



## Prediksi Kuat Lentur Balok Beton dengan Menggunakan Program Response-2000 dan Persamaan Pendekatan

\*Fanny Monika<sup>1</sup>, Kholil Muqorrobil<sup>1</sup>, Hakas Prayuda<sup>1</sup>, Talitha Zhafira<sup>2</sup>, Lilis Tiyani<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Semarang

<sup>3</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Politeknik Negeri Jakarta

\*) [fanny.monika.2007@ft.umy.ac.id](mailto:fanny.monika.2007@ft.umy.ac.id)

Received: 12 Oktober 2021 Revised: 8 Desember 2021 Accepted: 11 Juli 2022

### Abstract

*Flexural strength is one of the mechanical properties of concrete that should be tested, especially for concrete that serves as a beam and is subjected to flexural loads. However, the assessment of flexural strength in concrete frequently relies solely on a mathematical approach that several previous researchers have found. Concrete structures continue to evolve, particularly in the use of more diverse and sustainable constituent materials. Meanwhile, the generated equations use conventional concrete without adding cementitious or replacement components. Therefore, it is necessary to investigate whether these equations can accurately predict the flexural strength of concrete with diverse constituent materials. This investigation was undertaken by reviewing 72 data sets derived from the experiment by previous researchers. Each set of test data will be compared to various formulas and will also be compared to the analysis performed using Response-2000. The results show that the correlation between Response-2000 and the experiment was 0.8207 with the linear regression equation  $y = 1.1326x + 1.0016$ . The flexural strength analysis using various approach formulas resulted in an average correlation  $R^2$  of 0.8246, or 82.46% correlated to the results of the flexural strength of laboratory tests.*

**Keywords:** Flexural strength, substitute materials, response-2000, compressive strength, concrete beam

### Abstrak

*Kuat lentur beton merupakan salah satu sifat mekanik yang perlu di periksa khususnya untuk beton yang difungsikan sebagai balok yang menerima beban lentur. Namun demikian, seringkali pemeriksaan kuat lentur beton hanya menggunakan pendekatan persamaan yang telah ditemukan oleh beberapa peneliti. Seiring perkembangannya, inovasi konstruksi beton terus dilakukan khususnya inovasi bahan penyusun yang lebih bervariasi. Sementara itu, persamaan-persamaan yang telah dihasilkan pada umumnya menggunakan beton konvensional tanpa bahan-bahan penyusun tambahan. Oleh sebab itu, perlu dilakukan pemeriksaan apakah persamaan tersebut dapat memprediksi kuat lentur dengan material penyusun yang lebih bervariasi. Penelitian ini dilakukan dengan memeriksa 72 data dari hasil pengujian laboratorium yang dilakukan oleh peneliti terdahulu. Masing-masing data hasil pengujian akan dikomparasikan dengan persamaan yang telah ditemukan serta hasil ini juga dibandingkan dengan analisis menggunakan Response-2000. Hasil analisis kuat lentur aplikasi Response-2000 didapatkan korelasi  $R^2$  terhadap pengujian kuat lentur laboratorium sebesar 0,8207 atau mendekati nilai kuat lentur pengujian laboratorium sebesar 82%, dengan persamaan regresi linier  $y = 1,1326x + 1,0016$ . Hasil analisis kuat lentur menggunakan berbagai metode pendekatan substitusi kuat tekan didapatkan rata-rata korelasi  $R^2$  sebesar 0,8246, atau mendekati nilai kuat lentur pengujian laboratorium sebesar 82,46%.*

**Kata kunci:** Kuat lentur, material pengganti, response-2000, kuat tekan, balok beton

### Pendahuluan

Beton merupakan salah satu material yang paling banyak digunakan khususnya di dunia industri

konstruksi. Material penyusun yang sangat mudah ditemukan dengan harga yang murah dibandingkan dengan material konstruksi lainnya, serta proses pembuatannya yang tidak memerlukan keahlian

khusus. Bahan penyusun beton pada umumnya terdiri dari agregat halus, agregat kasar, air, semen dan *superplasticizer*. Untuk menjamin kualitas beton yang digunakan, perlu dilakukan pemeriksaan propertis beton seperti kuat tekan, kuat tarik dan kuat lentur. Pemeriksaan ini perlu dilakukan karena sumber bahan penyusun beton yang sangat bervariasi dan sangat sulit untuk dikontrol. Pemeriksaan yang paling sering dilakukan adalah pengujian kuat tekan dengan variasi umur beton. Sementara sifat mekanik lainnya seperti kuat tarik dan kuat lentur seringkali dilakukan dengan menggunakan metode kalkulasi dari persamaan pendekatan melalui pengujian kuat tekan dengan mengaplikasikan konstanta tertentu melalui hasil penelitian terdahulu.

Beberapa penelitian yang ditemukan memprediksi bahwa penggunaan dan produksi beton akan terus meningkat hingga tahun 2050 khususnya di negara-negara yang sedang berkembang seperti China, India serta Indonesia (Imbabi *et al.*, 2012; Schneider *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2015; Andrew, 2018). Di sisi lain, produksi beton secara terus menerus dipercaya sebagai salah satu sumber polusi terbesar di dunia. Tingkat gas emisi yang lepas ke *atmosphere* akibat dari produksi beton termasuk semen mencapai 8% setiap tahunnya (Wesseling & Vooren, 2017; Danish *et al.*, 2019). Peningkatan polusi yang terjadi secara masif ini tentunya sangat mengkhawatirkan apabila terus dibiarkan. Banyak metode dan teknologi yang sedang berkembang dan terus dilakukan oleh peneliti untuk menekan angka polusi yang diakibatkan oleh konstruksi beton. Penggunaan material-material yang lebih ramah lingkungan seperti pemanfaatan berbagi limbah juga dilakukan untuk membantu pengurangan penggunaan semen serta menghasilkan beton yang lebih berkelanjutan. Pemanfaatan material-material limbah ini akan terus berkembang dan diaplikasikan di lapangan sebagai salah satu material penyusun beton.

