

ANALISIS KEKUATAN PEMASANGAN PIPA PVC (PRALON) DALAM KOLOM UNTUK SISTEM DRAINASE MENGGUNAKAN *SPCOLUMN*

R M Saputra¹⁾, B Prasetyo²⁾, Y D Setiyarto³⁾

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Komputer Indonesia

Jl. Dipatiukur No. 112-116, Bandung, 40132, Indonesia

E-mail: raka.13021015@mahasiswa.unikom.ac.id¹⁾, bagas9852@gmail.com²⁾,

y.djoko.setiyarto@email.unikom.ac.id³⁾

ABSTRAK

*Inovasi desain bangunan modern mendorong integrasi sistem utilitas seperti drainase air hujan ke dalam elemen struktur untuk meningkatkan efisiensi ruang dan estetika. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pemasangan pipa PVC (pralon) sebagai saluran drainase internal terhadap kekuatan dan efisiensi kolom beton bertulang. Analisis numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak *spColumn* pada kolom berdimensi 350x600 mm dengan variasi jumlah pipa 4 inci (nol, satu, dua, dan tiga). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan satu, dua, dan tiga pipa secara bertahap mengurangi kapasitas tekan maksimum kolom dari 4100 kN menjadi 3930 kN, 3790 kN, dan 3650 kN. Meskipun terjadi penurunan, seluruh konfigurasi kolom terbukti aman untuk menahan beban ultimate rencana sebesar 368,72 kN. Menariknya, efisiensi struktural-material kolom justru meningkat hingga 4,2% pada konfigurasi tiga pipa karena pengurangan volume beton lebih besar dibandingkan penurunan kapasitasnya. Disimpulkan bahwa integrasi pipa drainase PVC dalam kolom merupakan solusi yang aman secara struktural, fungsional, dan lebih efisien dalam penggunaan material. Temuan ini berpotensi mengurangi kebutuhan ruang untuk saluran drainase eksternal, sehingga memberikan efisiensi tata ruang bangunan serta penghematan biaya konstruksi. Selain itu, integrasi sistem drainase ke dalam kolom juga memungkinkan perancangan fasad yang lebih bersih dan minimalis tanpa gangguan saluran konvensional, yang pada akhirnya meningkatkan nilai estetika serta daya saing arsitektural bangunan.*

Kata Kunci: kolom, beton bertulang, *spColumn*, drainase internal, kolom berlubang, pipa PVC dalam kolom beton.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi konstruksi modern menuntut desain bangunan yang tidak hanya kuat dan aman, tetapi juga efisien dan estetis. Salah satu tantangan dalam desain bangunan bertingkat adalah integrasi sistem utilitas seperti drainase air hujan yang seringkali menimbulkan gangguan visual maupun mengurangi efisiensi ruang. Umumnya, talang air atau pipa drainase vertikal diletakkan di luar struktur bangunan, yang dapat mengurangi nilai estetika serta memerlukan ruang tambahan untuk pemasangannya.

Untuk menjawab tantangan ini, beberapa inovasi telah dikembangkan, salah satunya adalah mengintegrasikan sistem drainase langsung ke dalam elemen struktural seperti kolom beton bertulang. Pendekatan ini memungkinkan saluran air hujan disalurkan melalui pipa yang tertanam di dalam kolom, tanpa mengganggu tampilan fasad bangunan dan memanfaatkan ruang secara lebih

optimal. Namun, keberadaan lubang pipa dalam penampang kolom berpotensi menurunkan kapasitas beban dan stabilitas strukturalnya.

Berbagai studi telah dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh pipa yang tertanam dalam kolom terhadap perilaku struktur. Kolom beton bertulang dengan saluran air internal tetap dapat memenuhi persyaratan kekuatan, meskipun terjadi penurunan kapasitas aksial. Kajian eksperimental oleh [1] mengungkapkan bahwa keberadaan lubang pipa drainase dapat menurunkan kapasitas beban dan daktilitas, tetapi dapat diatasi dengan penguatan lateral yang memadai. Pendekatan eksperimental dan numerik [2], [3], [4] menunjukkan bahwa pipa PVC yang tertanam dalam kolom beton dapat tetap menjaga performa struktur bila konfigurasi geometri dan penulangan dikendalikan dengan baik.

Beberapa penelitian lain berfokus pada pemanfaatan pipa PVC sebagai *confinement* eksternal [5], [6], atau pada sistem kolom ganda

seperti pada kolom tabung ganda (*double-skin tubular*) [7], serta pendekatan numerik berbasis FEM dan *machine learning* [8], [9]. Studi [10] mengembangkan pemodelan numerik dan eksperimen kolom dengan pipa baja internal sebagai saluran udara, yang memberikan wawasan relevan terhadap perilaku kolom berlubang. Selain itu, penelitian pada pipa beton bertulang di bawah tanah [11] dan kolom beton-fiber dengan pipa plastik [6] menunjukkan bahwa material pipa dan geometri sangat memengaruhi integritas struktural.

