

ANALISIS PERILAKU HUBUNGAN PELAT-KOLOM TEPI STRUKTUR PELAT DATAR MENGGUNAKAN *CONCRETE DAMAGE PLASTICITY (CDP)* DALAM ABAQUS

I Ketut Sudarsana¹, I Gede Gegiranang Wiryadi² dan I Gede Adi Susila³

^{1,2,3} Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Udayana
Email:ksudarsana@unud.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perilaku hubungan pelat-kolom tepi dari struktur pelat datar menggunakan fitur CDP dari program Abaqus. Benda uji eksperimen dari literatur dimodelkan pada program Abaqus dengan fitur CDP untuk mendefinisikan perilaku inelastis beton. Hubungan pelat-kolom yang ditinjau merupakan pelat-kolom tepi terisolasi dengan dimensi pelat 1020 mm x 1540 mm, tebal pelat 120 mm, dimensi kolom 250 mm x 250 mm, dan tinggi total kolom 1520 mm. Beban vertikal dan momen tak seimbang dikerjakan melalui ujung-ujung kolom. Beban vertikal bekerja tegak lurus bidang pelat, sedangkan momen dihasilkan dari dua gaya horizontal yang saling berlawanan dengan arah tegak lurus terhadap tepi bebas pelat. Perletakan sendi ditempatkan pada tiga sisi pelat selain tepi bebas dengan arah yang berlawanan dengan arah kerja beban vertikal. Sebanyak 22 model dianalisis dengan variasi nilai dari lima parameter utama CDP dan ukuran mesh. Nilai-nilai parameter CDP divariasikan untuk mendapatkan hasil analisis yang memberikan prediksi yang mendekati hasil eksperimen. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai-nilai parameter CDP seperti viskositas (μ) = 0,00005, dan sudut dilatasi (ψ) = 40°, regangan tarik dalam mendefinisikan perilaku tarik dan penggunaan parameter keruntuhan (*damage parameter*) pada perilaku tekan dan tarik memberikan perilaku hubungan pelat-kolom tepi hasil analisis yang mendekati hasil eksperimen.

Kata kunci: hubungan pelat-kolom tepi, momen tak seimbang, geser pons, Abaqus, concrete damage plasticity

BEHAVIOUR ANALYSIS OF EDGE COLUMN-PLATE CONNECTION OF FLAT PLATE STRUCTURES USING CDP IN ABAQUS

ABSTRACT

This research was done to investigate the behavior of edge slab-column connection of flat plate structure using the CDP features of ABAQUS software. Experimental specimen obtained in the literature was modelled in ABAQUS software with CDP features to define the concrete inelastic behavior. The investigated slab-column connection is an edge slab-column subassembled connection having slab dimension of 1020 mm x 1540mm, slab thickness of 120 mm, column dimension of 250 mm x 250mm and column height of 1520 mm. The vertical load and unbalanced moment were applied through the column ends. The vertical load works in the direction perpendicular to slab surface, and the unbalanced moment perpendicular to slab free edge that is obtained from a couple of horizontal forces acting in opposite direction. As many as 22 models were analyzed for five variations on CDP parameters and mesh size. The parametric values of the CDP were varied to obtained the analysis results predict well the experimental results. The analysis shows that the parametric values of CDP such as viscosity (μ) of 0,00005, dilatation angle (ψ) of 40°, using tension strain to define tension behavior of concrete, and considering damage parameter due to compression and tension give the analysis results of the behavior of edge slab-column connections close to experimental result.

Key words: edge slab-column connections, unbalanced moment, punching shear, abaqus, concrete damage plasticity

1 PENDAHULUAN

Kelemahan utama dari hubungan pelat dan kolom pada struktur pelat datar adalah kekakuan yang rendah dibandingkan dengan hubungan balok dan kolom. Distribusi beban pelat yang ditransfer langsung ke kolom dapat menimbulkan kegagalan geser ponds (*punching shear failure*). Penelitian eksperimen telah banyak dilakukan untuk memprediksi perilaku hubungan pelat-kolom, namun penelitian eksperimen memerlukan fasilitas pengujian yang memadai, pengamatan dengan ketelitian yang tinggi saat tes berlangsung, dan biaya yang cukup mahal untuk memperoleh satu set data. Apabila pengujian eksperimen dilakukan untuk menstudi beberapa parameter, maka diperlukan biaya sangat besar. Pendekatan dengan simulasi analisis menjadi alternatif dalam melakukan penelitian. Salah satu simulasi numerik dengan software berbasis metode elemen hingga, Abaqus telah dilakukan oleh Genikomsou & Polak (2014; 2015), meninjau fenomena geser ponds (*punching shear*) pada hubungan pelat-kolom. Perilaku dari beton dimodelkan dengan metode *concrete damage plasticity* (CDP), dimana hasil analisis tersebut menunjukkan perilaku yang bersesuaian dengan perilaku hasil eksperimen. Metode CDP ini dapat memprediksi perilaku hubungan pelat-kolom yang ditinjau dari deformasi, kapasitas beban, dan pola retak (Tambusay et al. 2016; 2015). Dalam aplikasinya, parameter-parameter utama CDP perlu dilakukan justifikasi sesuai dengan karakteristik beton yang digunakan dan kondisi beban yang diaplikasikan dalam benda uji eksperimen.

Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi perilaku hubungan pelat-kolom tepi dengan pembebanan vertical dan momen tak seimbang menggunakan program Abaqus dengan fitur CDP dalam memodelkan perilaku beton. Adapun benda uji eksperimen yang dipakai perbandingan dalam analisis ini adalah salah satu benda uji dari penelitian El-Salakawy et al. (1998). Benda uji ini dengan kode slab XXX merupakan hubungan pelat-kolom tepi yang dibebani gaya vertikal dan momen tak seimbang pada arah tegak lurus tepi bebas dan rasio beban vertikal dengan momen (M/V) adalah 0,3. Adapun parameter-parameter CDP yang akan ditinjau untuk mendapatkan hasil yang bersesuaian dengan data eksperimen adalah sudut dilatasi (ψ), parameter viskositas (μ), definisi regangan tarik, dan penggunaan parameter keruntuhan (*damage parameter*) dalam mendefinisikan perilaku tekan dan tarik beton. Perbandingan hasil analisis pada Abaqus dengan hasil eksperimen ditinjau dari beban vertikal, deformasi vertikal, dan pola retak.

2 METODE CONCRETE DAMAGE PLASTICITY (CDP) DARI ABAQUS

Metode Concrete Damage Plasticity (CDP) digunakan dalam memodelkan perilaku plastis dari beton. Metode ini berkesinambungan, berbasis plastisitas, model keruntuhan, yang mengasumsikan mekanisme kegagalan utama dari beton yaitu retak akibat tarik dan tekan. Metode ini menggunakan mekanisme leleh dengan persamaan modifikasi oleh (Lee & Fenves 1998), dari persamaan oleh Lubliner sebagai berikut:

$$F = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\epsilon}^{pl})(\bar{\sigma}_{\max}) - \gamma(-\bar{\sigma}_{\max})) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl}) \quad (1)$$

dengan :

$$\alpha = \frac{\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right) - 1}{2\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right) - 1} \quad (2)$$

$$\beta(\tilde{\epsilon}^{pl}) = \frac{\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})}{\sigma_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})} (1-\alpha) - (1+\alpha) \quad (3)$$

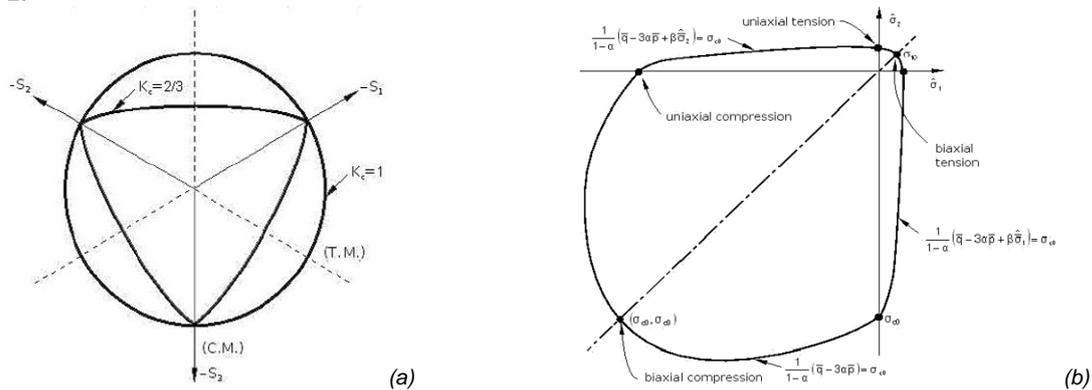
$$\gamma = \frac{3(1-K_1)}{2K_c - 1} \quad (4)$$

$\bar{\sigma}_{\max}$ adalah tegangan principal efektif maksimum, $\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})$ dan $\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})$ merupakan tegangan kohesi tekan dan tarik efektif. K_c merupakan ratio dari invariant tegangan kedua pada meridian tarik, $q_{(TM)}$, dan pada meridian tekan, $q_{(CM)}$, yang menggambarkan bentuk dari leleh permukaan pada bidang *deviatory* sesuai pada Gambar 1a. $K_c = 2/3$ sesuai persamaan Rankine dan $K_c = 1$ untuk kriteria Drucker-Prager, dimana K_c didefinisikan berdasarkan tes pada beton secara tiga arah berdasarkan nilai rasio tegangan dua arah dengan tegangan satu arah $\sigma_{b0}/\sigma_{c0} = 1,16$ (Gambar 1b). Nilai K_c diambil sebesar $2/3 = 0,667$, yang setara dengan kriteria kekuatan yang diformulasikan oleh William dan Warnke (kombinasi dari tiga tangen eliptikal) yang berdasarkan hasil test triaksial (Kmieciak & Kaminski, 2011).

