

Pengembangan Alat Simulasi Model Numeris Elemen Beton Bertulang dengan Respon Geser dan Lentur Tinggi

Nuroji*, Mhd. Rony Asshidiqie, Sukamta, Han Ay Lie

Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

Abstrak

Pengujian eksperimental elemen beton bertulang di laboratorium memiliki kelemahan bahwa penyiapan benda uji sampai selesainya proses pengujian memerlukan waktu lama. Biaya yang tinggi mengakibatkan jumlah benda uji terbatas, dan beratnya elemen skala penuh merupakan kendala pada saat set-up. Tingkat ketidak-telitian dipengaruhi banyak faktor seperti ketersediaan alat presisi, kondisi laboratorium dan faktor kehandalan laboran. Agar perilaku sebuah elemen beton bertulang dapat dianalisa dengan teliti dan cepat, diperlukan sebuah model numeris yang dapat digunakan sebagai alat simulasi untuk menganalisa pengaruh variabel-variabel bebas pada perilaku elemen beton bertulang. Agar model numeris diyakini kehandalan dan ketelitiannya, perlu dilakukan beberapa tingkatan validasi, baik dari validasi sensitivitas model itu sendiri, maupun validasi terhadap data benda uji aktual di laboratorium. Model elemen hingga yang dikembangkan dalam studi ini dikhususkan pada kondisi tegangan lentur dan geser tinggi, akibat respon beban vertikal dan horizontal yang umum terjadi pada struktur sesungguhnya di lapangan. Proses validasi terhadap model dilakukan dengan analisa sensitivitas terhadap kehalusan mesh dan inkrementasi deformasi vertikal, sedang validasi terhadap benda uji eksperimental di tujukan pada aspek respon beban-deformasi dan pola perkembangan retak beton. Dari proses ini dibuktikan bahwa model yang dikembangkan memberikan hasil prediksi yang sangat teliti terhadap perilaku elemen sesungguhnya, sehingga dapat digunakan sebagai alat simulasi.

Kata kunci: permodelan numeris; metoda elemen hingga; perilaku lentur dan geser; validasi model

Abstract

[Title: The development of A Simulation Tool for Numerical Modelling of High Flexure and High Shear Reinforced Concrete Elements] The weakness of full-scale testing of reinforced concrete elements in a laboratory is the long period, both to prepare and test specimens and the high-cost, resulting in a limited number of specimens. The heavy specimen creates another difficulty during set-up. Data accuracy depends on apparatus precision, laboratory conditions, and the technicians' expertise in experimenting. A finite element model was constructed to simulate a reinforced concrete element subject to high flexure and shear stresses induced by vertical and horizontal forces to overcome these constraints. The model can further be utilized to evaluate the effects of independent variables on the behavior of the member. The model was validated both numerically and experimentally to ensure accuracy and precision. The numerical validation was conducted through a sensitivity analyses process on the finesses of meshing and loading incrementation. At the same time, the load-deformation data and the crack propagation of identical laboratory-tested elements were utilized for validation of the experimental data. It was proven that the developed model predicts the behavior of the beam to a high degree of correctness. The model can further be used as a tool for analyses in the field.

Keywords: numerical modelling; finite element method; flexure and shear behavior; model validation

^{*)} Penulis Korespondensi.
E-mail: nuroji@lecturer.undip.ac.id

1. Pendahuluan

Pemahaman tentang perilaku struktur dapat diperoleh dari pengujian eksperimental di laboratorium.

Uji eksperimental ini sangat penting untuk mendapatkan gambaran mengenai respon struktur berdasarkan pembebanan yang terjadi secara nyata. Keabsahan data sangat tergantung jumlah benda uji. Agar jumlah benda uji memadai dibutuhkan biaya tinggi dan waktu yang relatif lama. Kedua aspek negatif ini akan semakin meningkat pada benda uji yang besar. Kendala lain adalah faktor luar yang mempengaruhi hasil pengujian, seperti ketelitian alat presisi, lingkungan pengujian, kehandalan dan kemampuan laboran. Apabila spesimen berupa elemen beton, maka perlu diingat kendala waktu yang disebabkan karena beton harus diuji pada usia 28 hari. Yang terjadi kemudian adalah bahwa penelitian didasarkan pada benda uji dengan jumlah terbatas. Kesimpulan yang dihasilkan dari kondisi ini dapat mengakibatkan kesalahan analisa, dan berdampak pada keputusan yang diambil pada saat perencanaan bangunan yang menggunakan elemen serupa.

Metoda untuk dapat meningkatkan kecepatan waktu dan penghematan biaya adalah dengan pemodelan numerik. Pendekatan numeris yang sering digunakan dalam pemodelan numerik adalah metode elemen hingga (*Finite Element Method*). Pada studi ini parameter non-linearitas material yang menjadi fokus utama respon struktur, dapat langsung didefinisi dalam program komputer dalam bentuk data yang akan diolah dan diselesaikan dalam persamaan matematis. Selain itu, model yang telah valid dapat digunakan sebagai alat untuk menganalisa perilaku struktur dengan parameter yang berbeda tanpa melalui pengujian eksperimental terlebih dahulu.

Model Elemen Hingga (FEM) dikembangkan berdasarkan diskretisasi sistem struktur menjadi bagian yang sangat kecil, sehingga properti mekanis masing-masing bahan dapat diimplementasikan ke dalam model. Dimensi dan pembebanan serta kondisi batas (*boundary conditions*) dari perletakan dengan mudah dapat dialokasikan pada nodal yang terhubung. Perkembangan komputer masa kini memungkinkan pembuatan model dengan diskretisasi (*meshing*) yang sangat halus, sehingga didapatkan ketelitian tinggi. Model numeris dengan ketelitian tinggi dapat digunakan sebagai alat untuk menganalisa berbagai respon elemen beton bertulang tanpa pengujian eksperimental. *State of the art* tentang pemodelan elemen lentur beton bertulang saat ini telah mencakup area sangat luas, baik dari aspek bentuk struktur maupun dari inovasi material beton itu sendiri.

