

## PEMODELAN TIGA DIMENSI BETON SILINDER YANG DIUJI TEKAN DENGAN VARIASI TIPE *MESH ELEMENT* DAN EFEK REDUKSI INTEGRASI

I Gede Gegiranang Wiryadi, I Ketut Diartama Kubon Tubuh dan I Putu Agus Putra Wirawan  
*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Mahasaraswati Denpasar*  
*Email: anankwiryadi@gmail.com*

**ABSTRAK:** Penelitian dengan metode numerik menggunakan program komputer mengalami peningkatan akhir-akhir ini dalam berbagai sektor termasuk bidang material struktur. Namun, analisis secara numerik tersebut masih perlu dikembangkan dalam hal teknik pemodelan agar mendapatkan hasil sesuai dengan kondisi sebenarnya. Paper ini menyajikan pemodelan beton berbentuk silinder secara numerik menggunakan program komputer berbasis elemen hingga, Abaqus®. Teknik pemodelan ditinjau pada tipe *mesh element* dan efek reduksi-integrasi *hourglass control*. Benda uji pemodelan berupa beton silinder berukuran 150 mm x 300 mm dengan mutu 25 MPa. Perilaku plastis beton dimodel dengan fitur *concrete damage plasticity* (CDP). Hasil analisis menunjukkan reduksi-integrasi *hourglass control* memberikan efek puncak beban lebih rendah pada kondisi material melewati batas elastis. Sedangkan tipe elemen mesh yang lebih baik adalah bentuk *hexahedral 8-noded* karena lebih stabil sehingga reduksi-integrasi dengan *hourglass control* dapat bekerja.

**Kata kunci:** analisis elemen hingga, beton, CDP, *mesh element*, *hourglass effect*

### ***THREE DIMENTIONAL MODELING OF CYLINDRICAL CONCRETE UNDER AXIAL COMPRESSION WITH VARIATIONS OF MESH ELEMENT TYPE AND EFFECT OF REDUCED INTEGRATION***

**ABSTRACT:** Research by numerical methods using computer software programs has increased in recent for various sectors including structural materials. However, the numerical analysis still needs to be developed as a modeling technique to get results that correspond to factual conditions. This paper presents the modeling of a concrete cylinder with a numerical method using a finite element-based computer program, Abaqus®. Modeling technique to investigate the mesh element technique and the reduced-integration of hourglass control. The specimen model is in the form of cylindrical concrete with a size of 150 mm x 300 mm with a quality of 25 MPa. Concrete plastic behavior modeled with the concretes damage plasticity (CDP) feature. The analysis results show that the reduction-integration of hourglass control gives a lower peak load effect when the material passes the elastic limit. Meanwhile, a better type of mesh is 8-noded hexahedral because it is more stable so that the reduction-integration of hourglass control can work.

**Keywords:** finite element analysis, concrete, CDP, *mesh element*, *hourglass effect*

## PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu jenis material yang paling banyak digunakan sebagai bahan struktur bangunan. Kelebihan beton adalah mudah dikerjakan, awet dan tahan terhadap cuaca, dan lebih murah dibandingkan material kayu atau baja. Beton memiliki karakteristik yang kuat menerima gaya tekan dan lemah menerima gaya tarik aksial. Mekanisme distribusi tegangan dan regangan pada bagian dalam beton masih sulit diamati secara langsung melalui uji eksperimental di laboratorium. Sehingga apa yang terjadi pada bagian inti beton tidak dapat diamati ketika tegangan masih bekerja. Hasil uji eksperimen dapat diamati pada kondisi sudah mengalami retak atau pecah. Sedangkan ketika proses tegangan maupun regangan bekerja sulit diamati tanpa alat bantu tertentu.

Penelitian eksperimental dilakukan dengan biaya yang tidak murah jika parameter yang diamati lebih banyak. Selain itu jika pengujian dilakukan berulang kali karena kesalahan, maka biaya akan menjadi lebih mahal. Penelitian dengan metode numerik sebagai pendekatan penelitian eksperimental semakin banyak dikembangkan beberapa tahun terakhir. Dukungan teknologi yang semakin canggih dan dibantu program komputer, membuat penelitian ini lebih efisien untuk mengurangi biaya penelitian eksperimental dan mendapatkan hasil yang diharapkan seperti pada penelitian. Tambusay (2016), Forouzanmehr (2019), serta Wiryadi and Sudarsana (2019), melakukan penelitian dengan salah satu metode numerik yang banyak digunakan yaitu metode elemen hingga (MEH) yang mana dalam penelitian mereka mendapatkan banyak informasi dari parameter yang ditinjau. Salah satu program yang berbasis metode elemen hingga adalah Abaqus®, dengan salah satu fitur yang dapat menggambarkan karakteristik beton yaitu *Concrete Damage Plasticity* (CDP) (Abaqus, 2014).