Pemanfaatan material-material baru sebagai bahan pengganti penyusun semen tentunya sangat mempengaruhi propertis beton yang dihasilkan. Sebagai contoh, beberapa peneliti menyimpulkan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai material pengganti semen pada beton dapat mengurangi kualitas beton khususnya di umur awalnya (Subramaniam *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 2017). Beberapa penelitian juga ditemukan bahwa penggunaan *bottom ash* sebagai pengganti semen menghasilkan volume pori yang lebih banyak dibandingkan beton konvensional sehingga menghasilkan behavior yang berbeda (Rafieizonooz, *et al.*, 2016; Khan & Ganesh, 2016). Dari beberapa penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa penggunaan berkelanjutan material yang

terbarukan cukup mempengaruhi karakteristik dari beton. Disisi lain, terdapat banyak persamaan yang dihasilkan untuk memprediksi sifat dari beton melalui pengujian kuat tekan, seperti prediksi kuat tarik dan kuat lentur. Padahal rumus tersebut diperoleh menggunakan beton normal sebagai data eksperimen, sehingga perlu dilakukan analisis mengenai rumus-rumus yang telah dihasilkan untuk dapat diaplikasikan pada berbagai jenis beton dengan material penyusun yang berbeda beda.

Penelitian ini juga memanfaatkan aplikasi Response-2000 untuk memprediksi kuat lentur balok beton. Aplikasi Response-2000 seringkali digunakan untuk memeriksa kuat lentur beton tanpa dilakukan pengujian langsung di laboratorium dengan menggunakan beberapa data propertis dari beton. Response-2000 adalah program simulasi untuk menganalisis perilaku beton yang dibebani oleh gaya tertentu yang dikembangkan oleh Bentz dan Collins (2001). Program ini dinilai cukup akurat untuk melakukan analisis terhadap perilaku beton jika dibebani oleh beban aksial, momen, dan geser (Sadeghian & Vecchio, 2018).

Ketiga beban tersebut dipertimbangkan bersamaan untuk menganalisis respon beban dan deformasi yang terjadi berdasarkan teori medan kompresi yang dimodifikasi, atau *Modified Compression Field Theory* (MCFT), sehingga dapat diketahui daktilitas dan tingkat kekuatan dari balok beton tersebut. Aplikasi ini dapat menganalisis sifat-sifat dari sebuah balok/kolom beton yang dapat memunculkan momen, tegangan geser, gaya geser, beban aksial, kelengkungan, defleksi serta pola retak. Beberapa hasil penelitian juga ditemukan bahwa program Response-2000 cukup mampu untuk memprediksi dan memvalidasi kuat lentur pada balok beton (Suryanto *et al.*, 2016; Metwally, 2012; Zega *et al.*, 2020; Prayuda, *et al.*, 2018; Monika, *et al.*, 2019)

Penelitian ini dilakukan pemeriksaan kuat lentur dari 72 data hasil penelitian terdahulu. Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data kuat tekan. Hasil kuat tekan dari masing-masing hasil pemeriksaan akan digunakan untuk mengkalkulasi kuat lentur dengan menggunakan beberapa metode yang telah dihasilkan. Selain itu, dilakukan juga analisis Response 2000 dengan menggunakan kuat tekan beton hasil eksperimen sebagai input data untuk memeriksa kuat tekan balok beton. setelah hasil kuat lentur diperoleh baik dari rumus yang di approach maupun dari Response 2000, dilakukan komparasi hasil kuat lentur yang diperoleh dari eksperimen. Melalui penelitian ini diharapkan dapat memperoleh formula yang cocok untuk digunakan untuk memprediksi kuat lentur berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton.

## Metode

### Koleksi data

Tahap awal penelitian yang dilakukan adalah pengumpulan data dari peneliti terdahulu. Pada Tabel 1 merupakan hasil pengumpulan data dari hasil penelitian yang dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu. Data yang dipilih difokuskan dalam hasil-hasil penelitian yang menggunakan material lokal yang berasal dari Indonesia. Data yang diambil dari masing-masing jurnal terdiri dari hasil pengujian kuat tekan dan kuat lentur balok beton tanpa tulangan dengan penggunaan campuran beton yang sama. Penelitian ini tidak hanya mengambil data dengan variasi campuran material terbarukan sebagai pengganti semen, namun terdapat juga beberapa data hasil penelitian terdahulu dengan variasi penggantian agregat halus, agregat kasar serta penambahan beberapa jenis *supelplasticizer*. Total data yang terkumpul untuk penelitian ini adalah 72 data.

### Persamaan pendekatan

Setelah data terkumpul, analisis kuat lentur dilakukan dengan menggunakan rumus pendekatan dari hasil pengujian kuat tekan dengan menggunakan berbebagi metode. Penelitian ini

terkumpul sebanyak 8 persamaan yang sering digunakan untuk memprediksi kuat lentur balok beton. Adapun rumus dari masing-masing metode dapat dilihat dari Persamaan 1 sampai 8. Metode prediksi kuat lentur yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari metode SNI 2847:2019 (BSN, 2019), ACI 318:2005 (ACI, 2005), *Indian Standard* 456:2000 (IS, 2000), JSCE:2007 (JSCE, 2007), *Australian Standard*: 2004 (Austroads, 2004), CCAA:1999 (CCAA, 1999), Legeron & Paultre (2000) dan Juki, *et al* (2013).

