

Analisis Pilecap Proyek Pabrik Kertas Tanjung Morawa dengan Metode Strut-and-Tie Berbasis CAST

Raja Akibarung Banurea^{1*}, Samsul Abdul Rahman Sidik Hasibuan², Jaka Suranto³

¹⁻³Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area, Indonesia

*Penulis korespondensi, email: rajapakpak1689@gmail.com

Abstrak— Pilecap merupakan elemen pondasi yang tergolong daerah diskontinuitas (D-Region) sehingga distribusi tegangannya tidak dapat dianalisis secara akurat menggunakan teori lentur konvensional. Penelitian ini bertujuan menganalisis perilaku aliran gaya, mengevaluasi kapasitas pilecap beton bertulang menggunakan Strut-and-Tie Model (STM), serta mengkaji pengaruh penerapan lebar efektif terhadap efisiensi desain pada Proyek Pembangunan Pabrik Kertas Tanjung Morawa. Metode penelitian meliputi analisis elemen hingga menggunakan SAP2000 untuk memperoleh lintasan tegangan utama, penyusunan model STM, perhitungan kapasitas strut, tie, dan zona nodal berdasarkan SNI 2847:2019, serta verifikasi menggunakan perangkat lunak Computer Aided Strut and Tie (CAST). Hasil penelitian menunjukkan bahwa aliran gaya tekan utama membentuk jalur diagonal dari kolom menuju kelompok tiang, sedangkan gaya tarik terkonsentrasi pada serat bawah pilecap. Verifikasi menunjukkan rata-rata force ratio hasil perhitungan manual sebesar 0,64 dan hasil CAST sebesar 0,63 sehingga model yang dikembangkan dinilai konsisten dan andal. Penerapan lebar efektif dengan mengurangi lebar kerja pilecap dari 2600 mm menjadi 1800 mm meningkatkan rata-rata force ratio dari 0,63 menjadi 0,82 tanpa melampaui batas kapasitas struktur. Disimpulkan bahwa integrasi STM, analisis lintasan tegangan, dan verifikasi CAST mampu menghasilkan desain pilecap yang lebih rasional dan efisien. Pendekatan ini direkomendasikan sebagai alternatif perancangan pilecap beton bertulang pada D-Region sesuai ketentuan SNI 2847:2019.

Kata kunci: Strut-and-Tie Model; Pile Cap; CAST; D-Region; SNI 2847:2019.

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

1. Pendahuluan

Pilecap merupakan elemen kunci pondasi tiang pancang yang berfungsi menyalurkan beban kolom ke kelompok tiang dan tanah dasar[1]. Pada struktur bangunan tinggi maupun infrastruktur berat, perencanaan pile cap yang kurang tepat dapat menyebabkan distribusi beban yang tidak merata pada kelompok tiang. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan penurunan diferensial dan menurunkan kinerja sistem pondasi secara keseluruhan[2]. Secara tradisional, analisis pilecap mengandalkan teori lentur hipotesis Bernoulli yang mengasumsikan distribusi regangan linier. Pendekatan konvensional ini hanya ideal untuk daerah B-Region yang homogen, namun tidak lagi valid untuk pilecap masif yang tergolong balok tinggi (deep beam) karena adanya diskontinuitas geometri dan beban[3], [4]. Oleh karena itu, SNI 2847:2019 secara eksplisit membedakan wilayah B-Region dan D-Region serta merekomendasikan metode khusus untuk zona diskontinuitas tersebut.

Sebagai elemen yang masuk dalam D-Region, pilecap mengalami konsentrasi tegangan kompleks di sekitar kolom dan kepala tiang. Aliran gayanya tidak lagi mengikuti pola lentur sederhana, melainkan membentuk medan tegangan tekan diagonal dan tarik internal yang saling berinteraksi membentuk pola gaya di sekitar nodal. Untuk memodelkan perilaku nyata ini, Strut-and-Tie Model (STM) digunakan dengan merepresentasikan beton bertulang sebagai rangka batang internal yang terdiri dari elemen tekan (strut), elemen tarik (tie), dan zona nodal [5], [6]. Berakar pada teorema batas bawah (lower bound) teori plastisitas, STM memberikan cara pandang yang lebih intuitif untuk mengevaluasi kapasitas dan kebutuhan penulangan daerah diskontinuitas secara lebih akurat dibandingkan metode tradisional, selama memenuhi syarat keseimbangan gaya dan konsistensi geometri struktur [7], [8].