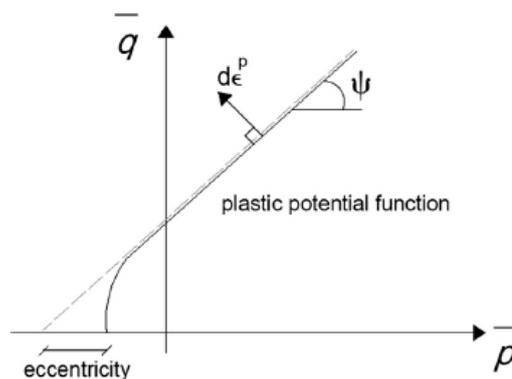
Metode CDP menggunakan fungsi potensial aliran, $G(\sigma)$, dengan Persamaan (5) yang tidak terkait dengan fungsi hiperbolik Drucker-Prager.

$$G(\sigma) = \sqrt{(\epsilon\sigma_{i0} \tan \psi)^2 + q^2} - \bar{p} \tan \psi \quad (5)$$

Pada Persamaan (5), ε adalah eksentrisitas, ψ adalah sudut dilatasi yang diukur pada bidang meridian, $p-q$, dan σ_{10} merupakan tegangan tarik satu arah. Skema eksentrisitas (ε) dan sudut dilatasi (ψ) dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Permukaan leleh pada bidang deviatoric (a) dan permukaan leleh pada bidang tegangan (b)
Sumber: Abaqus (2014)



Gambar 2. Skema eksentrisitas dan sudut dilatasi pada bidang meridian $p - q$
Sumber: Abaqus (2014)

Definisi tegangan tekan dan tarik beton pada metode CDP diperhitungkan setelah kondisi elastis beton. Data ini dinyatakan dalam bentuk tabel dari fungsi regangan inelastic (Gambar 3). Diagram tegangan-regangan pada tekan dan tarik digunakan dalam menentukan tegangan-regangan tarik retak ($\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$) dan tegangan-regangan tekan hancur ($\tilde{\varepsilon}_t^{in}$) yang dibebani uniaksial. Hubungan regangan retak dan hancur dengan regangan plastis ($\tilde{\varepsilon}^{pl}$) dapat dilihat pada Persamaan (6) dan (7).

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (6)$$

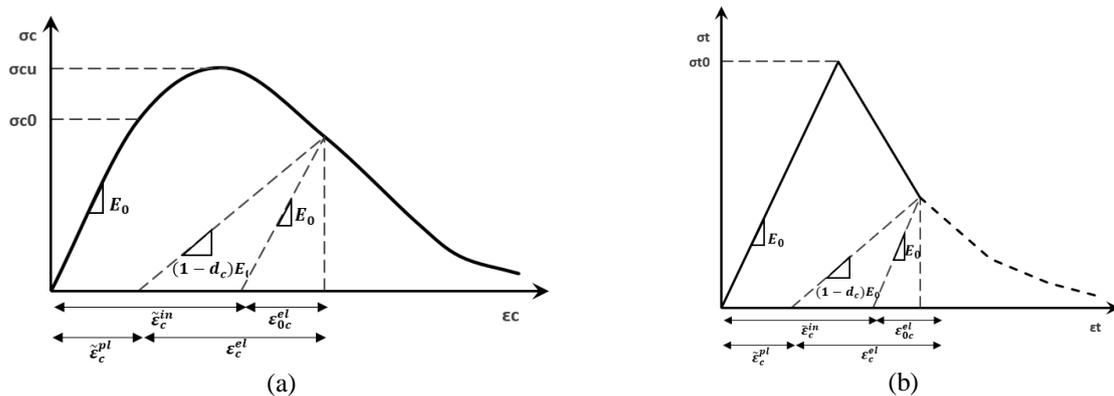
$$\tilde{\varepsilon}_t^{pl} = \tilde{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (7)$$

Keruntuhan (*damage*) pada *concrete damage plasticity* untuk tarik dan tekan dapat didefinisikan sebagai perbandingan kondisi beton antara *undamaged* dan *damage*, sehingga definisi keruntuhan beton (d_c atau d_t) pada Persamaan (6) dan (7) dapat dihitung dengan Persamaan (8) dan (9) (Tambusay et al. 2015).

$$d_c = 1 - \sigma_c / f_{cm} \quad (8)$$

$$d_t = 1 - \sigma_t / f_{ct} \quad (9)$$

d_c dan d_t merupakan parameter keruntuhan tekan dan tarik dengan rentang nilai $0 < d < 1$, yang berkaitan dengan tegangan dan regangan seperti pada ilustrasi Gambar 3.



