

Pengembangan Program Analisis Penampang Spun Pile

Putu Ogi Suryadinata^a, Sagung Istri Pramitari Wima Devi^b, I Putu Pandu Rusmana^c, I Gusti Agung Arie Krismayanti^d, Putu Ryan Priyatna^e.

^{a,b} D3 Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bali, Jimbaran, Bali

^c D2 Fondasi, Beton, dan Pengaspalan Jalan, Politeknik Negeri Bali, Jimbaran, Bali

^{d,e} Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi Bangunan Gedung, Politeknik Negeri Bali, Jimbaran, Bali

*Corresponding author, email address: ogisuryadinata@pnb.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 Februari 2026

Revised: 18 Maret 2026

Accepted: 31 Maret 2026

Available Online: 30 April 2026

Kata Kunci:

spun pile, diagram interaksi aksial–momen, daktilitas, analisis momen–kurvatur

Keywords:

spun pile, axial–moment interaction diagram, ductility, moment–curvature analysis

ABSTRAK

Spun pile merupakan salah satu jenis tiang pancang pracetak beton yang diproduksi secara horizontal, sehingga proses manufaktur dan transportasinya dari pabrik ke lokasi proyek menjadi lebih efisien. Namun, sistem pengangkatan horizontal pada beberapa titik tumpuan dapat menimbulkan momen lentur sepanjang batang tiang, yang berpotensi meningkatkan risiko retak akibat tegangan tarik berlebih pada beton. Untuk mengevaluasi kapasitas penampang terhadap kombinasi beban aksial dan momen lentur, digunakan diagram interaksi lentur–aksial (P–M diagram). Secara konvensional, diagram ini disusun melalui perhitungan manual iteratif yang memakan waktu dan rentan salah. Untuk mengatasinya, dikembangkan program berbasis MATLAB yang mempercepat perhitungan dan meningkatkan akurasi analisis. Program ini mempercepat perhitungan kapasitas penampang dan mengintegrasikan efek pengekanan untuk meningkatkan tegangan ultimit beton serta daktilitas struktur. Validasi dengan perhitungan manual menunjukkan deviasi terbesar pada kapasitas aksial maksimum (P_n) sebesar 16,61%, sementara perbedaan pada hubungan momen–kurvatur hanya 1,31%. Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa dengan mempertimbangkan efek pengekanan pada penampang *spun pile*, nilai daktilitas

meningkat rata-rata sebesar 47,43%, yang menandakan peningkatan kemampuan struktur dalam menyerap energi dan menahan deformasi sebelum mencapai kondisi ultimit.

ABSTRACT

Spun pile is a type of precast concrete pile that is produced horizontally, allowing for more efficient manufacturing and easier transportation from the factory to the construction site. However, horizontal lifting at several support points can induce bending moments along the pile, which increase the risk of cracking due to excessive tensile stress in the concrete. To evaluate the cross-sectional capacity under combined axial and bending loads, the axial–moment interaction diagram (P–M diagram) is commonly used. Traditionally, this diagram is constructed through time-consuming and error-prone manual iterations. To overcome this, a MATLAB-based program was developed to accelerate computation and improve analytical accuracy. Notably, the program accounts for lateral confinement, which significantly influences concrete stress–strain behavior. When the confinement effect is considered, the ultimate stress of the concrete increases, leading to more ductile behavior of the section. The developed program was validated through comparison with manual calculations and calibrated against previous research findings. The results show that the largest difference between the manual and program-based calculations occurred in the maximum axial capacity (P_n), with a deviation of 16.61%, while the difference in the moment–curvature relationship was only 1.31%. Overall, the analysis indicates that incorporating the confinement effect into the spun pile section increases its ductility by an average of 47.43%, demonstrating a significant improvement in the structure's energy absorption and deformation capacity before reaching the ultimate condition.



1. PENDAHULUAN

Pengaplikasian gaya pada komponen struktur akan menjadi dasar dalam mendesain kekuatannya. Kusuma dan Tavio [1] menyatakan bahwa diagram interaksi aksial-lentur (P - M) dibutuhkan dalam mendesain tiang pancang beton bertulang. Hasil diagram interaksi berupa kapasitas penampang terhadap gaya aksial serta momen yang didapat dari analisis sebaran regangan akibat gaya yang diterima. Pada kenyataannya pada saat proses pengangkatan tiang akan mengalami gaya lentur yang diakibatkan oleh beban tiang itu sendiri, sehingga kondisi ini harus diperhatikan agar tidak terjadi masalah pada saat pelaksanaan struktur dengan menggambarkan gaya-gaya dalam [2]. Penampang tiang yang mengalami retak menyebabkan penurunan momen inersia, yang berimbas pada berkurangnya kekakuan struktur tiang. Kondisi ini tercermin dari perubahan gradien pada kurva beban–lendutan yang tampak semakin landai seiring munculnya retak pada penampang [3].

Kondisi dari regangan berimbang (*strain compatibility*) merupakan regangan maksimum beton (ϵ_c) pada serat tekan beton tepat mencapai 0.003 bersamaan dengan dicapainya regangan tulangan tarik (ϵ_y) [4]. Beton menjadi material yang elastis apabila terdapat gaya prategang berupa gaya tarik yang bekerja pada penampang tiang, sehingga mampu meminimalisir keretakan beton. Agung Nusantoro dkk [5] telah menghitung total persentase kehilangan gaya prategang sebesar 28,10% yang disebabkan oleh komponen prategang pratarik untuk semua faktor.