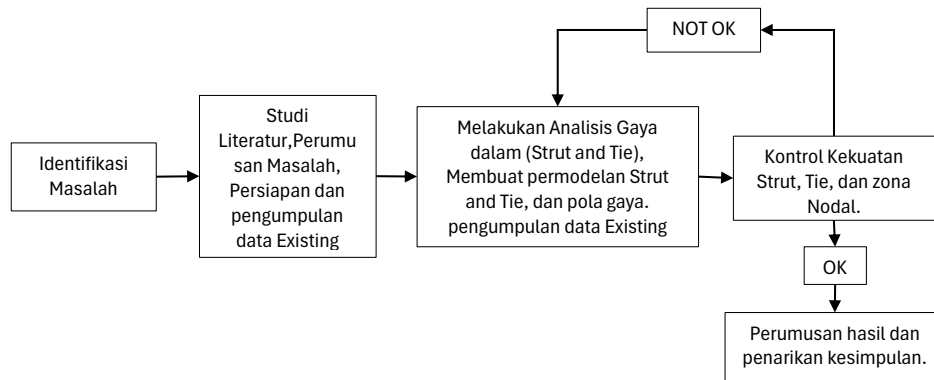
Penerapan STM pada pilecap telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam berbagai riset. Pengujian eksperimental membuktikan bahwa penulangan berbasis STM menjadi lebih fokus mengikuti jalur aliran gaya sehingga meningkatkan keamanan dan efisiensi struktur, meskipun dapat terjadi penyesuaian volume total tulangan [5], [9], [10]. Integrasi STM dengan analisis elemen hingga (finite element modeling) terbukti meningkatkan akurasi prediksi kapasitas beban serta perilaku retak, dan telah dimanfaatkan untuk menyusun panduan praktis penempatan komponen rangka batang pada infrastruktur massif [11], [12]. Efektivitas implementasi ini diperkuat oleh perangkat lunak khusus seperti Computer Aided Strut and Tie (CAST) yang mampu memvisualisasikan model, menghitung gaya internal, dan memverifikasi kapasitas elemen berdasarkan regulasi ACI/SNI [13].

Tantangan rekayasa muncul pada pilecap dengan dimensi fisik besar, karena medan tegangan cenderung terpusat pada jalur inti sehingga seluruh lebar beton tidak bekerja penuh secara merata. Pengabaian faktor distribusi lateral dan lebar efektif strut berpotensi menyebabkan kalkulasi kapasitas struktur menjadi terlalu tinggi (overestimated) [14]. Studi yang secara eksplisit mengintegrasikan konsep lebar efektif dengan analisis STM berbantuan CAST dalam koridor SNI masih sangat terbatas, sementara pemanfaatan CAST pada pilecap proyek nyata di Indonesia juga jarang dilaporkan. Berangkat dari kesenjangan tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis pilecap beton bertulang Proyek Pembangunan Pabrik Kertas Tanjung Morawa mengacu pada SNI 2847:2019 dengan memanfaatkan hasil analisis SAP2000 untuk memodelkan aliran gaya internal menjadi rangka batang, mengevaluasi kapasitas komponen STM menggunakan kombinasi hitungan manual dan CAST, serta mengkaji pengaruh lebar efektif terhadap efisiensi desain melalui perbandingan nilai force ratio.

Berbeda dengan penelitian sebelumnya, studi ini mengintegrasikan pemetaan lintasan tegangan hasil analisis elemen hingga SAP2000, penyusunan model STM, evaluasi kapasitas elemen strut, tie, dan nodal secara manual, serta verifikasi gaya internal menggunakan CAST dengan penekanan khusus pada pengaruh lebar efektif pilecap terhadap force ratio. Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan penelitian ini adalah: (1) menganalisis perilaku aliran tegangan dan mengidentifikasi jalur strut–tie pada pilecap Proyek Pembangunan Pabrik Kertas Tanjung Morawa sebagai D-Region, (2) menyusun dan mengevaluasi konfigurasi STM pilecap sesuai SNI 2847:2019 yang diverifikasi dengan hasil analisis CAST, dan (3) mengkaji pengaruh variasi lebar efektif pilecap terhadap nilai force ratio dan efisiensi pemanfaatan kapasitas beton dan baja sehingga diperoleh desain yang lebih rasional dan tetap memenuhi persyaratan keamanan struktur.

2. Metode

Penelitian ini dirancang untuk menganalisis perilaku dan kapasitas pilecap beton bertulang menggunakan Strut and Tie Model (STM) berbantuan perangkat lunak Computer Aided Strut and Tie (CAST). Secara garis besar, penelitian dimulai dari studi literatur, pengumpulan data proyek, analisis lintasan tegangan, penyusunan model STM, perhitungan manual, verifikasi dengan CAST, hingga optimasi lebar efektif dan penarikan Kesimpulan. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1, yang menggambarkan tahapan utama mulai dari identifikasi masalah hingga analisis hasil.