Gambar 3. Definisi perilaku tekan (a) dan tarik beton (b)

Sumber: Abaqus (2014)

Ada 5 (lima) parameter utama yang perlu didefinisikan dalam CDP yaitu sudut dilatasi (ψ), eksentrisitas (ϵ_c), K_c , perbandingan kuat tekan beton dua arah dengan satu arah (σ_{b0}/σ_{c0}), dan parameter viskositas (μ). Beberapa peneliti sebelumnya (Jankowiak & Lodygowski 2005; Kmiecik & Kaminski 2011; Chaudhari & Chakrabarti, 2012; Genikomsou & Polak, 2014, 2015; Sümer & Aktaş, 2015 dan Tambusay et al., 2015; 2016) melakukan kajian terhadap nilai parameter CDP tersebut dan menunjukkan bahwa kelima nilai parameter tersebut memiliki nilai tertentu sesuai dengan karakteristik beton yang dipergunakan. Namun demikian dari hasil penelitian nilai parameter tersebut memiliki rentangan tertentu. Adapun rentang nilai parameter CDP yang memberikan hasil mendekati hasil eksperimen dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekomendasi nilai parameter *concrete damage plasticity*

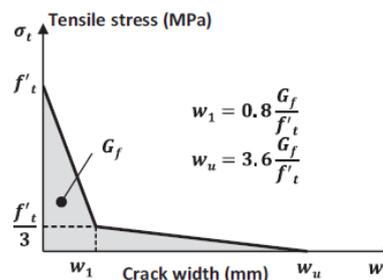
Sudut Dilatasi (ψ)	Eksentrisitas (ϵ)	K_c	$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	μ
25° s/d 40°	0.1	2/3	1.16	0.00001 s/d 0.001

Dalam mendefinisikan perilaku tarik beton, selain mengacu pada regangan tarik, fraktur energy (G_f) juga dapat digunakan sebagai alternatif. Parameter f'_t dan G_f adalah kuat tarik maksimum dan fraktur energi beton yang ditentukan dari luas dibawah kurva tegangan tarik-lebar retak (Gambar 4). Fraktur energi dapat ditentukan mengacu pada CEB-FIP Model Code 90, dengan persamaan sebagai berikut:

$$G_f = G_{f0} (f_{cm} / f_{cm0}) \quad (\text{N/mm}) \quad (10)$$

Parameter G_{f0} dan f_{cm0} merupakan fraktur energi berdasarkan ukuran agregat maksimum, d_{max} . f_{cm} adalah kuat tekan beton yang berhubungan dengan kuat karakteristik beton yang dihitung berdasarkan Persamaan (11).

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (\text{N/mm}) \quad (11)$$



Gambar 4. Kurva fraktur energi setelah tegangan puncak

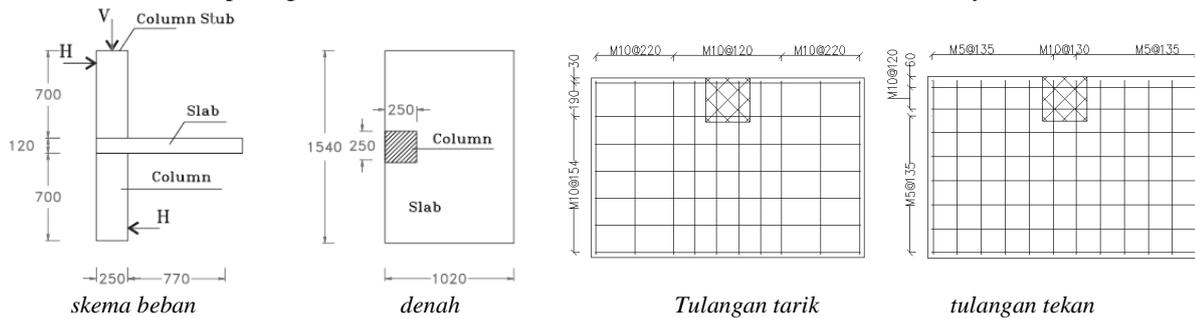
Sumber: Genikomsou & Polak (2014)

3 BENDA UJI

3.1 Geometri Benda Uji

Benda uji eksperimen slab kode XXX dari El-Salakawy et al. (1998) dipakai sebagai acuan dalam studi ini. Adapun dimensi benda uji tersebut seperti pada Gambar 5. Mutu material beton dan tulangan dapat dilihat pada

Tabel 2 dan Tabel 3. Perletakan dipasang pada ketiga tepi pelat kecuali tepi bebas, beban vertikal diaplikasikan berupa beban terpusat melalui penampang kolom yang tegak lurus bidang pelat, dan momen diperoleh dari pengerjaan beban lateral sejarak 600 mm dari permukaan pelat tegak lurus terhadap tepi bebas. Peningkatan beban secara bertahap dengan *initial incrementation* 0,01 dan ukuran *minimum increment* yaitu 1×10^{-25} .