Penelitian mengenai perilaku berbagai elemen struktur telah banyak dilakukan dengan fitur CDP dari abaqus dan mendapatkan hasil yang sesuai dengan hasil eksperimental (Chaudhari and Chakrabarti, 2012; Genikomsou and Polak, 2014; Hany *et al.*, 2016; Sudarsana *et al.*, 2017; Goh and Hrynyk, 2018; Secci *et al.*, 2019). Fitur CDP disesuaikan atau dimodifikasi berdasarkan nilai-nilai yang dapat memberikan hasil sesuai dengan eksperimental. Selain fitur dari CDP, ada efek lain yang mempengaruhi yaitu proses *mesh element*. Mesh elemen merupakan bagian yang diperhatikan dalam analisis elemen hingga. Ukuran mesh dan bentuk mesh akan menentukan perilaku material. Dalam memodelkan beton yang merupakan bahan yang tidak homogen, ukuran mesh disarankan tidak

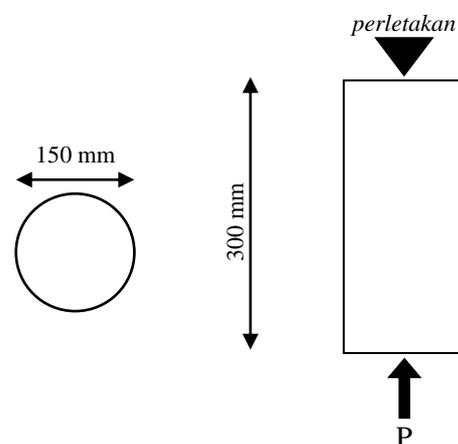
lebih kecil dari agregat kasar yang digunakan (Chaudhari and Chakrabarti, 2012; Genikomsou and Polak, 2015). Selain ukuran mesh, bentuk mesh dan efek *hourglass* juga dipertimbangkan dalam analisis elemen hingga. Bentuk mesh dengan elemen 4, 6, dan 8 titik nodal memberikan perilaku yang berbeda dalam analisis. Demikian juga dengan efek *hourglass* yang mana fitur ini dapat mempersingkat waktu analisis dan terdapat parameter yang dapat aktif dalam mendefinisikan perilaku material.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perilaku silinder beton yang diuji tekan aksial dengan variasi tipe dan bentuk *mesh element* dan reduksi integrasi *hourglass*. Beton silinder diasumsikan sebagai kolom pendek yang diuji tekan dan perilaku yang diamati yaitu tegangan-regangan terfokus pada bagian atau fase nonlinier. Tegangan-regangan beton didefinisikan berdasarkan kurva tegangan-regangan dari Hognestad (1951). Perilaku yang diamati adalah hubungan tegangan, regangan, beban-deformasi, dan pola retak dari kontur tegangan-regangan. Variasi teknik pemodelan pada penelitian ini akan memberikan informasi pemodelan beton akibat pengaruh jenis *mesh element* dan reduksi-integrasi *hourglass*. Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan pengujian eksperimen yang dilakukan oleh Wijaya (2018).

## METODE

### Metode dan Benda Uji

Benda uji dimodelkan pada program Abaqus® versi 6.14-01 dengan fitur CDP untuk definisi kekuatan beton pasca kondisi elastis sebelum dan sesudah beban puncak. Semua benda uji dibebani dan diberikan perletakan yang sama. Beban diberikan berupa gaya aksial melalui pusat penampang silinder dan diberikan perletakan sendi pada ujung lainnya (Gambar 1).





Permukaan atas diberikan perletakan sendi, dengan fitur *rigid body point to surface*, titik RP2 sebagai pusat penerima gaya pada seluruh penampang.

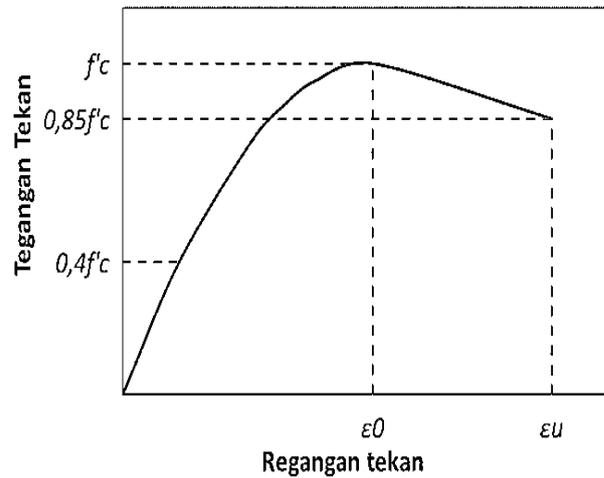
Permukaan bawah diberikan gaya aksial, dengan fitur *rigid body point to surface*, titik RP1 sebagai titik pusat gaya dan disebarkan ke seluruh penampang.