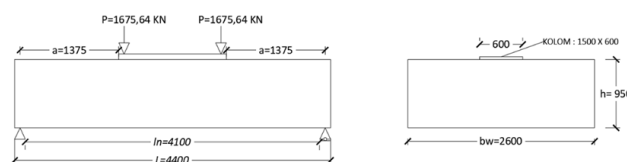
Gambar 1. Bagan Alir Tahapan Penelitian

Objek penelitian adalah pilecap pada Proyek Pembangunan Pabrik Kertas Tanjung Morawa dengan bentang keseluruhan (L) 4400 mm, bentang bersih (L_n) 4100 mm, lebar pilecap (b_w) 2600 mm, dan tinggi total (h) 950 mm. Pilecap menumpu kolom berukuran 1500 mm × 600 mm dan kelompok tiang pancang yang diidealisasikan sebagai perletakan sederhana pada kepala tiang. Mutu beton yang digunakan adalah f'_c 30 MPa dan mutu baja tulangan f_y 420 MPa, sedangkan beban aksial ultimit kolom sebesar 1675,64 kN diperoleh dari hasil perencanaan struktur atas proyek. Geometri pilecap dan konfigurasi tiang pancang ditunjukkan pada Gambar 2.

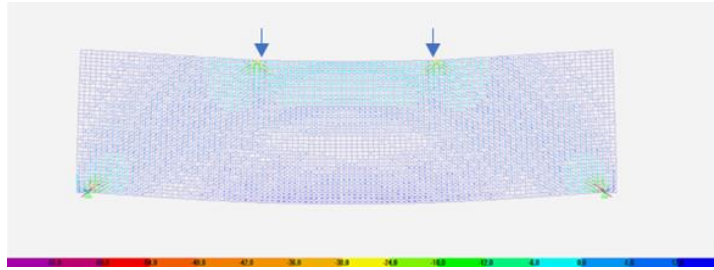
Analisis numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000 dengan memodelkan pilecap sebagai elemen shell tebal setebal 950 mm untuk merepresentasikan perilaku balok tinggi pada daerah D-Region. Mesh elemen disusun lebih rapat di zona sekitar kolom dan kepala tiang dengan ukuran elemen rata-rata sekitar 100 × 100 mm. Kepala tiang dimodelkan sebagai perletakan sederhana dengan translasi vertikal tertahan dan rotasi bebas, sedangkan kolom direpresentasikan sebagai beban terfaktor P_u yang bekerja pada area tumpuan kolom. Kombinasi pembebanan mengikuti ketentuan SNI 2847:2019 untuk beban aksial ultimit, dan analisis dilakukan dalam kondisi elastis linier untuk memperoleh distribusi tegangan dan lintasan tegangan utama. Dari hasil analisis SAP2000, kontur tegangan dan principal stress trajectories diekstraksi untuk mengidentifikasi jalur gaya tekan dominan dari kolom menuju tiang pancang serta jalur gaya tarik pada serat bawah pilecap yang kemudian menjadi dasar penyusunan model STM, seperti diperlihatkan pada Gambar 3.

Berdasarkan lintasan tegangan hasil analisis SAP2000, pilecap diidealisasikan sebagai rangka batang trapesium yang menghubungkan nodal pada kolom dan kepala tiang pancang. Geometri rangka batang (geometry truss) ditentukan sedemikian rupa agar mengikuti jalur aliran gaya tekan dan tarik utama yang teridentifikasi pada medan tegangan, dengan strut diagonal dan tie longitudinal yang memenuhi rekomendasi SNI 2847:2019 dan CEB FIP Model Code. Model rangka batang ditunjukkan pada Gambar 4.

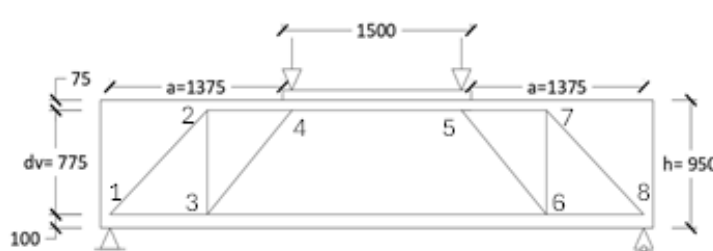
Model rangka batang tersebut kemudian dianalisis menggunakan SAP2000 untuk memperoleh gaya batang internal pada setiap elemen strut dan tie. Gaya gaya ini merupakan hasil analisis numerik rangka batang dan digunakan sebagai dasar penentuan gaya terfaktor F_u pada masing masing elemen dalam evaluasi kapasitas STM. Ringkasan gaya batang hasil analisis SAP2000 disajikan pada Tabel 1.



