19.07	$1,879 \cdot 10^{-4}$
Residual	2	0.05	0.00		
Total	4	0.24			

Tabel 12. Uji t Statistik Pada Variabel V dan $\ln \alpha$

	Coeff.	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	4,218	0,202	20,848	$8,58 \cdot 10^{-11}$
V	0,170	0,034	5,04	$2,87 \cdot 10^{-4}$
R	-0,030	0,006	-4,76	$4,64 \cdot 10^{-4}$

Nilai signifikansi F dari

Tabel 11 adalah $1,879 \cdot 10^{-4} < 0,05$, yang menunjukkan secara bersama-sama variabel V dan R mempengaruhi nilai $\ln(fc')$. Demikian pula hasil uji t menunjukkan variabel V memiliki nilai $P = 2,87 \cdot 10^{-4}$, dan R memiliki nilai $P = 4,64 \cdot 10^{-4}$, keduanya lebih kecil dari 0,05 yang berarti keduanya mempunyai pengaruh terhadap $\ln(fc')$. Persamaan regresi ganda hubungan variabel terikat $\ln(fc')$ dengan variabel bebas V dan R dapat dituliskan menjadi:

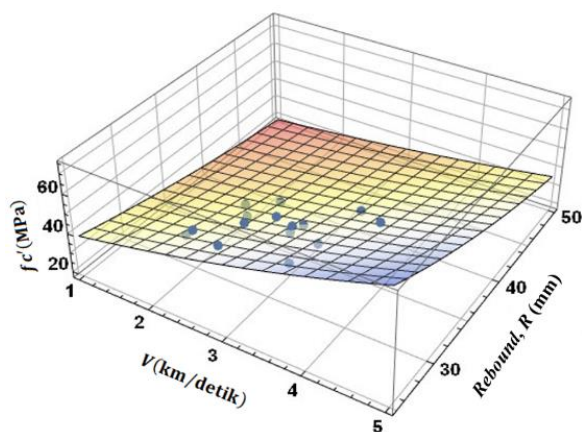
$$\ln(fc') = 0,170V - 0,030R + 4,218 \quad (3)$$

Atau dapat dituliskan menjadi:

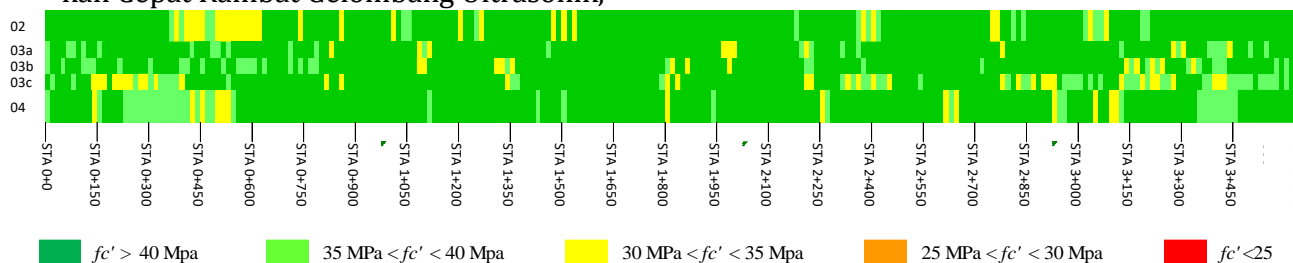
$$fc' = e^{(0,170V - 0,030R + 4,218)} \quad (4)$$

Dengan mensubstitusikan V dan R dalam range tertentu ke dalam pers. **Error! Reference source not found.**, maka fc' dapat divisualisasikan seperti pada Gambar 14. Dan dengan mensubstitusikan 1245 nilai R dari hasil RHT ke dalam pers. **Error! Reference source not found.**, diperoleh V , selanjutnya dengan mensubstitusikan

nilai R dan V ke dalam pers. **Error! Reference source not found.**, diperoleh nilai fc' . Gambar 14 menyajikan plotting nilai fc' sepanjang *runway*, dengan distribusi frekuensi nilai fc' seperti dalam Tabel 13.



Gambar 13. Kuat Tekan Beton Berdasarkan Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik,



Gambar 14. Estimasi Kuat Tekan Beton, fc' Dari Persamaan Regresi Berganda V dan R

RHT dan *ITM* lebih mewakili kondisi beton permukaan saja, dimana memang berdasarkan hasil pengamatan visual terlihat kondisi permukaan banyak bekas *patching*, terlihat juga kerusakan seperti retak longitudinal/ *transverse*, retak diagonal, *shattered slab* dan beberapa kerusakan lainnya. Sementara pada pengujian kuat tekan beton inti tentunya bagian permukaan yang mengalami *defect* sudah dipotong ataupun *digrinding* sebelum dilakukan uji tekan. Dan hasil pengujian beton inti menunjukkan 73.33% mempunyai nilai $fc' > 40$ MPa dan tidak ada satupun yang di bawah 30 MPa (

Tabel 7), dan hasil estimasi menggunakan pers. **Error! Reference source not found.** mendekati hal tersebut, seperti diberikan dalam Tabel 13.