Perkembangan pemodelan FEM terkini dapat dirangkum sebagai berikut. Pendekatan dua-dimensional dengan anggapan bahwa beton berperilaku nonlinier-isotropik merupakan dasar penentuan kriteria keruntuhan sebagian besar model. Kriteria ini masih tetap digunakan

secara umum. Kriteria keruntuhan dikembangkan oleh beberapa peneliti, dan tercantum dalam standar internasional baik di Eropa maupun Amerika (fib-CED, 2013; Thorenfeldt, Tomaszewicz & Jensen, 1987). Analisa permodelan FEM tiga-dimensi masih dalam taraf rintisan, dan studi di bidang ini sangat terbatas (Farooq, dkk., 2020; Kurumatani, Soma, & Terada, 2019; Mehrpay, Wang, & Ueda, 2020). Kriteria keruntuhan paling kritis sebagai parameter keruntuhan beton terjadi pada kombinasi tegangan bi-aksial tekan-tarik (Rai, 2020). Model dikembangkan berdasarkan model konstitutif material non-linear untuk beton, dan linear untuk baja tulangan, pendekatan ini juga digunakan untuk berbagai macam beton inovasi seperti beton berserat alam maupun sintesis (Elbehiry dkk., 2021), beton berbusa (Rahman dkk., 2019) dan beton *geopolymer* (Venkatachalam dkk., 2021).

Permodelan FEM juga digunakan untuk menjelaskan perilaku respon selain lentur (Bahraq dkk., 2019), dan diimplementasikan pada elemen beton seperti balok tinggi, pelat, balok berlubang dan beton laminat (Ayash, Abd-Elrahman, & Soliman, 2020; Filippoupolitis & Hopkins, 2021; Magnucki, Lewinski, & Magnucka-Blandzi, 2020; Rai, 2020; Sader Mohammed, 2019). Evaluasi terhadap riset permodelan beton terkini menunjukkan bahwa model FEM diyakini sebagai alat yang tangguh untuk dapat menganalisa pengaruh variabel pada sebuah elemen beton bertulang, dan memprediksi kapasitas pemikulan, perilaku beban-deformasi maupun pola keretakan beton.

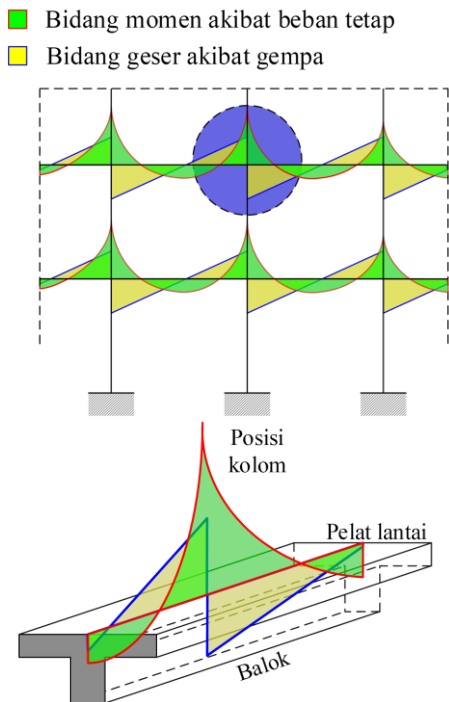
Pengembangan model dalam penelitian ini dilakukan dengan metoda validasi ganda, terhadap model itu sendiri melalui analisa sensitivitas meshing dan inkrementasi pembebanan, maupun melalui uji kehandalan terhadap data uji laboratorium dengan benda uji identik, baik dimensi maupun properti materialnya. Metoda ini digunakan secara luas, dan telah terbukti handal dan teliti (Lantsoght dkk., 2019; Naderpour & Mirrashid, 2020; Rahman dkk., 2019).

Permodelan numeris umumnya dilakukan untuk mengamati perilaku satu karakteristik respon tegangan. Sebagian besar model difokuskan pada perilaku geser, lentur atau kekangan secara terpisah. Penelitian respon geser dilakukan dengan menggunakan balok tinggi (*deep beam*), sehingga pola keruntuhan ditujukan pada perilaku runtuh geser murni (Bahraq dkk., 2019; Pranata, Tjitradi, & Prasetya, 2020; Yi, Huang, & Chen, 2017). Penelitian lentur menggunakan sistem pembebanan dua titik, sehingga di antara garis kerja kedua beban tersebut tercipta kondisi lentur murni (Halahla, 2018; Tudjono, Han, & Hariwijaya, 2013).

Model numeris yang dapat mensimulasikan kondisi elemen beton bertulang dengan tegangan lentur dan geser tinggi masih belum ditemukan. Adanya interaksi tegangan lentur dan geser tinggi, mengakibatkan pergeseran pola pada tegangan utama (*principal stresses*) elemen. Model yang dikembangkan didasarkan kondisi ini. Akibat beban gempa, maka pada pertemuan balok dan kolom dalam struktur rangka kaku akan terjadi konsentrasi momen lentur negatif maksimum, dengan tegangan geser tinggi (Gambar 1). Bagian sayap dari balok, yang merupakan elemen pelat, akan menderita tegangan tarik. Sendi plastis akan terbentuk di daerah ini, dan merupakan titik awal proses keruntuhan. Model yang dikembangkan menghasilkan respon perilaku beban-deformasi pada titik kritis, dan dapat digunakan untuk menggambarkan pola retak yang terjadi dalam beton tertarik. Pengujian laboratorium dilaksanakan dengan menggunakan metode beban satu-titik. Dengan tervalidasinya model, maka FEM ini dapat digunakan untuk secara cepat mengevaluasi dan menentukan kapasitas pemikulan sebuah elemen lentur, menunjukkan daktilitas dari balok, serta menggambarkan tingkat retakan dan arah retakan dengan teliti.