Pengaplikasian *spun pile* sangat sering dijumpai di Indonesia, namun seperti yang kita ketahui penampang berongga memiliki daktilitas yang kurang bagus dibandingkan dengan penampang *solid*. Keberadaan rongga pada *spun pile* menyebabkan efektivitas confinement beton inti menurun sehingga kapasitas deformasi plastis dan disipasi energi menjadi lebih rendah dibanding penampang solid [6]. Orientize dkk [7] menyatakan bahwa pengekanan merubah bentuk kurva tegangan regangan beton, dilihat dari bertambah besarnya tegangan tekan pada balok (C_c) pada saat regangan *ultimate* tertentu. Regangan *ultimate* akan meningkat apabila memperhitungkan efek pengekanan, sehingga struktur akan menjadi lebih daktil [8]. Model Hognestad [9] telah digunakan secara umum untuk menentukan kurva tegangan regangan beton tanpa pengekanan, karena memberikan hasil yang cukup akurat. Model pengekanan yang digunakan meliputi metode Mander dkk [10], metode El-Dash dan Ahmad [11], serta metode Kusuma dan Tavio [12].

2. KAJIAN PUSTAKA

Diagram interaksi aksial–momen (*P–M interaction diagram*) merupakan dasar utama dalam perencanaan elemen struktur yang menahan kombinasi gaya aksial dan momen lentur. Hubungan antara kedua gaya tersebut menentukan kapasitas ultimit suatu penampang beton terhadap beban kombinasi yang bekerja [1]. Penerapan beton prategang bertujuan untuk meningkatkan kapasitas lentur serta mengurangi risiko retak pada elemen struktural, khususnya pada komponen ramping seperti *spun pile* [8], [13]. Namun demikian, penampang berongga pada *spun pile* memiliki tingkat daktilitas yang lebih rendah dibandingkan dengan penampang padat [14]. Hasil penelitian eksperimental menunjukkan bahwa *spun pile* berongga juga memiliki perilaku tekuk dan retak yang berbeda dibandingkan tipe padat [15], [16], [17].

Untuk memahami perilaku beton di bawah beban aksial, sejumlah model tegangan–regangan telah dikembangkan. Model awal tanpa mempertimbangkan efek pengekanan dikemukakan oleh Hognestad [9] dan Popovics [18]. Selanjutnya, model yang memasukkan pengaruh pengekanan lateral dikembangkan oleh Mander et al. [10], El-Dash dan Ahmad [11], serta Kusuma dan Tavio [12]. Pengekanan lateral terbukti dapat meningkatkan kuat tekan beton (f'_{cc}) dan regangan ultimit (ϵ_{cu}), sehingga elemen struktur menjadi lebih daktil dan tahan terhadap keruntuhan getas.

Analisis kapasitas elemen aksial–momen umumnya dilakukan dengan pendekatan kompatibilitas regangan untuk menentukan posisi garis netral dan kapasitas momen nominal [19], [20]. Validasi hasil analisis sangat diperlukan untuk memastikan keakuratan model, dengan membandingkan hasil perhitungan numerik terhadap metode manual maupun hasil penelitian sebelumnya. Penelitian oleh Irawan, Raka, dan Suprobo [21] menunjukkan bahwa metode numerik dapat merepresentasikan kekuatan momen retak *spun pile* dengan baik sesuai kondisi lentur aktual di lapangan. Seiring perkembangan teknologi komputasi, penggunaan perangkat lunak berbasis numerik seperti MATLAB semakin luas diterapkan dalam analisis struktur beton bertulang dan prategang. Pemanfaatan perangkat lunak ini dapat mempercepat proses

perhitungan sekaligus meminimalkan potensi kesalahan manusia. Salah satu implementasi dari pendekatan tersebut adalah pengembangan program SPA (*Spun Pile Analysis*) versi 1.0, yang mampu menghasilkan diagram interaksi aksial–momen secara otomatis dan akurat. Validasi program menunjukkan kesesuaian yang baik terhadap hasil perhitungan manual serta data penelitian terdahulu.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Analisa Penampang

Libby [22] merumuskan gaya tendon prategang penampang simetris pada serat tarik maupun tekan dari pusat plastis akibat dari kehilangan gaya prategang pada daerah elastis (perpendekan beton yang meregang sebesar ϵ_{cu}) sebagai berikut:

$$T_T = A_{ps} \times f_{si} \quad (1)$$

$$T_C = A'_{ps} \times f_{si} \quad (2)$$

dengan

$$A_{ps} = A'_{ps} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_p^2 \quad (3)$$

(Untuk selongsong tendon bulat)

$$f_{si} = \frac{f_{eff}}{n_p} \quad (4)$$

$$\epsilon_{se} = \frac{f_{si}}{E_s} \quad (5)$$

Apabila jarak titik berat tendon prategang terhadap serat terluar penampang ($y_{(i)}$) lebih kecil daripada panjang garis netral (c) yang terjadi, maka perhitungan regangan untuk bagian tekan berdasarkan regangan prategang sama dengan:

$$\epsilon_{si} = \epsilon_{se} - \epsilon_u \times \frac{(c - y_{(i)})}{c} \quad (6)$$

Sedangkan regangan yang terjadi untuk bagian tarik berdasarkan regangan prategang apabila jarak titik berat tendon prategang terhadap serat terluar penampang ($y_{(i)}$) lebih besar daripada panjang garis netral (c) yang terjadi dengan penambahan regangan akibat prategang, atau sama dengan:

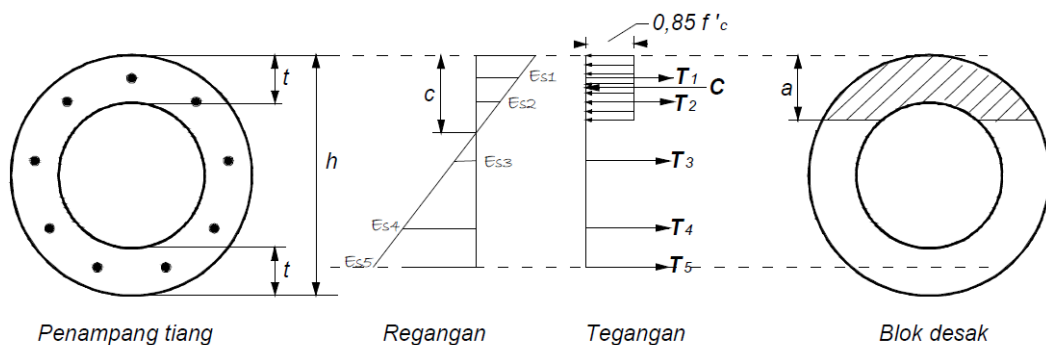
$$\epsilon_{si} = \epsilon_{se} + \epsilon_u \times \frac{(y_{(i)} - c)}{c} \quad (7)$$

Dan regangan, ϵ_{si} tersebut dipengaruhi oleh terjadinya pelelehan tulangan tendon prategang yang bersamaan dengan hancurnya beton oleh tekan secara terus – menerus, sehingga:

$$\epsilon_{si} < \frac{f_{yp}}{E_s} \rightarrow f_s = \epsilon_{si} \times E_s \quad (8)$$

$$\epsilon_{si} > \frac{f_{yp}}{E_s} \rightarrow f_s = f_{yp} \quad (9)$$

3.2 Luasan Desak dan Titik Berat Beton

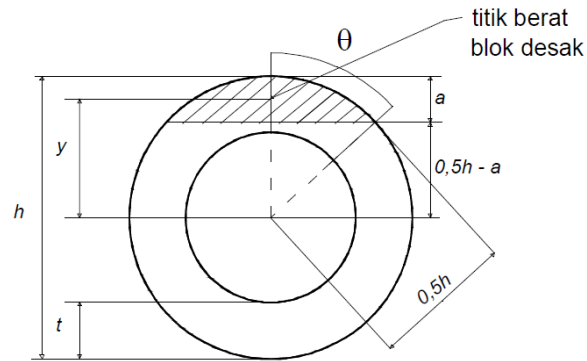


Gambar 1. Blok tegangan untuk penampang *spun pile*

Luasan desak beton diperhitungkan dengan menggunakan tali busur. Penampang berbentuk lingkaran akan memiliki bagian yang tertekan berupa kurva lingkaran dengan tinggi a . Menghitung luasan kurva yang diarsir

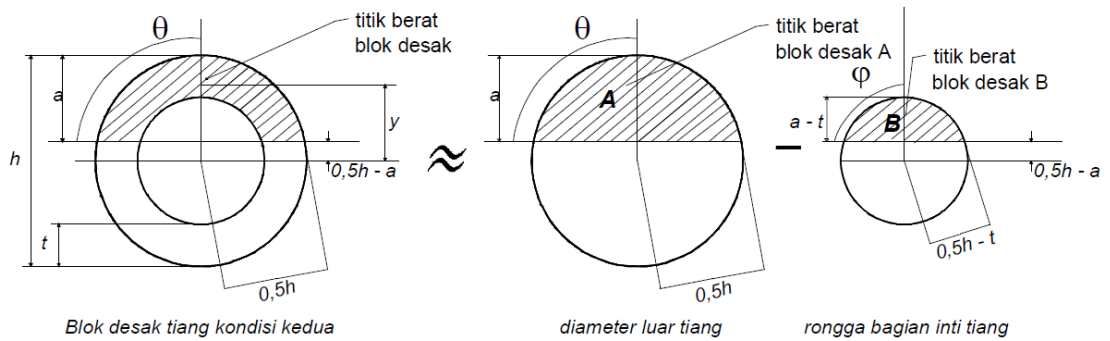
menggunakan persamaan dari panjang garis netral (c) dan tebal beton (t) terhadap tinggi blok desak (a), maka dari itu terdapat sejumlah kemungkinan kondisi yaitu:

a. Kemungkinan kondisi pertama ($a \leq t$)



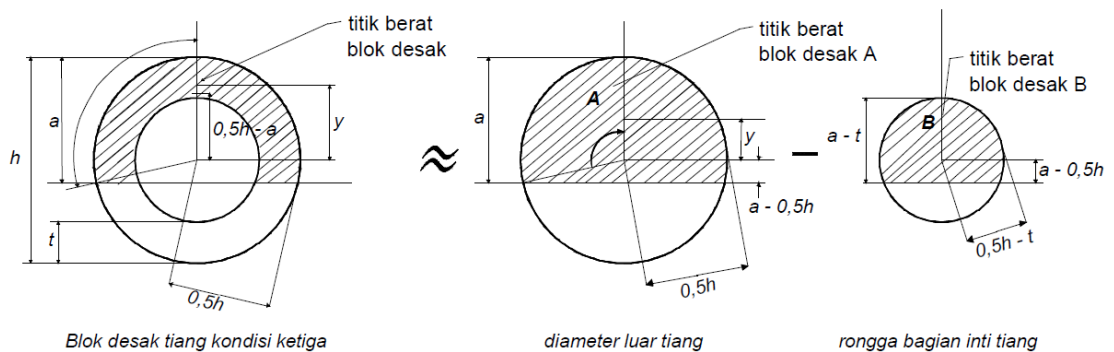
Gambar 2. Penggambaran luasan desak beton kemungkinan kondisi pertama

b. Kemungkinan kondisi kedua ($t < a \leq 0,5h$)