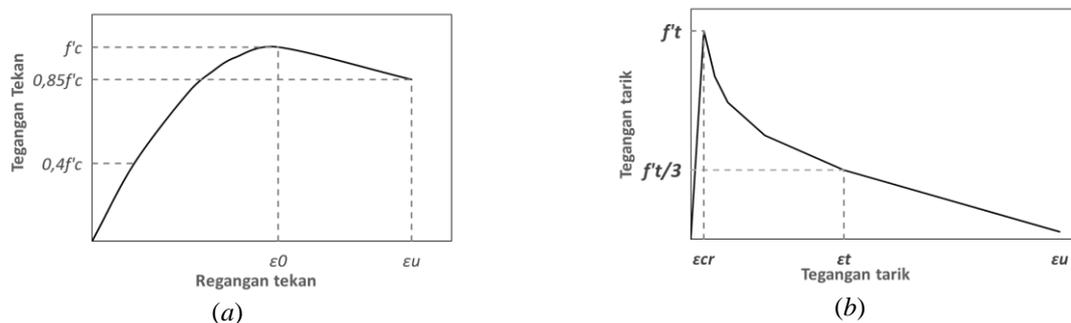


Gambar 5. Skema pembebanan, dimensi dan penulangan Slab XXX

Sumber: El-Salakawy et al. (1998)

3.2 Pemodelan Material

Beton dimodelkan sebagai elemen bertegangan tiga dimensi (*3D stress*) dengan delapan nodal heksahedral yang didefinisikan dalam program Abaqus sebagai C3D8R (*8-node linear brick, reduced integration with hourglass control*). Elemen ini digunakan untuk mereduksi integrasi yang sesuai dengan analisis nonlinier. Kemudian, tulangan dimodelkan sebagai elemen batang (*truss*) dengan dua nodal linier (*2-node linear 3-D truss*). Menurut Viswanathan et al. (2012), pemodelan tulangan menggunakan elemen satu dimensi menghasilkan nilai yang ekuivalen dengan model menggunakan elemen solid. Ikatan antara tulangan dengan beton menggunakan teknik *embedded* (*embedded region* pada Abaqus), dimana tulangan dan beton melekat sempurna. Pemodelan beton dan tulangan dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**, dan mutu material yang digunakan terlihat pada Tabel 2 dan Tabel 3. Hubungan tegangan-regangan beton ($f'_c - \epsilon$) mengikuti kurva Hognastaad (1951) untuk beton normal (Gambar 6a) dengan *ascending branch* mengikuti Persamaan (12) dan *descending branch* mengikuti persamaan (13). Kurva tegangan-regangan tersebut dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu bagian kurva linier-elastis dengan modulus elastisitas, $E_0 = 4700\sqrt{f'_c}$, dimana kondisi linier ini berakhir pada saat tegangan $\sigma_{\epsilon_0} = 0.4f'_c$ tercapai, bagian puncak yaitu tegangan maksimum yang dicapai saat regangan, $\epsilon_0 = 2f'_c / E_0$, dan bagian setelah puncak yaitu tegangan pada saat regangan maksimum ϵ_u .



Gambar 6. Kurva hubungan tegangan-regangan tekan beton menurut Hognastaad (a) dan Hubungan tegangan-regangan tarik beton (b)

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \rightarrow 0 < \epsilon_c \leq \epsilon_0 \quad (12)$$

$$f_c = f'_c [1 - 100(\epsilon_c - \epsilon_0)] \rightarrow \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_u \quad (13)$$

Perilaku tarik beton mengacu pada kurva hubungan tegangan-regangan tarik beton seperti pada Gambar 6b dengan mengikuti Persamaan (14), (15), dan (16).

$$f'_t = 0,3(f'_c)^{2/3} \quad (14)$$

$$f_t = E_c \epsilon_t \text{ jika } \epsilon_t \leq \epsilon_{cr} \quad (15)$$

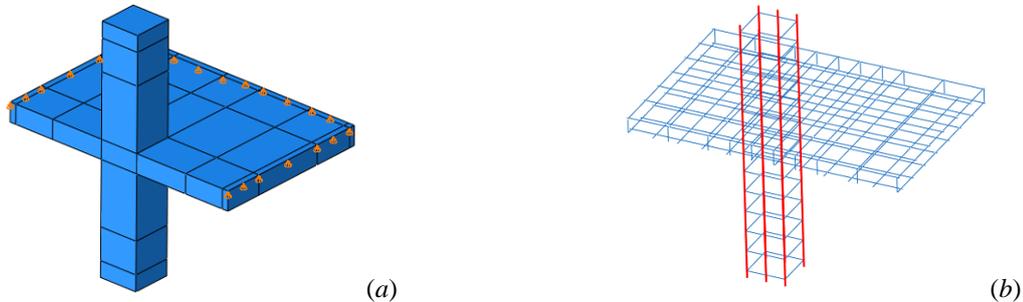
$$f_t = f'_t \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_t} \right) \text{ jika } \epsilon_t > \epsilon_{cr} \quad (16)$$

Tabel 2. Mutu beton

Benda Uji	Mutu beton (Mpa)			Regangan puncak (mm/mm)	
	σ_c	σ_t	E_c	ϵ_c	ϵ_t
Slab XXX	33	1,89	26999	0,0023	0,00007