Meskipun studi-studi tersebut telah membahas keberadaan pipa dalam kolom beton baik sebagai saluran maupun pembungkus, sebagian besar fokus pada uji eksperimental atau kolom pendek. Studi numerik berbasis perangkat lunak rekayasa desain praktis seperti *spColumn* masih terbatas, khususnya yang mengaplikasikannya pada desain nyata di lapangan untuk kolom bertulang dengan lubang pipa drainase internal.

Kebaruan ilmiah dari kajian ini terletak pada analisis numerik penggunaan pipa pralon (PVC) sebagai saluran drainase yang tertanam di dalam kolom beton bertulang pada bangunan bertingkat, dengan menggunakan *spColumn* sebagai alat bantu permodelan dan evaluasi kapasitas struktur. Tidak hanya membandingkan antara kolom utuh dan kolom berlubang secara geometri, penelitian ini juga mengaitkan pendekatan desain terhadap data beban riil dari proyek konstruksi aktual, sehingga hasil yang diperoleh lebih aplikatif dan kontekstual.

Berdasarkan uraian tersebut, maka permasalahan penelitian ini adalah: Apakah pemasangan pipa pralon sebagai saluran drainase internal dalam kolom beton bertulang memengaruhi kapasitas kekuatan aksial kolom secara signifikan. Dengan hipotesis bahwa penambahan lubang untuk pipa pralon akan menurunkan luas penampang efektif kolom namun masih berada dalam batas aman kekuatan struktural sesuai perhitungan desain.

Oleh karena itu, tujuan dari kajian ini adalah untuk menganalisis dan mengevaluasi kapasitas kekuatan aksial kolom beton bertulang dengan dan tanpa pipa pralon menggunakan bantuan *spColumn*, serta memberikan rekomendasi desain struktural yang mempertimbangkan integrasi sistem drainase dalam kolom beton bertulang tanpa mengorbankan keamanan dan efisiensi struktur.

Kolom adalah salah satu elemen struktur yang vertikal berfungsi meneruskan beban aksial

dan diteruskan ke fondasi. Kolom merupakan suatu elemen struktur tekan yang memegang peranan penting dari suatu bangunan, sehingga keruntuhan pada suatu kolom merupakan lokasi kritis yang dapat menyebabkan runtuhnya (*collapse*) lantai yang bersangkutan dan juga runtuh total (*total collapse*) seluruh struktur. Kolom memainkan peran penting dalam kestabilan dan kekuatan sebuah bangunan karena mendukung beban kepala dan memastikan integritas struktur secara keseluruhan [12]. Kolom didefinisikan [13] sebagai komponen struktur dengan rasio tinggi terhadap dimensi lateral terkecil.

Studi sebelumnya [14] telah menunjukkan efektivitas perangkat lunak *spColumn* dalam menganalisis kapasitas tekan dan lentur kolom beton bertulang berpenampang bujur sangkar. Dalam penelitian ini, pendekatan serupa digunakan namun dengan modifikasi geometri berupa lubang vertikal untuk penempatan pipa pralon sebagai saluran drainase internal, sehingga diperlukan evaluasi lebih lanjut terhadap performa struktural akibat perubahan konfigurasi penampang.

Sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada uji eksperimental terhadap kolom pendek maupun pemodelan berbasis *finite element method* (FEM). Meskipun kedua pendekatan tersebut memberikan kontribusi penting dalam memahami perilaku struktural, keduanya memiliki keterbatasan dari segi biaya, waktu, serta kompleksitas analisis. Oleh karena itu, studi numerik praktis menggunakan perangkat lunak rekayasa desain seperti *spColumn* masih sangat terbatas, pendekatan ini menawarkan keseimbangan antara ketelitian analisis dan kemudahan penerapan dalam praktik perencanaan struktur.

2. Metodologi

Pada penelitian ini, pipa pralon (PVC) digunakan sebagai saluran drainase yang ditanam di dalam kolom beton bertulang pada bangunan bertingkat. Penanaman pipa ini bertujuan untuk mengintegrasikan sistem drainase langsung ke dalam struktur bangunan, sehingga dapat menghemat ruang dan menambah estetika bangunan.

Pengumpulan data-data yang dibutuhkan dalam perencanaan kolom menggunakan *spColumn* adalah:



Gambar 1. Konstruksi Pembuatan Kolom

A. Data Primer

Adapun data – data struktur yang digunakan dalam perencanaan kolom ini sebagai berikut:

- Data Kolom yang direncanakan:
 - Dimensi Kolom yang direncanakan adalah 350x600 mm
 - Menggunakan beton bertulang, Mutu besi tulangan yang digunakan = BJTS 420B, $F_y = 420$ MPa,
 - Menggunakan Mutu Beton yang direncanakan adalah K-300 ($f'c = 25$ Mpa)
 - Tebal Selimut Beton yang direncanakan adalah 22.5 mm
 - Diameter tulangan pokok yang direncanakan adalah 16 mm
- Data Gambar

Gambar perencanaan (Struktur) dapat dilihat pada lampiran, terdiri dari denah masing – masing lantai, tampak, potongan dan detail lainnya. Gambar ini diperoleh dari PT. BPK sebagai pelaksana.