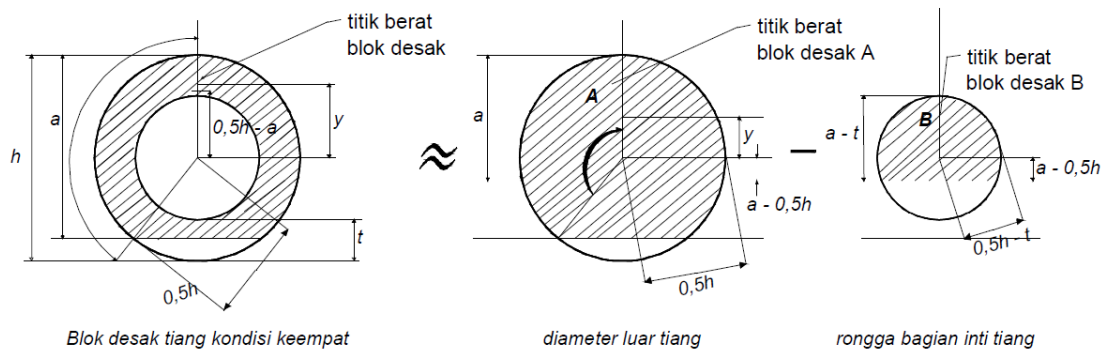
Gambar 3. Penggambaran luasan desak beton kemungkinan kondisi kedua

c. Kemungkinan kondisi ketiga ($0,5h < a \leq (h - t)$)



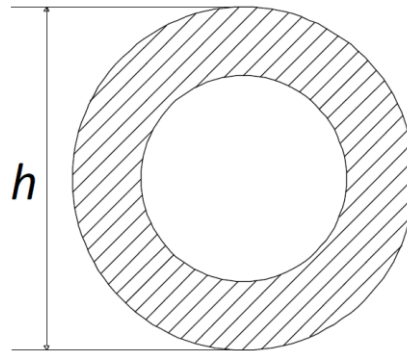
Gambar 4. Penggambaran luasan desak beton kemungkinan kondisi ketiga

d. Kemungkinan kondisi keempat ($a \geq (h - t)$)



Gambar 5. Penggambaran luasan desak beton kemungkinan kondisi keempat

e. Kemungkinan kondisi kelima ($a > h$)



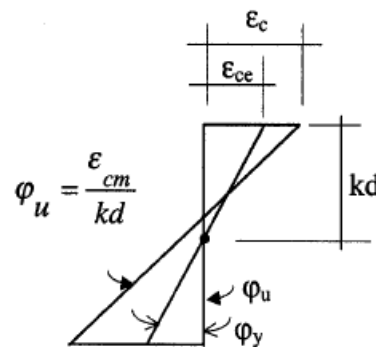
Gambar 6. Penggambaran luasan desak beton kemungkinan kondisi kelima

3.3 Daktilitas Penampang Tiang

Elemen yang daktil di definisikan sebagai elemen yang mampu mempertahankan mayoritas momen kapasitas pada saat mencapai μ_ϕ yang telah dirancang. Daktilitas bertulang yang ditinjau pada studi ini berupa daktilitas kurvatur. Kurvatur (ϕ) merupakan gradien regangan pada suatu penampang yang dinyatakan sebagai putaran per satuan panjang. Untuk mendapatkan nilai dari daktilitas kurvatur dapat digunakan perumusan sebagai berikut:

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \tag{10}$$

$$\phi_u = \frac{\epsilon_{cm}}{kd} \tag{11}$$



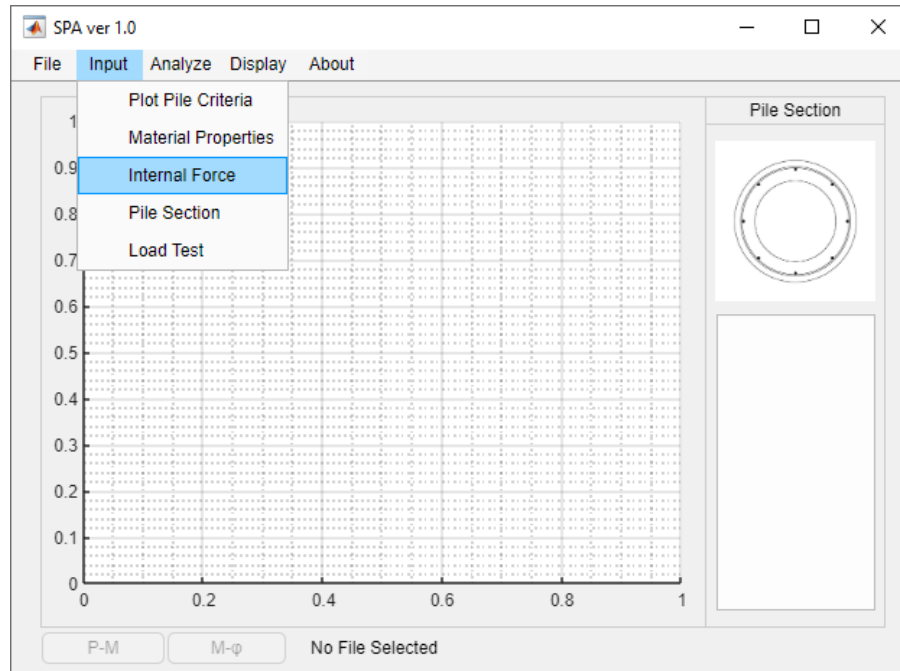
Gambar 7. Distribusi regangan pada kurvatur saat mencapai leleh pertama dan ultimit

Leleh pertama (*first yielding*) terjadi ketika regangan baja tarik mencapai regangan leleh (ϵ_y), yang ditandai dengan tercapainya kelengkungan leleh (ϕ_y). Pada kondisi ini, perilaku penampang mulai berubah dari elastis menjadi inelastis sehingga kekakuan elemen mulai menurun.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Program SPA ber. 1.0

Spun Pile Analysis (SPA ver 1.0) merupakan program terbaru yang digunakan untuk menggambar diagram interaksi serta momen-kurvatur sebuah penampang *spun pile* sesuai dengan input yang diberikan berpedoman pada peraturan SNI 2847-2019 [4]. Penggunaan program SPA ver 1.0 dapat menggantikan proses perhitungan garis netral secara manual yang bersifat iteratif dan memerlukan waktu cukup lama.



