

Kajian Eksperimental dan Numerikal Kekuatan dan Daktilitas Mortar-filled *Hollow Column* akibat Beban Aksial Konsentris

Sandy I. Yansiku*, Yohanes G.G.L Duran, Anjeli Dos Santos
Program Studi Teknik Sipil, FT Universitas Nusa Nipa, Maumere, NTT

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

kolom berongga; mortar pengisi; daktilitas; FEM; aksial konsentris.

***Correspondence email:**

sandy.yansiku@nusanipa.ac.id

Submitted: 31 Oktober 2025

Revised: 09 November 2025

Accepted: 21 Januari 2026

Published: 04 Februari 2026

ABSTRAK

Kapasitas aksial kolom beton berongga diketahui menurun secara signifikan apabila dinding kolom memiliki ketebalan yang tidak memadai, sehingga memicu keruntuhan pada dinding luar akibat tekuk lokal. Fenomena ini menjadikan kolom berongga berperilaku layaknya cangkang tipis yang rentan terhadap kehilangan kestabilan, sebagaimana ditunjukkan pada beberapa kasus kegagalan struktur, seperti tiang pancang berongga pada jembatan layang dan tiang listrik pratekan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas pengisian mortar sebagai perkuatan internal pada segmen berongga guna meningkatkan kapasitas aksial dan daktilitas kolom beton berongga tanpa menambah massa struktur secara signifikan. Metodologi penelitian meliputi pengujian eksperimental terhadap sebelas spesimen beton silinder berongga dengan variasi ketebalan dinding dan jenis mortar pengisi, serta analisis numerik berbasis metode elemen hingga untuk memperoleh model material yang terkalibrasi dengan hasil uji laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengisian mortar pada segmen berongga meningkatkan kuat desak aksial dan perilaku lateral kolom hingga 5,6%, dengan peningkatan yang berbanding lurus terhadap kuat tekan mortar yang digunakan. Model numerik yang dikembangkan mampu merepresentasikan perilaku beton berongga mutu 30 MPa dan 50 MPa dengan tingkat kesesuaian yang baik. Dapat disimpulkan bahwa pengisian mortar pada kolom beton berongga merupakan metode perkuatan internal yang efektif dalam meningkatkan kekuatan, daktilitas, serta menunda terjadinya kegagalan mendadak.

ABSTRACT

Keywords:

hollow column; filler mortar; ductility; FEM; axial concentric.

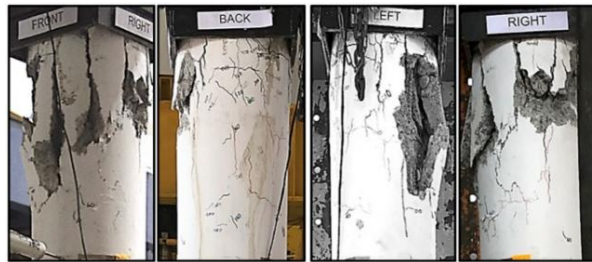
The axial load-carrying capacity of hollow concrete columns significantly decreases when the wall thickness is inadequate, leading to premature crushing or instability of the outer shell. The internal void causes the column wall to behave as a thin shell structure, rendering it susceptible to local buckling and stiffness degradation. Several structural failures, particularly in hollow pile foundations and prestressed concrete poles, have been attributed to this reduction in load-bearing capacity. This study aims to evaluate the effectiveness of mortar infill as an internal strengthening technique to enhance the strength and ductility of hollow concrete columns while maintaining a reduced self-weight. The research employs both experimental and numerical approaches. The experimental program involves axial compression tests on eleven hollow cylindrical specimens with varying wall thicknesses and mortar infill configurations. Complementary finite element analyses are conducted to calibrate a material constitutive model consistent with the experimental behavior, followed by the development of a numerical interaction diagram tailored for hollow column systems. The results demonstrate that mortar infill substantially improves the axial compressive strength, with the extent of enhancement being proportional to the mortar's compressive strength. Furthermore, the infill induces a more uniform stress distribution and triaxial confinement effect, leading to an improvement of up to 5.6% in lateral performance. Overall, mortar infill is shown to be an effective internal strengthening method that enhances structural stability and delays sudden failure in hollow concrete columns.

PENDAHULUAN

Kegagalan kolom beton berongga terjadi akibat beban ekstrim seperti gempa bumi yang diawali dengan terkelupasnya selimut beton pondasi tiang pancang (Belarbi et al., 2017), diikuti oleh kegagalan lentur atau geser. Penyebab minor lainnya adalah ketidakstabilan tekuk dan kurangnya daya dukung tiang pancang (Dewangga, 2024)(You et al., 2017). Runtuhnya gedung perumahan bertingkat tinggi dan jembatan-jembatan akibat kegagalan tiang pancang adalah bukti kuat bahwa aspek penting dalam perencanaan kolom berongga terhadap beban aksial, lateral, kelengkungan dan daktilitas perlu ditingkatkan. Pada skala kecil, kolom pracetak tiang listrik PLN di banyak daerah di

Indonesia mudah mengalami retak, patah dan roboh akibat angin (Arwin & Eshaya, 2023; Mulyono, 2024; Nur, 2024; Sam, 2023; Sumut24, 2022).

Pengaruh tiga kondisi pembebanan yang berbeda diselidiki untuk lebih memahami perilaku kolom silinder beton bertulang berongga tanpa perkuatan. Untuk semua kolom yang diuji, kegagalan dominan terletak pada tepi atas kolom. Perbandingan sebelum dan sesudah pengujian spesimen untuk setiap beban yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 1. Semua spesimen untuk kolom tanpa perkuatan mengalami kegagalan karena hancurnya beton/*concrete crushing*. Umumnya, kolom tanpa pengekanan mengalami kegagalan dengan terkelupasnya selimut beton/*cover spalling*. Hal ini biasanya akan diikuti oleh tekuk ke arah luar tulangan longitudinal yang menyebabkan beton semakin retak parah (Ismail et al., 2019).



Gambar 1. Kegagalan dan retak beton berongga
Sumber: Ismail et al., 2019

Beton sangat rentan terhadap tegangan tarik dibandingkan dengan baja sehingga beton mudah retak. Beton juga memiliki berat yang relatif tinggi. Penelitian untuk mengurangi berat beton merekomendasikan material pengganti (Aprilia et al., 2025; Sugiri, 2005; Yansiku, 2016, 2018a, 2018b) dan segmen rongga pada kolom beton bertulang (Ahmad et al., 2021; AlAjarmeh et al., 2020; Liang et al., 2021). Selain itu segmen berrongga dapat meningkatkan daktilitas (Mander et al., 1983) dan mereduksi zona kerusakan beton pada sisi dalam rongga (J.-H. Lee et al., 2015). Namun, struktur beton berongga berpotensi mengalami vertical cracking apabila perencanaan tidak dilakukan dengan cermat (Liang et al., 2021; Nuryanti et al., 2018). Adanya rongga kolom dapat menurunkan daya dukung aksial desak (Ayash et al., 2021). Struktur bangunan yang sudah ada memerlukan perkuatan struktural untuk memperpanjang layanannya atau menyalurkan kapasitas daya dukung yang lebih tinggi untuk beban eksternal yang lebih besar. Keberadaan rongga mengubah pola distribusi tegangan, mempengaruhi kapasitas beban aksial, serta mengurangi efektivitas performa lateral yang memberi kontribusi pada daktilitas kolom beton. Perbandingan antara silinder padat dan silinder berongga pada beton menunjukkan penurunan kapasitas tekan namun potensi peningkatan rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight*) untuk elemen berongga dengan desain yang tepat. Oleh karena itu, uji tekan aksial eksperimental pada silinder berongga penting untuk memetakan kurva tegangan-regangan, puncak kuat tekan, dan perilaku pasca puncak (*descending branch*) yang terkait langsung dengan daktilitas. Penelitian ini melakukan kajian eksperimental dan numerikal kolom beton berongga yang diisi dengan mortar pengisi sebagai perkuatan pasif internal dengan variasi mutu beton untuk meningkatkan kemampuan dukung kolom beton berongga. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh elemen perkuatan pasif internal kolom beton berongga dengan mortar pengisi. Untuk memperoleh trend yang memadai, ketebalan dinding silinder beton dan variasi mutu beton dilakukan antara 30 MPa dan 50 MPa. Hasil pengujian dan hasil simulasi FEM berupa data beban versus perpindahan dijadikan referensi untuk menentukan kekuatan dan daktilitas kolom akibat perkuatan internal dan untuk menjabarkan rumus untuk menentukan kekuatan ultimit.

