

Analisis Numerik Momen Lentur Sambungan Plate pada Square Pile menggunakan Metode Elemen Hingga

Zulfikriansyah M, Awaludin A, Satyatno I

Departement of Civil and Enviromental Engineering, Gadjah Mada University, Yogyakarta, Indonesia

* Email untuk Korespondensi: zulfikriansyahm@gmail.com

ABSTRAK

Kata kunci:

Tiang pancang, sambungan pelar, elemen hingga, sambungan las, kegagalan beton

Keywords:

Piles, stretch joints, finite elements, weld joints, concrete failures

Penelitian ini menganalisis sambungan plat baja pada Square Pile yang terletak pada masing-masing ujung pile. Sambungan pelat baja disatukan menggunakan las, agar mempermudah dan mempercepat sambungan pada saat konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis momen lentur pada sambungan plate yang digunakan pada square pile dengan menggunakan metode elemen hingga. Penelitian ini menggunakan metode pengujian lentur pada spesimen dengan mengikuti standar Jepang JIS A 5373:2010. Hasil uji eksperimen yang dapat juga memiliki selisih yang serupa, maka dari penggunaan metode finite element untuk analisis numerik ini dapat mendekati hasil uji eksperimen yang telah dilakukan. Dari hasil penelitian, simulasi elemen hingga pada benda uji TP1 dan TP2 menunjukkan karakteristik kegagalan lentur yang berbeda. Pada TP1, retakan muncul di tengah bentang dan memanjang ke atas hingga terjadi kegagalan pada beton akibat patahnya tulangan baja

This study analyzes the joints of steel plates on the Square Pile located at each end of the pile. The joints of the steel plates are joined together using welds, in order to make the connection easier and faster during construction. This study aims to analyze the bending moment in the plate joints used in the square pile using the finite element method. This study uses a bending test method on specimens following the Japan standard JIS A 5373:2010. The results of experimental tests that can also have similar differences, so from the use of the finite element method for numerical analysis, it can be close to the results of the experimental tests that have been carried out. From the results of the study, the simulation of finite elements on TP1 and TP2 test specimens showed different bending failure characteristics. In TP1, cracks appear in the middle of the span and extend upwards until there is a failure in the concrete due to the breakage of the steel reinforcement

Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

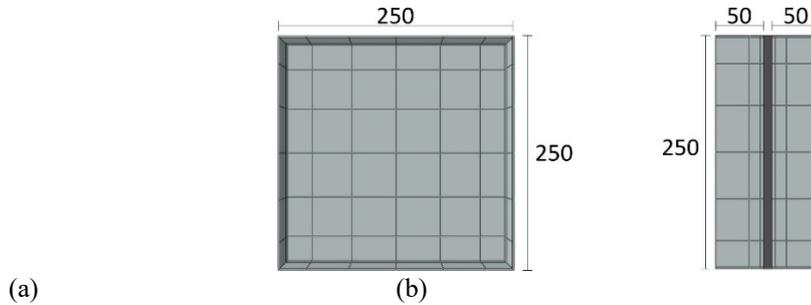
PENDAHULUAN

Penggunaan tiang pancang square pile sebagai pondasi beton prategang telah menjadi populer karena dapat mempercepat konstruksi jembatan dan struktur bangunan. Square piles memiliki keunggulan dalam distribusi pembebanan, keamanan lingkungan, ekonomis, dan kualitas yang terjamin (Dong, Dang, and Gao 2023). Penggunaan pondasi beton prategang juga lebih stabil dan efisien dalam mendistribusi beban pada sekitar tanah (Bhandari and Han 2009). Square piles memiliki rasio shear mobilization yang lebih tinggi dibandingkan dengan bored pile, maka dari itu memiliki permukaan gesek dan beban ultimit yang tinggi (Giuseppe 2023).

Namun, penggunaan tiang pancang memiliki batasan panjang untuk daya dukung lentur dan retak (Terán-Torres et al. 2023). Sambungan tiang pancang sangat diperlukan untuk menambah daya dukung lentur dan retak. Oleh karena itu, pengujian numerik telah diusulkan sebagai alternatif, termasuk penggunaan sambungan pengelasan yang banyak digunakan di lapangan. Studi ini bertujuan untuk menganalisis perilaku struktural tiang pancang dan daya dukung lentur serta modifikasi pada sambungan pelat berdasarkan hasil uji eksperimen PT. Wika Beton. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekuatan lentur yang dihasilkan tiang pancang dengan sambungan pelat baja yang dilas lebih rendah dari tiang pancang tanpa sambungan. Oleh

karena itu, penelitian ini mencoba mencari solusi terbaik agar kekuatan lentur yang dihasilkan oleh tiang pancang dengan sambungan pelat baja yang dilas dapat mendekati kekuatan lentur tiang pancang tanpa sambungan dengan menggunakan metode finite element.

Sambungan, yang sering kali merupakan sambungan terlemah pada pondasi, biasanya mengandalkan pengelasan pelat ujung atau sambungan sambungan mekanis. Sangatlah penting bagi desain elemen pracetak dan sambungannya untuk mempertimbangkan semua kondisi pembebanan dan pengekangan mulai dari pengecoran sampai dengan penggunaan struktur pada akhirnya. Dalam studi ini, sambungan las digunakan sebagai penghubung antara satu pelat baja dengan pelat baja lainnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



(a) (b)
Gambar 1. Skema sambungan pelat baja (unit: mm): (a) sambungan pelat (b) cover sambungan pelat