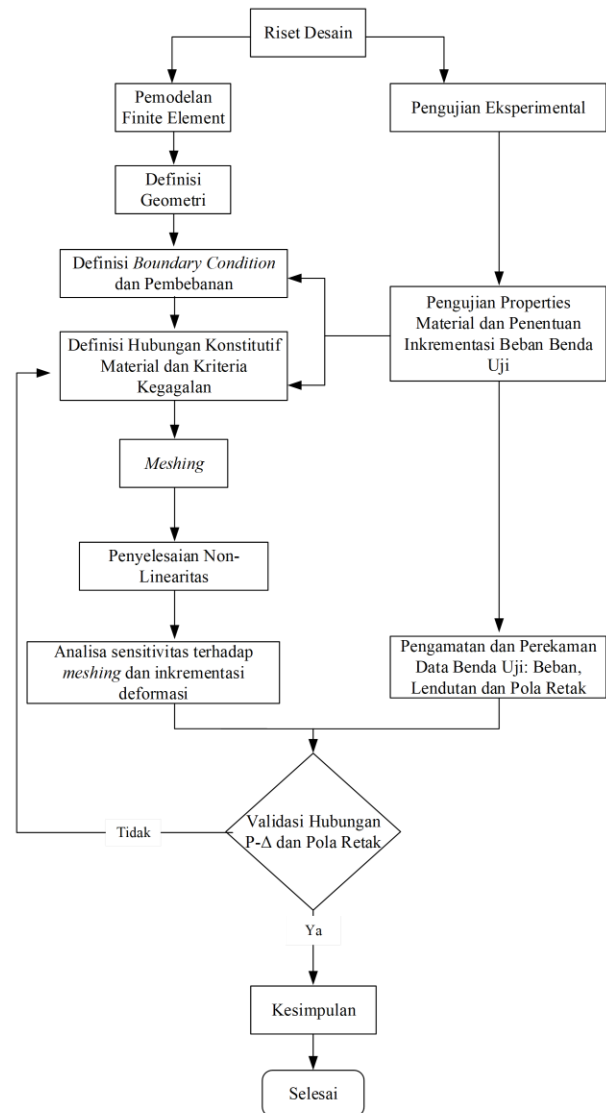
2. Bahan dan Metode

Penelitian ini dilakukan secara *hybrid*, dengan mengkombinasikan riset numeris dengan eksperimental

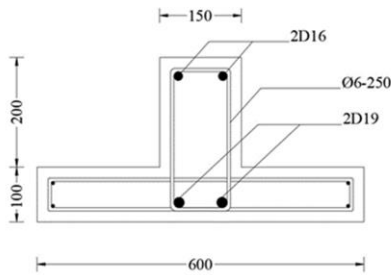


Gambar 1. Distribusi momen dan geser pada portal beton

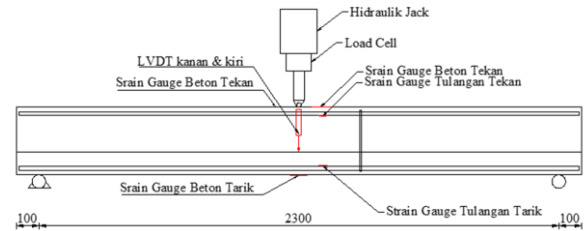
di laboratorium. Data eksperimental awal berupa properti mekanis beton; kuat tekan (f'_c) dan tarik (f_{tr}), angka Poisson (ν) dan modulus elastis Young (E) serta property baja; kuat tarik (f_{ult}), tegangan leleh (f_y) merupakan input untuk model. Berdasarkan kondisi eksisting, beban di posisikan pada nodal sesuai dengan kondisi benda uji validasi, dan kekangan perletakan ditentukan sebagai kondisi batas (*boundary condition*). Setelah melalui proses analisa sensitivitas, model disimulasi, sampai runtuh. Data beban-deformasi, dan pola retak dicatat untuk keperluan validasi dengan benda uji laboratorium. Ketidakesesuaian atau penyimpangan besar digunakan untuk evaluasi terhadap kriteria permodelan. Diagram alir proses pengembangan model tampak dalam Gambar 2.



Gambar 2. Bagan alir proses pengembangan dan validasi model



Gambar 3. Penampang balok-T (Maulana & Riko, 2020)



Gambar 4. Skema pengujian balok-T (Maulana & Riko, 2020)

Validasi model numeris dilakukan menggunakan data pengujian eksperimental yang dilakukan oleh (Maulana & Riko, 2020). Spesimen merupakan balok-T dengan bentang 2,50 meter dengan dimensi tertera pada Gambar 3. Metode pengujian yang dilakukan dengan pembebanan inkremental beban satu-titik (*one-point load*) pada tengah bentang untuk memperoleh nilai tegangan lentur dan tegangan geser maksimal. Skema pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.

Perekaman beban-deformasi dilakukan dengan menggunakan *load-cell* type CLC-500KNA dengan kapasitas 500 kN dan Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) type CDP-100MT dan sensitivitas 100×10^{-6} strain/mm serta kapasitas maksimum 100 mm yang dihubungkan dengan *data logger*. Perilaku beban-deformasi ini yang menjadi alat validasi model numeris. Pemodelan numeris dilakukan untuk memvalidasi pengujian eksperimental menggunakan perangkat lunak *DIANA FEA 10.3*

2.1. Pemodelan Elemen Beton Bertulang

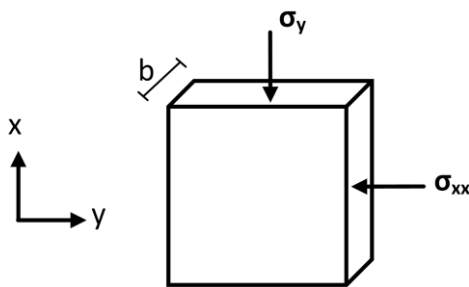
Elemen penyusun balok T terdiri dari elemen beton, elemen tulangan dan elemen pelat baja sebagai tumpuan maupun pembebanan. Balok ini banyak digunakan sebagai prototipe pengujian (S. Tudjono, Lie, & Gan, 2018). Pada pemodelan elemen beton dan pelat baja menggunakan elemen dua dimensi *regular plane*

stress (Gambar 5) karena pembebanan pada uji eksperimental adalah beban monotonik yang dilakukan pada tengah bentang, maka tegangan arah tegak lurus bidang bernilai sangat kecil mendekati nol ($\sigma_{zz} = 0$) sehingga bisa diabaikan (Oh, Lee, Mohd Raizamzamani, Azerai, & Norrul Azmi, 2018).

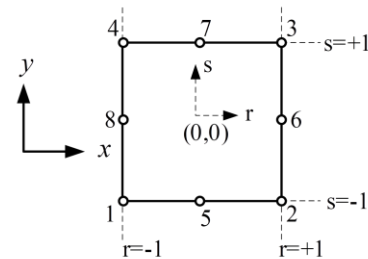
Tipe yang digunakan dalam elemen *regular plane stress* adalah *quadrilateral* 8 nodal dimana elemen tersebut meningkatkan interpolasi kuadratik sehingga menghasilkan perilaku non-linear setiap inkrementasi yang diberikan terhadap elemen tersebut (Gambar 6).

Tulangan dimodelkan sebagai elemen satu dimensi *truss element*. Karena tegangan yang terjadi pada tulangan hanya tegangan axial dengan *output* elemen adalah pertambahan panjang (ΔL), regangan dan perpindahan sepanjang sumbu axialnya, maka elemen ini sudah cukup untuk mempresentasikan tulangan pada kondisi yang sebenarnya (Gambar 7). Elemen ini mempunyai definisi *cross section* yang menggambarkan luas tulangan yang ada (Feirusha & Abdal, 2019; Zhang, Restrepo, Conte, & Ou, 2017).