Tabel 3. Mutu baja tulangan

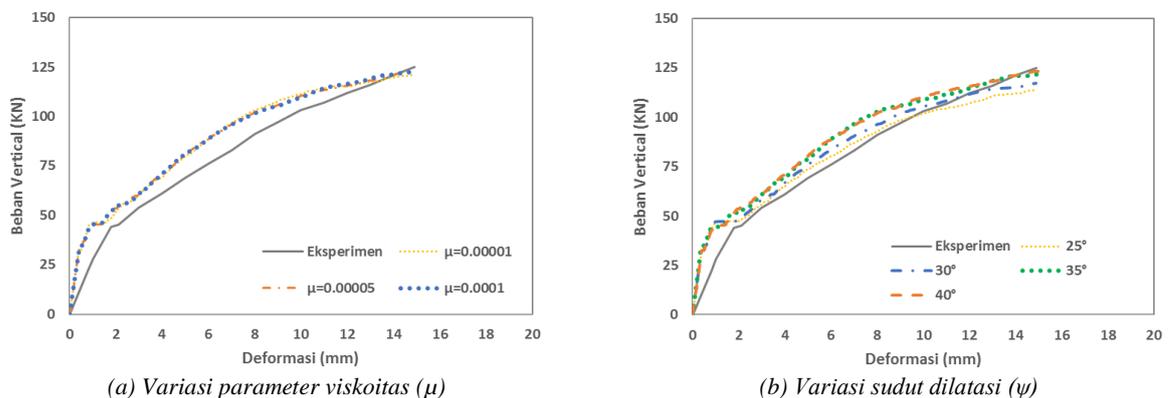
Benda Uji	Mutu tulangan (MPa)			Regangan (mm/mm)	
	f_y	f_u	E_s	ϵ_y	ϵ_u
Slab XXX	430	600	195454	0,0022	0,15



Gambar 7. Pemodelan beton dengan elemen solid (a) dan baja tulangan dengan elemen batang (b)

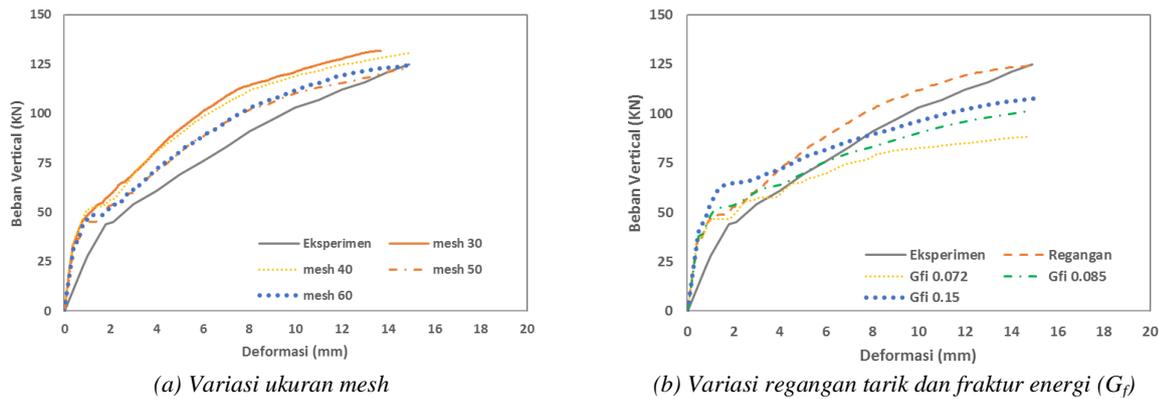
4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Perilaku yang ditinjau adalah hubungan antara beban vertical dan deformasi, yang mana beban ultimate masing-masing model diukur pada deformasi yang sama dengan hasil eksperimen pada ujung kolom dimana beban vertical dikerjakan. Kalibrasi parameter *concrete damage plasticity* (CDP) dimulai dari meninjau variasi parameter viskositas (μ) dan sudut dilatasi (ψ). Variasi parameter viskositas diambil sebesar 0,00001; 0,00005, dan 0,0001, sedangkan variasi sudut dilatasi (ψ) yaitu 25°, 30°, 35°, dan 40°. Nilai parameter lainnya diambil berdasarkan rekomendasi penelitian sebelumnya seperti pada Tabel 1. Ukuran *mesh* digunakan sebesar 60 mm merata pada semua elemen. Nilai parameter viskositas, $\mu = 0,00005$, dan sudut dilatasi $\psi = 40^\circ$, menunjukkan perilaku beban vertical-deformasi pada hubungan pelat-kolom yang lebih mendekati hasil eksperimen seperti terlihat pada Gambar 8. Peningkatan nilai parameter viskositas (μ) tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, namun peningkatan nilai sudut dilatasi (ψ) menunjukkan kurva beban-deformasi semakin curam.