Gambar 2. Pemodelan Geometri Pilecap



Gambar 3. Hasil aliran Tegangan (Stress Path) Menggunakan SAP2000



Gambar 4. Model rangka batang (truss model) untuk pilecap

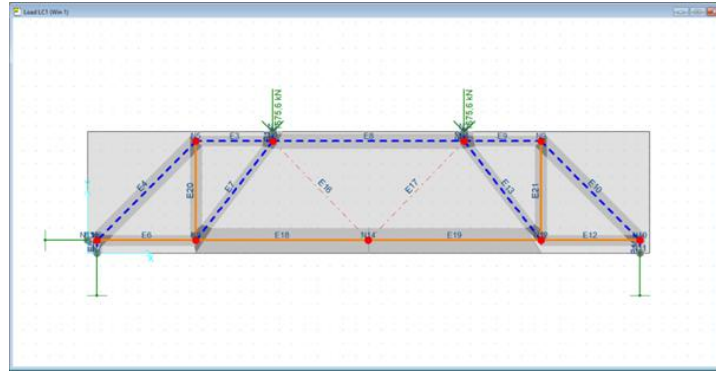
Tabel 1. Gaya batang strut dan tie

Batang	Jenis Gaya	Gaya Terfaktor (F_u/P_u) (kN)
F12	Tekan (<i>Strut</i>)	2267,58
F13	Tarik (<i>Tie</i>)	1527,79
F23	Tarik (<i>Tie</i>)	1675,64
F24	Tekan (<i>Strut</i>)	1527,79
F34	Tekan (<i>Strut</i>)	2051,05
F36	Tarik (<i>Tie</i>)	2710,06

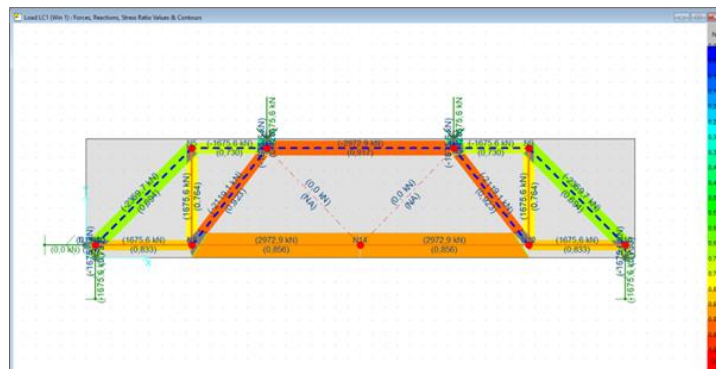
Pada tahap berikutnya, kapasitas nominal strut, tie, dan zona nodal dihitung secara manual menggunakan formulasi STM berbasis SNI 2847:2019 dengan parameter kuat tekan efektif beton f_{ce} , faktor efisiensi strut β_s , dan faktor efisiensi nodal β_n serta luas penampang efektif elemen. Gaya terfaktor F_u pada setiap batang diambil dari gaya batang hasil analisis SAP2000 pada rangka batang yang telah dikalikan faktor beban sesuai ketentuan SNI. Force ratio tiap elemen didefinisikan sebagai $F_u/\phi F_n$, yaitu rasio antara gaya terfaktorasi dan kapasitas nominal tereduksi, yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat pemanfaatan kapasitas elemen.

Untuk memverifikasi hasil perhitungan manual, model STM yang sama dimodelkan dalam perangkat lunak CAST dengan memasukkan geometri pilecap, posisi nodal, dan konfigurasi strut-tie sesuai hasil analisis sebelumnya. Parameter material beton (f'_c 30 MPa) dan baja tulangan (f_y 420 MPa) diinput sesuai data proyek, sedangkan klasifikasi nodal (C-C-C, C-C-T) mengikuti kombinasi gaya tekan dan tarik yang bertemu pada tiap nodal sesuai ketentuan SNI/ACI yang terintegrasi di CAST, seperti dapat dilihat pada gambar 5. CAST kemudian menghitung gaya batang, kapasitas nominal, serta utilization ratio (force ratio) untuk setiap elemen strut, tie, dan zona nodal. distribusi utilization ratio dapat dilihat pada Gambar 6.