Gambar 1. Skema pembebanan dan perletakan

Untuk menyebarkan gaya pada seluruh penampang lingkaran melalui titik pusat beban, digunakan fitur *rigid-body point to surface*. Proses analisis menggunakan fitur *Dynamic Explicit* yang mana memberikan efek waktu analisis yang lebih cepat karena *increment* yang *divergent* akan diloncati atau diabaikan (Abaqus, 2011).

Enam (6) buah Silinder beton memiliki diameter 150mm dan tinggi 300 mm seperti pada Gambar 1 diberikan perlakuan bentuk *mesh element*, dengan efek *hourglass* atau tidak. Mutu beton dimodelkan dengan kuat karakteristik tekan ( $f'_c$ ) sebesar 25 MPa seperti pada Tabel 1. Dalam pengujian kuat tekan maupun tarik beton data karakteristik beton disajikan dalam diagram tegangan ( $f'_c$ ) - regangan( $\epsilon$ ). Maka dari itu, pendekatan data tegangan-regangan beton ditentukan mengikuti kurva tegangan-regangan dari (Hognestad, 1951) (dengan kurva mengikuti Persamaan (1) dan Persamaan (2)). Kurva tegangan regangan ini dibagi menjadi tiga (3) yaitu bagian linier ditentukan oleh  $E_0$  yang diambil sebesar  $4700\sqrt{f'_c}$  sampai batas  $0,4f'_c$ , kemudian setelah kondisi linier sampai titik puncak mengikuti Persamaan 1, dan terakhir kondisi setelah beban puncak hingga runtuh mengikuti Persamaan (2).



Gambar 2. Kurva tegangan-regangan tekan (sumber: Abaqus, 2014)

*Ascending branch*

$$f_c = f'_c \left[ \frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \rightarrow 0 < \epsilon_c \leq \epsilon_0 \quad (1)$$

*Descending branch*

$$f_c = f'_c [1 - 100(\epsilon_c - \epsilon_0)] \rightarrow \epsilon_0 < \epsilon_c - \epsilon_u \quad (2)$$

Keterangan:

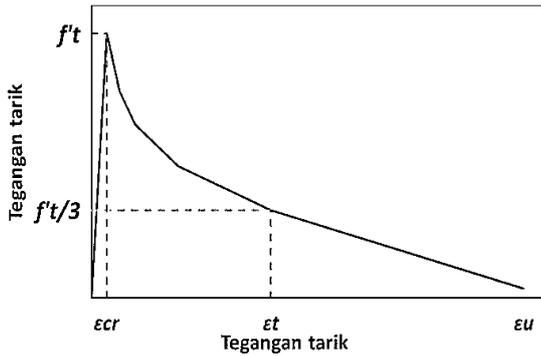
$f_c$  : kuat tekan beton

$f'_c$  : kuat tekan beton puncak

$\epsilon_0$  : regangan beton pada tegangan puncak

$\epsilon_c$  : regangan beton pada  $f_c$

Kuat tarik maksimum beton ditentukan berdasarkan berdasarkan Persamaan (3), bagian sebelum puncak kuat tarik mengikuti persamaan (4) dan pada bagian setelah puncak beton mengalami perlemahan dengan mengikuti Persamaan (5) dan berakhir pada regangan maksimum ( $\epsilon_u$ ). beton mengalami retak pertama ketika telah melewati batas elastis, namun efek retak tersebut tidak menurunkan kekuatan secara signifikan. Namun setelah melewati batas puncak beban pada regangan puncak ( $\epsilon_0$ ) kekuatan dalam menerima beban menurun. Kondisi perlemahan ini setelah tegangan tarik maksimum terlewati, retak pada beton mulai terbuka dan mengalami penurunan kekuatan dalam memikul beban.



Gambar 3. Kurva tegangan-regangan tarik (sumber: Abaqus, 2014)

$$f_t = 0,33\sqrt{f'_c} \tag{3}$$

$$f_t = E_c \epsilon_t \text{ jika } \epsilon_t \leq \epsilon_{cr} \tag{4}$$

$$f_t = f'_t \left( \frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_t} \right)^{0,4} \text{ jika } \epsilon_t > \epsilon_{cr} \tag{5}$$

Keterangan:

- $f_t$  : kuat tarik beton
- $f'_t$  : kuat tarik beton puncak
- $\epsilon_0$  : regangan beton pada tegangan puncak
- $\epsilon_c$  : regangan beton pada  $f_c$