Metode SNI 2847:2019 (BSN, 2019):

$$f_s = 0,62 \lambda \sqrt{f'c} \quad (1)$$

Metode ACI 318:2005 (ACI, 2005):

$$f_s = 0.517 \sqrt{f'c} \quad (2)$$

Metode *Indian Standard* 456:2000 (IS, 2000):

$$f_s = 0.626 \sqrt{f'c} \quad (3)$$

Metode *Japan Society of Civil Engineers* (JSCE, 2007):

$$f_s = 0,23 f'c^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

Metode *Austroads Pavement Design Guide* (Austroads, 2004)

$$f_s = 0.75 \sqrt{f'c} \quad (5)$$

Tabel 1. Koleksi data untuk pemeriksaan kuat lentur

No	Sumber data	Material terbarukan	Jumlah data
1	Natalius (2012)	<i>Bondcrete</i> 0°, <i>Bondcrete</i> 45°, <i>Bondcrete</i> 60°	3
2	Syukranlillah, <i>et al.</i> (2021)	Tanah <i>diatomae</i> , Tanah <i>diatomae</i> + serbuk gergaji	2
3	Suryono, <i>et al.</i> (2021)	Pasir palaran, Pasir batuan, Pasir tenggarong	3
4	Lagalung, <i>et al.</i> (2021)	<i>Bottom ash</i> 0%, 25% and 35%	3
5	Sultan, <i>et al.</i> (2017)	Beton normal, Beton dari abu Gamalam	2
6	Rompas, <i>et al.</i> (2013)	Abu ampas tebu 0%, 10%, 20%, 30%	4
7	Suarnita (2010)	Agregat kasar tempurung kelapa	1
8	Erlina (2020)	Serbuk kayu Jati 0%, 25%, 50%, 75%, 100%	5
9	Erlina (2020)	Serbuk kayu Kelapa 0%, 25%, 75%, 100%	5
10	Setiawan, <i>et al.</i> (2021)	Cangkang Kerang Hijau 0%, 5%, 10%, 20%	4
11	Raya, <i>et al.</i> (2016)	Agregat kasar dari limbah batu <i>Onyx</i>	2
12	Darwis, <i>et al.</i> (2017)	Beton non-pasir 1:4, 1:6, 1:8, 1:10	4
13	Kushartomo & Tandio (2016)	<i>Fly Ash</i> 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 40%	7
14	Kristianto, <i>et al.</i> (2016)	Cangkang Sawit 0%, 5%, 10%, 15%	4
15	Rahamudin, <i>et al.</i> (2016)	Abu Sekam Padi 5%, 10%, 15%, 20%	4
16	Ismail, <i>et al.</i> (2017)	<i>Fly Ash</i> dan agregat kasar dari limbah	1
17	Meidiani & Pratama (2015)	Variasi jenis cetakan beton	2
18	Setiati dan Halim (2018)	Semen <i>slag low heat</i> (LH), Semen biasa	2
19	Mardiaman, <i>et al.</i> (2020)	<i>Fly Ash</i> 0%, 5%, 10%, 15%, 20%	5
20	Suryani, <i>et al.</i> (2018)	Dengan dan tanpa <i>superplasticizer</i>	2
22	Darmiyanti (2018)	Concrete tipe K-350, K-450	2
23	Mildawati (2018)	Agregat halus dari limbah bangunan	1

Metode *Cement Concrete & Aggregates Australia* (CCAA, 1999)

$$f_s = 0.70\sqrt{f'c} \quad (6)$$

Metode Legeron dan Paultre (2000)

$$f_s = 0,342 f'c^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

Metode Juki, *et al.* (2013)

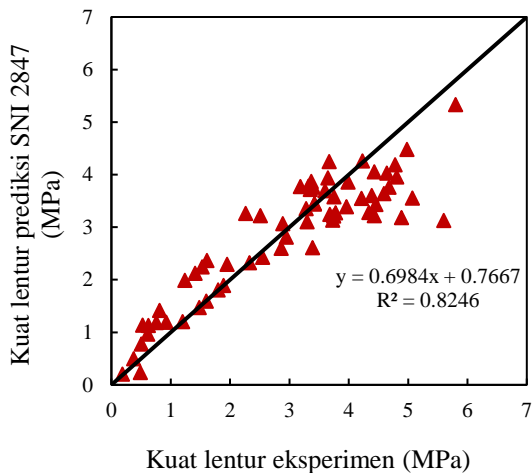
$$f_s = 0,68 f'c^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

dengan  $f_s$  merupakan kuat lentur prediksi (MPa),  $\lambda$  merupakan faktor koefisien modifikasi beton, dan  $f'c$  merupakan Nilai kuat tekan (MPa).

## Hasil dan Pembahasan

### Komparasi hasil eksperimen dengan persamaan.

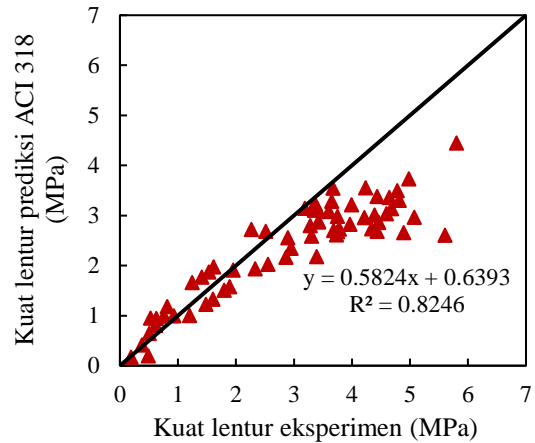
Hasil prediksi dan komparasi kuat lentur dengan berbagai metode terhadap kuat lentur hasil eksperimen dapat dilihat pada Gambar 1 sampai dengan Gambar 8. Gambar 1 merupakan hasil komparasi antara hasil eksperimen dengan prediksi kuat lentur dengan menggunakan metode SNI 2748:2019. Hasil prediksi menunjukkan bahwa kuat lentur di bawah 4 MPa dapat diprediksi dengan baik, namun hasil prediksi kuat lentur di atas 4 MPa terlihat hasil pengujian laboratorium jauh lebih besar dibandingkan hasil prediksi. Namun demikian, korelasi antara hasil eksperimen dengan hasil prediksi metode SNI cukup baik yaitu 0,8246.



