

## ASESMEN BALOK BETON BERTULANG DENGAN PENDEKATAN HASIL PENGUJIAN NDT DI LABORATORIUM

<sup>1)</sup> Ahmad Gazi P.,<sup>1)</sup> Akmaluddin,<sup>1)</sup> Ni Nyoman Kencanawati  
<sup>1)</sup> Jurusan Teknik Sipil, Program Pascasarjana, Universitas Mataram

<b>Kata kunci :</b>	<b>Abstrak</b>
<b>Pengujian NDT, cepat rambat gelombang (v), nilai pantul (R), dan kekuatan sisa (KS).</b>	Salah satu metode untuk pengujian beton adalah pengujian dengan cara yang tidak merusak spesimen (Non-Destructif Test) yang selanjutnya dikenal dengan metode NDT. Pengujian beton dengan metode DNT terus mengalami perkembangan dan dikembangkan oleh para peneliti dewasa ini. Penelitian ini mengenai asesmen struktur balok beton bertulang dengan menggunakan pendekatan hasil pengujian NDT di laboratorium. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membangun model hubungan antara cepat rambat gelombang (v) terhadap kekuatan sisa (KS), korelasi antara cepat rambat gelombang (v) dengan kuat tekan ( $f'c$ ) beton, hubungan antara modulus elastis statis ( $E_c$ ) dengan modulus elastis dinamis ( $E_d$ ), dan membangun model korelasi antara cepat rambat gelombang dan nilai pantul terhadap kuat tekan beton. Hubungan/korelasi yang terbangun tersebut kemudian diaplikasikan untuk melakukan asesmen terhadap elemen struktur balok beton bertulang. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai v berbanding lurus dengan KS, dan berdasarkan KS dan v terbangun lima kategori kualitas beton yaitu (1) Sangat Baik; (2) Baik; (3) Cukup; (4) Jelek; dan (5) Sangat Jelek. Semakin besar nilai v maka kekuatan tekan beton semakin besar (v berbanding lurus dengan $f'c$ ). Nilai $E_d$ berbanding lurus dengan $f'c$ prediktif. Semakin besar $E_d$ semakin besar pula nilai $E_c$ . Semakin besar nilai R semakin besar pula nilai $f'c$ prediktif (R berbanding lurus dengan $f'c$ ). Dari hasil pengujian balok beton bertulang dan analisis dengan model persamaan yang terbangun diperoleh bahwa balok beton bertulang pada 40% beban maksimal rata-rata mempunyai KS 60-80%. MU-prediktif balok beton bertulang < MU aktual dengan rasio rata-rata 0,983 jika menggunakan Pundit, rasio rata-rata 0,808 jika menggunakan Hammer, dan rasio rata-rata 0,875 jika menggunakan Kombinasi Pundit dan Hammer. Artinya model yang terbangun dapat digunakan. Hasil pengujian defleksi menunjukkan $\delta$ teoritis < $\delta$ aktual < $\delta$ ijin. Artinya balok beton bertulang aman. $\delta$ teori rata-rata underestimate terhadap $\delta$ aktual dengan tingkat akurasi $\pm 20\%$ . Dengan demikian model yang terbangun bisa digunakan (acceptable) untuk asesmen balok beton dilapangan.
<b>Key words :</b>	<b>Abstract</b>
<b>NDT, velocity (v), the value of reflectance (R), and Compression strength</b>	<i>One method for testing concrete is non-destructive test (NDT). NDT is a way for testing that does not damage the specimen. Today DNT concrete testing methods has been develops and is still bieng developed by researchers. The research studies on the assessment of reinforced concrete beams using NDT test approach in laboratory. PUNDIT and Hammer is an equipment that can be used to determine the compressive strength and elastic modulus that does not damage the specimen. To get a valid result NDT equipment used needs to validation or verification of NDT results with the results of the testing standard methods. This study used three cylinder, twelve units cube of 20x20 and nine beams of 100x150x110. Before testing on beams performed a preliminary test on the specimen cube to build a model that will be applied to the beam. Results showed that the greater the value of v, the greater the compressive strength of concrete. The higher value of dinamic of <math>E_d</math>, the higher of <math>f'c</math>. The greather value of <math>E_d</math>, the greather of static of modulus elasticity. The higher the R-value, the higher the value of <math>f'c</math>. The relationship between the compressive strength (<math>f'c</math>) with a dynamic elastic modulus (<math>E_d</math>), and the relationship dynamic elastic modulus (<math>E_d</math>) with the static elastic modulus (<math>E_c</math>) is generated. By using the model in assessment of reinforced concrete beam specimen was obtained the results predicted ultimate moment (Mu) of beams underestimate or smaller 0.983 towards Mu experiment/actual if <math>f'c</math> predicted based on the v-value. And underestimate 0.808 from Mu experiment/actual if <math>f'c</math> predicted based on the value of R. The prediction results of deflection, <math>\delta</math> theory underestimate towards <math>\delta</math> experiment/actual with accuracy <math>\pm 20\%</math> if <math>f'c</math> predicted based on v-value and <math>\delta</math> theory, underestimate of <math>\delta</math> experiment/actual if <math>f'c</math> predicted based on R-value with accuracy <math>\pm 20\%</math>.</i>

