

ANALISIS *PILECAP* DENGAN *METODE STRUT AND TIE MODELING* MENGGUNAKAN *COMPUTER AIDED STRUT AND TIE* PADA PROYEK PEMBANGUNAN PABRIK KERTAS TANJUNG MORAWA

SKRIPSI

OLEH:

**RAJA AKIBARUNG BANUREA
228110036**



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2026**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 14/7/26

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)14/7/26

ANALISIS *PILECAP* DENGAN *METODE STRUT AND TIE MODELING* MENGGUNAKAN *COMPUTER AIDED STRUT AND TIE* PADA PROYEK PEMBANGUNAN PABRIK KERTAS TANJUNG MORAWA

SKRIPSI

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana di Fakultas Teknik
Universitas Medan Area

Oleh:

**RAJA AKIBARUNG BANUREA
228110036**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2026**

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Skripsi : Analisis *Pilecap* dengan metode Strut and Tie Modeling menggunakan Computer Aided Strut and Tie pada Proyek pembangunan Pabrik Kertas Tanjung Morawa

Nama : Raja Akibarung Banurea
NPM : 228110036
Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh:
Komisi Pembimbing



Samsul A Rahman Sidik Hasibuan, S.T., M.T
Pembimbing



M. Firdausy, S.T., M.T
Dekan



Fika Esmita Wulandari, S.T., M.T
Ka. Program Studi

Tanggal Lulus : 12 Maret 2026

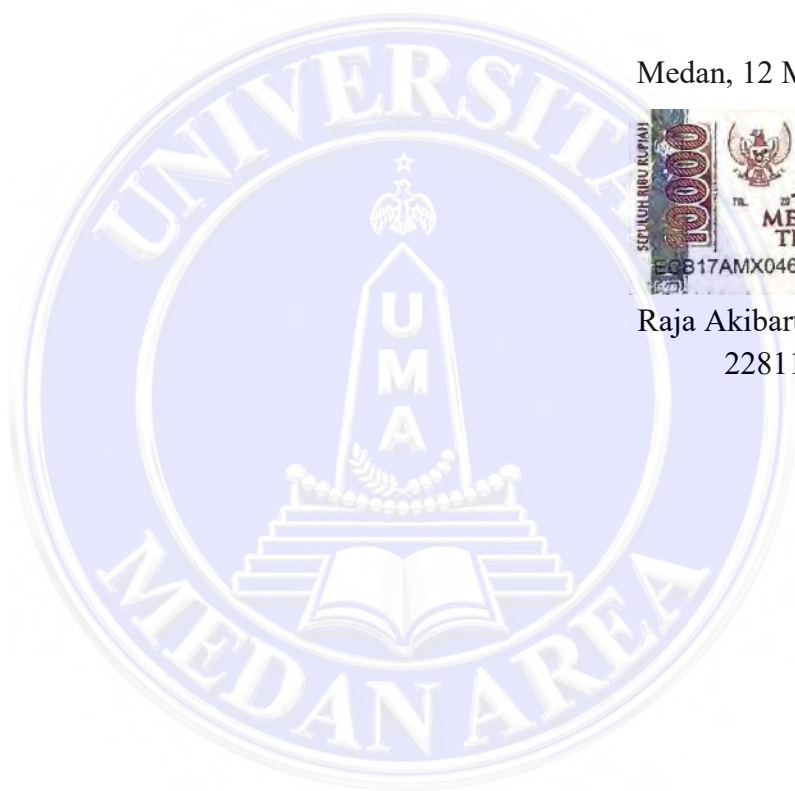
HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah. Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan saksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, 12 Maret 2026



Raja Akibarung Banurea
228110036



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Raja Akibarung Banurea
NPM : 228110036
Program Studi : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non Exclusive Royalty Free-Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : Analisis *Pilecap* dengan metode *Strut and Tie Modeling* menggunakan *Computer Aided Strut and Tie* pada Proyek pembangunan Pabrik Kertas Tanjung Morawa. Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Medan
Pada tanggal : 12 Maret 2026
Yang menyatakan

(Raja Akibarung Banurea)

RIWAYAT HIDUP

Raja Akibarung Banurea, dilahirkan di Laenauli, pada tanggal 15, November 2002. Penulis merupakan anak ke-6 dari 7 bersaudara, dari pasangan Bapak J.Banurea dan Ibu N.Bancin. Penulis berkewarganegaraan Indonesia dan memeluk agama Kristen Protestan.

Riwayat Pendidikan formal yang pernah ditempuh oleh penulis adalah sebagai berikut:

1. Menyelesaikan pendidikan dasar di SD 030412 Salak dan lulus pada tahun 2015.
2. Melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 1 Salak dan lulus pada tahun 2018.
3. Melanjutkan pendidikan menengah di SMA Negeri 1 Salak dan lulus pada tahun 2021.
4. Pada tahun 2022, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik di Universitas Medan Area hingga berhasil menyelesaikan studi Strata Satu (S-1) pada tahun 2026 dengan judul skripsi: Analisis *Pilecap* dengan metode *Strut and Tie Modeling* menggunakan *Computer Aided Strut and Tie* pada Proyek pembangunan Pabrik Kertas di Tanjung Morawa.