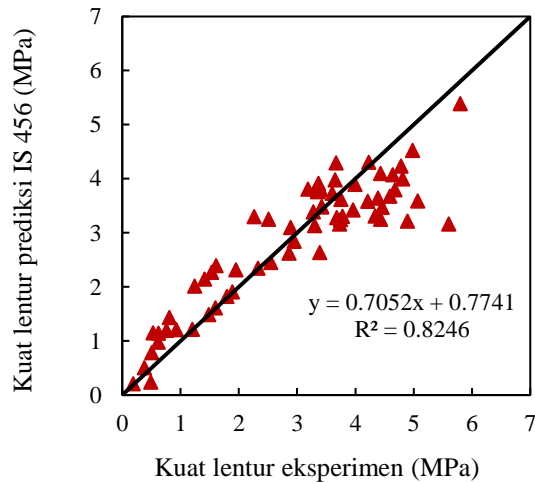
**Gambar 1. Komparasi kuat lentur hasil eksperimen dengan prediksi metode SNI**

Hasil korelasi yang sama seperti metode SNI yaitu 0,8246 juga diperoleh dengan menggunakan beberapa metode lainnya yaitu metode ACI pada Gambar 2. Gambar 3 menunjukkan metode IS. Metode CCAA pada Gambar 4, metode *Austroads* pada Gambar 6, serta metode Legeron & Paultre Gambar 7. Metode-metode dengan korelasi yang sama ini menunjukkan bahwa kuat lentur yang kecil di bawah 4 MPa cukup memiliki pola berbanding

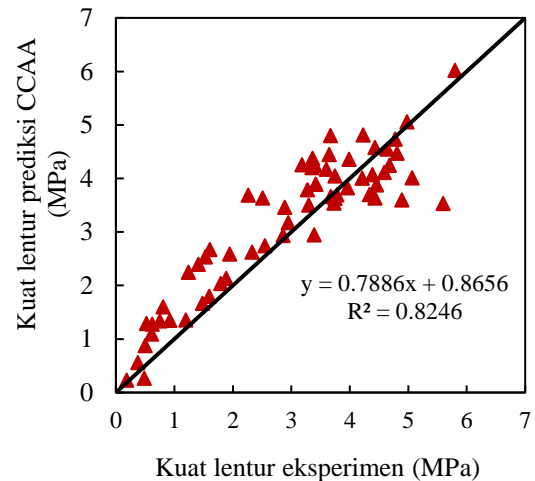
lurus dengan hasil eksperimen. Kuat lentur di atas 4 MPa menunjukkan bahwa metode-metode tersebut belum mampu memprediksi dengan cukup tepat.



**Gambar 2. Komparasi kuat lentur hasil eksperimen dengan prediksi metode ACI**

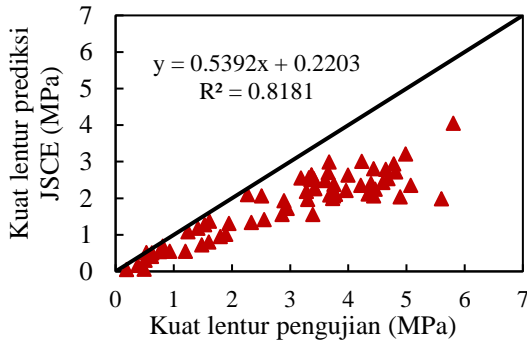


**Gambar 3. Komparasi kuat lentur hasil eksperimen dengan prediksi metode IS**

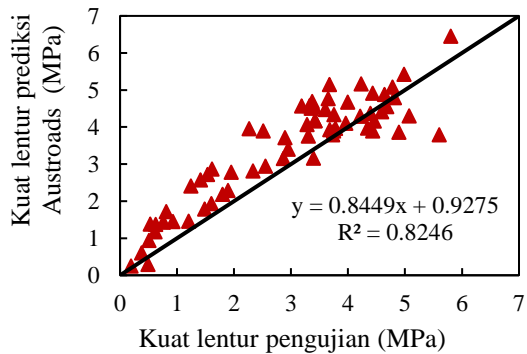


**Gambar 4. Komparasi kuat lentur hasil eksperimen dengan prediksi metode CCAA**

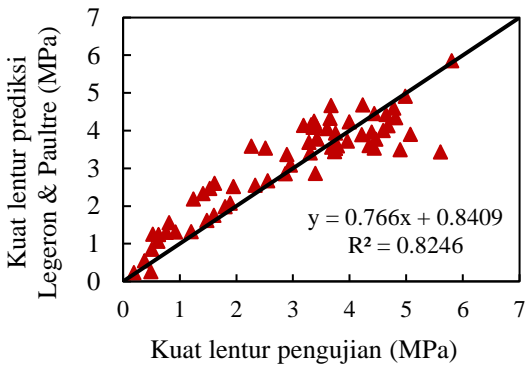
Hasil prediksi kuat lentur untuk metode JSCE terlihat sebagai dalam Gambar 5. Hasil komparasi ini menunjukkan bahwa metode JSCE selalu menghasilkan prediksi kuat lentur lebih rendah dibandingkan dengan hasil eksperimen (*under-estimation*). Namun demikian, hasil koefisien korelasinya masih cukup baik yaitu 0,8181. Pada Gambar 8 menunjukkan hasil komparasi prediksi kuat lentur dengan metode Juki, *et al.* Hasil komparasi ini menunjukkan bahwa metode Juki, *et al* ini selalu menghasilkan kuat lentur yang lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimen (*over-estimation*). Korelasi yang diperoleh metode Juki *et al* yaitu 0,8147