Gambar 8. Tampilan awal program SPA ver 1.0

Input data dilakukan pada bagian sub menu yang akan digunakan sebagai data perhitungan pada script yang dibuat pada aplikasi MATLAB R2021a. Hasil akhir dari SPA. ver 1.0 adalah diagram interaksi nominal, diagram momen-kurvatur dan nilai kapabilitas/kapasitas momen aksial nominal (beserta kombinasinya) dari penampang berdasarkan nilai data masukan.

4.2 Diagram Interaksi P-M

Diketahui tiang pancang prategang dengan dimensi potongan penampang bulat berlubang prismatis sepanjang bentang bertendon konsentris yang dibuat dengan sistem pratarik (*pre-tensioned*) dengan data – data sebagai berikut:

a) Material bahan:

- Kuat mutu beton, $f'_c = 52$ MPa.
- Kuat putus tendon prategang, $f_{up} = 1,860$ Mpa.
- Gaya prategang awal saat stressing, $f_0 = 1,302$ Mpa. (70 % f_{up})
- Kuat leleh tendon prategang, $f_{yp} = 1,670$ MPa.
- Kuat leleh spiral, $f_{yh} = 400$ Mpa.

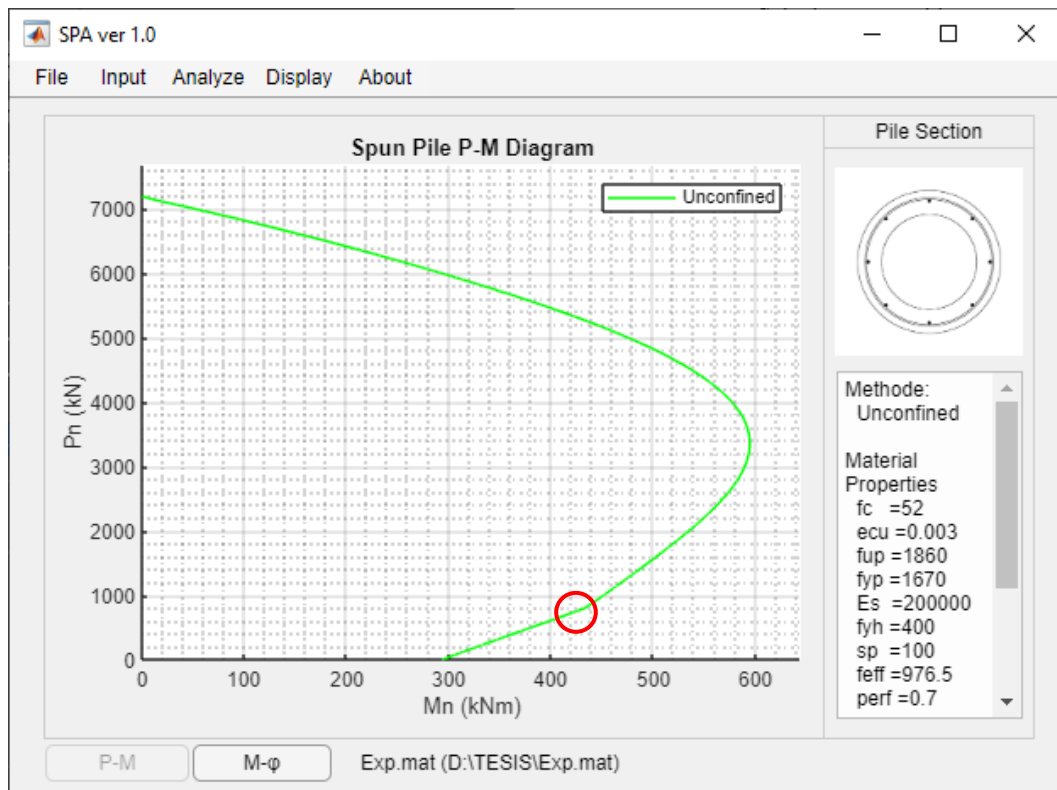
b) Dimensi penampang tiang:

- Diameter luar beton, $h_1 = 600$ mm.
- Ketebalan tiang, $t_s = 100$ mm.
- Ketebalan decking, $d_c = 30$ mm
- Jumlah tendon prategang, $n_p = 6$
- Diameter nominal tendon, $d_p = 12.7$ mm (Standard ASTM)
- Diameter nominal spiral, $d_s = 8$ mm (D-8, Standard ASTM).
- Jarak spasi kerapatan spiral, $s_{sp} = 100$ mm.

Tabel 1. Perbandingan antara perhitungan manual dengan hasil dari iterasi running program

Nilai c.	Manual	Pu (kN)	Selisih (%)	Manual	Mu (kNm)	Selisih (%)
-	6167.13	7191.40	16.61	0.00	0.00	0.00
789.34	6480.84	6480.80	0.00	183.93	183.93	0.00
617.89	4684.12	4684.10	0.00	516.81	516.81	0.00
302.78	2493.81	2493.80	0.00	567.98	567.98	0.00
127.46	456.50	456.50	0.00	373.25	373.25	0.00

Sumber: Spun Pile Analysis (SPA ver 1.0)