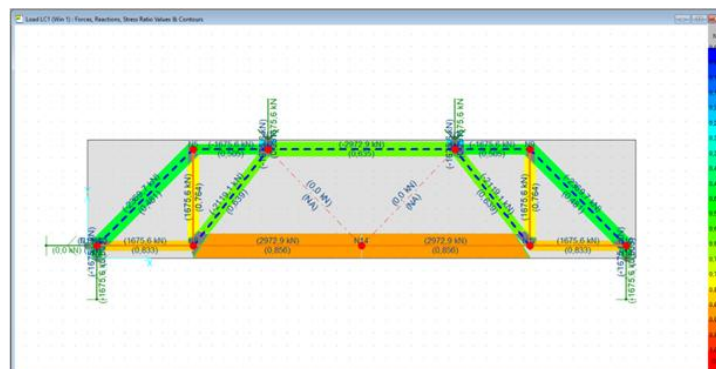
Pada tahap akhir, dilakukan analisis pengaruh lebar efektif pilecap dengan membatasi lebar kerja penampang dari 2600 mm menjadi 1800 mm berdasarkan konsep medan tegangan dan terkait pemilihan lebar efektif pada elemen beton masif. Reduksi lebar ini mencerminkan fakta bahwa distribusi tegangan pada D-Region cenderung terkonsentrasi pada jalur inti di sekitar lintasan strut, sehingga sebagian lebar pilecap tidak termanfaatkan secara optimal. Model STM dan CAST diperbarui sesuai lebar efektif tersebut, kemudian gaya batang, kapasitas nominal, dan force ratio dihitung kembali dengan prosedur yang sama. Skematik lebar efektif ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 5. Model STM pilecap pada CAST



Gambar 6. Distribusi utilization ratio elemen pada CAST



Gambar 7. Skematik pilecap lebar efektif 1800 mm.

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis elemen hingga dengan SAP2000 menunjukkan konsentrasi tegangan yang tinggi di sekitar pertemuan kolom dan kepala tiang pancang, dengan lintasan tegangan utama (principal stress trajectories) membentuk pola diagonal dari kolom menuju tiang. Jalur gaya tekan utama cenderung berkumpul pada zona inti pilecap, sedangkan gaya tarik terkonsentrasi pada serat bawah penampang, khususnya di antara kepala tiang. Pola tersebut menegaskan bahwa pilecap berperilaku sebagai daerah diskontinuitas (D-Region) yang tidak dapat direpresentasikan secara memadai dengan pendekatan balok lentur konvensional.

Konfigurasi aliran gaya yang terbentuk sejalan dengan konsep medan tegangan pada balok tinggi, di mana distribusi tegangan dominan mengikuti jalur strut diagonal dan tie tarik internal di sekitar tulangan utama. Hasil ini konsisten dengan literatur terdahulu [15] dan berbagai penelitian terkait pilecap maupun pier cap yang menunjukkan bahwa beban kolom pada elemen massif cenderung dialihkan ke tumpuan melalui sistem jalur tekan langsung (direct strut) dan jalur tarik bawah. Dengan demikian, penggunaan Strut-and-Tie Model (STM) pada pilecap yang dikaji dapat dianggap tepat secara mekanis karena mampu

merepresentasikan jalur aliran gaya aktual yang teramati pada hasil analisis numerik.

Berdasarkan model rangka batang trapesium yang disusun, gaya batang pada elemen strut dan tie dihitung dengan metode keseimbangan nodal menggunakan beban aksial terfaktorasi Pu. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa strut diagonal utama mampu menahan gaya tekan pada kisaran 2648,17–5925,26 kN, sementara tie utama menahan gaya tarik sekitar 1581,23–2731,21 kN. Nilai kapasitas nominal serta force ratio untuk setiap elemen disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kapasitas batang elemen strut dan tie

Element	Fn (KN)	ΦF_n (KN)	Fu (KN)	Efisiensi (%)	Force Ratio
Tie 1-3	1756,92	1581,23	1527,79	96,62	0,97
Tie 3-6	3034,68	2731,21	2710,06	99,23	0,99
Tie 3-2	1916,64	1724,98	1675,64	97,14	0,97
Strut 2-4	4413,62	3310,21	1527,79	46,15	0,46
Strut 3-4	7900,34	5925,26	2051,05	34,62	0,35
Strut 1-2	6550,79	4913,09	2267,58	46,15	0,46
Strut 4-5	6264,50	4698,37	2710,60	57,69	0,58
Strut 2-1	6264,50	4698,37	2267,58	48,26	0,48
Strut 4-3	4413,62	3310,21	2051,05	61,96	0,62
Strut 5-4	6264,50	4698,37	2710,60	57,69	0,58
Strut 4-2	3530,89	2648,17	1675,64	63,28	0,63