METODE

Kegiatan Eksperimen

Program aksperimental terdiri dari dua kategori yaitu eksperimen kuat tekan mortar dan eksperimen kuat tekan beton silinder dengan perkuatan mortar pengisi. Karakteristik material dan persiapan eksperimen secara terperinci dijelaskan sebagai berikut. Mortar digunakan sebagai pengisi/filler pada spesimen beton berongga. Mortar yang digunakan dalam penelitian ini berupa campuran semen, agregat halus dan air dengan perbandingan campuran 1 : 2,89 : 0,5 dengan $w/c = 0,5$. Spesimen mortar dibuat dengan ukuran yang sama seperti silinder beton yaitu tinggi 200 mm dan diameter 110 mm dengan cetakan dari pipa PVC 4". Spesimen mortar akan diukur kekuatannya pada umur 28 hari.

Spesimen beton silinder terdiri dari dua tipe yaitu berongga dan tidak berongga. Tipe berongga diberi perkuatan internal dengan mortar pengisi dan akan diuji kekuatannya pada umur 28 hari. Semen yang digunakan umumnya adalah semen Portland tipe I (Ordinary Portland Cement/OPC) sesuai dengan SNI 2049:2015. Pemilihan semen tipe I didasarkan pada ketersediaannya di pasaran dan sifatnya yang serbaguna untuk penelitian struktural. Agregat halus

berfungsi mengisi rongga di antara agregat kasar serta berperan dalam meningkatkan kepadatan beton. Pasir yang digunakan harus memenuhi syarat SNI 03-2461-2002 untuk menjamin kualitas beton. Penelitian ini juga menguji gradasi pasir melalui analisis saringan/sieve analysis. Analisis saringan menggunakan koefisien keseragaman dan koefisien gradasi untuk menentukan gradasi agregat halus dalam campuran sesuai persamaan.

Agregat kasar berperan sebagai tulang beton yang menahan gaya tekan dan meningkatkan kekakuan beton. Umumnya digunakan batu pecah dengan ukuran maksimum 20 mm, sesuai standar pembuatan beton silinder uji. Agregat harus keras, tidak berpori berlebihan, dan bebas dari lumpur atau bahan lempung. Kerikil yang digunakan dalam penelitian ini yaitu kerikil cor split 2/3. Dalam penelitian ini, ditambahkan admixture seperti superplasticizer untuk meningkatkan workability tanpa menambah kadar air. Dalam penelitian ini digunakan zat additif SikaCim untuk mempermudah pekerjaan campuran pada beton mutu tinggi 50 MPa. Campuran adukan beton untuk spesimen mortar pengisi, spesimen beton silinder 30 MPa dan 50 MPa direncanakan berdasarkan (BSN, 2000). Mortar pengisi merupakan campuran dari semen, pasir dan air yang akan ditempatkan di dalam rongga spesimen beton silinder berongga. Campuran adukan beton dibagi dalam tiga batch sesuai kuat desak rencana.

Pipa PVC 4", 1" dan ¾" bermerk Breston digunakan sebagai cetakan silinder beton dan pipa internal untuk membentuk rongga pada spesimen beton. Pipa dipotong sesuai tinggi spesimen beton silinder (tinggi 200 mm dan diameter Ø110 mm). Pemotongan pvc sesuai tinggi spesimen beton harus benar-benar rata dan tegak lurus agar permukaan spesimen beton yang dicor juga rata untuk menghindari penurunan kekuatan aksial akibat kemiringan permukaan kontak dengan pelat beban. Untuk membuat rongga pada spesimen, digunakan dua tipe rongga dengan pipa pvc berukuran 1,5 inci dan ¾ inci. Pipa internal ditempatkan sedemikian sehingga terletak persis di tengah-tengah pusat lingkaran pipa 4 inci. Untuk memastikannya, pada dasar cetakan digunakan potongan tripleks berukuran 150 mm x 150 mm. Cetakan pvc 4 inci ditempelkan pada tripleks dan digambar lingkaran keliling pipa kemudian ditentukan titik pusat sebagai acuan penempatan pipa internal. Pipa internal yang telah dipotong sesuai ukuran kemudian ditempelkan dengan lem bakar tepat di tengah-tengah berhimpit dengan titik pusat lingkaran. Setelah itu diikuti dengan pipa PVC 4 inci mengacu pada lingkaran yang telah digambar sebelumnya. Perlu dipastikan agar tidak terjadi kebocoran yang dapat menyebabkan terjadinya rembesan air semen keluar dari cetakan.

Spesimen beton silinder berjumlah 33 spesimen mencakup 3 spesimen tiap model beton pada Tabel 1. Dalam tabel tersebut, D_o = diameter luar silinder, D_i = diameter rongga, H = tinggi spesimen, t_w = tebal dinding spesimen berongga dan menggunakan nomenklatur/penamaan spesimen sebagai berikut: M = mortar, R = spesimen referensi (solid, tidak berongga), H = hollow/berongga, W1 = wall1, tebal dinding 39 mm, W2 = wall2, tebal dinding 34 mm, i = *infill* (mortar pengisi).

Tabel 1. Matriks spesimen beton silinder

No.	Notasi	Jumlah spesimen	f'_c MPa	D_o mm	H mm	D_i	t_w mm
1	M10	3	5	110	200	-	-
2	R30	3	30	110	200	-	-
3	R50	3	50	110	200	-	-
4	H30W1	3	30	110	200	32	39
5	H50W1	3	50	110	200	32	39
6	H30W1i	3	20	110	200	32	39
7	H50W1i	3	40	110	200	32	39
8	H30W2	3	30	110	200	42	34
9	H50W2	3	50	110	200	42	34
10	H30W2i	3	20	110	200	42	34
11	H50W2i	3	40	110	200	42	34

Pengujian kuat desak beton dalam penelitian ini menggunakan mesin uji desak sederhana/manual berkapasitas 2000 kN. Setelah spesimen diletakan pada mesin uji, pembebanan diterapkan dengan kecepatan 0,2 mm/detik hingga spesimen beton mengalami kegagalan. Selama pembebanan, diamati pola retak dan keruntuhan spesimen dan akan diobservasi secara lebih teliti berdasarkan hasil rekaman video saat pengujian berlangsung. Untuk mengukur perpindahan aksial, pada pelat beban mesin uji ditempelkan sebuah caliper digital dan sebuah stopwatch yang berdekatan. Rekaman video dikondisikan sedemikian sehingga dapat menangkap tampilan spesimen, manometer beban, caliper, stopwatch dan sensor digital

Analisis Elemen Hingga

Analisis elemen hingga/finite element analysis (FEA) bertujuan untuk mengetahui perilaku spesimen beton akibat pembebanan aksial, memprediksi respon fisik berupa tegangan, regangan dan gaya, membantu proses optimasi desain,

mengevaluasi kegagalan. FEA memungkinkan adanya fleksibilitas variasi parameter, dapat diperoleh visualisasi hasil yang detail dan adanya efisiensi waktu dan biaya. Dalam penelitian ini dilakukan simulasi FEA untuk seluruh spesimen berongga dan membandingkannya dengan hasil eksperimen.