Model benda uji dibuat sebanyak 6 (enam) buah dengan variasi bentuk atau tipe *mesh element* beserta tekniknya dan pemberian efek reduksi-integrasi yaitu *hourglass*. Kode benda uji adalah S1, S2, S3, S4, S5, dan S6. Benda uji S1 dan S2 adalah variasi bentuk *mesh hexahedral* (8 nodal) dengan efek

reduksi-integrasi *hourglass control* (C3D8R), tetapi dengan pola *mesh* berbeda. Sedangkan benda uji S3 dan S4 juga memiliki bentuk *mesh hexahedral* (8 nodal) tetapi tanpa reduksi-integrasi (C3D8) dan berbeda pola *mesh element*. Benda Uji S5 dan S6 masing masing dengan bentuk prisma segitiga (6 nodal / *wedge*) (C3D6) dan *tetrahedral* (4 nodal) (C3D4). Variasi benda uji dapat dilihat pada Gambar 6 dengan ukuran *mesh* dibuat merata yaitu 20mm, yang mana memberikan efek yang paling baik (Genikomsou and Polak, 2015). Dalam memodelkan beton dengan fitur CDP, ukuran *mesh* sangat menentukan hasil analisis dan tidak disarankan lebih kecil dari 15mm (Chaudhari and Chakrabarti, 2012)

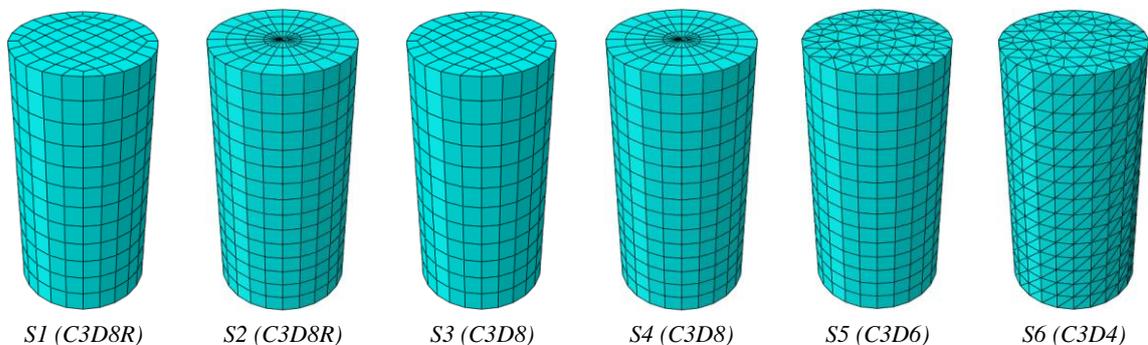
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kapasitas aksial dan perpendekan

Kapasitas aksial dari benda uji disajikan dalam hubungan beban – perpendekan seperti pada Gambar 5. Perbedaan signifikan terlihat pada kondisi setelah batas elastis terlewati. Pada batas elastis semua perlakuan yang diberikan pada benda uji menunjukkan hasil yang sama. Hal ini menunjukkan perilaku hanya dipengaruhi oleh modulus Elastisitas ( $E$ ) dan pengaruh variasi tipe *mesh element* dan reduksi intergrasi *hourglass control* tidak terlihat. Pada kondisi melewati batas elastis, puncak beban, dan setelah puncak beban (*down curve*), variasi tipe *mesh element* dan reduksi integrasi *hourglass control* terlihat pengaruhnya. Reduksi-integrasi *hourglass control* memberikan efek signifikan setelah melewati batas elastis-puncak beban, yang

Tabel 1. Properti material beton

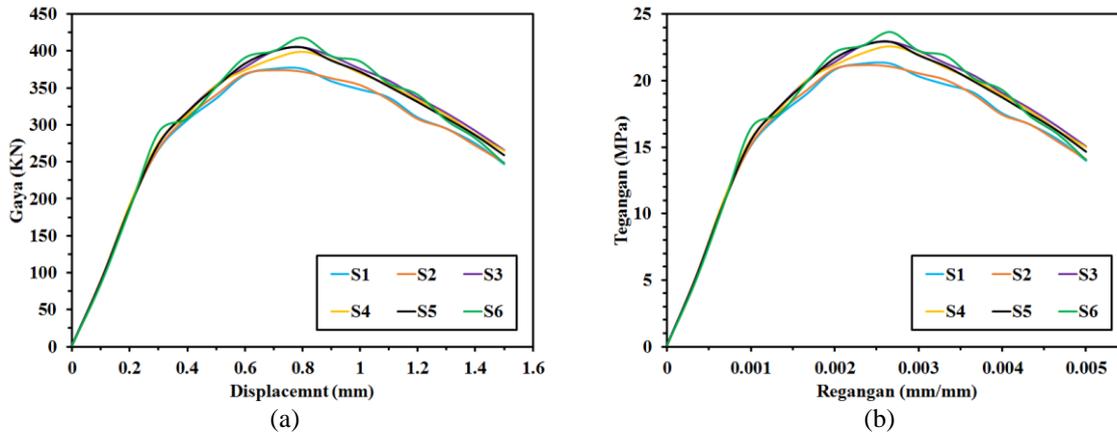
Kuat Tekan ( $f'_c$ ) MPa	Kuat Tarik ( $f_t$ ) MPa	Modulus Elastisitas, $E_c$ MPa	$\epsilon_0$	$\epsilon_u$	$\epsilon_{cr}$	$\epsilon_t$
25	1.65	23500 MPa	0,02	0,038	0,0	0,0