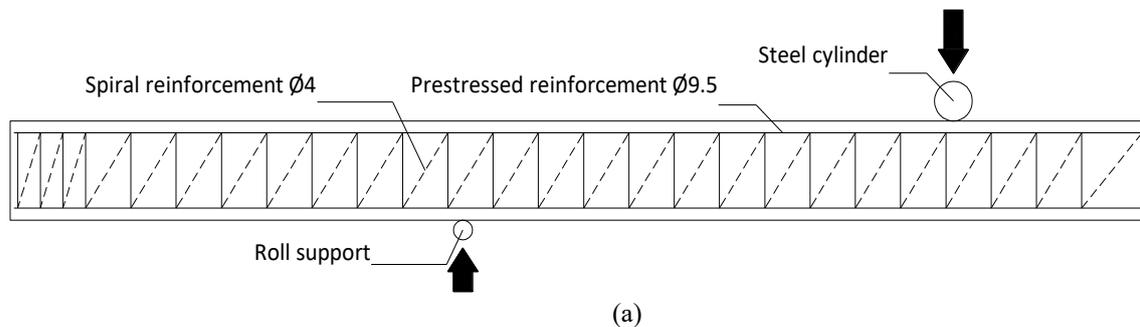
Penelitian sebelumnya secara ekstensif menyelidiki teknik sambungan tiang pancang beton pracetak dan karakteristik mekanisnya. Liu (2008) dan Huang (2011) melakukan eksperimen lentur pada sampel sambungan untuk menguji kapasitas beban lentur dan sifat kegagalan sambungan las konvensional (Huang, Yan, and Zhou 2011; Liu, Jia, and Li 2008). Hasil pengujian menunjukkan bahwa desain pelat ujung dan kualitas las merupakan faktor penting dalam menjamin efektivitas sambungan pada tiang pancang berongga. Selain itu, karakteristik lentur sambungan las pada tiang pancang pipa beton prategang konvensional (PHC) tidak dapat mencapai standar kekuatan lentur poros tiang pancang.

Penelitian ini menganalisis karakteristik kegagalan yang terjadi pada tiang pancang, kapasitas lentur bantalan, dan optimasi pada sambungan pelat baja. Analisis dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga, dengan menggunakan perangkat lunak ABAQUS. Model simulasi meliputi tiang pancang beton, sambungan pelat baja, angkur, tulangan spiral, dan tulangan prategang. Desain dan dimensi dari Wijaya Karya Beton Co. Ltd. digunakan sebagai parameter data.

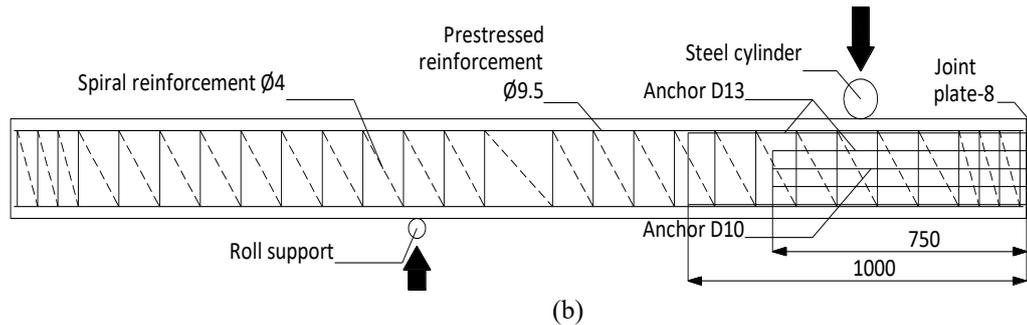
Dua model balok tiang pancang persegi 250 mm x 250 mm dengan konfigurasi four-point bending dianalisis: SP1 adalah model balok tanpa sambungan, dan SP2 adalah dua tiang pancang yang disambung pada pertengahan bentang dengan dua pelat baja yang dilas setebal 8 mm dan angkur. Panjang bentang tiang pancang persegi SP1 adalah 6000 mm, tanpa batang angkur. Sementara itu, panjang bentang tiang pancang persegi SP2 dengan sambungan pelat baja adalah 3000 mm + 3000 mm (Tabel 1). Skema penulangan SP1 dan SP2 terdiri dari 6 tulangan prategang dengan diameter 9,5 mm dan tulangan spiral dengan diameter 4 mm. Untuk SP2, sambungan pelat baja disambung dengan angkur dengan diameter 10 panjang 750 mm dan diameter 13 panjang 750 mm dan 1000 mm (Gambar 2).

Tabel 1 Ukuran model tiang pacang dan tulangan

| Model | Pile Length (m) | Prategangan (mm) | Angkur |
|-------|-----------------|------------------|--------------|
| TP1 | 6,0 | 6Ø9.5 | n.a. |
| TP2 | 3,0 + 3,0 | 6Ø9.5 | 4D10 & 12D13 |



(a)



(b)
Gambar 2 Skema penulangan tiang pancang dan perletakan tumpuan (unit: mm):
(a) TP1 (b) TP2

Tiang pancang persegi menggunakan tiga jenis tulangan: tulangan prategang, tulangan spiral, dan angkur. Tulangan prategang diposisikan dalam susunan melingkar dengan kekuatan leleh 1488 MPa dan kekuatan tarik 1860 MPa. Tulangan spiral ditempatkan dengan interval 60 mm pada 200 mm pertama dan terakhir dari panjang tiang pancang dan 120 mm pada bagian tengah bentang. Dengan ketebalan 8mm, pelat ujung sambungan dibuat dari baja SS400. Karakteristik material dari masing-masing benda uji diuraikan dalam Tabel 2. Sifat material ini didasarkan pada uji eksperimental (Wijaya Karta Beton Limited Company, 2016) dan untuk nilai rasio kepemilikan menggunakan penelitian sebelumnya (Corondo, 2010) (Coronado and Lopez 2010; PT Wijaya Karya Beton Tbk. 2016).

Penelitian sebelumnya oleh Wang (2022) dan Xu (2023) membahas sambungan tiang pancang tanpa menggunakan pelat baja yang dilas (Wang, Qi, and Yang 2022; Xu et al. 2023a). Wang (2022) dalam penelitiannya membahas tiang pancang persegi dengan tulangan canai panas. Sedangkan penelitian Xu (2023) membahas penggunaan sambungan jepit ulet pada tiang pancang persegi. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk membahas sambungan pelat baja yang disambung dengan pengelasan pada tiang pancang. Diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kemajuan teknologi tiang pancang.