Spesimen silinder beton dimodelkan dengan aplikasi yang terintegrasi dalam program simulasi. Beton solid dan berongga dengan perkuatan internal berupa mortar pengisi dimodelkan dan didiskritisasi dan hasilnya ditunjukkan dalam Gambar 2. Diskritisasi/meshing dilakukan dengan ukuran elemen meshing 5% dari diameter silinder yaitu 5 mm. Ukuran mesh ini adalah ukuran global element mesh untuk seluruh model spesimen dengan tipe elemen tetrahedron. Jumlah elemen dan node setiap tipe model spesimen dapat dilihat pada gambar meshing berikut.



Gambar 2. Diskritisasi elemen beton

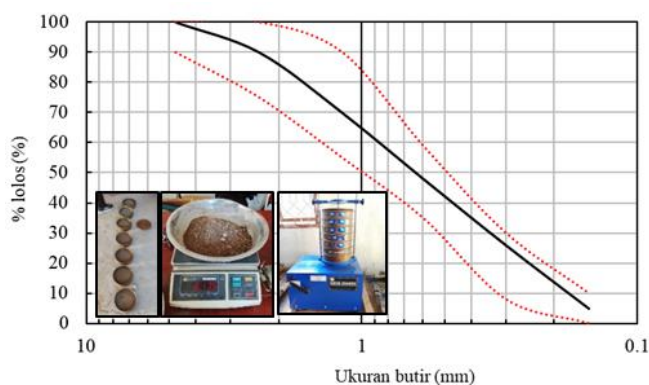
Berat unit beton (γ_c) 24 kN/m³, modulus elastisitas beton (E_c) sesuai standard ACI 318-2019 (ACI, 2019). Model material beton yang digunakan dalam penelitian ini mengikuti model plastisitas kerusakan beton/*concrete damage plasticity* (J. Lee & G. L. Fenves, 1998; Lubliner et al., 1989). Untuk menggunakan Model Plastisitas Kerusakan Beton (CDP), beberapa parameter wajibnya adalah *dilatation angle*, $\psi = 35^\circ$ untuk beton normal dan $\psi = 25^\circ$ untuk beton mutu tinggi; *eccentricity*, $\epsilon = 0,1$; rasio tegangan leleh tekan biaksial terhadap tegangan leleh tekan uniaksial, $f_{bol}/f_{c0} = 1,16$; rasio tegangan invarian kedua pada meridian tarik terhadap tegangan invarian kedua pada meridian tekan, $K = 2/3$; viskositas = 1E-5. Antarmuka antara beton berongga dan beton pengisi diterapkan kontak tangensial dengan formulasi gesekan penalty dengan daya lekat/koheesi C yang kecil, koefisien gesek $\mu = 0,2$.

Semua model spesimen mengalami kompresi aksial konsentris dengan kontrol perpindahan vertikal ke bawah pada penampang atas model spesimen beton silinder sebesar 0,01 mm per step. Jadi, untuk kontrol perpindahan sejauh 10 mm dibutuhkan 1000 step dalam satu simulasi. Diasumsikan bahwa spesimen silinder beton telah mencapai beban puncaknya dalam rentang kontrol perpindahan yang diberikan.

HASIL

Eksperimen

Analisis saringan/sieve analysis dilakukan untuk mengetahui gradasi agregat halus sebagai salah satu material dalam campuran adukan beton. Hasil analisis saringan menunjukkan bahwa pasir yang digunakan masuk dalam kategori agregat sedang dengan batasan sesuai standar SNI 2834-2000 dalam Gambar 3. Berat basah ditimbang sesuai casting dan berat kering spesimen ditimbang setelah beton berumur 28 hari. Berat basah dan kering spesimen beton disajikan dalam Tabel 2 untuk dapat menghitung berat jenis seluruh spesimen beton. Berat jenis dan kuat tekan beton akan digunakan untuk menentukan modulus elastisitas beton berdasarkan ACI-318 2019.



Gambar 3. Gradasi pasir

Sumber: Kajian eksperimental (2025)

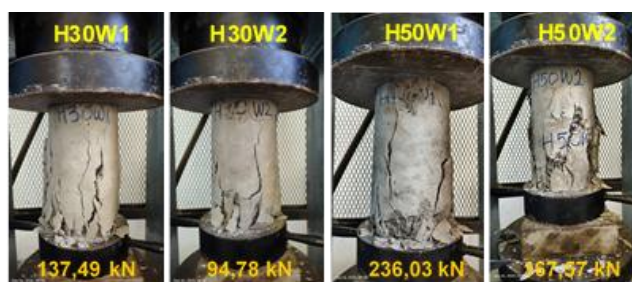
Tabel 2. Berat basah, berat kering dan density spesimen beton

No.	Notasi	f'_c	D_i	Berat basah	Berat kering	Density
		MPa	mm	gr	gr	kg/m ³
1	M10	10		3739	3789	1994,5
2	R30	30		4438	4382	2306,7
3	R50	50		4531	4480	2358,3
4	H30W1	30	32	4034	4002	2106,6
5	H50W1	50	32	4195	4115	2166,1
6	H30W1i	20	32	4066	4410	2321,4
7	H50W1i	40	32	4164	4512	2375,1
8	H30W2	30	42	3853	3779	1989,3
9	H50W2	50	42	3897	3848	2025,6
10	H30W2i	20	42	3842	4432	2333,0
11	H50W2i	40	42	3802	4546	2393,0

Sumber: Analisis spesimen (2025)

Beban-perpindahan Spesimen Berongga

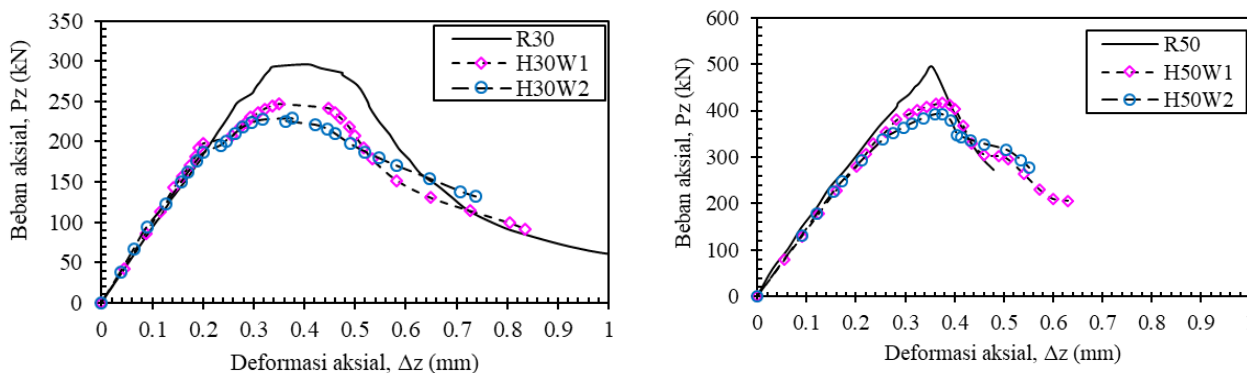
Gambar 4 menunjukkan pola kegagalan spesimen berongga 30 MPa (H30W1, H30W2 dan H50W1, H50W2) akibat beban aksial konsentris. Gambar 5 menunjukkan grafik beban aksial P_z versus perpindahan aksial Δ_z spesimen berongga dengan 2 tipe mutu beton yaitu R30 dan R50. Spesimen R30 dan R50 masing-masing mengalami kegagalan pada beban aksial sebesar 276,06 kN dan 455,33 kN. Deformasi aksial pada saat beban puncak/*peak load* untuk R30 dan R50 adalah 0,4057 mm dan 0,3560 mm. Dengan persamaan konvensional tegangan aksial $\sigma_z = P_z/A$ maka diperoleh kuat tekan spesimen referensi R30 sebesar 31,24 MPa dan R50 sebesar 51,96 MPa. Demikian pula dengan rumus konvensional regangan $\epsilon_z = \Delta/l_0$ maka regangan saat peak spesimen R30 adalah 0,00178 dan R50 sebesar 0,00117.