Dari hasil asesmen ini teridentifikasi

V dan *Rebound*, R

Tabel 13. Distribusi Frekuensi fc' Hasil Estimasi dari Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik, V dan *Rebound*, R

fc'_{scd}	Frekuensi
> 40 MPa	78.35%
35 MPa-40 MPa	13.25%
30 MPa-35 MPa	8.40%
25 MPa-30 MPa	0.00%
<25 Mpa	0.00%

Estimasi fc' dalam Gambar 14 berbeda dengan fc' hasil estimasi dari *RHT* dalam Gambar 6 dan juga berbeda dengan hasil estimasi dari *ITM* dalam Gambar 9.

bahwa kerusakan perkerasan beton hanya terjadi pada bagian permukaan, karena beban berulang dari pesawat yang tinggal landas dan mendarat dalam frekuensi yang tinggi, namun kuat tekan beton inti semuanya masih di atas 30 MPa.

4. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian perkerasan landasan pacu dengan sampel acak terstruktur, dimulai dari uji palu beton, pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik dengan transmisi permukaan dan uji tekan beton inti dapat disimpulkan:

Nilai signifikansi pada uji F antara variabel terikat R terhadap fc' sebesar $0,063 > 0,05$ menunjukkan R tidak mempunyai korelasi dengan fc' .

Nilai signifikansi pada uji F antara variabel

terikat V terhadap fc' sebesar $0,031 < 0,05$ menunjukkan R mempunyai korelasi dengan fc' , namun nilai faktor determinasi, $r^2 = 0,327$, menunjukkan korelasi yang lemah, hal ini karena V mengindikasikan performa beton permukaan, sementara fc' dari uji kuat tekan beton inti.

Ada korelasi yang cukup kuat antara V dan R , dimana $V = 0,163 R + 2,366$, dengan faktor determinasi $r^2 = 0,719$. Hal ini dikarenakan nilai V dan R sama-sama mengindikasikan kondisi permukaan.

Formulasi fc' dari sampel acak terstruktur (*stratified random sampling*) cukup efektif untuk meminimalisir pengambilan sampel beton inti dan mampu menghasilkan persamaan $fc' = 67.910e^{(0,170V-0,030R)}$, dengan faktor determinasi $r^2 = 0,761$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ACI, *ACI 228.1R-19 Report on Methods for Estimating In-Place Concrete Strength*. American Concrete Institute, 2019.
- [2] American Concrete Institute., *ACI 228.2R-13 Report on nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures*. American Concrete Institute, 2013.
- [3] A. M. I. Said and B. A. H. Ali, "Assessment of Concrete Compressive Strength by Ultrasonic Non-Destructive Test," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Nov. 2021.
- [4] B. A. Herki, J. Khatib, Z. Ramadhan, and B. Hamadameen, "Condition Assessment Of Building Concrete Structures Using NDTs – Case Study," *International Conference on Recent Academic Studies*, vol. 1, pp. 158–171, May 2023, doi: 10.59287/icras.690.
- [5] British Standards Institution, *BS 1881-203:1986; Testing concrete - Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*, BSI. British Standards Institution, 2004
- [6] BSN, *SNI ASTM C805:2012, Metode uji angka pantul beton keras*. Jakarta, Indonesia: Badan Standarisasi Nasional, 2012. [Online]. Available: www.bsn.go.id
- [7] Direktur Jenderal Perhubungan Udara, *Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor SKEP/78/VI/2005, Petunjuk Pelaksanaan Pemeliharaan Konstruksi Landas Pacu (runway), Landas Hubung (taxiway), Dan Landas Parkir (apron) Serta Fasilitas Penunjang Di Bandar Udara*. 2005.
- [8] Direktur Jenderal Perhubungan Udara, *Standar Teknis dan Operasi Peraturan Keselamatan Penerbangan Sipil – Bagian 139 (Manual Of Standard CASR – Part 139), Volume I Bandar Udara (Aerodromes)*. Indonesia, 2015.
- [9] D. M. Zárate, F. Cárdenas, E. F. Forero, and F. O. Peña, "Strength of Concrete through Ultrasonic Pulse Velocity and Uniaxial Compressive Strength," *International Journal of Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 103–114, 2022, doi: 10.14716/ijtech.v13i1.4819.
- [10] F. Ma'arif, I. Yasin, and Z. F. Haza, "Studi Eksperimen Non-Destructive Test dengan Metode Semi-Direct pada Beton," vol. 18, no. 1, 2022, doi: 10.21831/inersia.v18i1.
- [11] F. Ridho and H. Khoeri, "Perbandingan Mutu Beton Hasil Upvt Metode Indirect Terhadap Mutu Beton Hasil Hammer Test dan Core Drill," *Konstruksia*, vol. 6, no. 2, 2015, doi: 10.24853/jk.6.2.%p.
- [12] F. Surya Herlambang and Y. Setyono, "Comparison Of Ultrasonic Pulse Velocity Test Results With and Without Using Transducer Stabilizer."
- [13] H. Khoeri, G. A. Putra, and N. R. Rizqullah, "Pengaruh Tingkat Karbonasi Terhadap Kuat Tekan Beton Pada Asesmen Struktur Gedung Eksisting," *Rancang Bangun*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2024.
- [14] H. Khoeri, "Non-Destructive Test