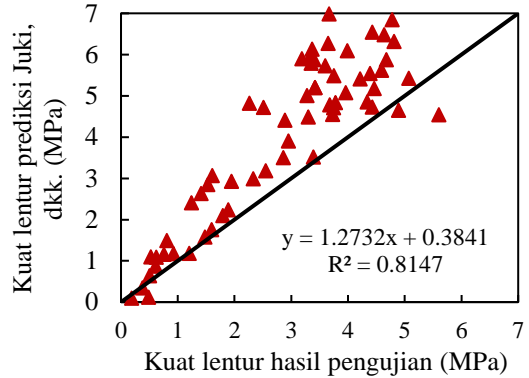
Gambar 5. Komparasi kuat lentur hasil eksperimen dengan prediksi metode JSCE



Gambar 6. Komparasi kuat lentur hasil eksperimen dengan prediksi metode Austroads



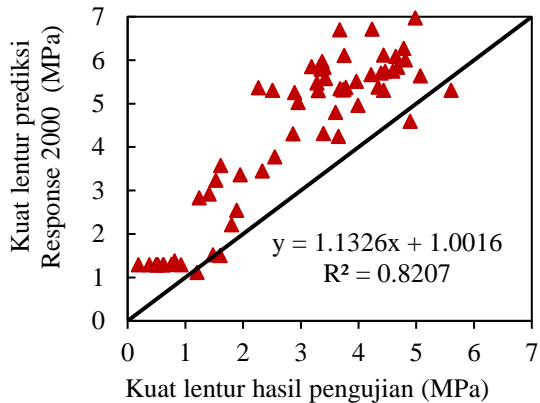
Gambar 7. Komparasi kuat lentur hasil eksperimen dengan prediksi metode Legeron & Paultre



Gambar 8. Komparasi kuat lentur hasil eksperimen dengan prediksi metode Juki

#### Komparasi hasil eksperimen dengan Response-2000

Pada penelitian ini juga dilakukan pemodelan balok dengan menggunakan aplikasi Response-2000. Gambar 9 merupakan hasil komparasi kuat lentur menggunakan aplikasi Response-2000 yang dibandingkan dengan hasil pengujian laboratorium untuk seluruh data. Hasil investigasi menunjukkan bahwa prediksi kuat lentur menggunakan aplikasi Response-2000 selalu *over-estimation* untuk seluruh benda uji dengan hasil kuat lentur mulai dari 0 sampai 7 MPa. Koefisien korelasi yang dihasilkan untuk prediksi kuat lentur dengan menggunakan aplikasi Response-2000 yaitu sebesar 0,8207.

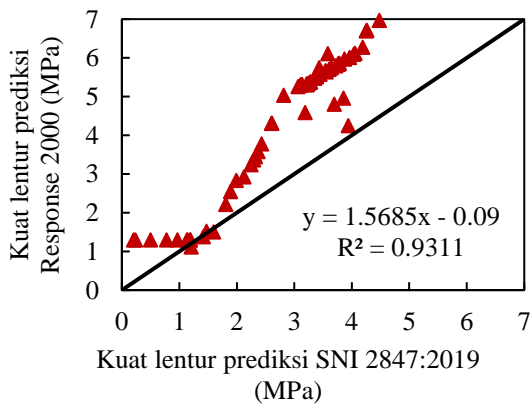


Gambar 9. Komparasi kuat lentur hasil eksperimen dengan prediksi Response-2000

Hasil simulasi maupun hasil prediksi menggunakan berbagai metode menunjukkan bahwa korelasi hasil prediksi terhadap hasil pengujian laboratorium selalu berada di atas 0,80 atau dapat disimpulkan bahwa tingkat kevalidan data berada di atas 80%. Dapat disimpulkan bahwa seluruh metode yang digunakan untuk memprediksi kuat lentur dalam penelitian ini masih dapat digunakan untuk bahan penyusun beton yang bervariasi. Kuat tekan masih memiliki korelasi yang erat terhadap kuat lentur balok beton tanpa tulangan.

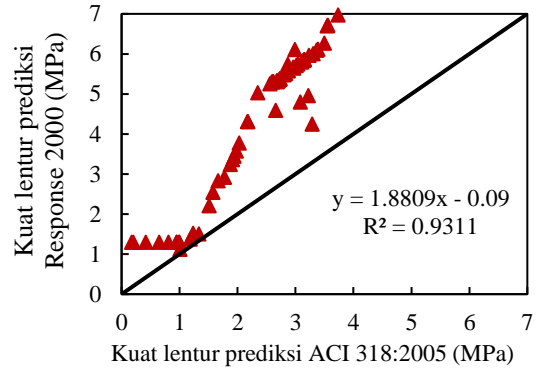
**Komparasi hasil prediksi dengan menggunakan persamaan dan Response-2000**

Gambar 10 sampai dengan Gambar 17 merupakan hasil komparasi antara prediksi kuat lentur menggunakan berbagai metode dengan aplikasi Response-2000. Hasil prediksi menunjukkan bahwa koefisien korelasi tertinggi 0,9311 diperoleh dengan menggunakan beberapa metode yaitu dengan metode SNI Gambar 10, metode ACI Gambar 11, metode IS Gambar 12, metode CCAA Gambar 14, metode Austroads Gambar 15, dan metode Legeon & Paultre Gambar 16. Metode-metode tersebut memiliki korelasi yang baik terhadap hasil analisis menggunakan simulasi Response-2000. Sementara ini hasil korelasi kuat lentur antara aplikasi Response-2000 dengan metode JSCE diperoleh sebesar 0,9290. Sementara itu, metode Juki, *et al* menghasilkan korelasi sebesar 0,9261. Investigasi seluruh metode terhadap hasil Response-2000 menunjukkan korelasi selalu berada di atas 90%. Namun demikian pada masing-masing metode menunjukkan pola hasil yang berbeda-beda. Beberapa metode menunjukkan bahwa hasil Response-2000 masih menghasilkan prediksi kuat lentur yang lebih tinggi dibandingkan hasil prediksi dengan menggunakan rumus.