Tabel 2 Parameter material

| Material | Density, ρ (kg/m^3) | Elastic Modulus, E (MPa) | Yield Strength, f_y (MPa) | Compression Strength, f_c (MPa) | Tensile Strength, f_t (MPa) | Poisson's Ratio, ν |
|--------------------|--|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Beton | 2400 | 32404 | n.a. | 42 | n.a. | 0,20 |
| Tulangan prategang | 7800 | 200000 | 1488 | n.a. | 1860 | 0,30 |
| Spiral | 7800 | 200000 | 300 | n.a. | 240 | 0,30 |
| Pelat baja | 7800 | 200000 | 212 | n.a. | 265 | 0,30 |
| Angkur | 7800 | 200000 | 336 | n.a. | 420 | 0,30 |

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis momen lentur pada sambungan plate yang digunakan pada square pile dengan menggunakan metode elemen hingga. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk memahami perilaku lentur dan distribusi tegangan pada sambungan tersebut, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja struktur sambungan plate. Hasil dari analisis ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai efektivitas desain sambungan plate pada square pile, serta kontribusinya terhadap stabilitas dan kekuatan struktur secara keseluruhan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa peningkatan pengetahuan mengenai perilaku momen lentur pada sambungan plate, yang dapat digunakan sebagai referensi dalam perancangan dan pengembangan teknik konstruksi square pile. Selain itu, hasil penelitian ini dapat berkontribusi pada peningkatan standar keamanan dan efisiensi dalam konstruksi struktur bangunan, serta membantu para insinyur sipil dan praktisi dalam mengidentifikasi desain sambungan yang optimal untuk mengurangi risiko kerusakan atau kegagalan struktur. Dengan demikian, penelitian ini juga mendukung pengembangan teknologi konstruksi yang lebih inovatif dan berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode pengujian lentur pada spesimen dengan mengikuti standar Jepang JIS A 5373:2010. Pengujian dilakukan dengan menggunakan pengaturan pembebanan simetris pada balok yang ditumpu secara sederhana, dengan setengah bentang pembebanan sebesar 500 mm. Beban vertikal diterapkan ke sambungan las pada tiang pancang persegi melalui dongkrak hidrolik yang dibantu oleh rangka penyeimbang portal, di mana beban tersebut dihitung berdasarkan balok distribusi dan berat sendiri dongkrak. Sebagai dasar untuk pengujian numerik, penelitian ini juga menggunakan data uji eksperimental sebelumnya. Pemodelan elemen hingga dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ABAQUS, yang melibatkan pembagian elemen benda menjadi unit solid 3D untuk beton dan tulangan kawat untuk penguatannya. Optimasi komputasi dicapai dengan memastikan konvergensi mesh melalui ukuran mesh yang berbeda, seperti 20 mm untuk tulangan prategang dan non-prategang, 25 mm untuk beton, dan 50 mm untuk sambungan pelat baja.

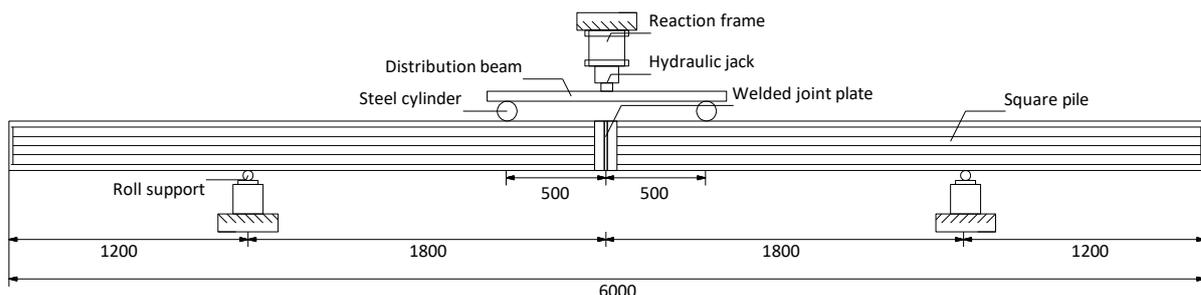
Untuk menganalisis perilaku nonlinier dan pola kegagalan beton, digunakan model plastisitas kerusakan beton dalam perangkat lunak ABAQUS, yang memperhitungkan mekanisme kegagalan utama seperti penghancuran kompresi dan retak tarik. Parameter-parameter penting seperti modulus elastisitas, rasio Poisson, dan parameter kerusakan lainnya diterapkan berdasarkan literatur yang relevan. Beton dianggap memiliki perilaku elastis linier hingga retak mulai terjadi, dan perilaku pasca-retak dijelaskan dengan metode perpindahan berbasis energi retak. Baja tulangan dimodelkan dengan kriteria elastis-plastik sempurna dan pengerasan regangan isotropik, serta pengujian kelenturan dilakukan dengan metode pembebanan simetris. Teknik pengumpulan data melibatkan uji eksperimental langsung dan simulasi numerik untuk mendapatkan hasil yang komprehensif mengenai perilaku material dan struktur di bawah pembebanan tertentu.