B. Data Sekunder

Data sekunder penelitian yang menjadi acuan berupa data ukuran pipa PVC. Pipa yang dipakai untuk pemodelan kolom menggunakan *spColumn* dengan pipa ukuran 4” diameter luar 114 mm. Data sekunder penelitian yang menjadi acuan data sekunder berupa data jenis pembebanan pada [16].

Jenis pembebanan:

- Beban Mati (Dead Load)
- Beban Hidup (Live Load)

Tabel 1. Data Pipa PVC (Sumber: Pipa Jaya)

Ukuran Pipa	Diameter Luar (mm)
1/2”	22
3/4”	56
1”	32
1¼”	42
1½”	48
2”	60
2½”	76
3”	89
4”	114
5”	140
6”	165

Hasil penelitian ini terbatas pada analisis numerik satu dimensi menggunakan perangkat lunak *spColumn* pada model kolom persegi berdimensi 350x600 mm dengan variasi jumlah pipa PVC berdiameter 4 inci. Oleh karena itu, kajian ini belum

mencakup variasi bentuk penampang, dimensi kolom yang berbeda, kondisi pembebanan dinamis, maupun pengaruh lingkungan nyata di lapangan.

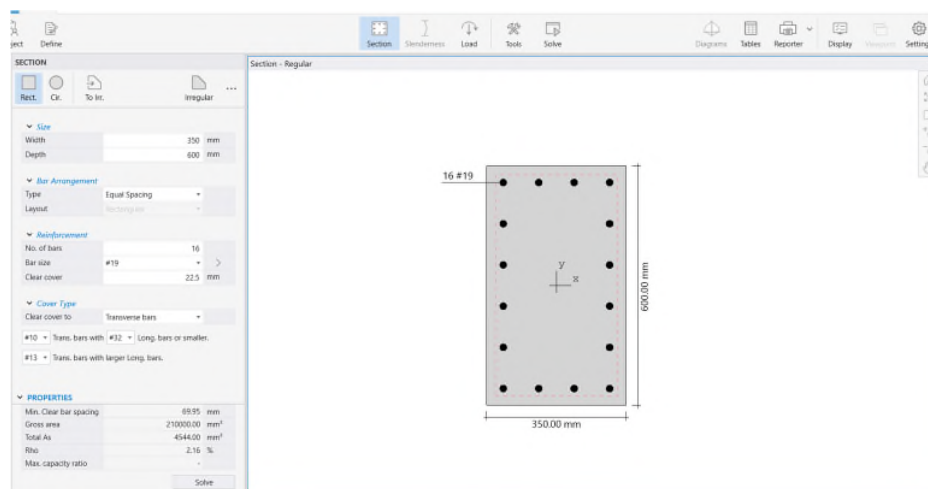
3. Hasil Dan Pembahasan

Proyek yang ditinjau untuk merencanakan kolom adalah proyek pembangunan Hotel Laska Ciater Subang.

3.1. Pemodelan Menggunakan *spColumn*

Pemodelan kolom menggunakan *spColumn* dengan dimensi kolom yang didapat pada data

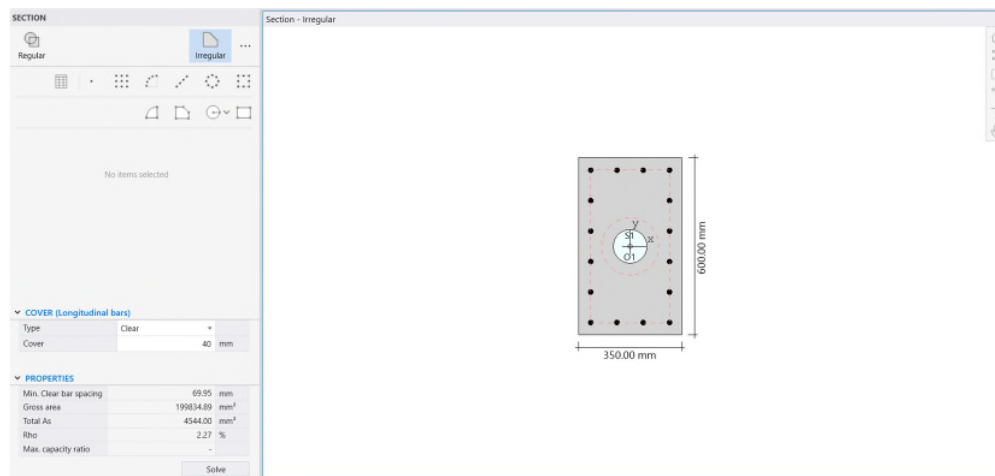
primer yang berukuran 350x600 mm. Dengan menyesuaikan mutu besi tulangan, mutu beton tebal selimut beton dan diameter tulangan pokok. Untuk mutu besi tulangan yang digunakan BJTS 420B dengan $F_y = 420$ MPa, Mutu Beton yang direncanakan adalah K-300 dengan kekuatan ($f'_c = 25$ Mpa), tebal selimut beton yang direncanakan adalah 22.5 mm dan diameter tulangan pokok yang direncanakan adalah 16 mm. Untuk hasil pemodelan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan Kolom Menggunakan *spColumn*

Selanjutnya dilakukan pemodelan kolom 350x600 mm yang sudah terpasang pipa pralon 4". Dengan pemodelan yang sama seperti kolom yang

direncanakan, dengan tambahan terpasangnya pipa pralon berukuran 4" dengan dimensi 114 mm yang didapat dari data sekunder.