Gambar 9. SPA ver 1.0 diagram interaksi aksial-momen tiang pancang prategang

Tabel 1 merupakan perbandingan perhitungan manual dan program menunjukkan adanya selisih sebesar 16,61% pada nilai P_n saat nilai M_n sama dengan 0. Hal tersebut disebabkan karena iterasi pada program hanya sebatas tinggi penampang, untuk melanjutkan kurva digunakan persamaan garis lurus sehingga menghasilkan nilai perhitungan P_n manual berbeda dengan hasil program. Pada elemen tekan beton bertulang, nilai faktor reduksi kekuatan menurut ACI 318-19[23] berada pada kisaran 0,65–0,75, yang secara implisit menunjukkan bahwa penurunan kapasitas hingga sekitar 25–35% dari kapasitas nominal masih telah

diperhitungkan dalam konsep keamanan desain. Hasil lainnya menunjukkan selisih yang mendekati 0 dan hal tersebut dapat dianggap wajar karena pada proses manual terdapat pembulatan angka. Oleh karena perhitungan manual juga mengandalkan trial-error maka pendekatan metode numerik yang dilakukan komputer relatif lebih teliti dan akurat.

Pada Gambar 9 menunjukkan adanya patahan di bagian diagram interaksi aksial-momen tiang pancang. Dari hasil analisa *output*, patahan tersebut terjadi saat nilai garis netral sebesar 151,85 tepat saat terjadinya leleh pertama pada tulangan tendon. Setelah terjadinya leleh pertama pada tulangan tendon akan menyebabkan peningkatan nilai aksial maupun momen tidak sebesar nilai sebelumnya.

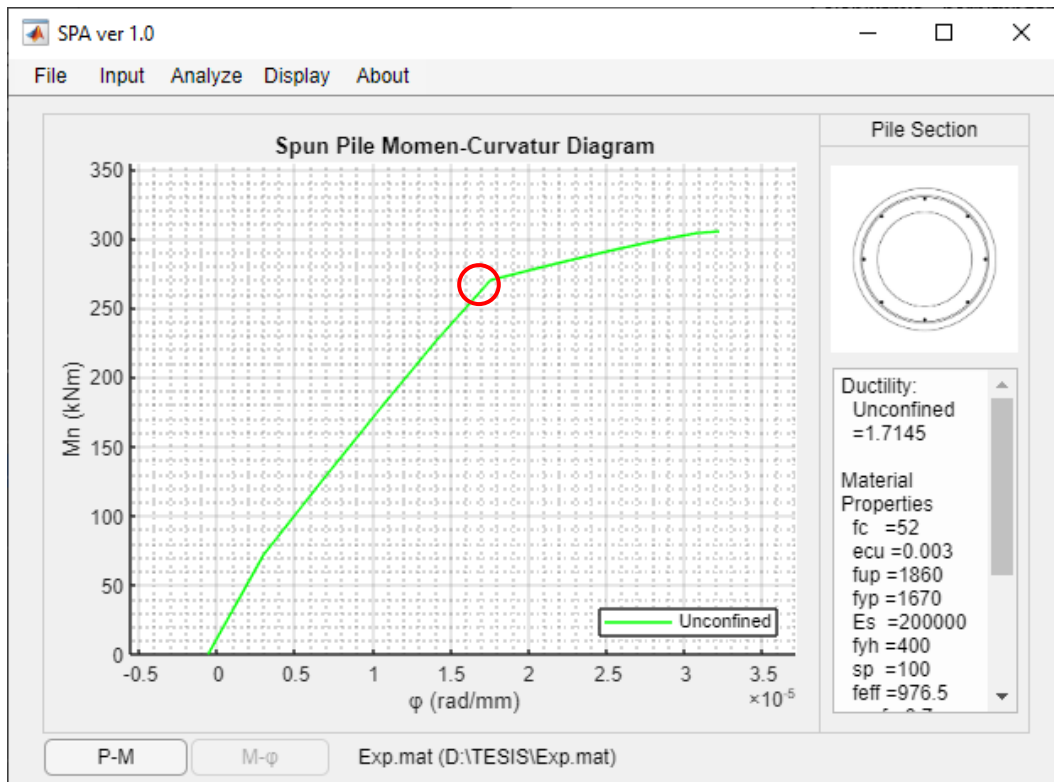
4.3 Diagram Momen-Kurvatur

Dimensi dan data material yang digunakan sama persis pada studi kasus diagram interaksi, selanjutnya hasil perhitungan dirangkum pada Tabel 2

Tabel 2. Perbandingan antara perhitungan manual dengan hasil dari iterasi running program

Nilai c.	Kurvatur Manual	(rad/mm) x 10 ⁻⁵	Selisih (%)	Manual	Mu (kNm)	Selisih (%)
300.00	0.05	0.05	0.00	87.95	87.95	0.00
85.63	1.73	1.75	1.31	269.80	269.80	0.00
99.89	3.00	3.00	0.01	293.63	293.63	0.00
Daktilitas	1.74	1.71	1.27			

Sumber: *Spun Pile Analysis (SPA ver 1.0)*



Gambar 10. SPA ver 1.0 diagram momen-kurvatur tiang pancang prategang

Tabel 2 merupakan perbandingan perhitungan manual dan program yang menunjukkan selisih terbesar bernilai 1,31%. Selisih tersebut terjadi pada perhitungan kurvatur saat leleh, akibat iterasi dalam mencari nilai $P_n = 0$. Hasil lainnya menunjukkan selisih yang mendekati 0 dan hal tersebut dapat dianggap wajar

karena pada proses manual terdapat pembulatan angka. Oleh karena perhitungan manual juga mengandalkan *trial-error* maka pendekatan metode numerik yang dilakukan komputer relatif lebih teliti dan akurat.