©2015 Universitas Mataram

✉ Alamat koresponden penulis: E-mail : emamardiana@gmail.com

**PENDAHULUAN**

Terdapat dua cara untuk mengetahui kondisi dari mutu beton tersebut yaitu dengan uji mutu beton dengan merusak spesimen (*Destruktif*) dan uji mutu beton tanpa merusak spesimen (*Non-Destruktif*). Dengan uji beton yang sifatnya merusak spesimen, mutu beton yang dihasilkan bersifat aktual berdasarkan kuat tekan di laboratorium sedangkan uji mutu beton yang sifatnya tidak merusak spesimen, mutu yang dihasilkan bersifat perkiraan/prediktif. Penggunaan kedua metode uji ini disesuaikan dengan kebutuhan, umumnya untuk struktur beton yang masih baru pembuatannya menggunakan “destruktif test”(DT) tetapi untuk struktur beton yang masih aktif penggunaannya, metode uji yang tepat adalah “Non-destruktif test”(NDT) agar tidak mengganggu fungsi dari struktur beton tersebut.

Metode *NDT* Dalam beberapa tahun terakhir berkembang pesat, telah tersedia alat uji struktur beton yang dapat digunakan untuk penilaian struktur yang ada, namun masih belum ditetapkan untuk pemeriksaan secara rutin. Metode uji tidak merusak yang umum digunakan saat ini adalah dengan menggunakan hammer test, *Ultrasonic Pulse Velocity-PUNDIT*, *cavermeter*, *Resonant Frequency Test* dan lain-lain. Tes *NDT* juga sering berhubungan dengan kekuatan beton yang dibutuhkan oleh penyidik. Penekanan pada kekuatan beton timbul dari kenyataan bahwa sebagian besar cara kontrol durabilitas dan kinerja dalam pelaksanaannya mempengaruhi sifat kekuatan betonnya (Nash, a, & Sadoon, 2005).

*NDT* mudah untuk diterapkan tetapi interpretasi dan analisis data lebih sulit. ada masalah dalam grafik kalibrasi yang disiapkan oleh produsen. Sebagai catatan bahwa penggunaan grafik kalibrasi yang dibuat oleh produsen alat *NDT* perlu di pertimbangkan, karena diagram itu di turunkan atas dasar pengujian beton dengan jenis dan ukuran agregat tertentu, bentuk benda uji yang tertentu dan kondisi tes tertentu (Lubis, 2003).

Untuk mensiasati problem tersebut atau agar hasil asesmen dengan alat *NDT* di lapangan lebih akurat maka diperlukan informasi akurasi alat Hammer dan Pundit dengan pengujian aktual spesimen beton di laboratorium.

Tujuan utama penelitian adalah untuk membangun model korelasi dari bacaan peralatan *NDT* (Pundit dan Hammer) dengan

dengan kuat tekan ( $f'c$ ) dan Modulus elastisitas ( $E$ ) serta melakukan asesmen keamanan struktur dengan tinjauan kapasitas penampang (*ultimate limits state*) dan lendutan/defleksi (*serviceability limits state*) pada elemen balok beton bertulang.

**METODOLOGI PENELITIAN**

**Lokasi Penelitian**

Penelitian ini adalah Penelitian Eksperimen yang dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mataram.