Gambar 4. Kegagalan spesimen berongga 30 MPa dan 50 MPa

Sumber: Kajian eksperimental (2025)

Pada Gambar 4 terlihat perbedaan pola retak dan keruntuhan akibat variasi kuat tekan beton dan diameter rongga. Pada spesimen H30W1 dan H30W2, retak vertikal dominan dan spalling dinding luar terjadi secara luas, menandakan keruntuhan getas akibat ketahanan material yang lebih rendah. Sementara itu, spesimen H50W1 dan H50W2 menunjukkan retakan yang lebih terkendali dan terlokalisasi di sekitar area tekan, mencerminkan peningkatan kekakuan serta kapasitas beban akibat mutu beton yang lebih tinggi. Nilai beban maksimum yang lebih besar pada kolom 50 MPa (hingga 236,03 kN) menunjukkan bahwa peningkatan mutu beton dan pengurangan diameter rongga berpengaruh langsung terhadap peningkatan kapasitas aksial serta ketahanan terhadap keruntuhan lokal pada kolom beton berongga.



Gambar 5. Beban-perpindahan spesimen berongga 30 MPa dan 50 MPa

Sumber: Analisis hasil uji (2025)

Berdasarkan pengamatan, pada spesimen beton referensi yang tidak diperkuat mengalami retak vertikal searah pembebanan aksial dan terjadi pengelupasan permukaan beton (*cover spalling*) akibat terjadinya konsentrasi regangan (*strain localization*) seperti pada umumnya beton apabila diberi beban tekan aksial. Adanya rongga di dalam penampang mengurangi luas efektif beton yang menahan gaya tekan. Semakin besar persentase rongga, semakin rendah kapasitas aksial kolom. Adanya rongga sepanjang ketinggian menyebabkan penurunan daya dukung spesimen beton yang selaras dengan diameter penampang rongga. Dalam kasus ini, rongga menyebabkan penurunan kapasitas beton masing 15%-25%. Penurunan ini lebih ekstrim pada beton 30 MPa dibandingkan beton 50 MPa.

Beban-perpindahan spesimen berongga dengan filler

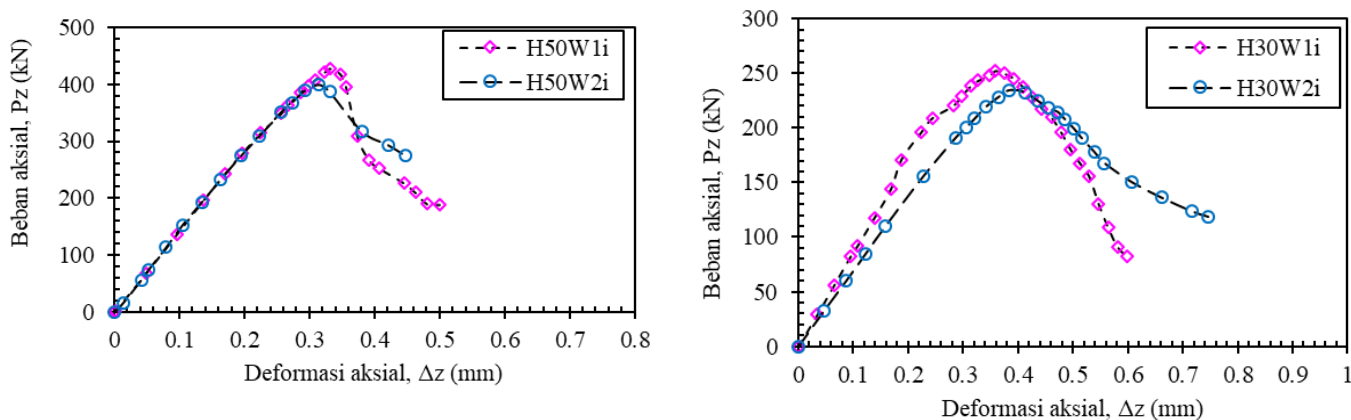
Gambar 6 menunjukkan pola kegagalan spesimen berongga 30 MPa (H30W1, H30W2 dan H50W1, H50W2) akibat beban aksial konsentris. Gambar 7 menunjukkan grafik beban aksial P_z versus perpindahan aksial Δ_z spesimen berongga dengan 2 tipe mutu beton yaitu R30 dan R50. Kerusakan yang terjadi pada spesimen berkurang drastis akibat adanya *filler*. Retak vertikal lebih seragam yang menandakan distribusi tegangan desak pada arah tak beraturan direduksi secara signifikan oleh hilangnya rongga pada spesimen. Apabila segmen berongga ini diisi campuran mortar dengan mutu 5,5 MPa, maka akan mengembalikan daya dukung beton hingga sedikit lebih kecil (2%-6%) daripada kapasitas dukung solidnya. Penambahan filler ini mempertinggi kapasitas lentur kolom akibat perbesaran kembali momen inersia penampang. Penambahan filler ini lebih berdampak pada beton mutu tinggi karena beton dengan kegetasan tinggi lebih mudah runtuh.



Gambar 6. Kegagalan spesimen berongga 30 MPa dan 50 MPa dengan filler
 Sumber: Kajian eksperimental (2025)

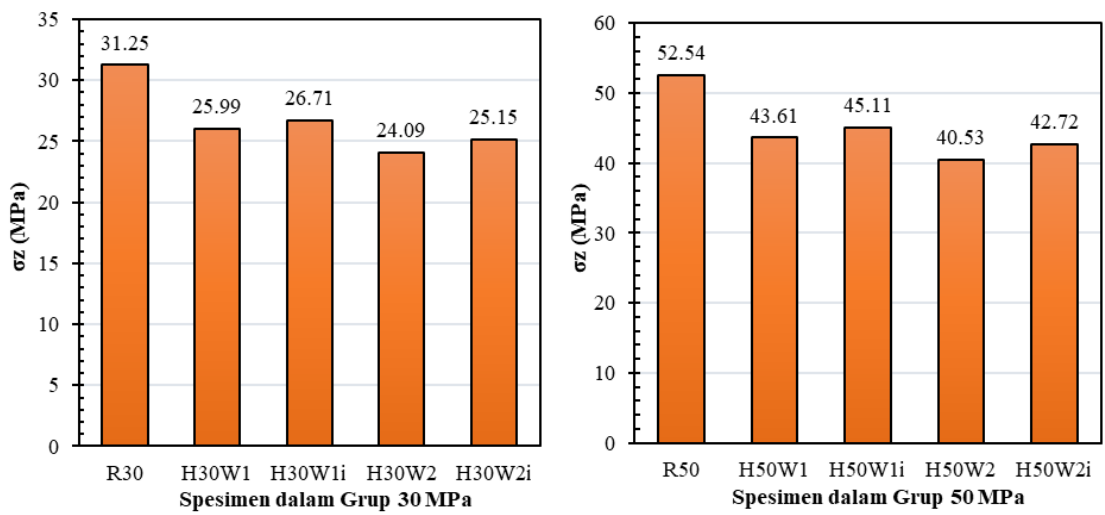
Kekuatan dan Daktilitas

Pada grup spesimen beton silinder 30 MPa terjadi peningkatan daya dukung aksial dari 25,99 MPa (H30W1) menjadi 26,71 MPa (H30W1i) dan dari 24,09 MPa (H30W2) menjadi 25,15 MPa (H30W2i). Sedangkan pada beton silinder 50 MPa terjadi peningkatan daya dukung aksial dari 43,61 MPa (H50W1) menjadi 45,11 MPa (H50W1i) dan dari 40,53 MPa (H50W2) menjadi 42,72 MPa (H50W2i). Perubahan kekuatan secara detail disajikan dalam Gambar 8. Laju peningkatan kekuatan dukung ini lebih lambat pada beton 50 MPa karena beton mutu tinggi memiliki kegetasan yang besar sehingga beton lebih cepat mengalami retak dan hancur pada regangan yang sangat kecil. Pada grup spesimen beton silinder 30 MPa terjadi peningkatan regangan aksial sampai dengan 4%. Sedangkan pada beton silinder 50 MPa terjadi peningkatan regangan sampai dengan 2%. Daktilitas perpindahan μ_{Δ} dalam penelitian ini ditentukan dari rasio regangan ultimit (ϵ_u) terhadap regangan saat yield (ϵ_y) yang diasumsikan terjadi pada saat 70% beban puncak.