Gambar 3. Pemodelan kolom yang terpasang satu buah pralon pada *spColumn*

PROPERTIES	Sebelum	Sesudah
Min. Clear bar spacing	69.95 mm	69.95 mm
Gross area	210000.00 mm ²	199834.89 mm ²
Total As	4544.00 mm ²	4544.00 mm ²
Rho	2.16 %	2.27 %
Max. capacity ratio	0.33	-
Solve		Solve

Gambar 4. Luas Penampang Kolom Berkurang Akibat Pemasangan Pralon

Untuk mutu besi tulangan yang digunakan BJTS 420B dengan $F_y = 420$ MPa, Mutu beton yang direncanakan adalah K-300 dengan kekuatan ($f'c = 25$ Mpa), tebal selimut beton yang direncanakan adalah 22.5 mm, Diameter tulangan pokok yang direncanakan adalah 16 mm dan tambahan pralon berukuran 4” dengan diameter 114 mm. Untuk hasil pemodelan dapat dilihat pada Gambar 3 terlihat pada pemodelan kolom tersebut berlubang. Pada Gambar 5, terlihat Gross area atau area penampang yang telah terpasang pralon berkurang sebesar 5% dari pemodelan kolom yang direncanakan.

Tabel 2. Data Beban mati

Beban Mati Lt 1-3 + dak		
Plat lantai	9021,6	kg
balok		
B2	1112,4	kg
B4	5544	kg
B6	748,8	kg
B7	1344	kg
B8	1236	kg
dinding	11911,39	kg
Plafond	344,58	kg
Spesi	657,83	kg
Kramik	751,80	kg
M/E	783,13	kg
Total	33455,51	kg
	33,46	kn
Total lt 2-3	100,37	kn
Plat Lantai (dak)	8618,4	kg
balok	9985,20	kg
Total	18,6036	kn
TOTAL Lt 2-3 + DAK	128,96	kn

A. Data Beban

Beban yang direncanakan pada pemodelan

Hotel Laska adalah beban mati (*Dead Load*), dan beban hidup (*Live Load*). Berikut adalah data pembebanan untuk kolom yang menerima beban dari setengah bentang balok dan pelat lantai.

B. Analisis Kolom yang direncanakan

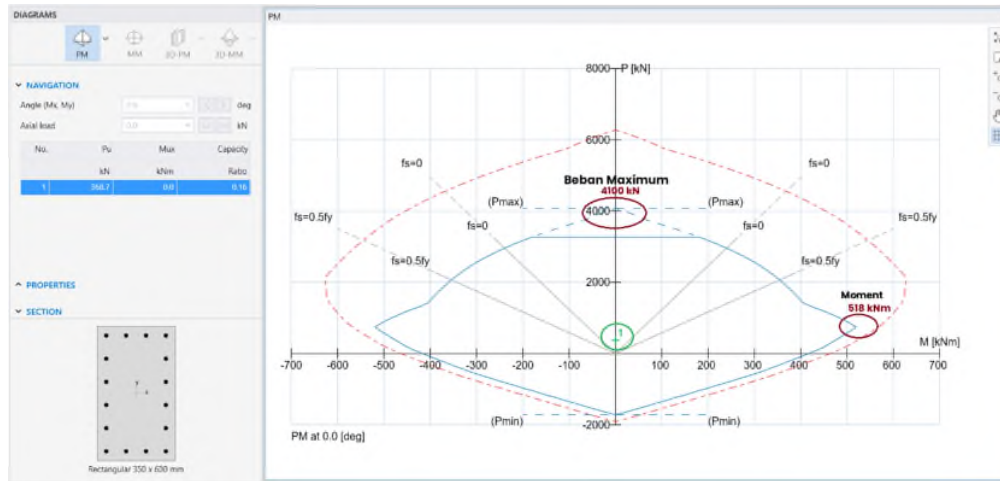
Setelah melakukan pemodelan memasukan beban P_u /gaya tekan *ultimate* sebesar 368,72 kN, lalu melakukan proses analisis pada *system Solve spColumn*, untuk melihat ketahanan kekuatan yang diterima pada kolom dengan cara melihat diagram interaksi pada Gambar 6.