**Alat dan Bahan**

Peralatan utama dalam penelitian ini adalah mesin uji tekan CTM (*compression Testing Machine*) merek Controls Milano, peralatan *NDT* test merek PUNDITplus buatan CNS FARNELL Inggris, hammer test merek Controls dan set mesin uji lentur balok ADVANTEST9. Sedangkan bahan penyusun beton yang digunakan berupa semen portlan tipe I dan bahan agregat (agregat halus dan agregat kasar) berasal dari Ijo Balit, Lombok Timur yang disediakan oleh PT. Utama Beton Perkasa. Untuk benda uji balok digunakan tulangan baja polos  $\Phi$  10 mm dan begel/sengkang  $\Phi$  6 mm.

**Rancangan Campuran**

Sebelum dibuat campuran beton (*mix design*) terlebih dahulu dilakukan pemeriksaan bahan penyusun beton (agregat halus dan agregat kasar), pemeriksaan ini dimaksudkan untuk mengetahui spesifikasi bahan yang akan digunakan sebagai bahan penyusun beton antara lain : air, Semen Portland, agregat halus/pasir, dan agregat kasar/kerikil. Setelah mengetahui spesifikasi bahan yang meliputi; berat satuan agregat, modulus halus butir (MHB) agregat halus dan agregat kasar, kadar lumpur agregat halus dan berat jenis agergat, dibuat rancangan campuran beton seperti disajikan dalam tabel 1 berikut ini.

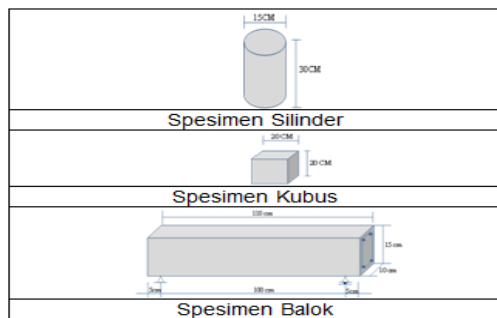
Tabel 1. Rancangan Komposisi Campuran

$f'c$ (Mpa)	Fas	Semen (kg/m <sup>3</sup> )	Air (kg/m <sup>3</sup> )	Pasir (kg/m <sup>3</sup> )	Kerikil (kg/m <sup>3</sup> )
25	0,56	360	205	740	1110
35	0,48	427	205	713	1070
45	0,43	477	205	693	1040

**Spesimen Uji**

Untuk mencapai tujuan yang diinginkan maka rancangan percobaan dibuat sedemikian rupa dengan memvariasikan kuat tekan beton dan besar pembebanan pada benda uji. Total benda uji yang diperlukan sejumlah 57 buah

dengan rincian 9 buah silinder  $\Phi 15$  cm x 30 cm, 45 Kubus 20 x 20 cm, dan 9 buah spesimen Balok dengan  $b=10$  cm,  $h=15$  cm dan  $p=110$  cm, seperti ditunjukkan Gambar 3. berikut ini.



Gambar 3. Spesimen

**Uji Kombinasi Destruktif (DT) dengan Non Destructive Test (NDT)**

Pengujian ini bertujuan untuk membangun model yang nantinya diaplikasikan untuk asesmen balok beton bertulang. Untuk membangun model tersebut digunakan 9 buah kubus 20x20 cm masing-masing 3 buah kubus mutu beton 25 MPa, 35 MPa, dan 45 MPa. Pada setiap benda uji dilakukan Pengujian pembebanan dengan “compressive-testing mechine” pada setiap interval kenaikan beban ( 0%P, 25%P, 50%P, 75%P dan 100%/hancur) dilakukan pembacaan cepat rambat gelombang dengan alat PUNDIT dan nilai pantul dengan peralatan Hammer test. seperti ditunjukkan pada Gambar 4 berikut ini:



Gambar 4. Pengujian Kombinasi DT dan NDT

**Uji Lentur**

Pengujian elemen balok bertujuan sebagai perwakilan elemen struktur balok dilapangan. Pada pengujian ini akan diaplikasikan model yang terbentuk pada pengujian utama pada

kubus beton untuk melihat kualitas balok dan tingkat keamanan elemen struktur berdasarkan Kapasitas Penampang (*Ultimate Limits State*) dan kontrol terhadap defleksi (*Serviceability Limits State*), sebarapa besar rasio hasil penerapan model terhadap kondisi balok yang sebenarnya berdasarkan pembebanan sesungguhnya. Untuk tujuan ini 3 buah benda uji disiapkan untuk masing-masing beton 25 Mpa, 35 Mpa dan 45 Mpa.