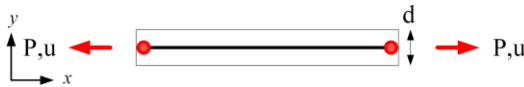
Asumsi pada pemodelan tulangan adalah kompatibilitas antara tulangan dengan beton dianggap tetap terjaga hingga struktur runtuh (*embedded*), dengan demikian perilaku regangan pada bidang kontak (interfasa) selalu sama (Gambar 8).



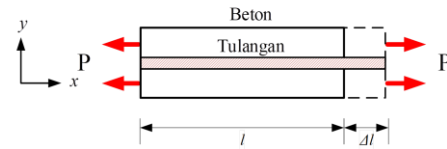
Gambar 5. Pendekatan vektor tegangan *Plane Stress*



Gambar 6. Elemen quadrilateral 8 nodal



Gambar 7. Elemen *Truss* dua nodal



Gambar 8. Dasar teori kompartibilitas beton-tulangan

2.2 Parameter Material Pemodelan

Material penyusun beton bertulang didefinisikan dalam hubungan tegangan-regangan material. Perolehan data material berasal dari pengujian eksperimental. Pengujian eksperimental yang dilakukan berupa pengujian kuat tekan beton dan kuat tarik baja tulangan (Tabel 1). Untuk mengisi beberapa parameter material yang tidak dilakukan pengujian eksperimental, dalam pemodelan ini menggunakan *fib-CEB Material Code 2010* sebagai acuan (*fib Model Code Concr. Struct. 2010, 2013*)

2.3 Pemodelan Beton Retak

Pemodelan non-linear beton menggunakan pendekatan *smearred rotating to fixed crack* karena dalam pemodelan ini, elemen retak didistribusikan secara merata dan evaluasi kekakuan berdasarkan hubungan tegangan-regangan konstitutif material. *Fixed crack* akan menghasilkan pola retak yang hampir mirip dengan keadaan sebenarnya tetapi akan menghasilkan kekakuan yang berlebih. *Rotating crack* terjadi ketika beton mengalami retak, retak akan dimodelkan berotasi bersamaan dengan regangan utamanya. Kelebihan kekakuan yang tidak dievaluasi pada *fixed crack* akan diperbaiki pada pemodelan *rotating crack* tetapi akan menghasilkan pola retak yang kurang baik. Oleh karena itu, pemodelan *rotating to fixed crack* menjadi sebuah solusi dari kekurangan tersebut dengan membatasi

regangan retak dengan Persamaan 1.

$$\epsilon_{fixed} = \frac{f_{ctk}}{E_c} \tag{1}$$

Dalam Diana FEA 10.3 (2019), pemodelan ini didefinisikan dalam total strain based crack model dimana dasar dari pemodelan ini adalah penelitian yang dilakukan oleh Vecchio & Collins (1986) yaitu Modified compression field theory dimana beton yang telah retak akan dianggap sebagai material baru dengan karakteristik tegangan-regangannya (Gambar 9).

2.4 Pemodelan Perilaku Beton Tarik

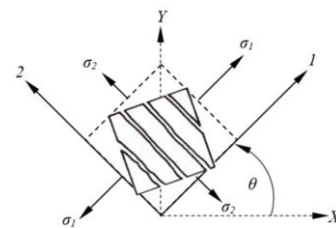
Pada pemodelan ini menggunakan kurva yang telah diteliti oleh Hordijk (1991) karena pada kurva ini dapat mensimulasikan keadaan natural beton ketika mengalami keadaan tarik dimulai dari lebar retak, regangan yang terjadi sampai mencapai tegangan retak pada akhir pembebanan. Karena sifat nonlinearitas beton, pada saat terjadi retak akibat tarik, tegangan tarik beton akan menurun secara bertahap seiring dengan bertambahnya tegangan. Hubungan yang dihasilkan bersifat eksponensial dimana ketika beton sudah mencapai regangan maksimum tarik, tegangan retak yang dihasilkan sebesar 0 (Gambar 10)

2.5 Pemodelan Perilaku Beton Tekan

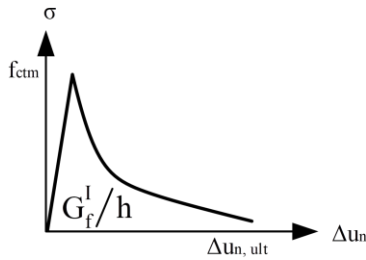
Pada pemodelan ini menggunakan kurva yang dikembangkan oleh Thorenfeldt, E., Tomaszewicz & Jensen (1987). Kurva konstitutif tekan memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap perilaku beban lendutan sehingga, perilaku tekan beton yang non-linear dan definisi *hardening zone* harus diperhatikan dan tidak boleh diabaikan agar tidak terjadi *over stiffness* maupun penurunan daktilitas karena kegagalan yang mendadak

Tabel 1. Parameter material balok T

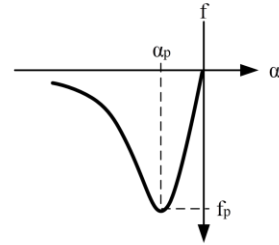
Parameter Material				
Material	f'_c (MPa)	f'_{ctm} (MPa)	G_f (N/mm)	E (MPa)
Beton	38.4	2.4	0.141	29122
Parameter Material				
Diameter	f'_y (MPa)	f'_u (MPa)	ϵ_y	E (MPa)
D16	416.1	622.9	0.00208	2×10^5
D19	433.6	618.5	0.00217	2×10^5
Ø6	704.5	906.9	0.00352	2×10^5
Parameter Material				
Material	E (MPa)	ν		
Pelat	2×10^5	0.3		
Baja				



Gambar 9. *Smeared Rotating to Fixed Crack*



Gambar 10. Kurva konstitutif tarik (Hordijk, 1991)



Gambar 11. Kurva konstitutif tekan (Thorenfeldt, 1987)

Gambar 11). *Over stiffness* diakibatkan oleh pemilihan konstitutif yang linear dimana tidak ada penurunan kekakuan walaupun tegangan tekan beton sudah mencapai 40%. Sedangkan penurunan daktilitas diakibatkan perilaku *post peak behavior* dari beton tekan tidak didefinisikan.