Tabel 3. Data Beban hidup (SNI 1727 : 2020 Pembebanan Gedung)

Beban Hidup Lt 2-3			
Loteng yang dapat didiami dan ruang tidur	merata (kN/m ²)	Luas	Total
	1,44	31,33	45,11
TOTAL			135,32

Tabel 4. Data Beban Mati dan Hidup Maximum

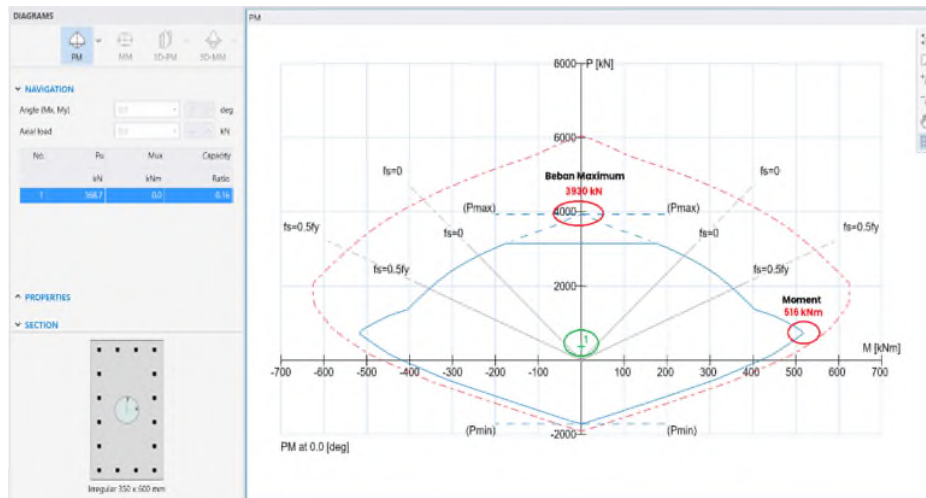
1,6 D + 1,2 L		
D	L	TOTAL (kn)
128,96	135,324	368,72



Gambar 5. Diagram Interaksi Kolom yang Direncanakan

Pada diagram interaksi kolom yang direncanakan, kolom tersebut kuat untuk memikul beban dari setengah bentang balok dan pelat yang terdiri dari beban mati dan beban

hidup *maximum* dikarenakan titik pembebanan berada di dalam diagram interaksi.



Gambar 6. Diagram Interaksi Kolom yang Terpasang Pralon

Untuk Gaya tekan maximum berada pada angka 4100 kN jika beban melawati batasan angka tersebut, maka kolom dinyatakan tidak aman, dan untuk moment berada pada angka 518 kNm.

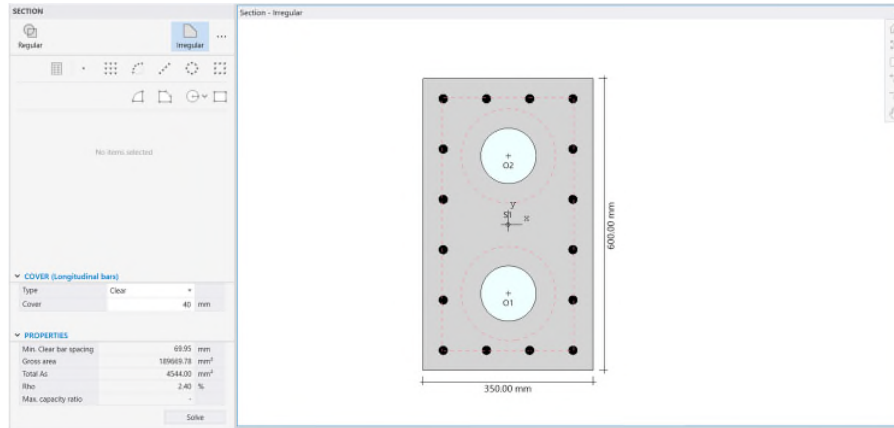
Pada diagram interaksi kolom yang sudah terpasang pralon, kolom tersebut kuat untuk memikul beban dari setengah bentang balok dan pelat yang terdiri dari beban mati dan beban hidup *maximum* dikarenakan titik pembebanan berada di dalam diagram interaksi. Untuk Gaya tekan maximum berada pada angka 3930 kN jika beban melawati batasan angka tersebut maka kolom tersebut dinyatakan tidak aman, dan untuk moment berada pada angka 516 kNm.

- C. Analisis Kolom yang terpasang pralon
 Untuk beban P_u / gaya tekan *ultimate* sebesar 368,72 kN, dan untuk melihat ketahanan kekuatan yang diterima pada kolom dengan cara melihat diagram interaksi pada gambar.