Gambar 5. Pengujian Kombinasi DT dan NDT pada Balok

**Analisa Data**

Data pengujian kombinasi DT dan NDT diolah untuk membangun model korelasi antara nilai cepat rambat gelombang ( $v$ ) dengan kuat tekan ( $f'c$ ) pada beton, Korelasi antara nilai pantul ( $R$ ) dengan  $f'c$  pada beton, korelasi antara modulus dinamis ( $Ed$ ) dengan  $f'c$ , dan membangun model korelasi antara  $Ed$  dengan modulus dinamis ( $Ec$ ).

Model korelasi antara parameter tersebut ditentukan dengan menggunakan analisa korelasi dengan bantuan Grafik MS Office yang modelnya bergantung pada tren data yang diperoleh.

Model Korelasi yang terbangun tersebut digunakan untuk menginterpretasi kondisi atau keamanan struktur pada tinjauan kapasitas penampang (*ultimate limits state*) dan lendutan/defleksi (*serviceability limits state*) pada elemen balok beton bertulang sebagai perwakilan elemen struktur lentur di lapangan (struktur balok eksisting).

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Hasil pengujian sifat fisik bahan penyusun beton**

Pada penelitian ini digunakan agregat halus dan agregat kasar berasal dari Pringgabaya, Lombok Timur yang disediakan oleh PT. Utama Beton Perkasa. Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa sifat fisik yang meliputi berat satuan agregat, gradasi

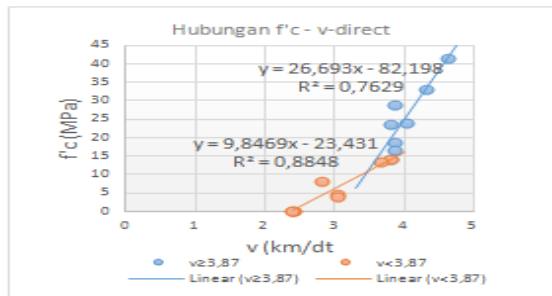
agregat, kadar lumpur agregat halus dan berat jenis agregat memenuhi standar SNI S-04-1989-F sebagai bahan campuran beton. Hasil selengkapnya pada Tabel 2. sebagai berikut:

Tabel 2. Data Hasil Pemeriksaan Bahan Penyusun Beton

Pemeriksaan Bahan	Hasil pemeriksaan bahan
Berat satuan pasir	
a. Berat satuan lepas	1,341 gr/cm <sup>3</sup>
b. Berat satuan padat	1,520 gr/cm <sup>3</sup>
Berat satuan batu pecah	
a. Berat satuan lepas	1,451 gr/cm <sup>3</sup>
b. Berat satuan padat	1,646 gr/cm <sup>3</sup>
Modulus halus butir (MHB) pasir	3,203
Modulus halus butir (MHB) batu pecah	6,67
Kandungan lumpur dalam pasir	3,06 %
Berat jenis pasir, SSD	2,65
Berat jenis batu pecah, SSD	2,56

**Hubungan v dengan f'c**

Dari hasil penelitian diperoleh pola hubungan f'c dengan v seperti ditunjukkan oleh Gambar 6. berikut:



Gambar 6. Hubungan Korelasi v dengan f'c

Gambar 6. menunjukkan semakin besar nilai cepat rambat gelombang semakin besar pula nilai kuat tekan beton (v berbanding lurus dengan f'c). Dari grafik pada Gambar 6. Dapat dibangun dua persamaan korelasi f'c dengan v sebagai berikut:

$$f'c_{prediktif} = 40,4465v - 139,84 \dots \dots \dots (1)$$

Persamaan 1 digunakan Jika v ≥ 3, 8 dan Jika v < 3,8 f'c dapat diprediksi dengan Persamaan 2. berikut ini:

$$f'c_{prediktif} = 8,7802v - 21,398. \dots \dots \dots (2)$$

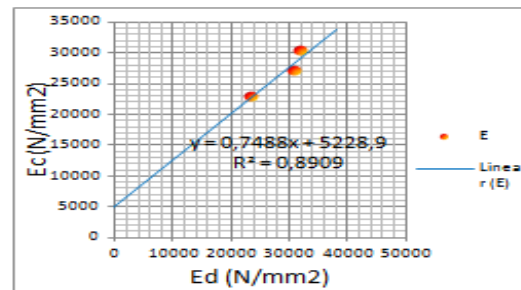
**Hubungan Ec dan Ed**

Modulus elastisitas statis (Ec) didapatkan dari uji silinder yang dihitung dengan Persamaan 2, maka untuk benda uji kubus nilai Ec diambil sebesar 4700√f'c.

Nilai f'c yang digunakan adalah nilai f'c kubus yang telah dikonversi ke kuat f'c silinder. Sedangkan nilai modulus elastisitas dinamis (Ed) dihitung dengan persamaan 2. dimana nilai cepat rambat gelombang (v) diambil saat pembacaan pundit titik 40% tegangan maksimum.

Semakin besar nilai modulus dinamis semakin besar pulai nilai modulus statis pada beton (Ed berbanding lurus dengan Ec). Korelasi antara Ec dengan Ed ditunjukkan dalam Gambar 7. berikut. Hubungan antara Ec dengan Ed variasi mutu beton dapat dinyatakan dengan persamaan korelasi:

$$Ec = 0,7488Ed + 5228,9 \dots \dots \dots (3)$$

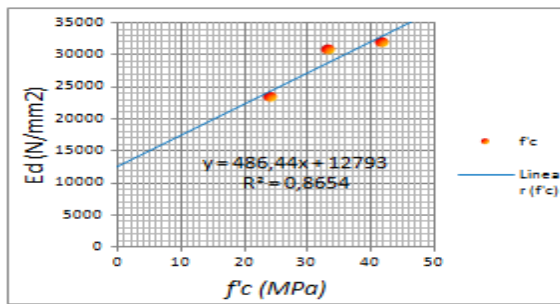


Gambar 7. Hubungan Ec dengan Ed

Dari pengujian kubus diperoleh f'c yang telah dikonversi ke kuat f'c silinder. Sedangkan nilai modulus elastisitas dinamis (Ed) untuk setiap mutu beton dihitung dengan persamaan 2. Nilai cepat rambat gelombang (v) diambil saat pembacaan pundit titik 40% tegangan maksimum.

Dalam pengukuran NDT dilapangan tidak diketahui beban yang diterima konstruksi oleh karena itu perlu dibangun hubungan korelasi antara Ed dengan f'c. Hasil Pengjian menunjukkan bahwa Ed berbanding lurus dengan f'c seperti ditunjukkan pada Gambar 8 dan diperoleh persamaan korelasi f'c dengan Ed adalah:

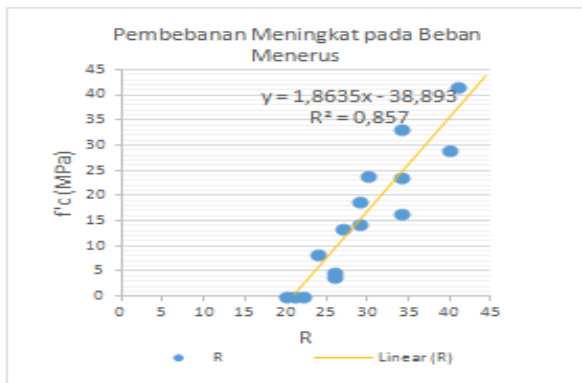
$$Ed = 486,44 f'c + 12793 \dots \dots \dots (4)$$



Gambar 8. Hubungan korelasi  $E_d$  dengan  $f_c$

**Hubungan R dengan  $f_c$**

Semakin besar nilai pantul maka semakin besar pula nilai kuat tekan pada beton ( $R$  berbanding lurus dengan  $f_c$ ) seperti ditunjukkan Gambar 8. Hubungan korelasinya ditunjukkan dengan persamaan;



Gambar 9. Hubungan korelasi  $R$  dengan  $f_c$

**Uji Lentur Balok**

Pengujian elemen balok bertujuan sebagai perwakilan elemen struktur balok dilapangan. Pada pengujian ini akan diaplikasikan model yang terbentuk pada pengujian utama untuk melihat kualitas balok pada setiap peningkatan beban dan tingkat keamanan elemen struktur berdasarkan Kapasitas Penampang (*Ultimate Limits State*) dan kontrol terhadap batas defleksi (*Serveacibility Limits State*) seberapa besar rasio hasil penerapan model terhadap kondisi balok yang sebenarnya berdasarkan pembebanan sesungguhnya.