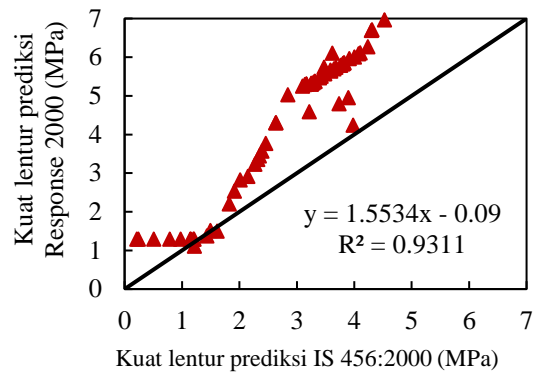


**Gambar 10. Komparasi kuat lentur hasil Response-2000 dengan metode SNI**

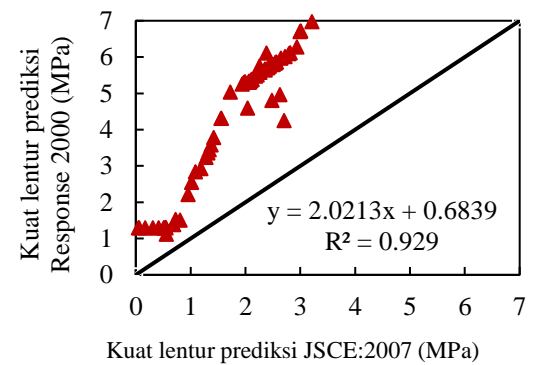
Melalui analisis ini dapat disimpulkan bahwa analisis dengan menggunakan Response 2000 maupun menggunakan berbagai metode pendekatan untuk memprediksi kuat lentur dapat digunakan meskipun material penyusun beton yang digunakan berbeda-beda. Kuat lentur masih memiliki hubungan erat dengan kuat tekan. Hal tersebut karena seluruh persamaan yang digunakan penelitian ini menggunakan hasil kuat tekan beton sebagai data utama untuk memprediksi kuat lentur. Aplikasi Response-2000 juga menggunakan hasil kuat tekan sebagai input utama untuk memprediksi kuat lentur. Selain itu, dengan aplikasi Response-2000 data juga dilakukan untuk menginvestigasi sifat beton lainnya.



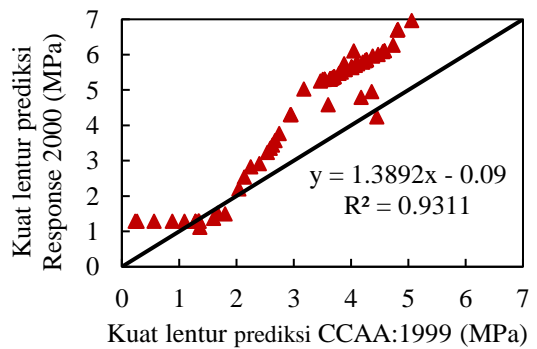
**Gambar 11. Komparasi kuat lentur hasil Response-2000 dengan metode ACI**



**Gambar 12. Komparasi kuat lentur hasil Response-2000 dengan metode IS**

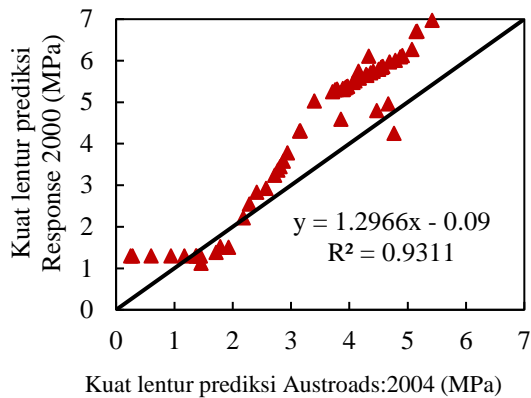


**Gambar 13. Komparasi kuat lentur hasil Response-2000 dengan metode JSCE**

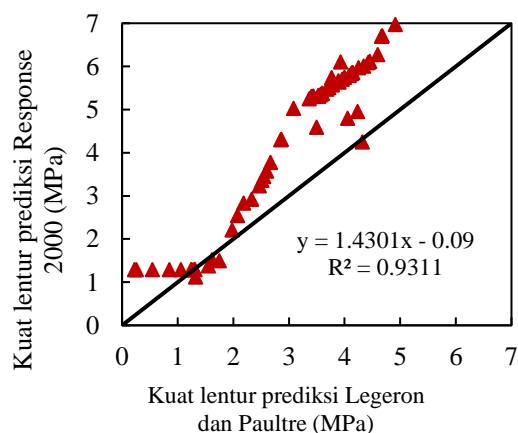


**Gambar 14. Komparasi kuat lentur hasil Response-2000 dengan metode CCAA**

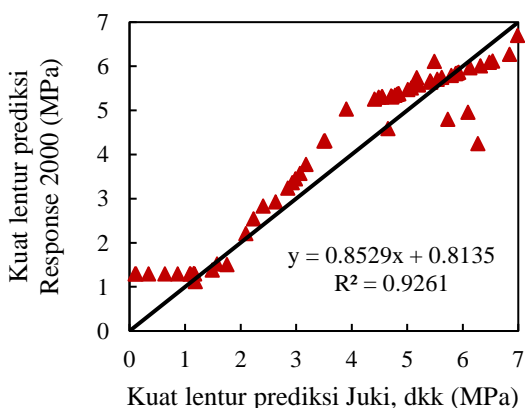




Gambar 15. Komparasi kuat lentur hasil Response-2000 dengan metode Austroads



Gambar 16. Komparasi kuat lentur hasil Response-2000 dengan metode Legeon & Paultre



Gambar 17. Komparasi kuat lentur hasil Response-2000 dengan metode Juki, et al

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis 72 data data hasil pengujian kuat tarik lentur beton umur 28 hari di laboratorium menggunakan aplikasi Response-2000 dan metode rumus pendekatan kuat tarik lentur substitusi kuat tekan dari 10 peraturan,

konsensus dan penelitian di atas dapat diambil beberapa kesimpulan, antara lain hasil analisis kuat lentur menggunakan aplikasi Response 2000 didapatkan korelasi  $R^2$  terhadap pengujian kuat lentur laboratorium sebesar 0,8207, atau nilai kuat lentur prediksi aplikasi Response-2000 tersebut mendekati nilai kuat lentur pengujian laboratorium sebesar 82%, sementara dari hasil analisis kuat lentur menggunakan metode pendekatan substitusi kuat tekan didapatkan rata-rata korelasi  $R^2$  sebesar 0,8246, atau nilai kuat lentur prediksi metode pendekatan substitusi kuat tekan tersebut mendekati nilai kuat lentur dari hasil pengujian laboratorium sebesar 82%.