2.6 Faktor Tahanan Geser Beton

Ketika beton mengalami retak, kekakuan geser akan tereduksi dimana meskipun beton telah retak, struktur beton masih memiliki kekuatan geser akibat interlocking antar agregat. Nilai β lebih besar dari 0 kurang dari 1. Sebagai faktor reduksi kekakuan, faktor β dapat dihitung dengan metode *constant shear retention* dimana nilai β yang direkomendasikan oleh Khalfallah et.al (2004) adalah 0.4 (Gambar 12).

2.7 Pemodelan Baja

Hubungan tegangan-regangan baja mempunyai beberapa jenis idealisasi yaitu : *elastic perfectly plastic (bilinear)*, *trilinear*, *complete curve*. Untuk memodelkan perilaku elemen tulangan digunakan hubungan *bilinear* (Gambar 13) dengan metode *Von Mises* untuk mendefinisikan kondisi plastis/*strain hardening* tulangan.

2.8 Kondisi Batas

Geometri yang dimodelkan memiliki penampang melintang yang sama dengan pengujian eksperimental dengan model setengah bentang. Pemodelan setengah bentang berfungsi untuk memotong waktu analisa karena geometri balok T dan kondisi pembebanan yang simetris maka menghasilkan perilaku secara natural

yang simetris (Gambar 14). Pembebanan menggunakan metode *prescribed deformation* dengan kondisi batas yaitu tumpuan sendi dan rol sederhana. Pemodelan setengah bentang menyebabkan kondisi batas pada balok T pada tengah bentang mendapat kekangan horizontal untuk menggantungkan posisi tumpuan sendi.

2.9 Penyelesaian Non-Linearitas

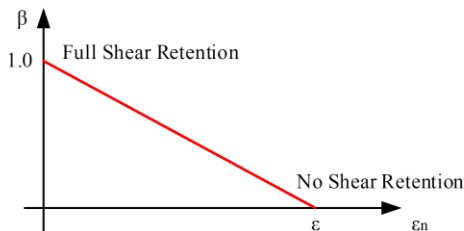
Dalam *finite element analysis*, model di diskritisasi menjadi elemen-elemen kecil yang disebut juga *meshing* (Gambar 15). Sebagai parameter analisa sensitivitas, *mesing* yang digunakan memiliki ukuran 50 mm, 25 mm, dan 10 mm.

Penyelesaian non-linear menggunakan metode *Modified Newton-Raphson* dengan evaluasi kekakuan menggunakan pendekatan *tangent stiffness*. Batas konvergen ditetapkan pada gaya dan lendutan sebesar 0.01 mm sebanyak 25 iterasi. Program akan dihentikan ketika beton sudah mencapai regangan hancurnya. *Load factor* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.

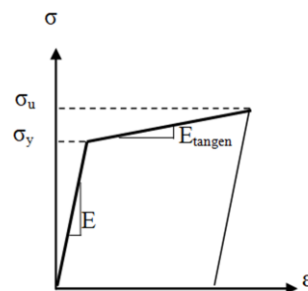
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisa Sensitivitas

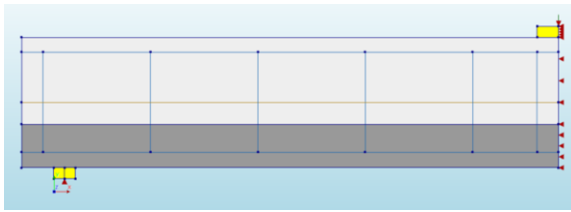
Analisa sensitivitas berfungsi untuk melihat pengaruh banyaknya elemen terdiskritisasi terhadap konvergensi data. Apabila elemen yang terdiskritisasi semakin banyak, maka data yang diperoleh semakin banyak pula tetapi akan waktu yang diperlukan untuk analisa cukup lama begitu pula sebaliknya (Halahla, 2018). Selain pengaruh dalam bentuk jumlah elemen,



Gambar 12. Grafik faktor tahanan geser (Khalfallah et.al., 2004)



Gambar 13. Kurva konstitutif baja tulangan



Gambar 14. Kondisi batas model balok T

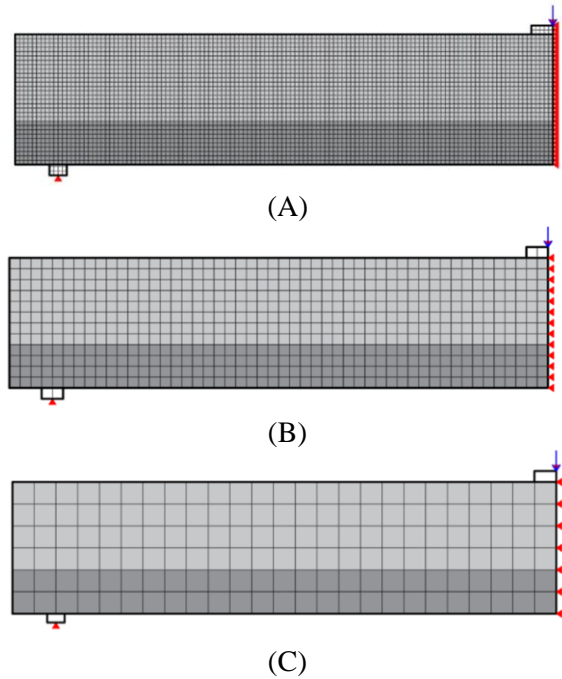
analisa sensitivitas ini juga menggunakan parameter inkrementasi deformasi vertikal dengan membandingkan pemberian data input *incremental prescribed deformation* yang besar dengan yang kecil. Parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.

Proses validasi model menunjukkan bahwa kehalusan *meshing* yang digunakan dalam FEM dengan elemen berukuran 10 mm dan kombinasi inkrementasi deformasi 0.01 mm paling optimal. Penghalusan elemen terutama berpengaruh pada proses penghalusan (*smoothing*) kurva, tetapi tahapan retak awal dan leleh tulangan hampir tidak terpengaruh. Daktilitas balok tidak sensitif terhadap baik kehalusan elemen maupun inkrementasi deformasi, karena proses keruntuhan terutama diawali melelehnya tulangan tarik, lendutan ultimit terjadi pada saat beton pada serat tertekan mencapai regangan ϵ_c sebesar 0.003. Batang tulangan dimodelkan sebagai garis, dan posisi momen terbesar mengakibatkan lelehnya tulangan, faktor ukuran elemen batang yang terhubung dengan nodal tersebut menjadi kurang relevan, secara analog dimensi elemen-hingga yang berhubungan dengan nodal pada zona beton tekan juga tidak sangat berpengaruh.