Data yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari uji eksperimental sebelumnya serta hasil simulasi numerik menggunakan perangkat lunak ABAQUS. Analisis data dilakukan dengan menggunakan metode analisis elemen hingga, serta evaluasi perilaku material berdasarkan model plastisitas kerusakan beton. Hasil yang diperoleh dari pengujian dan simulasi dianalisis untuk memahami pola kegagalan material dan pengaruh parameter tertentu terhadap performa struktur di bawah kondisi pembebanan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

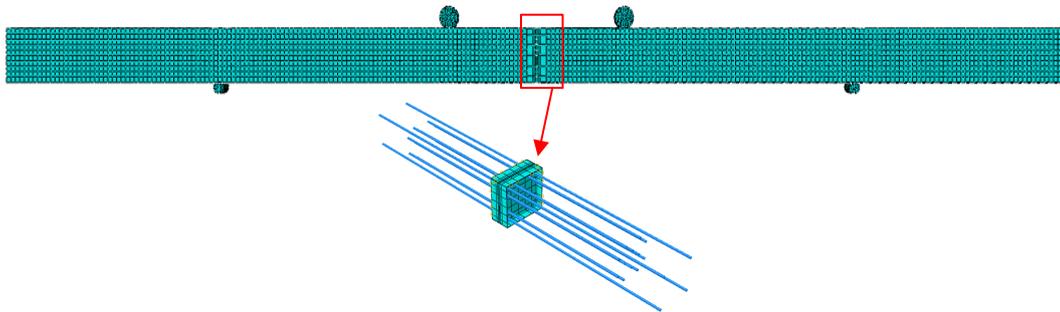
Pengujian lentur pada spesimen dilakukan dengan mengikuti panduan standar Jepang JIS A 5373:2010 (JIS (Japan Industrial Standard) 2010). Pengujian menggunakan pengaturan pembebanan simetris untuk balok dengan tumpuan sederhana, seperti yang digambarkan pada Gambar 3, dengan setengah bentang pembebanan ditetapkan pada 500 mm. Sambungan las pada tiang pancang persegi berada di tengah-tengah bentang dan terkena beban vertikal ke bawah yang diaplikasikan oleh dongkrak hidrolik, dibantu oleh rangka penyeimbang portal. Beban vertikal dihitung dengan memperhitungkan balok distribusi dan berat sendiri dongkrak. Meskipun demikian, grafik uji eksperimental tidak tersedia untuk memverifikasi simulasi.



Gambar 3 Skema pengujian lentur (unit: mm)

Mengacu pada model sebelumnya (Liang, Fan, and Qin 2022; Tang, Ling, and Qi 2023a; Wahalathantri et al. 2011), uji eksperimental digunakan sebagai dasar uji numerik. Beton tiang pancang persegi, sambungan pelat baja, silinder baja, dan roll support dibangun dengan menggunakan unit solid 3D, sedangkan tulangan tiang pancang persegi, tulangan prategang, tulangan spiral, dan angkur dibangun dengan menggunakan unit kawat. Konsep analisis elemen hingga melibatkan pembagian benda padat menjadi elemen-elemen yang lebih kecil, yang dapat mempengaruhi keakuratan hasil analisis (Logan 2007). Membagi elemen menjadi elemen yang lebih kecil dapat meningkatkan akurasi hasil analisis, namun membutuhkan lebih banyak waktu dan sumber daya komputasi yang lebih besar. Oleh karena itu, memastikan konvergensi mesh sangat

penting untuk memperkirakan solusi yang tepat dan untuk mencapai optimasi komputer yang efisien. Dalam pemodelan, ukuran mesh yang berbeda digunakan untuk mengoptimalkan komputasi. Gambar 4 mengilustrasikan pemodelan elemen hingga dengan ukuran mesh 20 mm untuk tulangan prategang dan non-prategang, ukuran mesh 25 mm untuk beton dan ukuran mesh 50 mm untuk sambungan pelat baja.



Gambar 4 Pemodelan dengan mesh pada perangkat lunak.

Untuk melakukan simulasi yang lebih baik terhadap perilaku nonlinier dan pola kegagalan beton, perangkat lunak ABAQUS menggunakan model plastisitas kerusakan beton. Model ini memperhitungkan dua mekanisme kegagalan utama: penghancuran kompresi dan retak tarik. Selain itu, model plastisitas kerusakan beton memerlukan lima parameter kerusakan, bersama dengan modulus elastisitas dan rasio Poisson. Rasio Poisson ditetapkan sebesar 0,2, dan nilai parameter kerusakan lainnya dirinci dalam Tabel 3. Untuk perilaku kompresi uniaksial beton, hubungan tegangan-regangan linier diterapkan hingga 50% dari kekuatan puncak (f_c'). Kurva kompresi yang tersisa ditentukan dengan menggunakan ekspresi yang diusulkan oleh Carreira dan Kuang-Han (1986) seperti yang diuraikan dalam persamaan (1) dan (2). (Carreira and Kuang-Han 1986). Dimana, ϵ_0 adalah regangan yang berhubungan dengan tegangan maksimum dan E_c adalah modulus elastisitas beton.

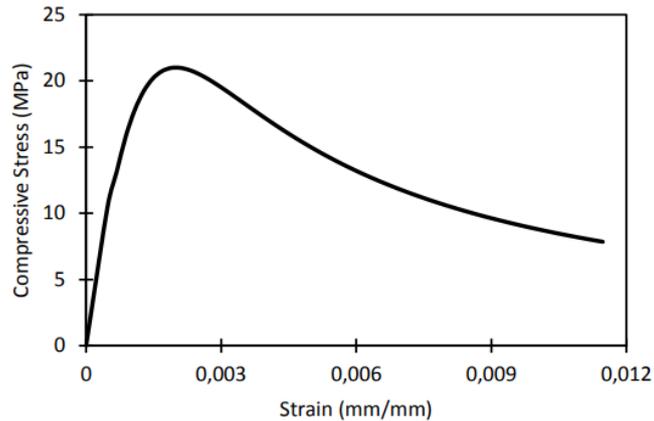
$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f_c'}{\epsilon_0 E_c}} \tag{1}$$

$$\frac{f_c}{f_c'} = \frac{\beta \cdot \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^\beta} \tag{2}$$

Tabel 3 Parameter model beton

| Dilatation angle Ψ | Eccentricity | f_{bo}/f_{co} | K | Viscosity |
|----------------------------|--------------|-----------------|------|-----------|
| 30 | 0,1 | 1,16 | 0,67 | 0,0001 |

Gambar 5 menampilkan kurva tegangan-regangan keseluruhan beton yang mengalami kompresi uniaksial (Saleem et al. 2018). Perilaku tarik beton dianggap elastis linier hingga retak dimulai, sesuai dengan kekuatan tarik (f_t') yang ditentukan oleh persamaan (3). Murthy, Palani, dan Nagesh (2009) memperkenalkan perilaku pasca-retak berbasis perpindahan, yang dijelaskan menggunakan persamaan (4-5) (Murthy, Palani, and Nagesh 2009). Persamaan (4) menyatakan bahwa energi retak (G_f) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (6), dengan nilai n diambil sebagai 3 (International Federation for Structural Concrete 2008).