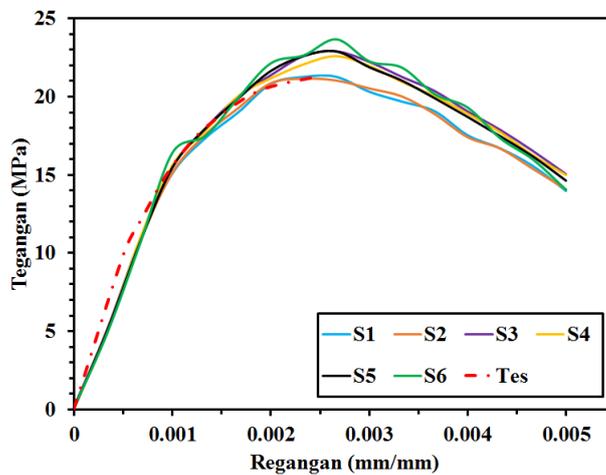
Gambar 4. Model 3-dimensi silinder dengan variasi bentuk *mesh*

mana puncak beban terlihat lebih rendah dari perlakuan tanpa reduksi-integrasi *hourglass control* (Gambar 5a). Hal tersebut juga secara langsung terlihat pada tegangan puncak masing-masing benda

uji (Gambar 5b). Besarnya gaya maksimum, perpindahan, tegangan, dan regangan dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 5. Kurva gaya-displacement (a), kurva tegangan-regangan (b)



Gambar 6. Perbandingan kurva tegangan-regangan model FE dan hasil pengujian eksperimental

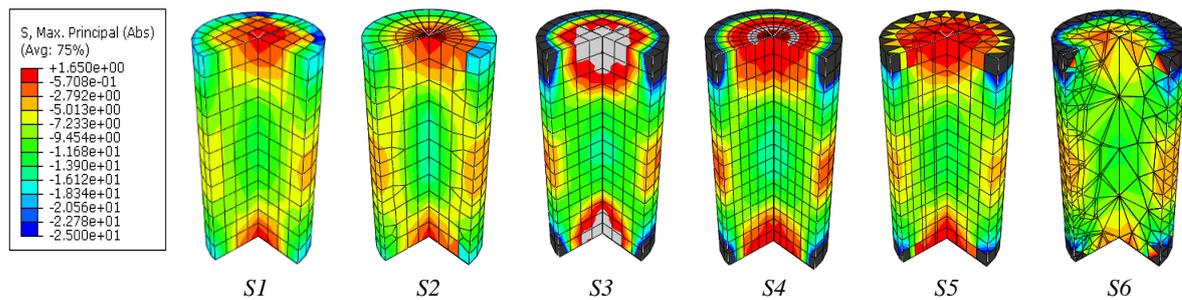
Pada Tabel 2 disajikan hasil analisis masing-masing benda uji pada kondisi menerima beban maksimum atau beban puncak. Gaya maksimum terbesar terjadi pada benda uji S6 dan terendah pada benda uji S2 yang nilainya masing-masing 418 kN dan 374 kN. Hasil tegangan puncak tertinggi adalah sebesar 23,65 MPa (benda uji S6) dan terendah sebesar 21,16 MPa (benda uji S2). Sedangkan regangan yang terjadi pada kondisi beban puncak berhimpit pada benda uji S1 dan S2 yaitu 0,0023, sedangkan pada benda uji S3, S4, S5, dan S6 yaitu 0,0027. Berdasarkan hasil analisis ini didapatkan bahwa penggunaan fitur reduksi-integrasi *hourglass control* mempengaruhi kapasitas beban yang dapat diterima, hal ini terlihat dari benda uji S1 dan S2 yang kapasitas maksimumnya lebih rendah dibandingkan benda uji lainnya. Variasi tipe *mesh element* juga berpengaruh terhadap kapasitas maksimum, yang mana terlihat pada benda uji S2 dan S4 yang memiliki bentuk mesh yang sama yaitu

hexahedral dengan teknik melingkar. Benda uji S2 dengan fitur reduksi-integrasi *hourglass control* lebih rendah dari benda uji S4 yang tanpa reduksi-integrasi. Tipe mesh *hexahedral* (S3) dan *wedge* (S5) menunjukkan tegangan puncak yang sama, sedangkan tipe mesh tetrahedral (S6) menunjukkan teganan paling tinggi dari yang lainnya. Tipe *mesh element* segitiga memiliki kekakuan lebih tinggi dibanding elemen yang lainnya pada kajian ini.