3.2. Variasi Jumlah Pipa PVC Pada Kolom

Variasi jumlah pipa PVC (pralon) yang dipasang pada elemen kolom bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh jumlah pipa PVC (pralon) terhadap kinerja struktural kolom, khususnya dalam

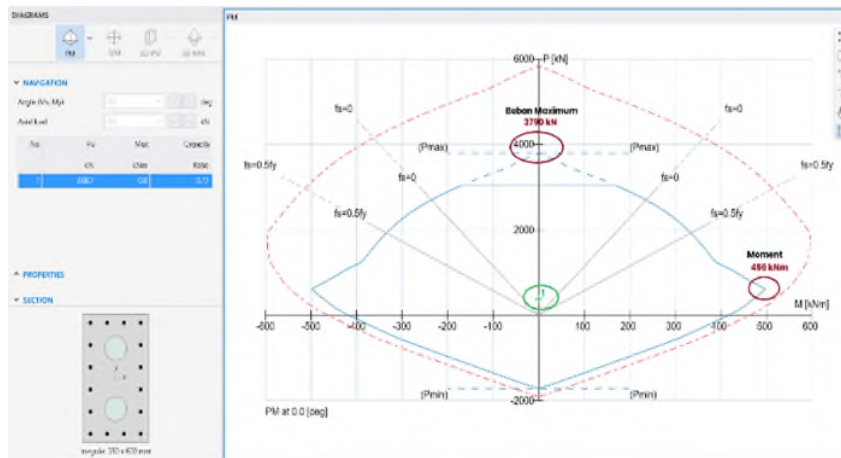
hal kekuatan. Dengan memvariasikan jumlah pralon, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai kekuatan kolom jika penambahan pipa PVC (pralon) lebih dari satu.



Gambar 7. Pemodelan Kolom yang Terpasang Dua Buah Pralon pada spColumn

Sebelum		Setelah	
Min. Clear bar spacing	69.95 mm	Min. Clear bar spacing	69.95 mm
Gross area	210000.00 mm ²	Gross area	189669.78 mm ²
Total As	4544.00 mm ²	Total As	4544.00 mm ²
Rho	2.16 %	Rho	2.40 %
Max. capacity ratio	0.16	Max. capacity ratio	0.17

Gambar 8. Luas Penampang Kolom yang Direncanakan vs Kolom dengan Dua Buah Pipa Pralon



Gambar 9. Diagram Interaksi Kolom yang Terpasang Dua Buah Pralon

A. Variasi jumlah pipa PVC (pralon) dua buah
 Pemodelan kolom dengan dua buah pipa PVC

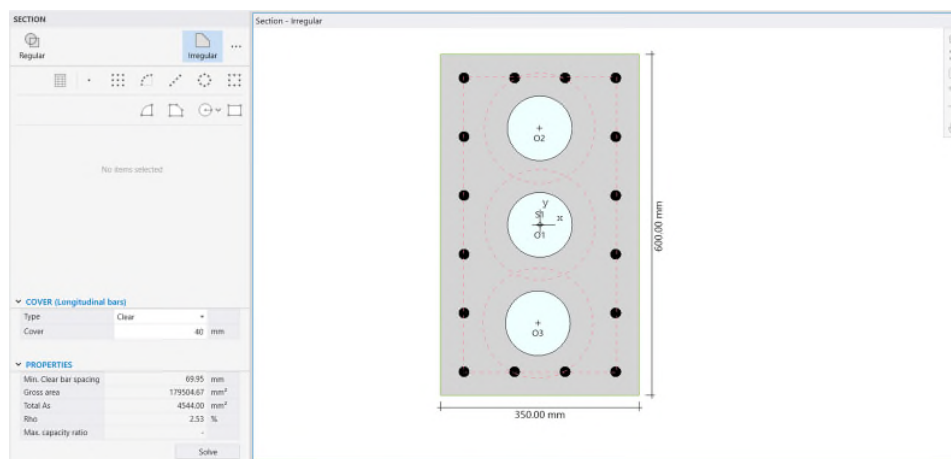
(pralon) 4” dilakukan untuk mensimulasikan kondisi aktual dari kolom yang direncanakan.

dengan dimensi kolom 350x600 mm dan beban P_u / gaya tekan *ultimate* sebesar 368,72 kN. Terlihat gross area atau area penampang yang telah terpasang dua buah pralon berkurang sebesar 10% dari pemodelan kolom yang direncanakan.

Pada diagram interaksi kolom yang sudah terpasang pralon dua buah, kolom tersebut kuat untuk memikul beban dari setengah bentang balok dan pelat yang terdiri dari beban mati dan beban hidup *maximum* dikarenakan titik pembebanan berada di dalam diagram interaksi. Untuk gaya tekan

maximum berada pada angka 3790 kN jika beban melawati batasan angka tersebut maka kolom tersebut dinyatakan tidak aman, dan untuk moment berada pada angka 496 kNm.

B. Variasi jumlah pipa PVC (pralon) tiga buah
Untuk pemodelan kolom dengan tiga buah pipa PVC (pralon) 4" sama seperti pemodelan kolom yang direncanakan dengan dimensi kolom 350x600 mm dan beban P_u / gaya tekan *ultimate* sebesar 368,72 kN.



Gambar 10. Pemodelan Kolom yang Terpasang Tiga Buah Pralon pada *spColumn*

Sebelum		Sesudah	
PROPERTIES		PROPERTIES	
Min. Clear bar spacing	69.95 mm	Min. Clear bar spacing	69.95 mm
Gross area	210000.00 mm ²	Gross area	179504.67 mm ²
Total As	4544.00 mm ²	Total As	4544.00 mm ²
Rho	2.16 %	Rho	2.53 %
Max. capacity ratio	0.16	Max. capacity ratio	0.17
Solve		Solve	

Gambar 11. Luas Penampang Kolom yang Direncanakan vs Kolom dengan Tiga Buah Pipa Pralon

Untuk *gross area* atau area penampang yang telah terpasang tiga buah pralon berkurang sebesar 15% dari pemodelan kolom yang direncanakan.