Gambar 7. Beban-perpindahan spesimen berongga 50 MPa

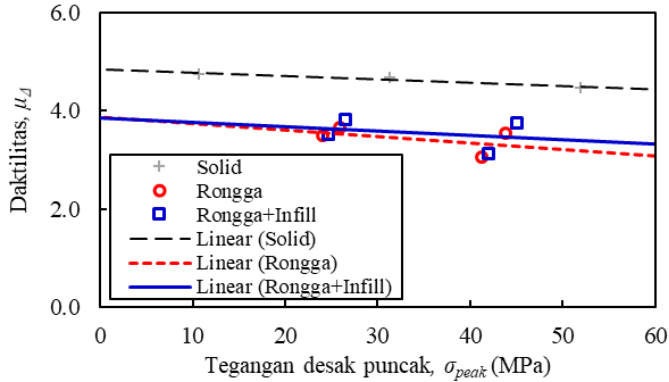
Sumber: Analisis hasil uji (2025)



Gambar 8. Peningkatan daya dukung aksial konsentrik

Sumber: Analisis hasil uji (2025)

Gambar 9 menunjukkan hubungan kuat desak puncak dan daktilitas perpindahan (μ_d) spesimen beton berongga dengan mortar pengisi. Pada beton berongga tanpa perkuatan, hubungan antara kekuatan aksial dan daktilitas pada prinsipnya berbanding terbalik; semakin tinggi kekuatan desak maka beton semakin rapuh (*brittle*) yang berarti makin berkurang perilaku daktilnya. Dengan perkuatan internal menggunakan filler, meskipun hubungan tegangan aksial dan daktilitas berbanding terbalik, terjadi peningkatan daktilitas. Pada grup spesimen beton silinder 30 MPa terjadi peningkatan daktilitas dari 3,65 MPa (H30W1) menjadi 3,81 MPa (H30W1i) dan dari 3,49 (H30W2) menjadi 3,51 (H30W2i). Sedangkan pada beton silinder 50 MPa terjadi peningkatan daktilitas dari 3,53 (H50W1) menjadi 3,73 (H50W1i) dan dari 3,05 (H50W2) menjadi 3,13 (H50W2i). Perbandingan dengan beton solid dapat dilihat pada Tabel 3. Ketika rongga diisi mortar, maka deformasi lateral menjadi lebih seragam pada ketebalan dinding beton akibat adanya tekanan triaksial ke semua arah. Meskipun minimal, penambahan mortar isian meningkatkan perilaku daktil beton berongga yang semula sangat getas. Kolom solid memiliki daktilitas tertinggi dan cenderung stabil terhadap peningkatan tegangan desak puncak, menunjukkan kemampuan deformasi plastis yang baik. Kolom berongga tanpa infill memperlihatkan penurunan daktilitas seiring meningkatnya tegangan, yang mengindikasikan perilaku lebih getas akibat kurangnya pengekangan internal. Sementara itu, kolom berongga dengan infill menunjukkan daktilitas yang sedikit lebih tinggi daripada kolom berongga kosong, menandakan bahwa pengisian rongga berkontribusi terhadap peningkatan kapasitas deformasi dan memberikan efek pengekangan tambahan terhadap keruntuhan.



Gambar 9. Kuat desak versus daktilitas

Sumber: Analisis data (2025)

Tabel 3. Daktilitas perpindahan spesimen

Spesimen	σ_{peak} MPa	Δ_{peak} mm	μ_d
R30	31.24	0.406	4.67
H30W1	25.98	0.350	3.65
H30W2	24.09	0.376	3.49
H30W1i	26.57	0.263	3.53

Spesimen	σ_{peak} MPa	Δ_{peak} mm	$\mu\Delta$
R50	51.96	0.356	4.46
H50W1	43.92	0.325	3.53
H50W2	41.24	0.391	3.05
H50W1i	46.53	0.102	3.73
H50W2i	43.80	0.112	3.13

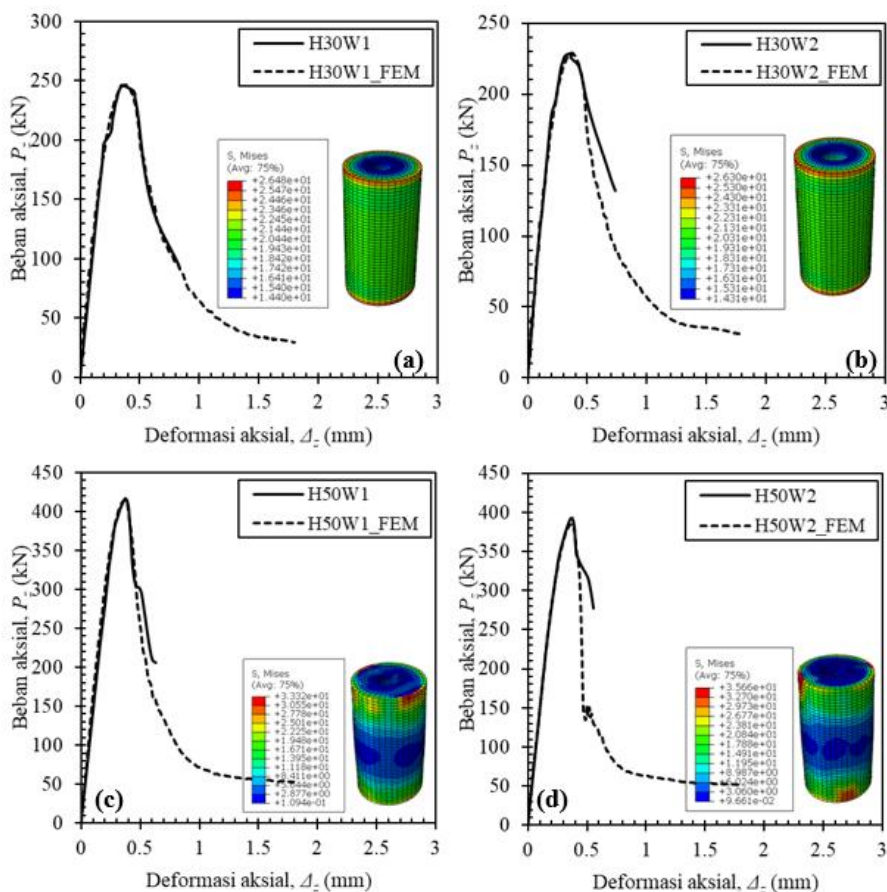
Sumber: Analisis data (2025)

Retak

Jika beton berongga diperkuat secara internal dengan mortar atau grout, maka struktur kolom berubah dari “dinding tipis (thin walled) menjadi penampang hampir pejal. Mortar memberikan dukungan dalam (internal restraint) terhadap dinding beton luar dengan membatasi deformasi lateral ke arah dalam sehingga distribusi tegangan ke seluruh segmen beton lebih merata. Retak vertikal masih muncul di awal karena sifat kuat tarik beton yang rendah namun lebih pendek dan lebih merata. Karena mortar menahan dinding beton dari dalam, retak melintang (horizontal) menjadi lebih menonjol dibandingkan kasus tanpa mortar. Retak mikro terbentuk di zona antar muka beton–mortar akibat perbedaan modulus elastisitas, namun dengan laju yang sangat kecil. Potensi kegagalan tekan beton / *crushing* pada dinding dalam beton lebih besar dari pada pengelupasan ekstrim pada bagian luar. Dengan demikian, mortar pengisi memperkecil retak makro, memperbanyak retak mikro yang menyebar dan mengubah tipe kegagalan dari getas menjadi semi-daktuil.