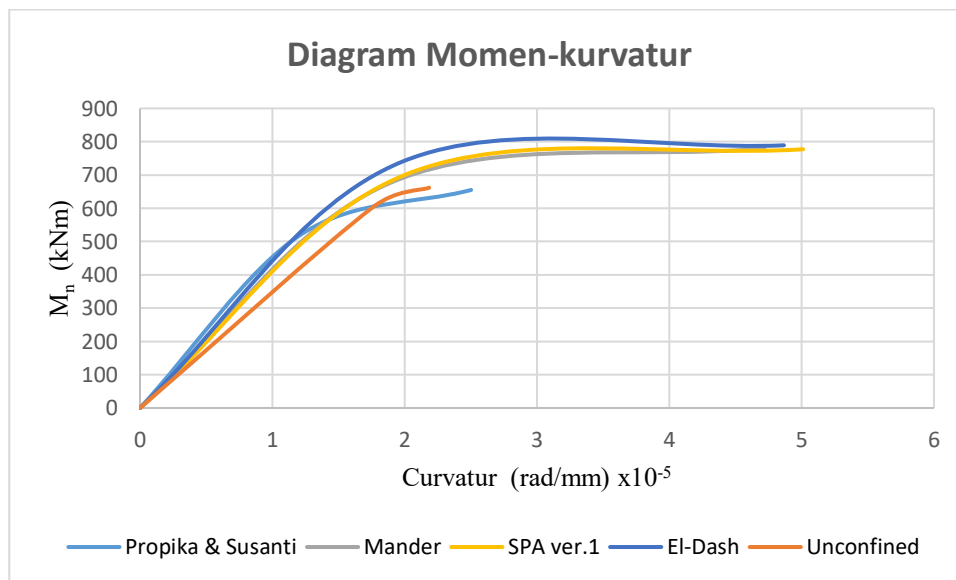
Efek penurunan nilai pada saat mencapai leleh pertama pada tulangan tendon juga berpengaruh pada diagram momen-kurvatur. Gambar 10 menunjukkan terjadinya patahan pada nilai momen 272,695 kNm. Kondisi ini terjadi pada saat regangan beton mencapai nilai 0,0015, yang bertepatan juga dengan nilai tegangan tendon terbawah mencapai leleh pertamanya

4.4 Daktilitas Kurvatur

Propika dan Susanti [24] meneliti membandingkan nilai daktilitas tiang pancang berongga dengan dan tanpa bahan pengisi beton cor lokal. Rincian data *hollow pile* yang digunakan sebagai benda uji dalam pemodelan penelitian merujuk pada data benda uji eksperimental yang dilakukan oleh Budek dkk [25]. Hasil penelitian tersebut dirangkum dan dibandingkan dengan hasil program SPA ver 1.0 pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan antara hasil paper dengan hasil dari iterasi running program

	Propika dan Susanti [24]	Unconfined	Program Mander [10]	SPA ver. 1.0 Tavio	El-Dash [11]
Kondisi Leleh					
Momen (kNm)	520.30	603.24	680.29	704.34	740.02
Kurvatur (rad/m)	0.01213	0.01760	0.01915	0.02028	0.01982
c (m)	0.1508	0.0852	0.1253	0.1331	0.1211
Kondisi Ultimate					
Momen (kNm)	655.00	661.66	779.91	777.13	789.08
Kurvatur (rad/m)	0.02502	0.02185	0.04720	0.05011	0.04866
c (m)	0.1446	0.1373	0.1199	0.1255	0.1124
Daktilitas	2.060	1.242	2.465	2.470	2.455