Dari Tabel 3 terlihat bahwa sebagian besar strut bekerja dengan force ratio sekitar 0,35–0,63, menunjukkan bahwa kapasitas tekan beton pada strut dan zona nodal masih memiliki cadangan cukup besar. Sebaliknya, tie utama memiliki force ratio sekitar 0,97–0,99, sehingga elemen tarik ini menjadi komponen paling kritis dalam sistem STM. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penulangan longitudinal pada tie harus direncanakan dengan cermat karena mendekati kapasitas nominal, sedangkan peningkatan kapasitas strut tidak akan memberikan peningkatan signifikan terhadap kinerja global jika tie tetap menjadi pengendali desain.

Temuan ini sejalan dengan sejumlah studi eksperimental dan numerik sebelumnya, [5], [10], di mana jalur tie pada pilecap terbukti menjadi elemen pengendali kapasitas karena memikul gaya tarik utama akibat distribusi beban kolom ke kelompok tiang. Dengan demikian, model STM yang dikembangkan tidak hanya menggambarkan pola aliran gaya, tetapi juga mampu mengidentifikasi elemen kritis yang perlu menjadi fokus dalam perencanaan tulangan dan pengendalian retak..

Model STM yang sama kemudian diverifikasi menggunakan CAST untuk memastikan konsistensi antara perhitungan manual dan pemodelan berbasis perangkat lunak. CAST menghitung gaya batang, kapasitas nominal, dan utilization ratio (force ratio) setiap elemen berdasarkan input geometri, material, dan klasifikasi nodal yang mengacu pada ketentuan SNI/ACI. Hasil perbandingan yang dirangkum pada Tabel 4 menunjukkan bahwa rata-rata force ratio dari CAST sebesar 63,39%, sangat dekat dengan rata-rata force ratio hasil perhitungan manual sebesar 64,44%.

Tabel 4. Perbandingan force ratio antara STM manual dan CAST.

Element	Efisiensi(%)		Force Ratio	
	Manual	Cast	Manual	Cast
Tie 1-3	96,62	83,3	0,97	0,83
Tie 3-6	99,23	85,6	0,99	0,86
Tie 3-2	97,14	76,4	0,97	0,76
Strut 2-4	46,15	50,5	0,46	0,51
Strut 3-4	34,62	63,9	0,35	0,64

Element	Efisiensi(%)		Force Ratio	
	Manual	Cast	Manual	Cast
Strut 1-2	46,15	48,1	0,46	0,48
Strut 4-5	57,69	63,5	0,58	0,64
Strut 2-1	48,26	48,1	0,48	0,48
Strut 4-3	61,96	63,9	0,62	0,64
Strut 5-4	57,69	63,5	0,58	0,64
Strut 4-2	63,28	50,5	0,63	0,51
Rata-rata	64,44	63,39	0,64	0,63

Perbedaan force ratio pada masing-masing elemen umumnya berada di bawah 5%, dengan kecenderungan tie utama menunjukkan nilai utilization yang sedikit lebih rendah pada CAST dibandingkan hasil manual, sedangkan beberapa strut menunjukkan nilai sedikit lebih tinggi. Pola ini masih dapat diterima karena CAST menerapkan idealisasi tertentu pada lebar strut, klasifikasi nodal, serta faktor reduksi kapasitas yang terkadang lebih konservatif dibandingkan asumsi manual. Deviasi yang relatif kecil ini mengindikasikan bahwa model STM yang dikembangkan telah memenuhi syarat keseimbangan gaya dan konsistensi geometri yang disyaratkan dalam teori batas bawah plastisitas, sehingga layak digunakan sebagai dasar perancangan pilecap mengacu SNI 2847:2019.

Dengan demikian, verifikasi melalui CAST tidak hanya mengkonfirmasi keandalan perhitungan manual, tetapi juga menunjukkan bahwa konfigurasi strut-tie yang dipilih telah mewakili mekanisme transfer gaya utama pada pilecap, sehingga memperkuat validitas pendekatan STM untuk elemen pondasi masif di D-Region.