Gambar 5 Kurva tegangan regangan beton akibat tekan

$$f'_t = 0.25 \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

$$d_0 = G_f \frac{(n+1)}{f'_t} \quad (4)$$

$$f'_t = f'_t \times \left(1 - \frac{x}{d_0}\right)^n \quad (5)$$

$$G_f = 110 \left(\frac{f'_c}{10}\right)^{0.18} \quad (6)$$

Baja tulangan dimodelkan sebagai elastis-plastik sempurna dengan kriteria pengerasan regangan isotropik. Nilai yang diasumsikan untuk modulus elastisitas, tegangan leleh, dan rasio Poisson masing-masing adalah 200000 MPa, 420 MPa, dan 0,3. Studi sebelumnya oleh Tang (2023) menunjukkan bahwa memungkinkan untuk menggabungkan tulangan prategang dan non-prategang untuk membuat rangka baja dengan pengekanan yang digabungkan (Tang et al. 2023a). Untuk menyederhanakan analisis, batang angkur dipasang pada pelat sambungan menggunakan pengekan tipe ikat. Uji lentur dilakukan dengan pembebanan simetris menggunakan balok yang ditumpu sederhana dengan tumpuan engsel bergulir di setiap ujungnya. Selanjutnya, aplikasi beban prategang dilakukan dengan menggunakan metode pendinginan, seperti yang dijelaskan pada penelitian sebelumnya (He and Wang 2015).

Persamaan (7) digunakan untuk mensimulasikan perilaku non-linier baja dengan menggunakan model bifold (Yang and Lei 2020), dimana σ mewakili tegangan batang baja, k menunjukkan kemiringan penampang yang diperkeras, yang ditetapkan sebesar 0.02 kali modulus elastisitas tulangan (E_s), serta f_y dan ε_y masing-masing mewakili kekuatan leleh dan regangan tulangan. Informasi ini digunakan untuk menghitung penurunan suhu yang diperlukan untuk tulangan prategang, dengan menggunakan persamaan (8), dimana σ adalah tegangan prategang, α adalah koefisien muai baja dengan nilai $1,2 \times 10^{-5}$ dan E_s adalah modulus elastisitas tulangan prategang.

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\sigma \leq f_y) \\ k(\varepsilon - \varepsilon_y) + f_y & (\sigma > f_y) \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta T = \frac{\sigma}{\alpha \cdot E_s} \quad (8)$$

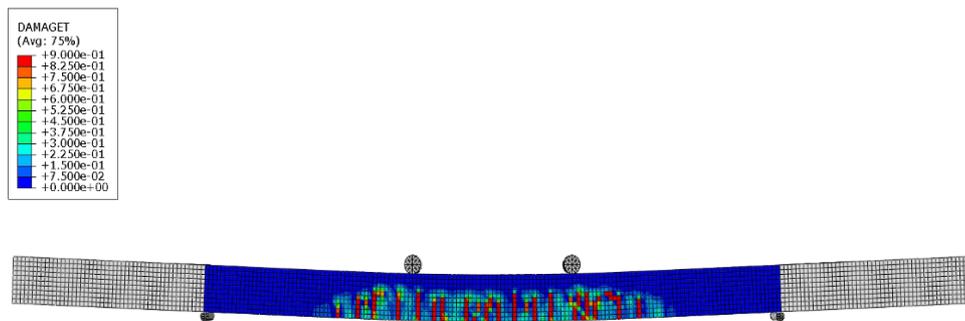
Dua pelat baja diintegrasikan dengan menggunakan pengikat tipe ikat di setiap ujungnya. Pembatas yang sama digunakan untuk menghubungkan batang jangkar dan pelat baja. Pada titik kontak antara beton dan baja, batasan tipe ikat digunakan untuk mensimulasikan daya rekat beton. Pada interaksi sambungan pelat,

digunakan kontak karena akan terjadi gesekan antara beton dan baja. Seperti yang disebutkan dalam Burak (2014) koefisien gesekan antara beton dan baja ditemukan berkisar antara 0,57 hingga 0,7 (Burak and Ahmet 2014). Mengenai koefisien gesekan antara baja dan baja pada pelat baja, nilai 0,15-0,2 ditentukan (Huang et al. 2011). Penelitian ini menggunakan 0,6 sebagai koefisien gesekan beton dan baja dan 0,15 sebagai koefisien gesekan antara baja dan baja.