**Kapasitas Penampang Balok**

Tabel 4. Kapasitas Penampang Berdasarkan nilai  $v$

Spesimen	$v$ (km/dt)	$f_c$ (MPa)	$M_{u\text{prediktif}}$ (kNm)	$M_{u\text{aktual}}$ (kNm)	Rasio	Rerata Rasio
B - 25	4,032	25,10	6,407	7,941	0,807	0,983
B - 35	4,340	34,04	8,498	8,248	1,030	
B - 45	4,470	37,82	9,371	8,433	1,111	

Tabel 4. Kapasitas Penampang Berdasarkan nilai  $R$

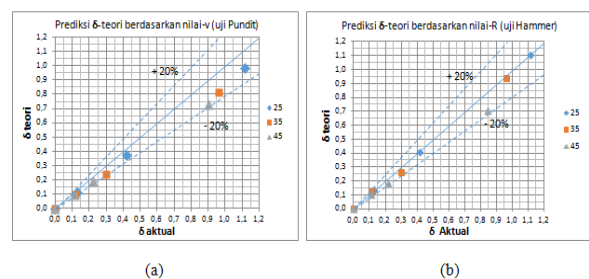
Spesimen	$R$	$f_c$ (MPa)	$M_{u\text{prediktif}}$ (kNm)	$M_{u\text{aktual}}$ (kNm)	Rasio	Rerata Rasio
B - 25	32	19,82	5,225	7,941	0,623	0,808
B - 35	32	21,49	5,694	8,248	0,605	
B - 45	40	33,19	9,064	8,433	1,075	

mutu beton pada balok beton mutu 25 MPa dan 35 MPa underestimate terhadap  $M_{u\text{eksperimen/aktual}}$ , dan pada mutu balok beton 45 MPa  $M_{u\text{prediktif}}$  overestimate terhadap  $M_{u\text{eksperimen/aktual}}$ . Rata-rata rasio  $M_{u\text{prediktif}}$  terhadap  $M_{u\text{aktual}}$  0,983 jika prediksi berdasarkan uji Pundit dan rata-rata rasio 0,808 jika prediksi berdasarkan uji Hammer. Artinya model yang terbangun dapat digunakan (acceptable) untuk memprediksi kapasitas elemen struktur balok dilapangan.

**Kontrol Defleksi Balok**

Dari pengujian pembebanan pada balok diketahui besar defleksi yang terjadi yang sesungguhnya ( $\delta_{\text{aktual}}$ ). Dengan pengujian  $NDT$  bisa diprediksi kuat tekan ( $f_c^{\text{prediktif}}$ ) dengan menggunakan Persamaan 1., Persamaan 2., dan Persamaan 5. Kemudian dari  $f_c^{\text{prediktif}}$  diperoleh  $E_d$  dan  $E_c$  dengan Persamaan 3., dan Persamaan 4., yang nantinya menjadi dasar perhitungan defleksi teoritis ( $\delta_{\text{teori}}$ ) elemen balok. Defleksi teoritis dihitung dengan menggunakan rumus defleksi model pembebanan 2 titik.