Peningkatan jumlah *mesh*, secara umum tidak mempengaruhi pola beban-deformasi, seperti tampak pada Gambar 16, tetapi *mesh* dengan ukuran 50 mm mempengaruhi beban ultimit diprediksi. Tingkat beban yang menyebabkan retak pertama dalam beton, mendekati sama untuk semua ukuran dan inkrementasi deformasi. Hal ini disebabkan elemen quadrilateral memiliki empat buah nodal yang mengalami keruntuhan bertahap. Dari data tegangan, tampak bahwa keruntuhan retak pertama terjadi karena respon bi-aksial tekan-tarik. Kondisi tekan-tarik merupakan kondisi yang paling sensitif dalam *failure envelope* dan pada ukuran elemen 50 mm pun, nodal yang terletak pada tengah bentang akan runtuh, tidak tergantung ukuran elemen-hingga yang terhubung.

Tabel 2. Kombinasi *Load Factor-Increment*

No Grup	Load Factor	Increment
1	0.5	20
2	1	50
3	2	100

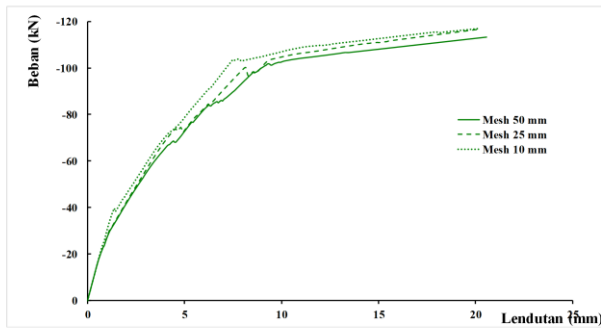


Gambar 15. *Meshing* model dengan variasi ukuran elemen; A= *Meshing* 10 mm B= *Meshing* 25 mm C= *Meshing* 50 mm

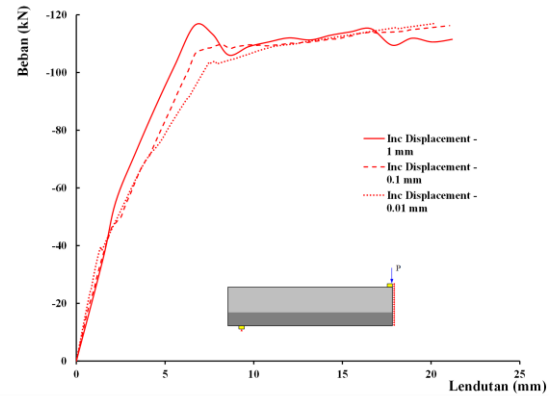
Kehalusan *meshing* mempunyai dampak pada propagasi retak (*crack propagation*) karena konfigurasi elemen hingga yang kasar dapat mengubah arah retak sebagai respon peningkatan beban. Elemen yang lebih kasar mengakibatkan pergeseran lokasi retak. Berbeda dengan penentuan retak pertama yang hanya di definisikan oleh satu buah nodal, perkembangan retak memerlukan keruntuhan elemen-hingga secara keseluruhan. Ini menjelaskan mengapa *meshing* kasar menghasilkan beban ultimit yang lebih rendah dari pada elemen-hingga yang kecil. Dengan *meshing* halus, tampak dengan jelas perambatan retak, sampai pada garis netral sesuai dengan kondisi benda uji eksperimental.

Tabel 3. Parameter analisa sensitivitas

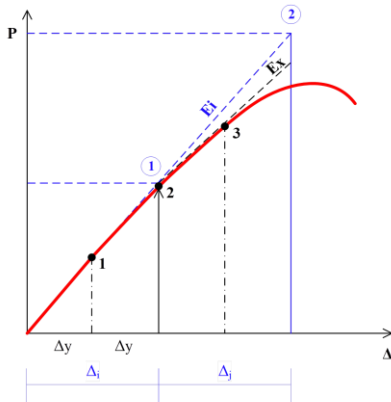
Kode Model	Ukuran Mesh	Jumlah Elemen	<i>Incremental Displacement Load</i>
BT1	50 mm	164	-1 mm
BT2	25 mm	600	-1 mm
BT3	10 mm	3810	-1 mm
BT4	50 mm	164	-0.1 mm
BT5	25 mm	600	-0.1 mm
BT6	10 mm	3810	-0.1 mm
BT7	50 mm	164	-0.01 mm
BT8	25 mm	600	-0.01 mm
BT9	10 mm	3810	-0.01 mm



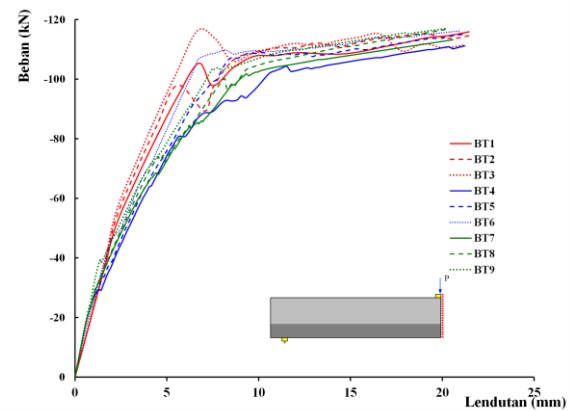
Gambar 16. Respon analisa sensitivitas variasi meshing dengan inkrementasi deformasi 0.01 mm



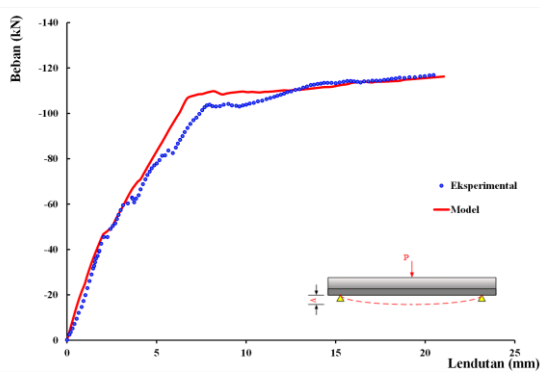
Gambar 17. Respon analisa sensitivitas variasi inkrementasi deformasi dengan meshing 10 mm