Hasil pemodelan kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian eksperimental yang dilakukan oleh Wijaya (2018) (Gambar 6). Efek reduksi integrase dan bentuk mesh *hexahedral* (8-nodal) membuat hasil pemodelan S1 dan S2 paling mendekati hasil eksperimental yang dimana fase non-liniernya serupa. Hal ini menunjukkan kombinasi efek reduksi-integrasi dan bentuk mesh *hexahedral* perlu ditambahkan untuk mendefinisikan penurunan kekuatan beton pasca kondisi elastis atau pada fase non-linier.

Tabel 2. Perbandingan hasil analisis dengan hasil pengujian eksperimen

Benda Uji	P <sub>max</sub> (KN)	Displacement (mm)	Tegangan (MPa)	Perbandingan	Regangan
Test			21,2	1	0,002
S1	376	0,701	21,28	1.004	0,0023
S2	374	0,701	21,16	0.998	0,0023
S3	405	0,800	22,92	1.081	0,0027
S4	399	0,800	22,58	1.065	0,0027
S5	405	0,800	22,92	1.081	0,0027
S6	418	0,800	23,65	1.116	0,0027



Gambar 7. Kontur tegangan

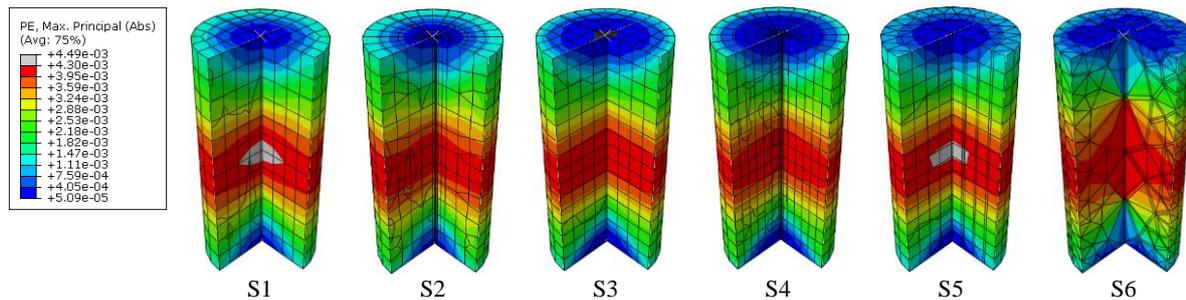
Tegangan awal ditargetkan sebesar 25 MPa tetapi tidak ada benda uji yang mencapai tegangan tersebut. Analisis pada persamaan numerik biasanya tidak memperhitungkan penurunan kapasitas akibat kerusakan benda uji setelah menerima beban dengan kata lain benda uji tetap utuh walau telah berdeformasi melewati batas elastis. Sedangkan kondisi sebenarnya pada pengujian laboratorium benda uji yang sudah mengalami kerusakan mengalami penurunan kekuatan karena ada bagian yang mengalami kerusakan akibat deformasi melewati batas elastis. Selain mengaplikasikan fitur reduksi-integrasi *hourglass control* dan menerapkan tipe *mesh element* untuk memperhitungkan kondisi sebenarnya, yang mana efek tersebut memperhitungkan kerusakan dari benda uji setelah menerima beban. Selain efek reduksi-integrasi, definisi keruntuhan tekan dan tarik diperhitungkan seperti kondisi kenyataannya yaitu akibat kerusakan kondisi tekan dan tarik yang telah terjadi pada benda uji setelah melewati batas elastis, maka kemampuan menahan beban juga mengalami penurunan atau degradasi kekuatan. Efek reduksi integrasi dapat mengefektifkan pengaruh dari definisi keruntuhan beton pada kondisi non-linier baik pada bagian sebelum beban puncak maupun pasca beban puncak.

**Tegangan Dan Regangan**

Pola tegangan ditampilkan dalam bentuk kontur warna yang terdistribusi pada benda uji. Warna

merah menunjukkan tegangan tarik hingga biru mengalami tekan, lihat Gambar 7. Setiap benda uji pada kondisi puncak beban memiliki pola yang tegangan yang sama yaitu pada bagian tengah cenderung mengalami tarik dan pada bagian tepi mengalami tegangan tekan. Ketika benda uji menerima beban aksial tekan pada ujungnya, maka benda uji akan memendek ke arah vertikal dan bagian tengah akan mendesak kesamping atau pemuai ke arah lateral. Efek ini yang disebut dengan efek Poisson yang biasanya dinyatakan dengan angka Poisson (*Poisson's ratio*). Sehingga pada bagian tepi mengalami tegangan tekan dan bagian tengah mengalami tegangan tarik. Pola ini menunjukkan hasil seperti pengujian tekan beton pada umumnya.