- Terhadap Semi Destructive Test pada Shear Wall Beton Bertulang,” *Konstruksia*, vol. 7, no. 2, Apr. 2016, doi: <https://doi.org/10.24853/jk.7.2.%25p>.
- [15] H. M. Najm, O. Nanayakkara, and M. M. S. Sabri, “Destructive and Non-Destructive Evaluation of Fibre-Reinforced Concrete: A Comprehensive Study of Mechanical Properties,” *Materials*, vol. 15, no. 13, Jul. 2022, doi: 10.3390/ma15134432.
- [16] H. R. Kumavat, N. R. Chandak, and I. T. Patil, “Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: A review,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14, p. e00491, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00491.
- [17] IAEA, *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002.
- [18] L. Wahidah, R. Ligina Ayu, and E. Wiyono, “Analisis Kerusakan dan Perbaikan Landas Pacu Bandar Udara dengan Metode PCI,” 2021.
- [19] L. Yang, X. Ma, and Y. Zhao, “A condition-based maintenance model for a three-state system subject to degradation and environmental shocks,” *Comput Ind Eng*, vol. 105, pp. 210–222, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.cie.2017.01.012.
- [20] M. Andi, Baehaki, and D. A. Khadafi, “Correlation of reinforcement concrete quality based on variations in UPV testing methods,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/673/1/012043.
- [21] M. Jedidi, “Evaluation of the Quality of Concrete Structures by the Rebound Hammer Method,” *Current Trends in Civil & Structural Engineering*, vol. 5, no. 5, 2020, doi: 10.33552/CTCSE.2020.05.000621.
- [22] M. R. Garcez, A. B. Rohden, and L. G. Graupner de Godoy, “The role of concrete compressive strength on the service life and life cycle of a RC structure: Case study,” *J Clean Prod*, vol. 172, pp. 27–38, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.153.
- [23] N. Handika, B. F. Norita, E. Tjahjono, and E. Arijoeni, “Experimental Studies on the Homogeneity and Compressive Strength Prediction of Recycled Aggregate Concrete (RAC) Using Ultrasonic Pulse Velocity (UPV),” *CSID Journal of Infrastructure Development*, vol. 3, no. 2, p. 117, Dec. 2020, doi: 10.32783/csijd.v3i2.111.
- [24] S. Alaswad and Y. Xiang, “A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system,” *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 157, pp. 54–63, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ress.2016.08.009.
- [25] S. Hong, S. Yoon, J. Kim, C. Lee, S. Kim, and Y. Lee, “Evaluation of Condition of Concrete Structures Using Ultrasonic Pulse Velocity Method,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 2, p. 706, Jan. 2020, doi: 10.3390/app10020706.
- [26] S. Silvia, L. B. Suparma, and S. H. T. Utomo, “Analisis Pengembangan Geometrik Runway Bandar Udara Fatmawati Soekarno Kota Bengkulu,” *Journal of Civil Engineering and Planning*, vol. 2, no. 2, p. 120, Dec. 2021, doi: 10.37253/jcep.v2i2.5201.
- [27] T. Amanah, “The Pavement Condition Index Functional Evaluation of Runway Pavement Used Pavement Condition Index (PCI) Method (Case Study : Fatmawati Soekarno Airport Provinsi Bengkulu),” *Journal of Civil Engineering and Planning*, vol. 4, no. 1, pp. 14–25, Jun. 2023, doi: 10.37253/jcep.v4i1.7660.
- [28] Y. Choi, J. W. Kang, T. Y. Hwang, and C. G. Cho, “Evaluation of residual strength with ultrasonic pulse velocity relationship for concrete exposed

to high temperatures," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 9, 2021, doi:
10.1177/16878140211034992.