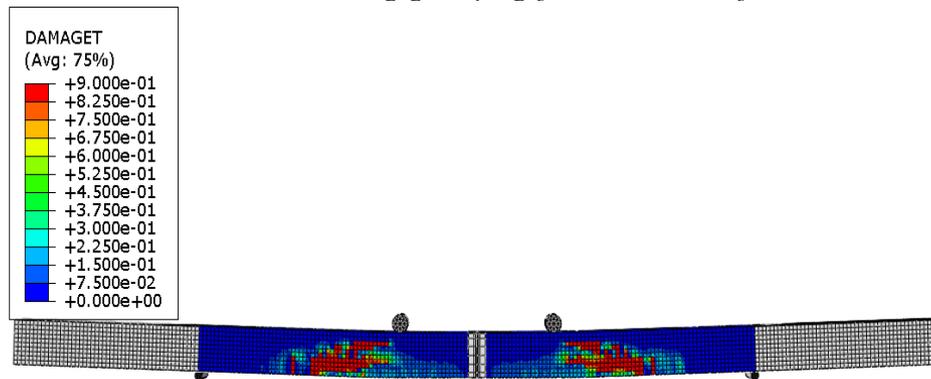
Pembahasan

Karakteristik Perilaku Benda Uji

Dari hasil simulasi elemen hingga masing-masing benda uji menunjukkan terjadi kegagalan lentur. Setelah diberik pembebanan hingga mencapai beban retak pada TP1 terlihat retakan kecil yang muncul dari tengah bentang. Retakan ini secara bertahap memanjang ke atas sebanding dengan meningkatnya defleksi pada tiang pancang, hal ini berlanjut hingga betin tian pancang tertekan hancur tidak mampu menahan beban lebih lanjut. Secara umum retakan yang terjadi pada tengah bentang terjadi akibat patahnya tulangan baja atau retaknya beton sehingga tidak mampu menahan tekan sebagaimana yang dijelaskan (Tang, Ling, and Qi 2023b). Berbeda dengan TP1, pada TP2 retakan dimulai dari sekitar ujung angkur. Retakan ini juga secara bertahap memanjang dan menyebar pada sekitar sambungan pelat baja. Kondisi ini terjadi akibat kekuatan tarik pada anchor telah tercapai yang kemudian mengakibatkan kegagalan beton. Sebagaimana disebutkan dalam (Xu et al. 2024) lelehnya sambungan tiang pancang berfungsi sebagai indikator kegagalan, sehingga diperlukan perhitungan kapasitas lentur pada tiang pancang. Gambar 6 menyajikan karakteristik kerusakan yang terjadi pada TP1 selama simulasi uji lentur. Gambar 7 menyajikan karakteristik kerusakan yang terjadi pada TP1 selama simulasi uji lentur.

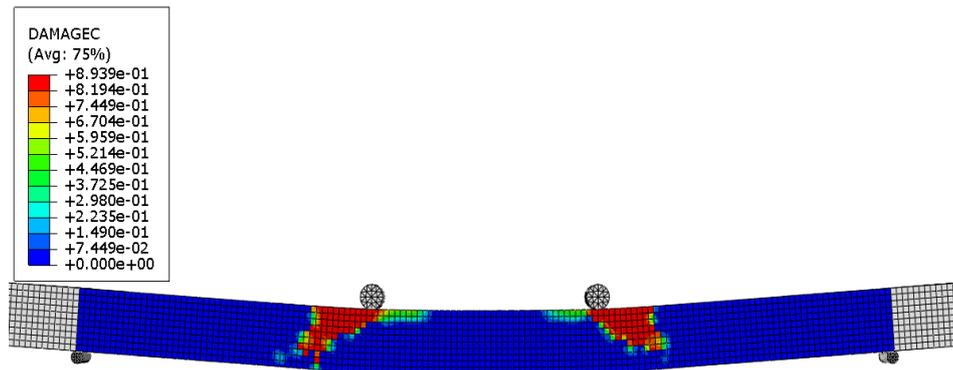


Gambar 6 Kegagalan pengujian lentur benda uji TP1

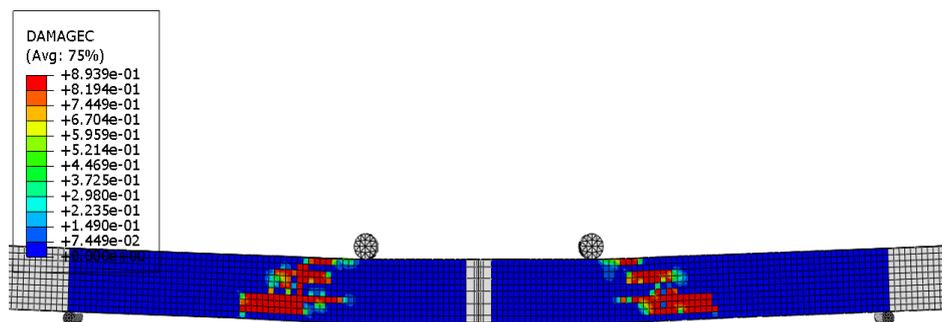


Gambar 7 Kegagalan pengujian lentur benda uji TP2

Pola kegagalan yang terjadi pada masing-masing model tiang pancang baik TP1 dan TP2 juga dapat terlihat gagal akibat tekan sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9. kegagalan yang terjadi pada tiang pancang bukan hanya karena momen lentur saja tetapi terjadi karena geser. Akibat dari ini pada model TP2 terjadi kegagalan yang dimulai dari ujung angkur. Berbeda dengan model TP1 yang mengalami kegagalan pada tengah bentang, pada sisi silinder beban pun terjadi kerusakan terlebih dahulu dibanding model TP2.



Gambar 8 Alur kegagalan beton pada simulasi TP1 akibat tekan

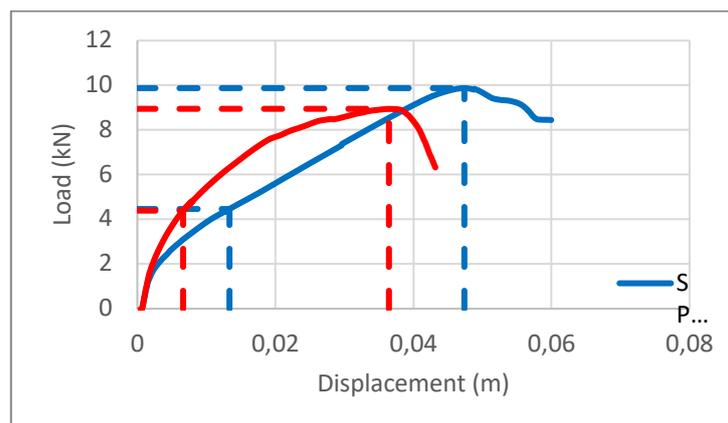


Gambar 9 Alur kegagalan beton pada simulasi TP2 akibat tekan

Distribusi tegangan pada tulangan dan pelat baja telah mencapai titik leleh maksimal 1816 MPa dari 75% UTS (*ultimate tensile strength*) sedangkan tulangan prategang hampir mencapai tegangan leleh atau sebesar 1232 MPa. Tegangan tulangan prategang yang mengalami nilai terbesar ada pada sekitar ujung angkur.