Pada diagram interaksi kolom yang sudah terpasang tiga buah pralon, kolom tersebut kuat untuk memikul beban dari setengah bentang balok dan pelat yang terdiri dari beban mati dan beban hidup *maximum* dikarenakan titik pembebanan

berada di dalam diagram interaksi. Untuk gaya tekan maximum berada pada angka 3650 kN jika beban melawati batasan angka tersebut maka kolom tersebut dinyatakan tidak aman, dan untuk moment berada pada angka 482 kNm.

3.3. Efisiensi Pada Kolom

Dalam perencanaan struktur bangunan, tidak

hanya kekuatan dan kestabilan yang menjadi pertimbangan utama, tetapi juga aspek efisiensi ekonomis dari elemen struktur yang digunakan. Efisiensi ekonomis berkaitan dengan seberapa optimal suatu elemen struktur, dalam hal ini kolom beton bertulang, mampu memikul beban dibandingkan dengan volume material atau biaya yang dikeluarkan untuk pembuatannya. Pada penelitian ini, evaluasi efisiensi ekonomis dilakukan dengan membandingkan kapasitas gaya tekan maksimum kolom terhadap volume beton efektif, baik untuk kolom utuh maupun kolom yang terpasang pipa PVC (pralon) sebagai saluran drainase internal.

Hasil analisis menunjukkan bahwa meskipun pemasangan pralon menyebabkan pengurangan kapasitas gaya tekan maksimum secara bertahap, volume beton yang digunakan juga berkurang secara proporsional. Hal ini mengakibatkan efisiensi tekan per satuan volume justru meningkat.

Perlu dicatat bahwa rasio antara gaya tekan maksimum terhadap volume beton efektif dalam kajian ini digunakan sebagai indikator efisiensi struktural-material. Pendekatan ini bersifat relatif dan bertujuan untuk menilai seberapa besar kapasitas kolom dalam memikul beban per satuan volume material beton yang digunakan.

Meskipun bukan merupakan parameter baku dalam standar desain seperti SNI atau ACI, indikator ini dapat memberikan gambaran awal mengenai optimalisasi penggunaan material struktural, khususnya dalam konteks penghematan volume beton tanpa mengorbankan kekuatan struktural yang signifikan.

Tabel 5 berikut menyajikan perbandingan efisiensi ekonomis kolom berdasarkan jumlah

pralon yang dipasang.

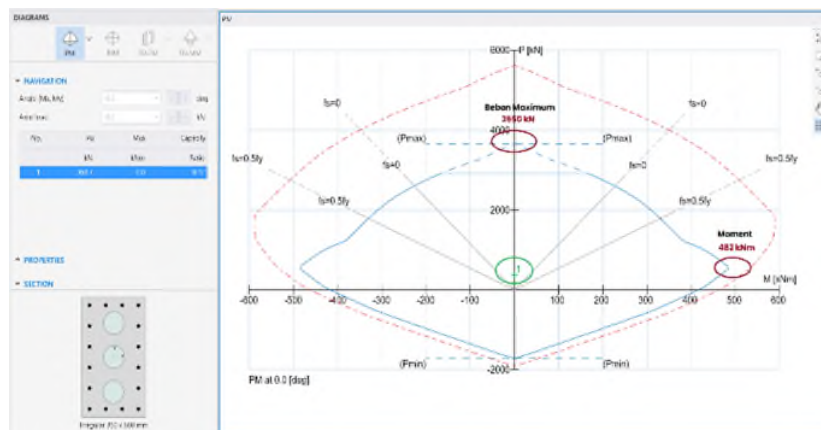
Tabel 5. Efisiensi Kolom

Jumlah Pralon	Volume Beton Efektif (m ³)	Gaya Tekan Maksimum (kN)	Efisiensi Ekonomis (kN/m ³)
0 (tanpa pralon)	0,21	4100	19.524
1 pralon	0,1998	3930	19.662
2 pralon	0,1896	3790	19.980
3 pralon	0,1794	3650	20.349

4. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan perangkat lunak *spColumn* terhadap kolom beton bertulang berukuran 350 × 600 mm, dapat disimpulkan bahwa:

1. Kolom tanpa pralon maupun kolom yang terpasang pipa PVC (pralon) berdiameter 4 inci tetap mampu menahan beban tekan maksimum (P_u) sebesar 368,72 kN, yang berasal dari beban mati dan beban hidup berdasarkan SNI 1727:2020.
2. Pemasangan satu hingga tiga buah pipa pralon menyebabkan penurunan kapasitas tekan maksimum secara bertahap (dari 4100 kN menjadi 3650 kN), namun seluruh konfigurasi kolom masih berada dalam batas aman karena titik kerja berada dalam kurva interaksi.