Gambar 11. Superposisi momen-kurvatur masing-masing model

Tabel 3 menunjukkan nilai yang sangat bervariasi dari masing-masing hasil perhitungan. Perbedaan tersebut timbul akibat penggunaan perumusan diagram tegangan-regangan pada paper dan program SPA ver 1.0 yang berbeda-beda. Masing-masing model pengekangan memiliki pendekatan tersendiri yang berpengaruh pada nilai regangan *ultimate* (ϵ_{cu}). Nilai regangan *ultimate* yang berbeda-beda berdampak pada nilai garis netral yang digunakan dalam perhitungan momen dan kurvatur, sehingga hasil akhir berupa daktilitas kurvatur akan berbeda pula. Namun dalam kasus ini dapat dilihat nilai yang tidak terlalu jauh menyimpang. Pada program SPA ver 1.0, antara model tanpa pengekangan dan dengan pengekangan memiliki selisih nilai rata-rata sebesar 47,43%. Peningkatan nilai tersebut terjadi akibat adanya gaya lateral akibat pengekangan sehingga meningkatkan nilai dari kuat tekan beton (f'_{cc}) dan regangan puncak (ϵ_{cc}).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil uraian dan pembahasan pada masing-masing kasus dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- Pada saat tulangan tandon mengalami leleh pertama, akan terjadi penurunan nilai yang mengakibatkan patahan pada diagram interaksi P-M maupun diagram momen-kurvatur.
- Perbedaan utama dalam menganalisis kapasitas penampang tiang pancang prategang antara kondisi terkekang dan tidak terkekang terletak pada nilai regangan ultimit (ϵ_{cu}). Nilai regangan ultimit ini memiliki peran penting dalam menentukan posisi garis netral pada penampang.
- Nilai daktilitas akan mengalami peningkatan rata-rata sebesar 47,43%. dengan memperhitungkan efek pengeangan terhadap penampang *spun pile*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tavio and B. Kusuma, "Studi Analitis Pengaruh Pengekangan Terhadap Kapasitas Interaksi P-M Tiang Pancang Prategang," in *Konferensi Nasional Teknik Sipil 4 (KoNTekS 4)*, Bali, 2010, pp. 349–356.
- [2] P. O. Suryadinata, Tavio, and I. G. P. Raka, "Influence of Confinement on Nominal Capacity and Curvature Ductility of Spun Piles," *Civil Engineering and Architecture*, vol. 11, no. 4, pp. 2255–2262, Jul. 2023, doi: 10.13189/cea.2023.110442.
- [3] K. T. Chiarli and A. J. Susilo, "Analisis Kekuatan Sambungan Tiang Pancang Beton Terhadap Gaya Tarik, Lateral, dan Momen pada Tanah Kohesif," *Agustus*, vol. 4, no. 3, pp. 607–614, Aug. 2021.
- [4] Badan Standardisasi Nasional, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (SNI 2847:2019)*, no. 8. Jakarta: BSN, 2019.
- [5] A. Nusantoro, E. Widyananto, N. Alami, P. Dian, and I. Prabuningrat, "Perencanaan Ulang Struktur Atas Jembatan di Desa Hargorojo dengan Menggunakan PCI Girder," *Jurnal Surya Beton*, vol. 6, no. 1, pp. 1–8, Mar. 2022, [Online]. Available: <http://jurnal.umpwr.ac.id/index.php/suryabeton>
- [6] M. Orientilize, W. A. Prakoso, Y. Lase, S. Purnomo, I. H. Sumartono, and W. Agustin, "The Evaluation of Displacement Ductility of Low Confinement Spun Pile to Pile Cap Connections," *International Journal of Technology*, vol. 14, no. 4, pp. 823–832, 2023, doi: 10.14716/ijtech.v14i4.5889.
- [7] Ridho Saleh Silaban, Darmansyah Tjitradi, and Syahril Taufik, "Permodelan Pengekangan Kolom Pada Beton Mutu Normal dengan Metode Elemen hingga 3-D," *Media Ilmiah Teknik Sipil*, vol. 8, no. 1, pp. 104–115, Jun. 2020.
- [8] Hognestad, "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members," *University of Illinois*, vol. 49, no. 399, Urbana, Dec. 11, 1951.
- [9] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park, "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *J. Struct. Eng.*, vol. 114, no. 8, pp. 1804–1826, 1988.
- [10] K. M. El-Dash and S. H. Ahmad, "A model for stress-strain relationship of spirally confined normal and high-strength concrete columns," *Magazine of Concrete Research*, vol. 47, no. 171, pp. 177–184, 1995, doi: 10.1680/mac.1995.47.171.177.
- [11] B. Kusuma and Tavio, "Unified Stress-Strain Model for Confined Columns of Any Concrete and Steel Strengths," in *International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation*, Jakarta, 2008, pp. 510–517.
- [12] M. Orientilize, W. A. Prakoso, Y. Lase, N. W. Dessy, and S. Willie, "The Numerical Study of the Need for Transverse Reinforcement of a Spun Pile," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1173, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1173/1/012004.
- [13] T. H. Tusher, A. Al Moneim, K. S. Ahmed, A. M. Billah, and S. Mangalathu, "Predicting shear strength of hollow pretensioned spun precast concrete pile using machine learning models," *Structures*, vol. 74, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.istruc.2025.108547.

- [14] Y. Lase, M. Orientilize, W. A. Prakoso, S. Purnomo, and I. H. Sumartono, "Experimental Study of Spun Pile to Pile Cap Connection Confined by Steel Jacket," *International Journal of GEOMATE*, vol. 27, no. 124, pp. 95–103, Dec. 2024, doi: 10.21660/2024.124.4707.
- [15] Z. Zhang, L. Li, G. Ye, M. Wang, Y. Xiao, and X. Wan, "Scaled model tests on pile types influencing the stability of stiffened deep mixed pile-supported embankment over soft clay," *Acta Geotech.*, vol. 20, no. 2, pp. 625–640, 2025, doi: 10.1007/s11440-024-02424-7.
- [16] M. Orientilize, W. A. Prakoso, Y. Lase, and C. K. Nando, "The Behaviour of Low Confinement Spun Pile to Pile Cap Connection," in *Proceedings of the 4th International Conference on Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (Beijing 2022)*, L. Wang, J.-M. Zhang, and R. Wang, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 1176–1184.
- [17] S. Popovics, "A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves for Concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 3, no. 5, pp. 583–59, 1973, doi: 10.1016/0008-8846(73)90096-3.
- [18] D. Kartikasari and ; Deny Sanhadi, "Studi Evaluasi Pondasi Tiang Pancang (Spun Pile) dengan Pondasi Tiang Bor (Bored Pile) pada Gedung Kantor Pemerintah Kabupaten Lamongan," *U Karst*, no. 2, pp. 121–130, Nov. 2019.
- [19] *318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute, 2019. doi: 10.14359/51716937.
- [20] C. Irawan, I. G. P. Raka, and P. Suprobo, "Kajian metode penentuan kekuatan momen retak tiang pancang spun pile," *Journal of Civil Engineering*, vol. 35, no. 1, p. 24, May 2020, doi: 10.12962/j20861206.v35i1.7790.
- [21] J. Libby, *Modern prestressed concrete: design principles and construction methods*, Fourth Edi. California: Springer Science+Business Media New York, 1990. [Online]. Available: <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=zvylRLRBIUkC&oi=fnd&pg=PR15&dq=MODERN+PRESTRESSED+Design+Principles+and+Construction+Methods&ots=a601bOVEpp&sig=m22GQt8qrqbtvsVIEWS6jFBZ6mI>
- [22] J. Propika and E. Susanti, "Studi Perbandingan Nilai Daktilitas Hollow Pile Dengan dan Tanpa Penambahan Material Pengisi Beton Cor Setempat," in *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan IV*, Surabaya, 2016, pp. 221–230.
- [23] A. M. Budek, G. Benzoni, and M. J. N. Priestley, "Experimental Investigation of Ductility of In-Ground Hinges in Solid and Hollow Prestresses Piles," California, 1997.