Hasil Simulasi Elemen Hingga

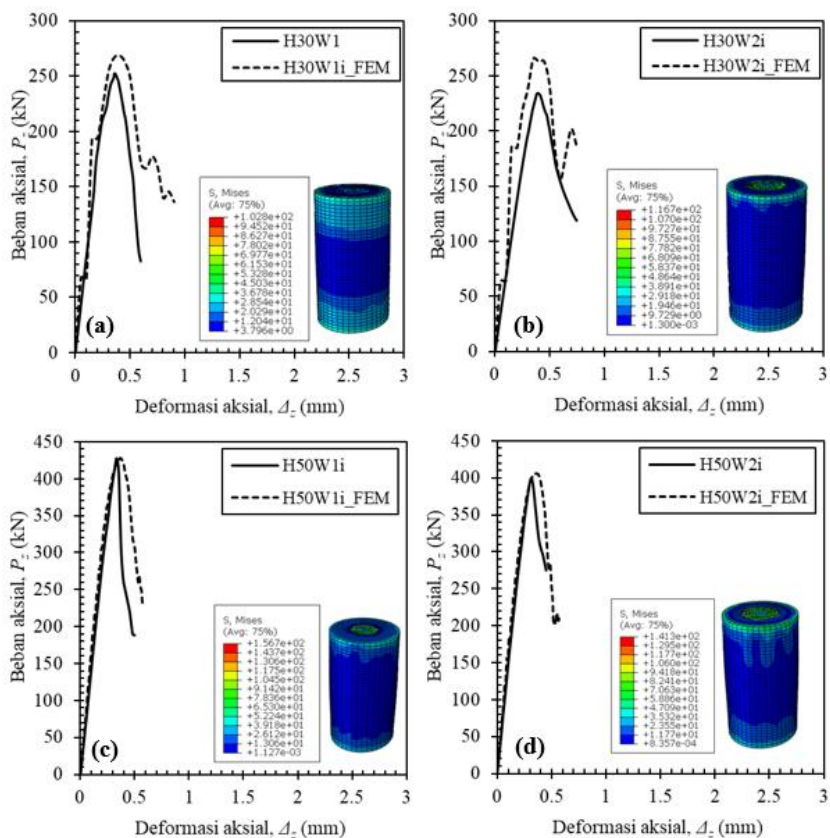
Sebelum simulasi dijalankan, proses konvergensi diskritisasi/mesh convergence dilakukan dengan program elemen hingga untuk memastikan ukuran diskritisasi yang sesuai. Mesh convergence menunjukkan ukuran mesh yang direncanakan yaitu 5 mm dapat mencapai tingkat konvergensi yang memadai untuk model elemen yang akan dianalisis. Proses simulasi menggunakan aplikasi FEM dan model material beton CDP dapat memprediksi dengan baik beban aksial ultimit seluruh spesimen uji dalam grup 30 MPa dan 50 MPa. Pada fase elastis, prediksi peningkatan beban aksial selaras dengan hasil eksperimen hingga mencapai beban puncak. Pasca beban puncak, prediksi beban-perpindahan pada beton normal lebih akurat dibandingkan dengan pada beton mutu 50 MPa.



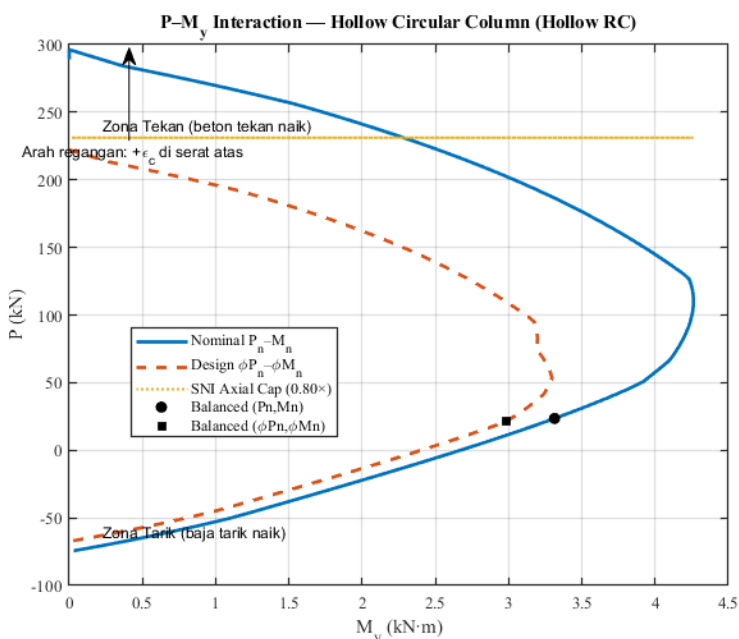
Gambar 11. Beban versus perpindahan beton berongga grup 30 MPa dan 50 MPa

Sumber: Analisis numerik/FEM (2025)

Terlihat dalam Gambar 11 dan Gambar 12, pasca beban puncak pola keruntuhan spesimen 50 MPa dengan berbagai variasi model beton dan diameter filler menunjukkan perbedaan yang nyata khususnya pada tegangan residual di akhir pembebanan. Akibat perbedaan ini, regangan aksial yang dihasilkan pun mengalami perbedaan hingga akhir pembebanan. Namun secara umum, pemilihan model konstitutif material beton dalam simulasi menggunakan CDP dapat memprediksi dengan baik hubungan tegangan regangan beton berongga dan beton berongga yang terisi mortar 5 MPa. Dengan perbedaan antara hasil uji dan hasil simulasi yang lebih kecil dari 5%, maka model elemen hingga untuk spesimen 30 MPa dan 50 MPa dapat digunakan untuk melakukan studi parametrik untuk mengkaji dampak dari parameter-parameter penting seperti diameter rongga D_i dan mutu beton f'_c .



Gambar 12. Beban versus perpindahan beton berongga dengan filler grup 30 MPa dan 50 MPa



Gambar 13. Diagram interaksi kolom H30W1

Dalam penelitian ini dikembangkan suatu program komputer untuk menganalisis interaksi kolom beton berongga berdasarkan SNI 2847-2019. Asumsi yang digunakan dalam analisis ini adalah kolom beton berongga merupakan kolom beton bertulang dengan komposisi tulangan longitudinal 6Ø8 dan sengkang spiral Ø8, selimut beton 15 mm, mutu baja tulangan $f_y = 248,2$ MPa dan modulus elastisitas baja $E_s = 200$ GPa. Sehingga, dengan menginput parameter-parameter geometri dan properti salah satu model spesimen berongga (H30W1, H30W2, H50W1 atau H50W2), dapat secara otomatis menghasilkan diagram interaksi kolom yang lengkap dengan titik-titik penting seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 13 untuk model H30W1. Diagram interaksi dapat memprediksi dengan baik beban aksial desak nominal dan momen nominal kolom berongga.

SIMPULAN

Hasil studi ini menunjukkan bahwa penambahan mortar pengisi pada kolom beton berongga secara efektif meningkatkan kuat tekan aksial dan kapasitas deformasi dibandingkan dengan spesimen berongga tanpa pengisi. Keberadaan rongga secara inheren mengurangi efisiensi kuat dukung akibat berkurangnya luas beton dan kerentanan terhadap ketidakstabilan lokal. Pengamatan eksperimental menunjukkan bahwa spesimen berongga tanpa perkuatan mengalami penurunan kapasitas aksial yang signifikan, disertai dengan penghancuran beton prematur dan pengelupasan permukaan, terutama pada beton mutu normal. Fenomena ini menggarisbawahi perlunya peningkatan respons struktural sistem berongga di bawah beban aksial konsentris untuk mencegah kegagalan getas dan mempertahankan kinerja fungsional.

Pengisi mortar mengubah mekanisme perpindahan tegangan di dalam penampang dengan mengubah penampang dari ber dinding tipis menjadi konfigurasi yang hampir padat. Perkuatan internal yang dihasilkan oleh pengisi mendorong pengekanan lateral yang lebih seragam, menunda perambatan retak, dan mengubah pola kegagalan dari kegagalan mendadak menjadi respons daktail yang lebih stabil. Meskipun peningkatan kekuatan relatif moderat, efek positif pada morfologi retak dan distribusi retak menunjukkan bahwa mortar secara efektif membatasi konsentrasi regangan lokal di dalam area dinding. Perbaikan perilaku ini berkontribusi pada peningkatan keandalan struktural dalam aplikasi di mana kolom berongga dikenakan beban aksial yang signifikan.