Semakin besar kuat tekan sebuah beton akan semakin besar pula nilai kuat lentur. Berbagai faktor seperti keseragaman campuran penyusun beton, dimensi benda uji, perilaku perawatan (curing) hingga mencapai umur beton 28 hari, model pengujian kuat lentur (tipe *one point-load* atau *two point-load*, tentu mempengaruhi hasil kuat lentur. Dari hasil kuat tekan yang ada, rata-rata nilai kuat lentur hanya sekitar 10-15% saja dari kuat lenturnya.

Berdasarkan analisis dan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran demi tercapainya penelitian selanjutnya agar lebih baik, antara lain diperlukan studi lebih spesifik tentang kuat tarik lentur untuk berbagai macam kekuatan beton termasuk pengaruh ukuran dan dimensi elemen beton terhadap kuat lentur, serta penerapan prosedur statistik untuk mendapatkan prediksi nilai kuat lentur yang lebih akurat dengan nilai kuat lentur pengujian laboratorium. Bagi penelitian selanjutnya, disarankan menggunakan data dengan klasifikasi campuran yang sejenis, agar simpangan data hasil kuat tekan dan kuat lentur yang dihasilkan tidak terlalu jauh, sehingga mempengaruhi nilai korelasi dalam analisis regresi.

## Daftar Pustaka

ACI Committee 318. (2005). *ACI 318:2005 Building Core Requirements for Structural Concrete*. United States: American Concrete Institute.

Andrew, R. M. (2018). Global CO 2 emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195-217.

Austroads, (2004) *Austroads Pavement Design Guide*. Sydney, Australia: Austroads Inc.

Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2019). *SNI 2847-2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung SNI 1726-2019 Persyaratan*

- Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Standar Nasional Indonesia. Indonesia.
- Bentz, E., & Collins, M. P. (2001). User Manual: Response-2000, Shell-2000, Triax-2000, and Membrane-2000. *Toronto, ON: Univ. of Toronto*.
- Cement and Concrete Association of Australia. (1999). *Industrial Floors and Pavements Guidelines for Design Construction and Specification*. New South Wales, Australia: Cement and Concrete Association of Australia,
- Danish, A., Salim, M. U., & Ahmed, T. (2019). Trends and developments in green cement “A sustainable approach”. *Sustainable Structures and Materials, an International Journal*, 2(1), 45-60.
- Darmiyanti, L. (2018). Perbandingan kuat lentur beton terhadap kuat tekan beton. *Jurnal Teknokris*, 21(1), 42-48.
- Darwis, Z., Baehaki, B., & Supriyadi, H. (2017). Beton non-pasir dengan penggunaan agregat lokal dari merak. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 6(1), 101-111.
- Erlina, E. (2020). Validasi kuat tekan dan kuat lentur beton normal terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton dengan penambahan serbuk kayu jati dan serbuk kayu kelapa. *Civil Engineering and Technology Journal*, 15(2), 1-10.
- Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2), 194-216.
- Indian Standard (IS). (2000). *IS 456:2000, code of practice for reinforced concrete*, BIS, Delhi, India.
- Ismail, A. G., Mustofa, A., Dwicahyani, A., Ridlo, M. M., & Sambowo, K. A. (2017). Pengaruh beton daur ulang dan bahan tambah fly ash terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton struktural ramah lingkungan. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 1(1), 59-63.
- Japan Society for Civil Engineer (JSCE). (2007). *Standard specifications for concrete structures – 2007*. Yotsuya 1-chome, Shinjuku-ku, Tokyo, Japan.
- Juki, M. D., Awang, M., Mahamad, M. K. A., Boon, K. H., Othman, N., Kadir, A. A., Roslan, M. A., & Khalid, F. S. (2013). Relationship between compressive, splitting tensile and flexural strength of concrete containing granulated waste polyethylene terephthalate (pet) bottles as fine aggregate. *Advanced Material Research Journal*, 795, 356–359
- Khan, R. A., & Ganesh, A. (2016). The effect of coal bottom ash (CBA) on mechanical and durability characteristics of concrete. *Journal of building materials and structures*, 3(1), 31-42.
- Legeron, F., & Paultre, P. (2000). Prediction of modulus of rupture of concrete. *Materials Journal*, 97(2), 193-200.
- Kristianto, K., Mungok, C. D., & Handalan, C. P. (2016). Pengaruh penggunaan cangkang kelapa sawit sebagai bahan tambah terhadap mutu beton. *Jurnal PWK, Laut, Sipil dan Tambang*, 3(3), 1-10.
- Kushartomo, W., & Tandio, K. (2016). Pengaruh penggunaan abu terbang terhadap sifat mekanis reactive powder concrete. *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil ke 10*, 119-126.
- Lagalung, I., Tanijaya, J., & Tonapa, S. R. (2021). Karakteristik beton normal substitusi agregat halus bottom ash pada perendaman asam sulfat. *Paulus Civil Engineering Journal*. 3(1), 47-54.
- Li, N., Ma, D., & Chen, W. (2015). Projection of cement demand and analysis of the impacts of carbon tax on cement industry in China. *Energy Procedia*, 75, 1766-1771.
- Mardiaman., Dewita, H., & Narto, H. (2020). Kajian kuat tekan dan kuat lentur pada beton mutu f'c 35 ditambah fly ash dan abu sekam padi rice husk ash. *Jurnal Ilmiah Widya Eksakta*, 2(1), 7-11.
- Meidiani, S. K., & Pratama, R. (2015). Analisis Penurunan Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton yang Menggunakan Bekisting Kayu. *Teknika: Jurnal Teknik*, 2(2), 109-115.
- Metwally, I. M. (2012). Evaluate the capability and accuracy of response-2000 program in prediction of the shear capacities of reinforced and prestressed concrete members. *HBRC Journal*, 8(2), 99-106.
- Mildawati, R. (2018). Perbandingan Kuat Tekan Dan Kuat Lentur Beton Mutu Tinggi Dengan Menggunakan Berbagai Merk Semen Di Kota Pekanbaru. *Jurnal Saintis*, 18(1), 49-58.
- Monika, F., Prayuda, H., & Al Fajir, M. S. (2019). Tingkat kekakuan pada beton bertulang menggunakan aplikasi response-2000. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 3(1), 7-15.
- Natalius, D. (2012). Studi Eksperimental Pengaruh Sudut Kemiringan Penyambungan Balok Beton