Analisis awal dengan lebar penuh 2600 mm menunjukkan bahwa banyak elemen strut bekerja pada force ratio relatif rendah, sehingga kapasitas tekan beton pada sebagian lebar pilecap tidak termanfaatkan secara optimal. Hal ini konsisten dengan hasil analisis lintasan tegangan, yang memperlihatkan konsentrasi medan tegangan pada jalur inti di bawah kolom dan di sekitar kelompok tiang, sementara bagian tepi pilecap mengalami tegangan yang jauh lebih kecil. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penggunaan seluruh lebar geometris sebagai lebar kerja strut berpotensi mengakibatkan estimasi kapasitas yang terlalu tinggi (overestimated) dibandingkan perilaku aktual.

Untuk mengatasi hal tersebut, lebar efektif pilecap dikurangi menjadi 1800 mm berdasarkan pola dispersi tegangan dan rekomendasi literatur mengenai pemilihan lebar strut yang realistis pada elemen beton masif. Hasil analisis ulang menunjukkan bahwa force ratio beberapa strut utama meningkat dan mendekati kisaran 0,8–0,9, sedangkan tie tetap berada pada level pemanfaatan tinggi yang relatif tidak berubah. Rata-rata force ratio elemen utama meningkat dari sekitar 0,63 menjadi 0,82, yang menandakan bahwa kapasitas beton dan baja pada penampang efektif dimanfaatkan secara lebih seimbang tanpa melampaui batas keruntuhan. Perbandingan force ratio antara lebar penuh dan lebar efektif disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Force ratio elemen utama: lebar penuh vs lebar efektif.

Element	Efisiensi(%)		Force Ratio	
	Eksisting	Optimasi	Eksisting	Optimasi
Tie 1-3	83,30	83,30	0,83	0,83
Tie 3-6	85,60	85,60	0,86	0,86
Tie 3-2	76,40	76,40	0,76	0,76
Strut 2-4	50,50	73,00	0,51	0,73
Strut 3-4	63,90	92,30	0,64	0,92
Strut 1-2	48,10	69,40	0,48	0,69

Element	Efisiensi(%)		Force Ratio	
	Eksisting	Optimasi	Eksisting	Optimasi
Strut 4-5	63,50	91,70	0,64	0,92
Strut 2-1	48,10	69,40	0,48	0,69
Strut 4-3	63,90	92,30	0,64	0,92
Strut 5-4	63,50	91,70	0,64	0,92
Strut 4-2	50,50	73,00	0,51	0,73
Rata-rata	63,39	81,65	0,63	0,82

Peningkatan pemanfaatan kapasitas ini menunjukkan bahwa konsep lebar efektif menghasilkan desain yang lebih rasional dan ekonomis karena menghindari penggunaan volume beton yang tidak berkontribusi signifikan terhadap pemikul beban. Temuan ini menekankan pentingnya pemilihan lebar strut yang realistis pada elemen D-Region untuk menghindari overestimation kapasitas dan untuk mengarahkan penulangan sesuai jalur aliran gaya yang dominan. Dengan demikian, penerapan lebar efektif pada pilecap proyek ini dapat menjadi referensi praktis bagi perencana dalam mengoptimalkan desain pilecap masif sesuai SNI 2847:2019.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, Pilecap pada Proyek Pembangunan Pabrik Kertas Tanjung Morawa terbukti berperilaku sebagai D-Region, dengan aliran gaya tekan utama menyebar secara diagonal dari kolom ke kelompok tiang dan gaya tarik terkonsentrasi pada serat bawah, sehingga model STM trapesium mampu merepresentasikan mekanisme transfer gaya yang terjadi. Tie utama teridentifikasi sebagai elemen paling kritis karena bekerja mendekati kapasitas nominal, sedangkan sebagian besar strut dan zona nodal masih memiliki cadangan kapasitas sehingga desain tulangan perlu difokuskan pada jalur tie.

Hasil verifikasi menunjukkan bahwa rata-rata force ratio dari perhitungan STM manual (64,44%) sangat dekat dengan hasil CAST (63,39%), dengan perbedaan umumnya di bawah 5%, sehingga konfigurasi STM dan asumsi perancangan yang digunakan dapat dianggap konsisten dan andal sebagai dasar perancangan pilecap sesuai SNI 2847:2019.

Penerapan lebar efektif dengan membatasi lebar kerja pilecap dari 2600 mm menjadi 1800 mm meningkatkan rata-rata force ratio elemen utama dari sekitar 0,63 menjadi 0,82 tanpa melampaui batas keruntuhan, yang menunjukkan pemanfaatan kapasitas beton dan baja yang lebih seimbang dan rasional. Dengan demikian, integrasi STM berbasis lintasan tegangan, verifikasi CAST, dan konsep lebar efektif dapat direkomendasikan sebagai pendekatan desain yang lebih efisien untuk pilecap beton bertulang pada D-Region..