Hasil penelitian pada pembebanan 0% P sampai dengan 40% ditunjukkan dalam Gambar 10. Dan Gambar 11. berikut ini:



Gambar 10. Perbandingan  $\delta_{\text{aktual}}$  dengan  $\delta_{\text{teori}}$

Gambar 10. ini menunjukkan perbedaan defleksi teoritis dan defleksi aktual dari benda uji dimana secara umum defleksi teoritis lebih kecil

(*underestimate*) dibanding defleksi aktual. Walaupun defleksi aktual dari benda uji ini belum tepat seperti yang diprediksi tetapi dari sudut pandang penggunaan model dari uji pendahuluan berdasarkan uji Pundit dan uji Hammer dalam penelitian ini dapat menghasilkan variasi nilai teoritis dimana penyebarannya (*scattered*) masih dalam batas yang diizinkan (*acceptable*). Batas akurasi yang digunakan  $\pm 20\%$  mengacu pada beberapa penelitian terdahulu (Akmaluddin & Thomas, C., 2006) dan (Gilbert, R.I.:1999)

### KESIMPULAN

Dari hasil penelitian, pengujian, analisa data, dan pembahasan yang telah dilakukan dalam penelitian ini, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Model yang terbangun dari uji laboratorium dapat digunakan (*acceptable*) untuk asesmen struktur balok beton bertulang.
2. Hasil prediksi  $\mu$  dari Uji Pundit dan Hammer *underestimate* terhadap  $\mu$  aktual dengan rasio rata-rata 0,983 berdasarkan uji Pundit dan 0,808 jika menggunakan Hammer.
3. Hasil prediksi defleksi dari Uji Pundit dan Hammer *underestimate* terhadap defleksi actual dengan akurasi  $\pm 20\%$ .

### SARAN

1. Agregat yang digunakan dalam penelitian baik agregat halus maupun agregat kasar lebih baik dalam keadaan kering permukaan jenuh sehingga beton yang dihasilkan sesuai dengan yang direncanakan.
2. Perlu dilakukan pengembangan penelitian terkait dengan pengaruh tulangan terhadap pengujian *NDT* pada struktur.

### DAFTAR PUSTAKA

Agency, I. A. E. (2002). *Guidebook of non-destructive testing of concrete structures*. Training Course Series, 17.

Akmaluddin. (2008). *Utilising Ndt Apparatus for Strength Assessment of Concrete Structural Element*. *Rekayasa*, 9(2), 93–98.

Akmaluddin. & Thomas, C., (2006). *Experimental Verification of Effective Moment of Inertia Used in the Calculation of Reinforced Concrete Beam Deflection*, *Proceeding of Civil Engineering Conference "Towards Sustainable Civil*

*Engineering Practice" ITB Journal of Engineering Science*. Vol.43, No.3, 2011.227-243

- Bungey J.H., Millard S. G. dan Grantham M. G. (1982). *Testing of Concrete in Structures* (4th ed.). 270 Madison Ave, New York, USA: Taylor & Francis.
- Dipohusodo, I. (1993). *Struktur Beton Bertulang berdasarkan SKSNI T 15-1991-03*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Gilbert, R.I. & Thomas, C., (1999). *Deflection Calculation for Reinforced Concrete Structures-Why We Sometimes Get It Wrong*, *ACI Structural Journal*, pp,1027-1032.
- L.Schodek, D. (1998). *Struktur*. (M. S. Ir.Bambang Suryoatmono, Ed.) (3rd ed.). Cambridge, Massachusetts: Refika Aditama.
- Lawson, K.A. Danso, H.C. Odoi, C.A. Adjei, F.K. Quashie, I.I. Mumuni, dan Ibrahim, I. (2011). *Non Destructive Evaluation of Concrete using Ultrasonic Pulse Velocity Research*. *Journal of Applied Sciences Engineering and Technology*, vol.3, p. 499–504.
- Lubis, M. (2003). *Pengujian Struktur Beton dengan Metode Hammer Test dan Metode Uji Pembebanan (Load Test)*. *USU Digital Library*, 1–17.
- Mulyono, T. (2004). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Nash, I. H., Hameed A.S., dan Abdullah S. A. (2005). *Finding an Unified Relationship between Crushing Strength of Concrete and Non-destructive Tests*.
- SNI-03-2847. (2002). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Departemen Pekerjaan Umum.
- SNI-2843. (2013). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Badan Standarisasi Nasional.
- SNI-2847:2013. (2013). *Persyaratan Struktural untuk Bangunan Gedung*.
- Turgut, P. (2010). *Research into the correlation between concrete strength and UPV values*. *Civil Engineering*, 12(12), 1–7.
- Winarsih, T. (2010). *Asesmen kekuatan struktur bangunan gedung*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.