Kontur tegangan S1 dan S2 terlihat merata tegangannya dan tidak ada yang melewati dari batas yang ditentukan, sedangkan kontur tegangan pada benda uji S3, S4, S5 dan S6 pada bagian ujung baik tekan dan tarik terlihat melewati batas yang telah ditentukan. Hal ini menunjukkan tanpa reduksi-integrasi tegangan yang terjadi dapat lebih tinggi. Tipe *mesh hexahedral* menunjukkan tegangan terpolakan lebih baik dengan peningkatan yang merata dibandingkan dengan widget maupun tetrahedral. Pada tipe *mesh tetrahedral* tegangan didominasi tekan dan sebagian besar terjadi pada bagian tepi pada kedua ujungnya.



Gambar 8. Kontur regangan

Pola regangan juga disajikan dalam bentuk kontur warna yang menunjukkan kontribusi regangan pada seluruh bagian benda uji (Gambar 8). Seperti pola tegangan, pola regangan menunjukkan pola yang sama pada setiap benda uji. Regangan maksimum (tekan) terjadi pada bagian tengah benda uji dan semakin ke ujung menunjukkan regangan semakin mengecil. Hal ini menunjukkan perpendekan akibat tekanan aksial terjadi pada bagian tengah benda uji dan pemuai lateral juga terjadi pada bagian tengah ini. Tipe mesh *hexahedral* dan *widjet* tidak menunjukkan yang berbeda, namun pada tipe *mesh tetrahedral* terlihat perbedaan pola regangan. Terlihat ada pusat pertemuan mesh pada bagian dekat kedua ujungnya yang mana hal tersebut memengaruhi pola regangan yang terjadi.

Kontur warna tegangan dan regangan akibat tipe mesh yang berbeda antara variasi *hexahedral* dan *widjet* tidak terlihat perbedaan yang signifikan. Kedua tipe tersebut menghasilkan pola yang cenderung sama. Tetapi pada tipe *mesh tetrahedral* sangat terlihat perbedaan pola dengan yang lainnya. *Mesh element* dengan tipe *tetrahedral* mempengaruhi pola regangan yang terjadi. Namun pada kenyataannya tidak dapat diprediksi distribusi tegangan pada beton yang menerima beban dan selalu menghasilkan pola retak ataupun tegangan yang berbeda-beda satu dan lainnya. Hal ini karena pada kenyataannya beton merupakan material yang tidak homogen, sehingga pola retak maupun distribusi tegangan yang terjadi sangat bergantung pada komposisi atau susunan bahan, variasi ukuran agregat yang digunakan, serta proses pengerjaan atau pencetakannya.

Reduksi-integrasi *hourglass control* juga memberikan efek *run time analysis* menjadi lebih singkat. Waktu menjalankan analisis yaitu model S1 hanya 19 detik, model S2 sebesar 35 detik, model S3 sebesar 1 menit 24 detik, model S4 sebesar 6 menit 2 detik, model S5 sebesar 23 detik, dan model S6 sebesar 56 detik. Model S1 dan S3 memiliki bentuk mesh yang sama, namun waktu menjalankan analisis

terlihat perbedaan waktu sebesar 1 menit 5 detik lebih lama untuk model S2. Model S2 dan S4 juga memiliki bentuk mesh yang sama, tetapi model S4 memerlukan waktu menjalankan 5 menit 27 tujuh detik lebih lama. Efek reduksi-integrasi *hourglass control* dapat mereduksi waktu menjalankan analisis yang cukup signifikan dibandingkan tanpa efek ini.

### SIMPULAN

Pemodelan material dengan metode elemen hingga perlu berbagai perlakuan khusus agar mendapatkan hasil sesuai dengan kenyataannya. Perlakuan khusus yang dimaksud seperti definisi kuat tekan dan tarik, efek reduksi kekuatan pasca kondisi elastik, maupun ukuran mesh dan tipe atau jenis *mesh element*. Dukungan persamaan numerik saja tidak cukup untuk menentukan perilaku dari suatu material. Pemodelan silinder beton dengan tinjauan khusus pada teknik pemodelan menggunakan software berbasis elemen hingga, Abaqus, diharapkan dapat memberikan masukan dan rekomendasi dalam memodelkan material beton.