- Dengan Bondcrete Terhadap Kuat Lentur Beton. *Final Project*, Bandung: Universitas Kristen Maranatha,.
- Prayuda, H., Saleh, F., & Istiawan, I. (2018). Studi Numerik Pengaruh Ukuran Penampang, Rasio Tulangan Lentur dan Jarak Tulangan Geser Terhadap Kekakuan Balok Beton Bertulang Menggunakan Program Responce 2000. *Semesta Teknika*, 21(1), 18-32.
- Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M. R., Hussin, M. W., & Khankhaje, E. (2016). Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. *Construction and Building Materials*, 116, 15-24.
- Rahamudin, R. H., Manalip, H., & Mondoringin, M. (2016). Pengujian kuat tarik belah dan kuat tarik lentur beton ringan beragregat kasar (batu apung) dan abu sekam padi sebagai substitusi parsial semen. *Jurnal Sipil Statik*, 4(3), 225-231.
- Raya, B. T., Setyowati, E. W., & Anggraini, R. (2016). Pengaruh penggunaan limbah batu onyx sebagai pengganti agregat kasar pada campuran beton terhadap kuat lentur beton. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya*, 1(1), 1-11.
- Rompas, G.P., Pangouw, J. D., Pandaleke, R., & Mangare, J. B. (2013). Pengaruh pemanfaatan abu ampas tebu sebagai substitusi parsial semen dalam campuran beton ditinjau terhadap kuat tarik lentur dan modulus elastisitas. *Jurnal Sipil Statik*, 1(2), 82-89.
- Sadeghian, V., & Vecchio, F. (2018). The modified compression field theory: then and now. *ACI Struct J, Special Publication (SP-328: Shear in Structural Concrete)*, 3-1.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production-present and future. *Cement and concrete research*, 41(7), 642-650.
- Setiati, N. R., & Hanna, A. B. (2018). Pemanfaatan Semen Portland Slag untuk Meningkatkan Sifat Mekanik dan Durabilitas Beton. *Jurnal Permukiman*, 13(2), 77-89.
- Setiawan, A. F., Natalius, D., & Karmela, J. (2021). Studi eksperimental pengaruh sudut kemiringan penyambungan balok beton dengan bondcrete terhadap kuat lentur beton. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 5(1), 64-75.
- Suarnita, I. W. (2010). Karakteristik beton ringan dengan menggunakan tempurung kelapa sebagai bahan pengganti agregat kasar. *Jurnal SMARTek*, 8(1), 22-33.
- Subramaniam, K. V., Gromotka, R., Shah, S. P., Obla, K., & Hill, R. (2005). Influence of ultrafine fly ash on the early age response and the shrinkage cracking potential of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(1), 45-53.
- Sultan, M. A., Imran, I., & Siswoko, S. (2017). Kapasitas lentur balok beton dengan bahan tambah abu vulkanik Gunung Gamalama. *Techno: Jurnal Penelitian*, 6(1), 18-26.
- Suryani, A., Dewi, S. H., & Harmiyati. (2018). Korelasi kuat lentur beton dengan kuat tekan beton. *Jurnal Saintis*. 18(2), 43-54.
- Suryanto, B., Morgan, R., & Han, A. L. (2016). Predicting the response of shear-critical reinforced concrete beams using response-2000 and SNI 2847: 2013. *Civil Engineering Dimension*, 18(1), 16-24.
- Suryono, J., Rafian, T., & Wiranto, A. (2021). Analisa material lokal terhadap kekuatan tekan dan kekuatan lentur beton. *Jurnal Inersia*, 13(1), 6-16.
- Syukranlillah, M., Saidi, T., & Muttaqin. (2021). Kajian pengaruh agregat ringan buatan dari tanah diatomae pada nilai kuat lentur beton struktural. *Journal of The Civil Engineering Student*. 3(1), 1-7.
- Wesseling, J. H., & Van der Vooren, A. (2017). Lock-in of mature innovation systems: the transformation toward clean concrete in the Netherlands. *Journal of Cleaner Production*, 155, 114-124.
- Xu, G., Tian, Q., Miao, J., & Liu, J. (2017). Early-age hydration and mechanical properties of high volume slag and fly ash concrete at different curing temperatures. *Construction and Building Materials*, 149, 367-377.
- Zega, B. C., Prayuda, H., & Mulia, D. P. (2020, November). Effect of Cross Section Dimensions to Stiffness and Deflection on Reinforced Concrete Beams. In *International Joint Conference on Science and Engineering (IJCSE 2020)* (pp. 259-266). Atlantis Press.