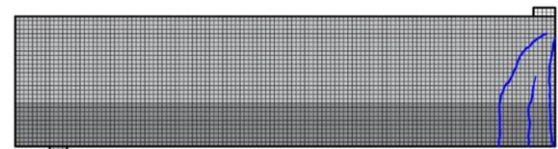
Gambar 18. Penyimpangan prediksi kekakuan pada inkrementasi deformasi yang kasar



Gambar 19. Respon analisa sensitivitas pada seluruh variasi Mesh dan inkrementasi deformasi



Gambar 20. Grafik perbandingan hubungan beban-lendutan pengujian eksperimental dengan model



(a)



(b)

Gambar 21. Perbandingan pola retak pada pengujian eksperimental dengan model; (a) = pola retak model, (b) = pola retak eksperimental

Tabel 4. Perbandingan Nilai Beban-Lendutan Pengujian Eksperimental dengan Model Kondisi *first crack*

	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Deviasi Beban	Deviasi Lendutan
Eksp.	12.615	0.52	56.52%	62.048%
Model	29.01	1.37		

Kondisi *Ultimate*

	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Deviasi Beban	Deviasi Lendutan
Eksp.	116.87	20.47	0.53%	2.78%
Model	116.247	21.15		

pada pola beban-deformasi yang dihasilkan oleh model. Tampak terjadi ketidaksinambungan pada kondisi beban puncak yang kemudian diikuti dengan penurunan kekakuan yang drastis. Fenomena ini tampak pada semua ukuran *meshing*, sehingga dapat disimpulkan bahwa model lebih sensitif terhadap inkrementasi deformasi, daripada kehalusan mesh (Gambar 17). Besarnya inkrementasi 1 mm mengakibatkan penyimpangan pada perhitungan deviasi kekakuan material, dan prediksi hubungan beban-deformasi pada tahap berikut. Gambar 18 menunjukkan inkrementasi kasar Δ_i akan menyebabkan prediksi kekakuan bahan E_i , pada tahapan berikut (titik ②) tampak bahwa model telah gagal menemukan titik akurat, dan beban puncak akan ditetapkan pada titik ①. Penghalusan inkrementasi sebesar Δ_j akan memberikan prediksi kekakuan E_j yang lebih akurat, dan titik 3 akan terbaca sebagai respon beban berikutnya. Semakin halus inkrementasi, semakin teliti prediksi beban ultimit (Gambar 18).

Dari segi inkrementasi deformasi, inkrementasi kasar akan mengakibatkan penyimpangan pada perhitungan modulus kekakuan bahan. Perilaku tegangan-regan beton di dekati dengan pola non-linier, sehingga sebagai akibat dari inkrementasi kasar, akan terjadi penyimpangan yang lebih besar pula pada perhitungan modulus elastisitas bahan. Evaluasi menunjukkan bahwa model lebih sensitif terhadap respon inkrementasi beban dari pada kehalusan elemen hingga. Gambar 19 menunjukkan hasil analisa sensitivitas secara menyeluruh.

3.2 Validasi Model dengan Eksperimental

Pada Gambar 20, dapat dilihat hasil perbandingan hubungan beban-lendutan antara pengujian eksperimental dan pemodelan. Dapat dilihat bahwa hasil pemodelan balok T dengan kondisi *under reinforced* cukup relevan dengan hasil pengujian eksperimental. Rekapitulasi perbandingan beban lendutan pada pengujian eksperimental dengan model dapat dilihat pada Tabel 4.

Pada pemodelan ini juga menghasilkan pola retak dengan kombinasi tegangan geser dan lentur yang cukup relevan dengan pengujian eksperimental (Gambar 21). Di tengah bentang terjadi retak lentur akibat tegangan lentur maksimum lalu terdapat juga kombinasi retak lentur dan geser akibat perubahan dimensi dari bagian sayap menuju bagian badan balok T.

Validasi terhadap hasil uji eksperimental (Gambar 20) menunjukkan prediksi retak awal dengan deviasi cukup besar. Hal ini disebabkan karena pada pengujian laboratorium kondisi retak pertama sulit ditentukan secara sangat teliti. Pengamatan visual tidak selalu dengan tepat dapat mendeteksi retak, karena retak pertama tidak selalu terjadi tepat di tengah bentang seperti yang terjadi pada model. Selanjutnya prediksi beban maksimum yang dihasilkan model di atas data eksperimental, ini disebabkan karena model menggunakan asumsi bahwa benda uji homogen sempurna, dan prismatic sempurna. Hasil uji laboratorium selalu cenderung memberikan nilai lebih tinggi. Namun demikian untuk kondisi ultimit, model menunjukkan ketelitian sangat tinggi

4. Kesimpulan

Pengembangan model numeris berdasarkan pendekatan elemen hingga untuk sebuah balok bentuk T akibat tegangan lentur dan geser tinggi telah dilakukan dengan membentuk elemen quadrilateral sebagai dasar analisa. Model yang diperoleh divalidasi terhadap sensitivitas kehalusan *meshing*, dan inkrementasi beban. Kehalusan inkrementasi deformasi sangat berpengaruh pada respon model. Tampak terjadi penyimpangan pada prediksi beban puncak maupun deviasi pada pola perkembangan perilaku beban-deformasi. Daktilitas pada saat ultimit sedikit terpengaruh oleh tingkatan inkrementasi deformasi. Kehalusan *meshing* tidak sangat berpengaruh pada respon model, walaupun demikian menambah kehalusan *meshing* secara signifikan akan menambah *running-time*. Hasil uji terhadap prediksi keretakan sangat mendekati kondisi di lapangan, dan retak pertama dapat terdeteksi dengan lebih teliti berdasarkan analisa keruntuhan nodal. Model yang dikembangkan terbukti sah dan teliti dalam menggambarkan perilaku beban-deformasi akibat beban monotonik, dan mampu memberikan gambaran akurat tentang pola keretakan (*first crack*) serta pengembangannya (*crack propagation*). Dengan tervalidasinya model tersebut, maka FEM ini dapat digunakan sebagai alat bantu untuk secara cepat dan teliti, serta dengan mengadakan penghematan biaya dan waktu substansial memberikan informasi tentang beban ultimit yang dapat dipikul balok, perilaku beban-deformasi, daktilitas dan pola keretakan. Model juga dapat di perluas untuk berbagai variasi material dasar beton dan tulangan, maupun rasio pembesian yang

berbeda. Dengan demikian FEM ini memberikan kontribusi nyata bagi dunia konstruksi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Konsorsium Riset CFRP antara SIK-Indonesia, Nihon University Jepang, UAJY Yogyakarta dan Universitas Diponegoro Semarang yang telah mendanai keberlangsungan jurnal ini.