Daya Dukung Lentur

Gambar 10 menyajikan perbandingan kurva load-deflection yang diperoleh dari simulasi elemen hingga dari benda uji. Dari Gambar 10 menunjukkan kekuatan lentur pada TP1 dan TP2, yang mengindikasikan bahwa simulasi berjalan sebagaimana mestinya. Pada keadaan tertentu grafik TP1 tampak lebih landai dari pada grafik TP2. Hal ini terjadi akibat sambungan yang ada pada tiang pancang, sehingga kekakuan yang terjadi pada TP1 lebih rendah dari TP2. Hasil ini juga sesuai dengan artikel yang ditulis (Tang et al. 2023b) dan (Xu et al. 2023b). Tang (2023) menyatakan bahwa tiang pancang yang tidak menggunakan angkur cenderung memiliki kekakuan yang lebih rendah dari pada tiang pancang dengan angkur. Dalam penelitian yang ditulis Xu (2023) disebutkan bahwa terdapat dua jenis bahan uji tiang pancang: pengujian lentur tiang pancang tanpa sambungan dan pengujian sambungan tiang pancang. Pada uji lentur tiang pacang tanpa sambungan tipe yang digunakan adalah X-PRS400-A dan X-PRS400-C, sedangkan pengujian lentur pada sambungan tiang pancang yang digunakan adalah sambungan resilient clamping X-PRS400-A dan X-PRS400-C dan sambungan resilient clamping X-PRS400-A dan X-PRS400-A. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa sambungan resilient clamping dapat meningkatkan kekakuan tiang pancang. Sedangkan tiang pancang yang tidak menggunakan sambungan resilient clamping akan memiliki kekakuan yang lebih rendah dibandingkan tiang pancang yang menggunakan sambungan tersebut.



Gambar 10 kurva load-displacement hasil uji lentur numerik

Tabel 4 Selisih hasil eksperimen dan hasil numerik

| Test sample | M_{cr} (t.m) | $M_{cr'}$ (t.m) | Error % | M_{br} (t.m) | $M_{br'}$ (t.m) | Error % |
|-------------|----------------|-----------------|---------|----------------|-----------------|---------|
| SP1 | 3,00 | 2,90 | 3,29 | 6,23 | 6,42 | 2,99 |
| SP2 | 2,76 | 2,85 | 3,75 | 5,67 | 5,81 | 2,49 |

Hasil eksperimen moment crack (M_{cr}), numerik momen retak ($M_{cr'}$), eksperimen moment break (M_{br}), dan numerik moment break ($M_{br'}$) dinyatakan dalam Tabel 4 di atas. Tabel 4 menunjukkan hasil uji numerik yang hampir mendekati hasil uji eksperimen. Hal ini dalam dilihat dari nilai momen retak TP1 eksperimen 3,00 t.m dan TP1 numerik 2,90 t.m memiliki selisih 3,29% sedangkan nilai momen break TP1 eksperimen 6,23 t.m dan TP1 numerik 6,41 memiliki selisih 2,99%. Pada nilai momen retak TP2 eksperimen 2,76 t.m dan TP2 numerik 2,85 t.m memiliki selisih 3,75% sedangkan nilai momen break TP2 eksperimen 5,67 t.m dan SP2 numerik 5,81 memiliki selisih 2,49%. Jadi selisih masing-masing momen retak dan momen break sekitar 2% - 4%. Model numerik yang dikembangkan ini menunjukkan kecocokan yang sangat baik dengan hasil pengujian TP1 dan TP2 yang memiliki selisih dibawah dari 5%.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian, simulasi elemen hingga pada benda uji TP1 dan TP2 menunjukkan karakteristik kegagalan lentur yang berbeda. Pada TP1, retakan muncul di tengah bentang dan memanjang ke atas hingga terjadi kegagalan pada beton akibat patahnya tulangan baja. Sebaliknya, TP2 mengalami retakan di sekitar ujung angkur, yang disebabkan oleh tercapainya kekuatan tarik pada anchor, sehingga beton gagal menahan beban lebih lanjut. Kedua model juga mengalami kegagalan akibat geser, dengan TP1 gagal di tengah bentang, sementara TP2 mengalami kegagalan yang dimulai dari ujung angkur. Distribusi tegangan maksimum pada tulangan dan pelat baja mencapai 1816 MPa, sedangkan tulangan prategang mencapai 1232 MPa di sekitar ujung angkur. Analisis kurva load-deflection menunjukkan bahwa kekakuan pada TP1 lebih rendah dibanding TP2 karena adanya sambungan pada tiang pancang, yang sesuai dengan penelitian sebelumnya. Kesimpulan ini didukung oleh hasil uji numerik yang mendekati hasil eksperimen dengan selisih error antara 2%-4%, menunjukkan kecocokan yang baik dalam model numerik yang dikembangkan.