Peningkatan daktilitas akibat keberadaan mortar sangat signifikan untuk aplikasi yang membutuhkan kemampuan disipasi energi, termasuk infrastruktur yang terpapar bahaya lateral seperti gerakan seismik atau efek angin kencang. Peningkatan daktilitas ini menunjukkan kemampuan pengisi mortar untuk mengkompensasi kerapuhan yang lebih tinggi pada beton dengan mutu yang lebih tinggi. Perkuatan internal dari pengisi mortar juga menghasilkan distribusi tegangan residu yang lebih baik di sepanjang respons pasca-puncak, sehingga mengurangi kecenderungan kegagalan setelah beban maksimum terlampaui.

Pemodelan elemen hingga komplementer memverifikasi bahwa model Plastisitas Kerusakan Beton yang diadopsi dapat memprediksi perilaku spesimen beton berongga, baik yang tidak terisi maupun yang terisi mortar, dengan akurasi yang memuaskan. Respons numeriknya sesuai dengan perilaku gaya-perpindahan eksperimental, baik dalam kondisi elastis maupun nonlinier, sehingga mendukung penerapannya untuk studi parametrik yang diperluas dan penilaian kinerja. Keberhasilan konstruksi diagram interaksi yang dirancang khusus untuk kolom beton berongga semakin memperluas kemampuan untuk mengevaluasi ketahanan aksial dan lentur gabungan dalam skenario desain.

Secara keseluruhan, penelitian ini memajukan pemahaman tentang pengendalian kegagalan dan peningkatan kinerja dalam sistem beton berongga. Pengisian mortar menunjukkan solusi yang layak dan praktis untuk memperkuat struktur yang ada atau mengoptimalkan aplikasi kolom ringan baru di mana pengurangan berat sendiri menguntungkan. Interaksi yang teramati antara kekakuan pengisian, ketebalan dinding, dan mutu beton memberikan fondasi bagi penyempurnaan berkelanjutan metodologi desain yang memaksimalkan efisiensi struktural sekaligus memitigasi risiko keruntuhan getas. Kontribusi ini menandakan kemajuan yang berarti dalam pengembangan teknologi beton berongga untuk lingkungan binaan yang lebih aman dan lebih tangguh.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada Kementerian Pendidikan, Tinggi, Sains, dan Teknologi (Kemendikditasintek) sebagai pembiaya penelitian ini dalam skema Penelitian Dosen Pemula Tahun 2025. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada Yayasan Pendidikan Tinggi Nusa Nipa dan Universitas Nusa Nipa atas dukungan fasilitas eksperimen selama menjalankan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*. American Concrete Institute. <https://doi.org/10.14359/51716937>
- Ahmad, H., Sheikh, M. N., & Hadi, M. N. S. (2021). Experimental Investigation on the Behavior of Hollow-Core Glass Fiber-Reinforced Concrete Columns with GFRP Bars. *Journal of Composites for Construction*, 26.
- AlAjarmeh, O. S., Manalo, A. C., Benmokrane, B., Karunasena, K., Ferdous, W., & Mendis, P. (2020). Hollow Concrete

- Columns: Review of Structural Behavior and New Designs Using GFRP Reinforcement. *Engineering Structures*, 203, 109829. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109829>
- Aprilia, R., Liliana, & Frieda. (2025). Substitusi Parsial dan Full Semen Konvensional pada Campuran Beton Geopolimer Berbahan Baku Arang Cangkang Kelapa Sawit. *Talenta Sipil*, 8(1), 374–378.
- Arwin, & Eshaya, G. (2023). Tiang Listrik Alami Kerusakan, Warga Mawasangka Diminta Waspada. In *Satu Tulis*. <https://satutulis.com/2023/02/22/tiang-listrik-alami-kerusakan-warga-mawasangka-diminta-waspada/>
- Ayash, N., Hanna, N., & Mahlis, M. (2021). *State of Art of the Behavior of Hollow Reinforced Concrete Columns*. 43, 203–217.
- Belarbi, A., Dawood, M., Bowman, M., & Mirmiran, A. (2017). *Synthesis of Concrete Bridge Piles Prestressed with CFRP Systems*.
- BSN. (2000). *SNI 03-2834-2000: Tata Cara Pembuatan Campuran Beton Normal* (P. B. PU (ed.); 2834th ed.). Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah.
- Dewangga, O. S. (2024). Belum Dipakai, KPK Sebut Sebagian Bangunan Shelter Tsunami di NTB Sudah Roboh. In *Rakyat Merdeka*. <https://rm.id/baca-berita/nasional/231803/belum-dipakai-kpk-sebut-sebagian-bangunan-shelter-tsunami-di-ntb-sudah-roboh>
- Ismail, R., Rashid, R. S. M., Zakwan, F. A. A., & Hejazi, F. (2019). Experimental Study of Circular Hollow Reinforced Concrete Column Strengthened with Partial Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) Confinement. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*, 615. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/615/1/012075>
- Lee, J.-H., Choi, J.-H., Hwang, D.-K., & Kwahk, I.-J. (2015). Seismic Performance of Circular Hollow RC Bridge Columns. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(5), 1456–1467. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12205-014-1173-z>
- Lee, J., & G. L. Fenves. (1998). Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), 892–900. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892))
- Liang, X., Du, C.-Y., Zhao, B., Li, Z.-X., Sritharan, S., & Zhang, H. (2021). Performance of Circular Hollow Concrete Columns with a Single Layer of Transverse Reinforcement. *Structures*, 32, 15–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.051>
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., & Oñate, E. (1989). A Plastic-damage Model for Concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 25(3), 299–326. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1983). Behaviour of Ductile Hollow Reinforced Concrete Columns. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 16(4), 273–290.
- Mulyono, Y. (2024). Tiang PLN di Jember Patah Diterjang Angin, Listrik Ratusan Rumah Padam. In *Detik Jatim*. <https://www.detik.com/jatim/berita/d-7130861/tiang-pln-di-jember-patah-diterjang-angin-listrik-ratusan-rumah-padam>
- Nur, R. (2024). PLN Abai Dengan Tiang Listrik Retak, Warga Mekar Ayu Bener Meriah Cemas. In *KenNews*. <https://kennews.id/2024/10/30/pln-abai-dengan-tiang-listrik-retak-warga-mekar-ayu-bener-meriah-cemas/>
- Nuryanti, P., Sulityo, D., & Suhendro, B. (2018). Non-linear Analysis of Hollow RC Column Square Cross-section with Various Load Eccentricities and Concrete Strength. *Langkau Betang: Jurnal Arsitektur*, 5(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.26418/lantang.v5i1.24083>
- Sam, A. (2023). Satu Rumah Ambyar Tertimpa Tiang Listrik Beton. In *Penaku*. <https://penaku.id/1-rumah-ambyar-tertimpa-tiang-listrik-beton/>
- Sugiri, S. (2005). Penggunaan Terak Nikel sebagai Agragat dan Campuran Semen untuk Beton Mutu Tinggi. *Jurnal Infrastruktur Dan Lingkungan Binaan*, 1(1), 8.
- Sumut24. (2022). Relawan Bertuhan Sumut Pertanyakan Kekuatan Tiang Listrik Beton Yang Memakan Korban. In *Berita Sumut*. <https://www.sumut24.co/headline/151333/relawan-bertuhan-sumut-pertanyakan-kekuatan-tiang-listrik-beton-yang-memakan-korban>
- Yansiku, S. I. (2016). Karakteristik Kekuatan Beton Dengan Glass Powder, Fly Ash dan GBFS Sebagai Material Pengganti Semen. *SIARTEK*, 2(2), 5.
- Yansiku, S. I. (2018a). Characteristic of Concrete Containing Glass and Tyre Particles as Replacement of Fine Aggregate. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 8(4), 1055. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.4.4274>
- Yansiku, S. I. (2018b). Perilaku Kekuatan Beton Dengan Partikel Gelas Dan Karet Ban Bekas Sebagai Pengganti Pasir Alam. *E-Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 2(1), 10. <http://jai.ipb.ac.id/index.php/jsil/article/view/15280>
- You, Y., Wang, J., Wu, Q., Yu, Q., Pan, X., Wang, X., & Guo, L. (2017). *Causes of Pile Foundation Failure in Permafrost Regions: The Case Study of a Dry Bridge of the Qinghai-Tibet Railway*. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.10.004>

```

% =====
% P-M INTERACTION (M_y) HOLLOW CIRCULAR RC COLUMN (FIBER)
% =====
clear; clc;

%% ===== INPUTS =====
% Geometry (mm)
Do = 110;
Di = 32;
ro = Do/2;
ri = Di/2;

% Materials
fc = 30; % MPa (f'c)
fy = 200; % MPa
Es = 200000; % MPa
eps_cu = 0.003;

% Longitudinal reinforcement
nb = 6;
db = 8;
cov = 20;
dst = 6;
rb = ro - (cov + dst + db/2); % mm to bar centerline

% Confinement type
isSpiral = true; % true: spiral (phi_c=0.75), false: tied (0.65)

% Discretization
dx = 1.0; % mm
c_list = linspace(1, 4*ro, 220); % NA depths sweep

% Plot & export
wantCSV = true;

%% ===== DERIVED / PREPARE GRID =====
Ac = pi/4 * (Do^2 - Di^2); % mm^2
Ab = pi/4 * db^2; % mm^2
As_tot = nb * Ab;
fc_eff = 0.85 * fc;

% Gross axial nominal strength (SNI/ACI)
Pn_conc_nom = 0.85*fc*(Ac - As_tot) + fy*As_tot; % N
Pn_cap_SNI = 0.80 * Pn_conc_nom; % N

% Bar coordinates (uniform around circle)
theta = linspace(0, 2*pi, nb+1); theta(end) = [];
xb = rb * cos(theta);
yb = rb * sin(theta);

% Fiber grid
xv = -ro:dx:ro;
yv = xv;
[X, Y] = meshgrid(xv, yv);
R2 = X.^2 + Y.^2;
mask_annulus = (R2 <= ro^2) & (R2 >= ri^2);
dA = dx * dx;

% For M_y, strain varies along +Y (compression at +y = ro)
y_top = ro;

%% ===== PHI (ACI/SNI TRANSITION) =====
phi_c = isSpiral*0.75 + (~isSpiral)*0.65; % 0.75 spiral; 0.65 tied
phi_t = 0.90;
eps_ty = 0.002;
eps_tt = 0.005;
phi_from_eps = @(et) ...
    (et<=eps_ty).*phi_c + ...
    (et>=eps_tt).*phi_t + ...
    ((et>eps_ty)&(et<eps_tt)).*( ...
    phi_c + (phi_t-phi_c).*( (et-eps_ty)/(eps_tt-eps_ty) ) );

%% ===== STORAGE ARRAYS =====
Pn = []; Mn = [];
phiPn = []; phiMn = [];
c_used = [];
eps_t_record = [];