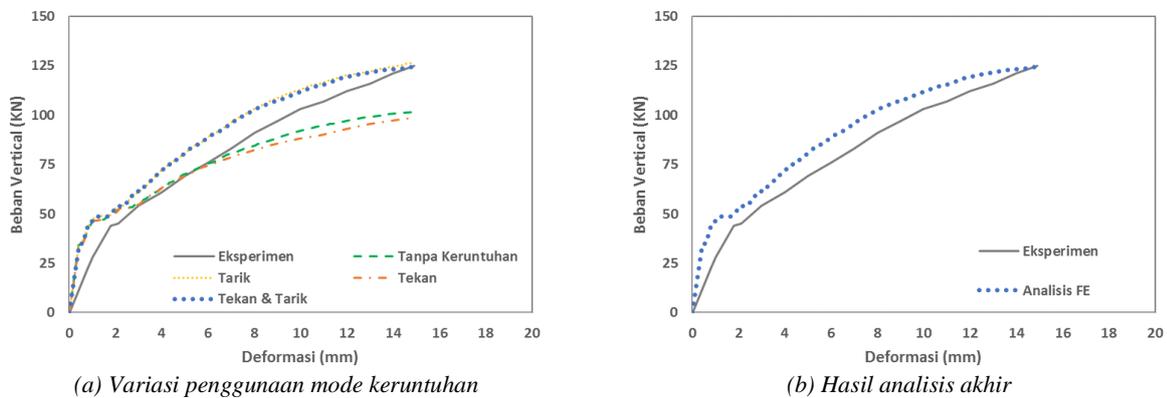
Gambar 8. Hubungan beban vertical-deformasi akibat variasi parameter viskositas (μ) dan sudut dilatasi (ψ)

Dalam analisis elemen hingga, ukuran mesh sangat sensitive dalam menentukan proses dan hasil analisis. Ukuran mesh pada analisis ini divariasikan empat ukuran yaitu 30 mm, 40 mm, 50 mm, dan 60 mm merata pada semua bagian pelat, kolom, dan tulangan. Ukuran mesh tidak disarankan diambil lebih kecil dari ukuran agregat maksimum yang digunakan (Genikomsou & Polak 2014). Hubungan beban-deformasi pada Gambar 9a menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran mesh mengakibatkan kurva hubungan beban-deformasi semakin curam. Variasi ukuran mesh 50 mm dan 60 mm memberi hasil yang berhimpit dan lebih dekat dengan hasil eksperimen. Selain itu, ukuran mesh yang semakin kecil mengakibatkan jumlah elemen yang lebih banyak dan berpengaruh terhadap waktu *running* analisis yang semakin lama.



Gambar 9. Hubungan beban vertikal-deformasi akibat variasi ukuran *mesh* dan fraktur energi (G_f)

Pendefinisian perilaku tarik beton dalam CDP dapat dilakukan dengan menggunakan regangan tarik atau fraktur energi (G_f). Perhitungan fraktur energi berdasarkan pada Persamaan (10) untuk beton dengan kuat tekan 33 MPa dan kuat tarik 3,4 MPa diperoleh nilai $G_f = 0,072$ N/mm. Adapun ukuran agregat maksimum adalah 10mm. Variasi nilai fraktur energi (G_f) lainnya diambil sebesar 0,085 N/mm dan 0,15 N/mm. Hasil analisis pada Gambar 9b menunjukkan bahwa penggunaan regangan tarik dalam mendefinisikan perilaku tarik lebih sesuai dengan hasil eksperimen dibandingkan dengan fraktur energi. Penggunaan fraktur energi (G_f) menunjukkan bahwa beban vertikal hasil analisis dibawah dari hasil eksperimen pada kondisi ultimit.



Gambar 10. Hubungan beban vertikal-deformasi akibat variasi mode keruntuhan dan hasil analisis akhir

Perilaku keruntuhan beton dengan penggunaan mode keruntuhan tentu berpengaruh sangat signifikan, baik keruntuhan tekan, keruntuhan tarik, maupun keduanya dan dibandingkan dengan tanpa menggunakan kedua mode keruntuhan. Mode keruntuhan pada CDP didefinisikan pada perilaku tekan dan tarik pada *suboption damage*. Gambar 10a menunjukkan bahwa tanpa menggunakan mode keruntuhan dan hanya memperhitungkan mode keruntuhan tekan, beban-deformasi hasil analisis pada kondisi deformasi ultimit berada dibawah hasil eksperimen, hasil terbaik ditunjukkan dengan mendefinisikan keruntuhan beton berdasarkan keruntuhan tekan dan tarik.

Hasil akhir analisis dan nilai parameter dapat ditampilkan pada Tabel 4 dan kurva hubungan beban-deformasi akhir ditampilkan pada Gambar 10b. Perbandingan hasil eksperimen dengan analisis elemen hingga disajikan pada Tabel 5, dengan rasio selisih hasil analisis elemen hingga terhadap hasil eksperimen. Trend perilaku hubungan beban-deformasi pada setiap variasi parameter CDP menunjukkan perilaku yang sesuai hasil eksperimen. Hal ini menunjukkan metode CDP sangat baik digunakan untuk mendefinisikan perilaku beton pasca elastis.