Dari hasil analisis yang dilakukan menunjukkan reduksi-integrasi *hourglass control* menurunkan waktu menjalankan analisis (*runtime analysis*) dan kapasitas maksimum dan berada dibawah dari benda uji tanpa pemberian reduksi-integrasi. Reduksi-integrasi ini memberikan porsi optimum untuk fitur reduksi kekuatan pada beton pasca kondisi elastis yang telah mengalami kerusakan akibat dari pemberian beban yang sesuai dengan hasil pengujian eksperimental. Setiap material yang melewati batas elastis mengalami penurunan performa dalam menerima beban dan fitur reduksi-integrasi ini dapat digunakan untuk hal tersebut. Tipe mesh dengan bentuk *hexahedral* memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan bentuk *tetrahedral* karena distribusi tegangan dan regangannya lebih baik. Penggunaan teknik dan jenis *mesh element hexahedral* dapat mengaktifkan reduksi-integrasi *hourglass control*. Teknik pembagian, ukuran, dan pola elemen mesh juga memberikan pengaruh terhadap perilaku material.

Fitur reduksi-integrasi, tipe mesh dan bentuk elemen mesh dapat diteliti lebih lanjut pada benda uji yang lebih kompleks, seperti elemen struktur yaitu kolom, balok, pelat, serta join atau sambungan. Pada kondisi yang lebih kompleks, pengaruh material yang berbeda seperti beton dan tulangan akan memerlukan waktu menjalankan analisis yang lebih panjang.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abaqus 2011. 'Three-dimensional solid element library', in *Abaqus 6.14 Online Documentation*, pp. 1–26.
- Abaqus 2014. 'Getting Started with Abaqus', in *Abaqus 6.14 Online Documentation*. USA: Dassault Systèmes Simulia.
- Chaudhari, S. V. and Chakrabarti, M. A. 2012. 'Modeling of Concrete for Nonlinear Analysis Using Finite Element Code ABAQUS', *International Journal of Computer Applications*, 44(7), pp. 14–18.
- Forouzanmehr, M., Reza-Kashyzadeh, K., Baziari, K. and Mohammadi, M. 2019. *Failure Analysis of Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with CFRP by Using Finite Element Method and Experimental Tests*, *International Journal of Solid Materials*. Available at: <http://jyotiacademicpress.org>.
- Genikomsou, A. S. and Polak, M. A. 2014. 'Finite Element Analysis of a Reinforced Concrete Slab-Column Connection using ABAQUS', *ASCE Structures Congress*, pp. 813–823. doi: 10.1061/9780784413357.072.
- Genikomsou, A. S. and Polak, M. A. 2015. 'Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS', *Engineering Structures*, 98, pp. 38–48. doi: 10.1016/j.engstruct.2015.04.016.
- Goh, C. Y. M. and Hrynyk, T. D. 2018. 'Numerical Investigation of the Punching Resistance of Reinforced Concrete Flat Plates', *Journal of Structural Engineering*, 144(10), p. 04018166. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002142.
- Hany, N. F., Hantouche, E. G. and Harajli, M. H. 2016. 'Finite element modeling of FRP-confined concrete using modified concrete damaged plasticity', *Engineering Structures*. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.06.047.
- Hognestad, E. 1951. 'A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members', *University of Illinois Bulletin Series*, 399, p. 49. doi: 10.14359/7785.
- Secchi, L. *et al.* 2019. 'Finite element analysis of punching shear of R/C slabs: A hybrid approach for model calibration', in *Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures*.
- Sudarsana, I. K., Gegiranang Wiryadi, I. G. and Adi Susila, I. G. 2017. 'Analisis Perilaku Hubungan Pelat-Kolom Tepi Struktur Pelat Datar menggunakan Concrete Damage Plasticity (CDP) dalam Abaqus', *Jurnal Spektran*, 5(2). Available at: <https://ojs.unud.ac.id/index.php/jsn/article/view/32932>.
- Tambusay, A., Suprobo, P., Faimun and Amiruddin, A. A. 2016. 'Analyses Behavior of Slab-Column Connections Using ECC Material Based', *EASEC*, 14. doi: 10.13140/RG.2.1.1517.7367.
- Wijaya, M. N. 2018. 'Evaluasi Tegangan-Regangan Dengan Pemodelan Silinder Beton', *Rekayasa Sipil*, 12(1), pp. 58–63. doi: 10.21776/ub.rekayasasipil/2018.012.01.8.
- Wiryadi, I. G. G. and Sudarsana, I. K. 2019. 'Analisis Pengaruh Bentuk Dinding Geser Beton Bertulang Terhadap Kapasitas dan Luas Tulangan', *Jurnal Spektran*, 7(2), pp. 187–194. Available at: <https://ojs.unud.ac.id/index.php/jsn/article/view/52143>.