Gambar 12. Diagram Interaksi Kolom yang Terpasang Tiga Buah Pralon

3. Integrasi sistem drainase ke dalam elemen kolom tidak hanya mempertahankan kekuatan struktur tetapi juga meningkatkan efisiensi penggunaan ruang, estetika bangunan, dan potensi penghematan biaya instalasi saluran eksternal.
4. Efisiensi ekonomis meningkat seiring bertambahnya jumlah pralon karena pengurangan volume beton lebih signifikan dibandingkan penurunan kekuatan tekan, dengan efisiensi tertinggi mencapai 104,2% pada kolom dengan tiga pralon

Penelitian ini dilakukan secara numerik pada satu dimensi kolom beton bertulang. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh bersifat spesifik terhadap konfigurasi ini. Untuk penerapan pada kondisi nyata dengan geometri atau pembebanan berbeda, diperlukan kehati-hatian serta verifikasi eksperimental lebih lanjut.

Daftar Pustaka

- [1] A. B. Nataj, S. Şensoy, and G. Razaqpur, "Seismic behaviour and strength of reinforced-concrete columns with embedded drain pipe," *Mag. Concr. Res.*, vol. 71, no. 11, pp. 577–586, 2019, doi: 10.1680/jmacr.17.00505.
- [2] Z. Chen, Y. Liang, X. Zhao, and J. Zhou, "Investigation on hysteretic behavior of embedded PVC pipe confined reinforced high strength concrete columns," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 3, pp. 1–19, 2020, doi: 10.3390/ma13030737.
- [3] H. F. Isleem *et al.*, "Finite element and analytical modelling of PVC-confined concrete columns under axial compression," *Front. Mater.*, vol. 9, no. December, pp. 1–23, 2022, doi: 10.3389/fmats.2022.1011675.
- [4] H. F. Isleem *et al.*, "Finite element and theoretical investigations on PVC–CFRP confined concrete columns under axial compression," *Front. Mater.*, vol. 9, no. December, pp. 1–42, 2022, doi: 10.3389/fmats.2022.1055397.
- [5] A. A. Hammadi, F. Khaleel, H. A. Afan, M. M. H. Khan, and A. A. H. Sulaibi, "Study of Behaviour of Short Concrete Columns Confined with PVC Tube under Uniaxial Load," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 22, 2022, doi: 10.3390/app122211427.
- [6] A. F. Ahmed, A. S. Elmanaaey, and H. E. E. Fouad, "Performance of axially loaded polyvinyl-chloride fibrous concrete filled tube short columns," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 15, no. 5, p. 102709, 2024, doi: 10.1016/j.asej.2024.102709.
- [7] J. L. Abbas, "Structural behavior of concrete filled double-skin PVC tubular columns confined by plain PVC sockets," *Open Eng.*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.1515/eng-2022-0404.
- [8] Y. Wang *et al.*, "Modeling of concrete - filled PVC tube columns confined with CFRP strips under uniaxial eccentric compression : machine learning and finite element approaches," *J. Big Data*, 2025, doi: 10.1186/s40537-024-01058-6.
- [9] F. Kwarteng, C. K. Kankam, J. O. Banahene, G. O. Boateng, and E. C. Mansal, "Predictive Behaviour from Finite Element Analysis on PVC-Ducted Reinforced Concrete Column," *J. Eng. Res. Reports*, vol. 26, no. 3, pp. 145–160, 2024, doi: 10.9734/jerr/2024/v26i31101.
- [10] S. Wang, C. Naito, S. Quiel, M. Suleiman, C. Romero, and S. Neti, "Experimental study and numerical simulation of a structural concrete column for building heating integration and energy storage," *J. Build. Eng.*, vol. 88, no. March, p. 109229, 2024, doi: 10.1016/j.jobte.2024.109229.
- [11] O. Alshboul, G. Almasabha, A. Shehadeh, O. Al Hattamleh, and A. S. Almuflih, "Optimization of the Structural Performance of Buried Reinforced Concrete Pipelines in Cohesionless Soils," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 12, pp. 1–15, 2022, doi: 10.3390/ma15124051.
- [12] Elmaguid M. A., Elaziz N. M. A., and Hana N., "State of Art of the Behavior of hollow reinforced concrete columns," vol. 43, no. 2, 2021, [Online]. Available: <http://www.azharcermjournal.com/CERMF2104/P21-04-16.pdf>
- [13] S. 03-2847, "Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung SNI 2847-2013," *Badan Standarisasi Nas.*, p. 265, 2019.
- [14] R. Wirachma and Y. D. Setiyarto, "Analisis Kolom Berpenampang Bujur Sangkar Menggunakan Program Rekayasa Struktur menggunakan Sap2000 V18.2.0 dan



spColumn V4.81,” CRANE Civ. Eng. Res. J.,
vol. 2, no. 2, pp. 9–22, 2021, doi:
10.34010/crane.v2i2.5010.

- [15] D. Sistem and P. Standar, “Penerapan
Standar Nasional Indonesia,” no. 8, 2020.