```

```

%% ===== SWEEP NEUTRAL AXIS =====
for c = c_list
    y_na = y_top - c;
    % Concrete compression zone (Whitney uniform 0.85 f'c)
    mask_comp = mask_annulus & (Y >= y_na);
    if ~any(mask_comp(:)), continue; end

    % Concrete resultants
    Fc = fc_eff * sum(mask_comp(:)) * dA;    % N
    Mc = fc_eff * sum(Y(mask_comp)) * dA;    % N·mm (M_y = ∫ F*y)

    % Steel (elastic-perfectly plastic)
    eps_s = eps_cu * (yb - y_na) / c;    % strain at bars
    sig_s = Es * eps_s;
    sig_s = max(min(sig_s, +fy), -fy);    % clip ±fy
    Fs = sig_s * Ab;
    Ms = sum(Fs .* yb);    % N·mm

    % Totals
    P = Fc + sum(Fs);    % N
    M = Mc + Ms;    % N·mm

    % Tension steel strain for phi and balanced tagging
    eps_t = max(0, max(-eps_s));
    phi = phi_from_eps(eps_t);

    % Store
    Pn(end+1,1) = P / 1000;    % kN
    Mn(end+1,1) = M / 1e6;    % kN·m
    phiPn(end+1,1) = phi * P / 1000;    % kN
    phiMn(end+1,1) = phi * M / 1e6;    % kN·m
    c_used(end+1,1) = c;
    eps_t_record(end+1,1) = eps_t;
end

%% ===== ADD PURE COMPRESSION POINT =====
Pn(end+1,1) = Pn_conc_nom / 1000;
Mn(end+1,1) = 0;
phiPn(end+1,1) = phi_c * Pn_conc_nom / 1000;
phiMn(end+1,1) = 0;
c_used(end+1,1) = max(c_list) + 1;

% Ensure eps_t_record has same length by appending a reasonable value
if isempty(eps_t_record)
    eps_t_record(end+1,1) = 0;    % fallback if no points
else
    eps_t_record(end+1,1) = eps_t_record(end);
end

%% ===== SORT BY c (PHYSICAL) =====
[~, ix] = sort(c_used);
Pn = Pn(ix);
Mn = Mn(ix);
phiPn = phiPn(ix);
phiMn = phiMn(ix);
eps_t_record = eps_t_record(ix);

%% ===== FIND BALANCED POINT =====
target_eps = 0.005;
[~, i_bal] = min(abs(eps_t_record - target_eps));
Mn_bal = Mn(i_bal);
Pn_bal = Pn(i_bal);
phiMn_bal = phiMn(i_bal);
phiPn_bal = phiPn(i_bal);

%% ===== SNI/ACI AXIAL CAPACITY CAP LINE (for ref) =====
Pcap_line = (Pn_cap_SNI/1000) * ones(size(Mn));    % kN

%% ===== PLOT =====
figure('Color','w'); ax = axes; hold(ax,'on'); grid(ax,'on'); box(ax,'on');

% Plot curves
h1 = plot(ax, Mn, Pn, 'LineWidth', 2);
h2 = plot(ax, phiMn, phiPn, '-', 'LineWidth', 2);

% Axial cap line
hcap = plot(ax, Mn, Pcap_line, ':', 'LineWidth', 1.5);

```

```
% Balanced markers
hb1 = plot(ax, Mn_bal, Pn_bal, 'ko', 'MarkerFaceColor','k', 'DisplayName','Balanced (nominal)');
hb2 = plot(ax, phiMn_bal, phiPn_bal, 'ks', 'MarkerFaceColor','k', 'DisplayName','Balanced (design)');

xlabel(ax,'M_y (kN·m)');
ylabel(ax,'P (kN)');
title(ax,'P-M_y Interaction — Hollow Circular Column (Hollow RC)');

legend(ax,[h1 h2 hcap hb1 hb2], ...
        {'Nominal P_n-M_n','Design \phiP_n-\phiM_n', ...
        'SNI Axial Cap (0.80×)','Balanced (Pn,Mn)','Balanced (\phiPn,\phiMn)}, ...
        'Location','best');

% ----- Strain direction & tension/compression labels -----
yl = ylim(ax); xl = xlim(ax);
annotation('textarrow',[0.20 0.20],[0.78 0.92], ...
        'String','Arah regangan: +\epsilon_c di serat atas', 'FontSize',9);

text(ax, xl(1)+0.05*(xl(2)-xl(1)), yl(1)+0.10*(yl(2)-yl(1)), ...
        'Zona Tarik (baja tarik naik)','FontSize',9);

text(ax, xl(1)+0.05*(xl(2)-xl(1)), yl(1)+0.85*(yl(2)-yl(1)), ...
        'Zona Tekan (beton tekan naik)','FontSize',9);

set(ax,'LineWidth',1.0,'FontName','Times New Roman');
```