Daftar Pustaka

- Ayash, N. M., Abd-Elrahman, A. M., & Soliman, A. E. (2020, December). Repairing and strengthening of reinforced concrete cantilever slabs using Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) wraps. In *Structures* (Vol. 28, pp. 2488-2506). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.053>
- Bahraq, A. A., Al-Osta, M. A., Ahmad, S., Al-Zahrani, M. M., Al-Dulaijan, S. O., & Rahman, M. K. (2019). Experimental and numerical investigation of shear behavior of RC beams strengthened by ultra-high performance concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13(1), 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0330-z>
- Elbehiry, A., Elnawawy, O., Kassem, M., Zaher, A., & Mostafa, M. (2021). FEM evaluation of reinforced concrete beams by hybrid and banana fiber bars (BFB). *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00479. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00479>
- Farooq, U., Nakamura, H., Miura, T., & Yamamoto, Y. (2020). Proposal of bond behavior simulation model by using discretized voronoi mesh for concrete and beam element for reinforcement. *Cement and Concrete Composites*, 110, 103593. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103593>
- Feirusha, S. H., & Abdal, A. M. (2019). Theoretical investigation of stresses and displacement in RC annular slabs. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 12(6), 1069-1090.
- Fib-CED. (2013). fib Model Code for Concrete Structures 2010. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9783433604090>
- Fib Model Code for Concrete Structures 2010*. (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. wiley. <https://doi.org/10.1002/9783433604090>
- Filippopolitis, M., & Hopkins, C. (2021). Experimental validation of finite element models representing stacked concrete beams with unbonded surface contacts. *Engineering Structures*, 227, 111421. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111421>
- Halahla, A. (2018). Study the behavior of reinforced concrete beam using finite element analysis. *Proceedings of the 3rd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (April 2018)*.(Vol. 10). <https://doi.org/10.11159/icsenm18.103>
- Hordijk, D. A. (1991). Cohesive model for crack propagation analyses of structures with elastic-plastic material behavior Foundations and implementation. *Dissertation, Delft University of Technology*, 41.
- Khalfallah, S., Charif, A., & Mohammed, N. (2004). Nonlinear analysis of reinforced concrete structures using a new constitutive model. *Revue Européenne des Eléments*, 13(8), 841-856. <https://doi.org/10.3166/reef.13.841-856>
- Kurumatani, M., Soma, Y., & Terada, K. (2019). Simulations of cohesive fracture behavior of reinforced concrete by a fracture-mechanics-based damage model. *Engineering Fracture Mechanics*, 206, 392-407. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.12.006>
- Lantsoght, E. O., De Boer, A., van der Veen, C., & Hordijk, D. A. (2019). Optimizing Finite Element Models for Concrete Bridge Assessment With Proof Load Testing. *Frontiers in Built Environment*, 5, 99. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00099>
- Magnucki, K., Lewinski, J., & Magnucka-Blandzi, E. (2020). Bending of two-layer beams under uniformly distributed load-Analytical and numerical FEM studies. *Composite Structures*, 235, 111777. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111777>
- Maulana, R., & Riko, R. (2020). *Studi eksperimental perilaku balok t akibat geser dan momen negatif*.
- Mehrpay, S., Wang, Z., & Ueda, T. (2020). Development and application of a new discrete element into simulation of nonlinear behavior of concrete. *Structural Concrete*, 21(2), 548-569. <https://doi.org/10.1002/suco.201900059>
- Naderpour, H., & Mirrashid, M. (2020). Evaluation and verification of finite element analytical models in reinforced concrete members. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44(2), 463-480. <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00240-8>
- Oh, C. L., Lee, S. W., Raizamzamani, M. M., Azerai, A. R., & Azmi, Y. N. (2018). Finite element analysis of high strength reinforced concrete beams. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 250, p. 03007). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825003007>
- Pranata, A. Y., Tjitradi, D., & Prasetia, I. (2020). Horizontal Web Reinforcement Configuration

- Analysis of Deep Beam Capacity and Behavior using Finite Element Modeling. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 10(1), 5242-5246. <https://doi.org/10.48084/etasr.3256>
- Rahman, A. F., Goh, W. I., Mohamad, N., Kamarudin, M. S., & Jhatial, A. A. (2019). Numerical analysis and experimental validation of reinforced foamed concrete beam containing partial cement replacement. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00297. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00297>
- Rai, P. (2020). Non-Linear Finite Element Analysis of RC Deep Beam Using CDP Model. *Advances in Technology Innovation*, 6(1), 1. <https://doi.org/10.46604/aiti.2021.5407>
- Sader Mohammed, D. A. (2019). Validation of Finite Element Modeling for Rectangular Reinforced Concrete Beams With Web Openings. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 23(3), 89–98. <https://doi.org/10.31272/jeasd.23.3.7>
- Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A., & Jensen, J. (1987). Mechanical properties of high-strength concrete and application in design. *Symposium Proceedings, Utilization of High-Strength Concrete*, Norway, 1987.
- Tudjono, S., Lie, H. A., & Gan, B. S. (2018). An integrated system for enhancing flexural members' capacity via combinations of the fiber reinforced plastic use, retrofitting, and surface treatment techniques. *International Journal of Technology*, 9(1). <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i1.298>
- Tudjono, S., Han, A. L., & Hariwijaya, L. H. (2013). Reinforced concrete finite element analysis incorporating material nonlinearity and failure criteria aspects. *Applied Mechanics and Materials*, 284–287, 1230–1234. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.1230>
- Vecchio, F. J., & Collins, M. P. (1986). The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI J.*, 83(2), 219-231. <https://doi.org/10.14359/10416>
- Venkatachalam, S., Vishnuvardhan, K., Amarapathi, G. D., Mahesh, S. R., & Deepasri, M. (2021). Experimental and finite element modelling of reinforced geopolymer concrete beam. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6500-6506. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.449>
- Yi, W. J., Huang, B., & Chen, H. (2017). Finite element analysis on the effect of web reinforcement on shear failure of reinforced concrete continuous deep beams. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 34(2), 175-182. <https://doi.org/10.7511/jslx201702008>
- Zhang, P., Restrepo, J. I., Conte, J. P., & Ou, J. (2017). Nonlinear finite element modeling and response analysis of the collapsed Alto Rio building in the 2010 Chile Maule earthquake. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(16), e1364. <https://doi.org/10.1002/tal.1364>