Daftar Pustaka

- [1] Jonathan Gopas Sinaga, Nelly Arta Sari Siallagan, and and Suhairiani, “Teknik Pelaksanaan Pekerjaan pilecap pada pondasi gedung,” vol. 6.1, pp. 27–33, Jul. 2020.
- [2] Y. D. Setiyarto and J. O. Joris, “Pengaruh Ketebalan Pile Cap Abutmen Jembatan terhadap Distribusi Beban pada Tiang Fondasi,” *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 22, no. 1, pp. 25–43, Apr. 2026, doi: 10.28932/jts.v22i1.10115.
- [3] Sukarman, Djoko Sulisty, and Inggar Septhia Irawati, “Analisis Regangan Baja Tulangan Pada Struktur Pile Cap Empat Tiang Metode Strut And Tie Model,” Yogyakarta, Nov. 2019.
- [4] *SNI 2847-2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Jl. M.H. Thamrin No.8, Kebon Sirih, Jakarta 10340: Badan Standart Nasional, 2019. Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: : www.bsn.go.id
- [5] A. Wijaya, N. Jakarta, J. D. GA Siwabessy, and K. Beji, “Pile Cap Design Using the Strut and Tie Model (STM) Method,” Kota Depok, Jawa Barat, Indonesia, May 2024.

- [6] Fery Riswanto and Pariatmono Sukamdo, “KEKUATAN BETON BERTULANG PIERHEAD JEMBATAN KANTILEVER GANDA – KAJIAN NUMERIK STRUT – AND - TIE METHOD (STM) SNI 28472019 ,” *Jurnal Infrastruktur*, vol. 9, Aug. 2023.
- [7] B. S. Abdelwahed, “Analytical and modeling studies on discontinuity regions in reinforced concrete elements: review article,” Apr. 01, 2026, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s41062-026-02537-w.
- [8] M. S. Lourenço, M. F. Ruiz, J. Blaauwendraad, S. Bousias, L. C. Hoang, J. Mata-Falcón, C. Meléndez, B.I. Mihaylov, M. P. Ferreira, and D. V. Faria, "Design and assessment of concrete structures with strut-and-tie models and stress fields: From simple calculations to detailed numerical analysis," *Structural Concrete*, 2022. DOI: 10.1002/suco.202200647..
- [9] Shidqy Ahmad Renald, “DESAIN SAMBUNGAN KOLOM MIRING DENGAN BALOK MENGGUNAKAN METODE STRUT AND TIE,” 2021.
- [10] Maulana Agung Sedayu, Djoko Sulistyo, and n Akhmad Aminullah, “Eksperimen Pada Struktur Pile Cap Tiga Tiang Dengan Metode Strut And Tie Model,” Yogyakarta, Nov. 2019.
- [11] J. Chandra and S. Teng, “Simplified Strut-and-Tie Model for Shear Strength Prediction of Reinforced Concrete Low-Rise Walls,” *ACI Struct. J.*, vol. 119, no. 2, pp. 61–74, Mar. 2022, doi: 10.14359/51734330.
- [12] P. Ginaya Taufik, D. Sulistyo, and A. Aminullah, “STRUCTURAL BEHAVIOR OF PILE CAP 3 PILE WITH EKSENTRIC LOAD DESIGNED USING STRUT AND TIE MODEL WITH NUMERICAL METHOD.” [Online]. Available: <http://ejournal.umm.ac.id/index.php/jmts/article/view/7483>
- [13] Tonny and M.Aswin, “Aplikasi Strut-And-Tie Model Pada Analisis Balok Tinggi Berdasarkan Sni 2847-2019 Dan Model-Model Truss Yang Sudah Established Serta Computer Aided Strut And Tie,” Medan, Sumatera Utara, Aug. 2020. Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: <http://repositori.usu.ac.id/handle/123456789/26934>
- [14] Febi Putri Yastari, Jeply Murdianan Guci, Ikhwan Said, Muhammad Fajrul Falah, and Suci Putri Elza, “Studi Perilaku Penampang Balok Beton Bertulang dengan Variasi Rasio Tulangan Longitudinal Tarik dan Tekan,” *Jurnal Media Konstruksi*, vol. 10, Jul. 2025.
- [15] G. Milutinović, N. Pecić, R. Hajdin, S. Mašović, and D. Bobera, "A practical method for strut-and-tie modelling of the bridge pile cap," *Proceedings of the International Scientific Conference Planning, Design, Construction and Building Renewal (iNDiS 2023)*, Novi Sad, Serbia, 2023, pp. 233-244.