REFERENSI

- Bhandari, Anil, and Jie Han. 2009. "Evaluation of High-Capacity Composite Spun Piles." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2116(1):53–61. doi: 10.3141/2116-08.
- Burak, Evirgen, and Tuncan Ahmet. 2014. "Determination of Frictional Behaviour between Concrete and Steel Tube Interaction."
- Carreira, Domingo J., and Chu Kuang-Han. 1986. "Stress-Strain Relationship for Reinforced Concrete in Tension." *ACI Journal Proceedings* 83(1). doi: 10.14359/1756.
- Coronado, Carlos A., and Maria M. Lopez. 2010. "Numerical Modeling of Concrete-FRP Debonding Using a Crack Band Approach." *Journal of Composites for Construction* 14(1):11–21. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000044.

- Dong, Zhongji, Faning Dang, and Jun Gao. 2023. "Experimental Study on the Flexural Behavior of Connected Precast Concrete Square Piles" edited by D. Song. *Advances in Civil Engineering* 2023:1–12. doi: 10.1155/2023/5731841.
- Giuseppe, Campione. 2023. "Selection of Best Models for Load-Carrying Capacity of Square Column Foundations." *Engineering Structures* 279:115609. doi: 10.1016/j.engstruct.2023.115609.
- He, Lin, and Jia-lin Wang. 2015. "Method of Equivalent Load and Temperature Reduction on Prestressing Tendon for Effective Prestress Simulation." *Journal of Highway and Transportation Research and Development* 31(11):75–80. doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.
- Huang, G. L., R. H. Yan, and W. Y. Zhou. 2011. "Experimental Study on Joint Flexural Bearing Capacity of Prestressed Concrete Pipe Piles." *J. Jiangsu Univ. Technol* 25:209-212.
- International Federation for Structural Concrete, ed. 2008. *Constitutive Modelling of High Strength/High Performance Concrete*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib).
- JIS (Japan Industrial Standard). 2010. *JIS A 5373:2010 Precast Prestressed Concrete Products*. Japan: Japanese Standards Association.
- Liang, Jia-hui, Qiu-yan Fan, and Kuo Qin. 2022. "Influence of Karst Caves on the Pile's Bearing Characteristics-A Numerical Study." *Frontiers in Earth Science* 9:754330. doi: 10.3389/feart.2021.754330.
- Liu, F. R., L. Jia, and Cheng Li. 2008. "Test Study on Welding Joint Flexural Bearing Capacity of Prestressed Concrete Hollow Square Pile." *Journal of Wuhan University of Technology* 30:105–8.
- Logan, Daryl L. 2007. *A First Course in the Finite Element Method*. 4th ed. Southbank: Thomson.
- Murthy, A. Rama Chandra, G. S. Palani, and R. Iyer Nagesh. 2009. "State-of-the-Art Review on Fracture Analysis of Concrete Structural Components." *Structural Engineering Research Centre* 34:345–67.
- PT Wijaya Karya Beton Tbk. 2016. "Gambar Tiang Pancang Segi Empat, Tipe: 250 x 250 Mm."
- Saleem, Muhammad Umair, Hassan Khurshid, Hisham Jahangir Qureshi, and Zahid Ahmad Siddiqi. 2018. "A Simplified Approach for Analysis and Design of Reinforced Concrete Circular Silos and Bunkers." *The Open Construction and Building Technology Journal* 12(1):234–50. doi: 10.2174/1874836801812010234.
- Tang, Mengxiong, Zao Ling, and Yuliang Qi. 2023a. "Bending Strength of Connection Joints of Prestressed Reinforced Concrete Pipe Piles." *Buildings* 13(1):119. doi: 10.3390/buildings13010119.
- Tang, Mengxiong, Zao Ling, and Yuliang Qi. 2023b. "Bending Strength of Connection Joints of Prestressed Reinforced Concrete Pipe Piles." *Buildings* 13(1):119. doi: 10.3390/buildings13010119.
- Terán-Torres, Bernardo T., Adolfo A. Elías-Chávez, Pedro L. Valdez-Tamez, Jose A. Rodríguez-Rodríguez, and César A. Juárez-Alvarado. 2023. "Flexural Stiffness and Crack Width of Partially Prestressed Beams with Unbonded Tendons." *Buildings* 13(11):2717. doi: 10.3390/buildings13112717.
- Wahalathantri, Buddhi, David Thambiratnam, Tommy Chan, and Sabrina Fawzia. 2011. "A Material Model for Flexural Crack Simulation in Reinforced Concrete Elements Using Abaqus." *In Proceedings of the First International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing, Queensland University Of Technology, Brisbane, Australia* 260–64.
- Wang, Bo, Lei Qi, and Yongdong Yang. 2022. "Experimental Study on Bending Resistance of New Type Joint of Prestressed Concrete Pipe Pile." *Symmetry* 14(9):1920. doi: 10.3390/sym14091920.
- Xu, Qianwei, Jinli Xie, Linhai Lu, Chaojun Wu, Yufeng Han, and Hui Yan. 2024. "Flexural Behavior on a Novel Socket Joint Connecting Precast Piles: A Full-Size Experimental Evaluation." *Case Studies in Construction Materials* 20:e02781. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02781.
- Xu, Yunsheng, Zhongfan Chen, Ji Fan, Zhiqiang Li, Kai Zhang, and Xuesong Tu. 2023a. "Study on the Flexural Performance of Prestressed Concrete Solid Square Piles and Resilient Clamping Connections." *KSCE Journal of Civil Engineering* 27(1):285–98. doi: 10.1007/s12205-022-0148-8.
- Xu, Yunsheng, Zhongfan Chen, Ji Fan, Zhiqiang Li, Kai Zhang, and Xuesong Tu. 2023b. "Study on the Flexural Performance of Prestressed Concrete Solid Square Piles and Resilient Clamping Connections." *KSCE Journal of Civil Engineering* 27(1):285–98. doi: 10.1007/s12205-022-0148-8.
- Yang, Zhi-jian, and Yue-qiang Lei. 2020. "Finite Element Analysis of the Shear Behavior of Prestressed High-Strength Concrete Piles." *Engineering Mechanics* 37:200–207. doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.04.S036.