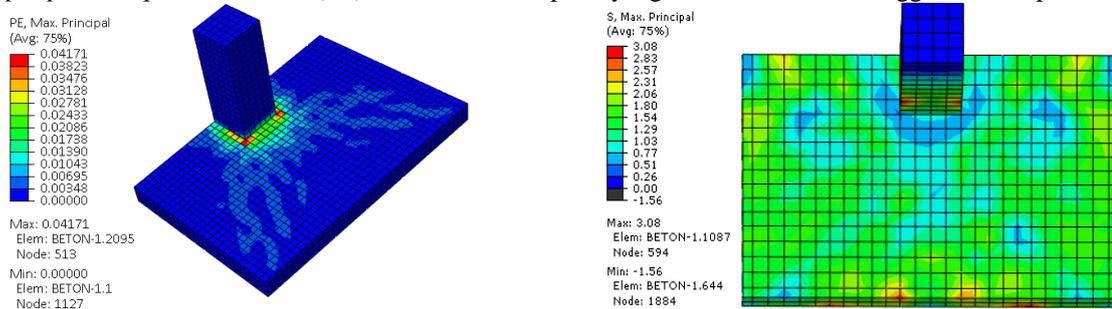
Tabel 4. Rekapitulasi nilai parameter terbaik

Parameter Viskositas (μ)	Ukuran Mesh	Sudut Dilatasi (ψ)	Mode Keruntuhan	Perilaku Tarik
0,00005	60	40°	Tekan dan Tarik	Regangan Tarik

Tabel 5. Perbandingan hasil eksperimen dengan hasil analisis *finite element*

Benda Uji	Gaya Vertikal (V)	Momen (KNm)	Deformasi (mm)	M/V
Eksperimen (test)	125,0	37,5	14,9	0,3
Analisis (FE)	125,25	37,58	14,9	0,3
Selisih (%)	-0,20%	-0,20%	-	-

Pola regangan dan tegangan yang ditampilkan merupakan *maximum principal plastic equivalent strain* (PE) dan *maximum tensile principal stress* (*S*) seperti pada Gambar 11, yang menunjukkan pola retak pada pelat. Regangan terjadi pertama pada pelat di dekat kolom pada arah diagonal, kemudian berkembang secara radial seiring peningkatan beban. Regangan maksimum pada kondisi ultimit terpusat di sekitar kolom yang menunjukkan hubungan pelat-kolom mengalami kegagalan geser pons. Kontur tegangan pada pelat disekitar kolom rendah yang menunjukkan beton tidak hancur di dekat kolom dan hancur di luar bidang kritis. *Maximum principal plastic equivalent strain* (PE) memberikan tampilan yang lebih baik untuk menggambarkan pola retak.



Gambar 11. Regangan dan tegangan pada *maximum principal*

5 KESIMPULAN

Analisis elemen hingga dengan program Abaqus menggunakan metode *concrete damage plasticity* (CDP), menunjukkan perilaku hubungan pelat-kolom tepi yang sesuai dengan hasil eksperimen setelah mengkalibrasi parameter-parameter utama CDP tersebut. Untuk kondisi benda uji slab XXX, diperoleh nilai parameter viskositas, $\mu = 0,00005$, sudut dilatasi $\psi = 40^\circ$, penggunaan regangan tarik pada perilaku tarik, dan penggunaan parameter keruntuhan (*damage parameter*) tekan dan tarik pada perilaku beton serta ukuran mesh 60 mm menghasilkan perilaku yang mendekati hasil eksperimen.

UCAPA TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu terselesaikannya karya ilmiah ini. Penelitian ini dibiayai dari dana DIPA BLU Universitas Udayana TA 2016 kontrak Nomor:082.2/UN.14.4TU/TS/2016.

DAFTAR PUSTAKA

- Abaqus, 2014. Abaqus Analysis User's Guide. In *Abaqus 6.14 Online Documentation*. USA: Dassault Systèmes Simulia.
- Chaudhari, S. V. & 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.
- El-Salakawy, E.F., Polak, M.A. & Soliman, M.H., 1998. Slab-column edge connections subjected to high moments. *Can. J. Civ. Eng.*, 25(1961), pp.526–538.
- Genikomsou, A. & Polak, M., 2014. Finite Element Analysis of a Reinforced Concrete Slab-Column Connection using ABAQUS. *Structures Congress 2014*, pp.813–823. Available at: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784413357.072>.
- Genikomsou, A.S. & 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.
- Jankowiak, T. & Lodygowski, T., 2005. Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model. *Foundation of Civil and Environmental Engineering*, (6).
- Kmiecik, P. & Kaminski, M., 2011. Modelling of Reinforced Concrete Structures and Composite Structures with Concrete Strength Degradation taken into Consideration. *Civil and Mechanical Engineering*, XI(3).
- Lee, J. & Fenves, G.L., 1998. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), pp.892–900.
- Sümer, Y. & Aktaş, M., 2015. Defining Parameters for Concrete Damage Plasticity Model. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 1(3), pp.149–155.
- Tambusay, A. et al., 2016. Analyses Behavior of Slab-Column Connections Using ECC Material Based. *EASEC*, 14.
- Tambusay, A. et al., 2015. Studi Numerik Perilaku Hubungan Pelat-Kolom Pada Struktur Flat Slab

- Menggunakan Beton Mutu Tinggi. *Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil (KNPTS)*, (November), pp.10–18.
- Viswanathan, T.S., Mohan, G.G. & Santhi, A.S., 2012. Shear stress distribution of flat-plate using Finite Element Analysis. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2(3).