Pada tahun ajaran 2024/2025 Penulis melaksanakan Praktek Kerja Lapangan (PKL) di Proyek Penggantian jembatan aek asahan di Porsea.

KATA PENGHANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat, rahmat, dan tuntunan-Nya yang berlimpah, sehingga penulis diberikan kemudahan dan kemampuan untuk menyelesaikan Skripsi ini dengan judul:

“Analisis *Pilecap* dengan metode *Strut and Tie Modeling* menggunakan *Computer Aided Strut and Tie* pada Proyek pembangunan Pabrik Kertas Tanjung Morawa”.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat akademis untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku struktural elemen *non-B-region* seperti *pilecap* secara lebih rasional melalui pendekatan *Strut-and-Tie Model*, yang mana aplikasinya sangat krusial dalam struktur pondasi beban berat pada proyek industri.

Dalam proses penyelesaian skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bimbingan, dukungan, dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Samsul A Rahman Sidik Hasibuan, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing penulis yang telah meluangkan waktu, memberikan arahan teknis, dan bimbingan dalam penulisan skripsi ini hingga selesai.
2. Ibu Ir. Tika Ermita Wulandari, S.T., M.T. , selaku kepala Program Studi Teknik Sipil Universitas Medan Area.
3. Bapak/ Ibu staf pengajar Program Studi Teknik Sipil Universitas Medan Area yang selama ini dengan sabar dalam mencurahkan ilmu dan dedikasinya kepada seluruh anak didiknya termasuk penulis.
4. Seluruh pegawai administrasi Program Studi Teknik Sipil yang telah memberikan bantuan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
5. PT. Mitra Struktur Trusindo, yang telah memberikan banyak pengalaman berharga dan ruang kepada penulis untuk melakukan penelitian ini hingga selesai.

6. Teristimewa kedua orang tua tercinta, Bapak J.Banurea dan Ibu N.Bancin, serta seluruh keluarga besar, atas doa tulus, dukungan moral dan materi yang tiada henti, dan kasih sayang yang selalu menjadi sumber kekuatan bagi penulis.
7. Rekan-rekan jurusan Teknik Sipil, terutama teman-teman seangkatan 2022 yang senantiasa membantu dan memberi semangat dikala penulis mendapat kendala. Terima kasih atas dukungan dan kerja sama selama ini di Teknik Sipil.
8. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, atas segala bentuk bantuan yang telah diberikan selama proses penelitian dan penulisan.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan. Untuk itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif demi perbaikan di masa mendatang.

Semoga Skripsi ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang Teknik Sipil dan perancangan struktur.

12 Maret 2026



(Raja Akibarung Banurea)

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku struktural elemen *non-B-region* seperti pilecap secara lebih rasional melalui pendekatan *Strut-and-Tie Model* (STM). Metode konvensional seperti teori lentur Bernoulli seringkali dianggap tidak akurat untuk pilecap karena adanya diskontinuitas aliran gaya atau *daerah D-region*. Penelitian ini menggunakan bantuan perangkat lunak *Computer Aided Strut and Tie* (CAST) untuk memvalidasi secara visual dan numerik distribusi gaya internal yang terjadi. Parameter perencanaan yang digunakan meliputi mutu beton (f_c) 25 MPa dan mutu baja (f_y) 420 MPa dengan geometri pilecap persegi panjang. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode STM mampu memodelkan aliran gaya tekan sebagai elemen strut dan gaya tarik sebagai elemen tie secara lebih realistis. Verifikasi menggunakan perangkat lunak CAST mempermudah evaluasi kapasitas pilecap dalam menyalurkan beban aksial dari kolom ke tiang pancang dengan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan perhitungan manual. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi praktisi dalam merencanakan struktur pondasi yang aman dan efisien sesuai standar SNI 2847-2019.

Kata Kunci: Pilecap, Strut-and-Tie Model (STM), D-Region, CAST, SNI 2847-2019.

ABSTRACT

This study aims to analyze the structural behavior of non-B-region elements such as pilecaps more rationally using the Strut-and-Tie Model (STM) approach. Conventional methods like Bernoulli's beam theory are often considered inaccurate for pilecaps due to discontinuities in force flow, known as D-regions. This research utilizes Computer Aided Strut and Tie (CAST) software to visually and numerically validate the internal force distribution. The design parameters include a concrete strength (f'_c) of 25 MPa and steel strength (f_y) of 420 MPa with a rectangular pilecap geometry. The analysis results show that the STM method provides a more realistic model by representing compressive force flows as strut elements and tensile forces as tie elements. Verification using CAST software facilitates the evaluation of pilecap capacity in transferring axial loads from columns to piles with higher accuracy compared to manual calculations. This study is expected to serve as a reference for practitioners in designing safe and efficient foundation structures in accordance with the SNI 2847-2019 standard.

Keywords: Pilecap, Strut-and-Tie Model (STM), D-Region, CAST, SNI 2847-2019.

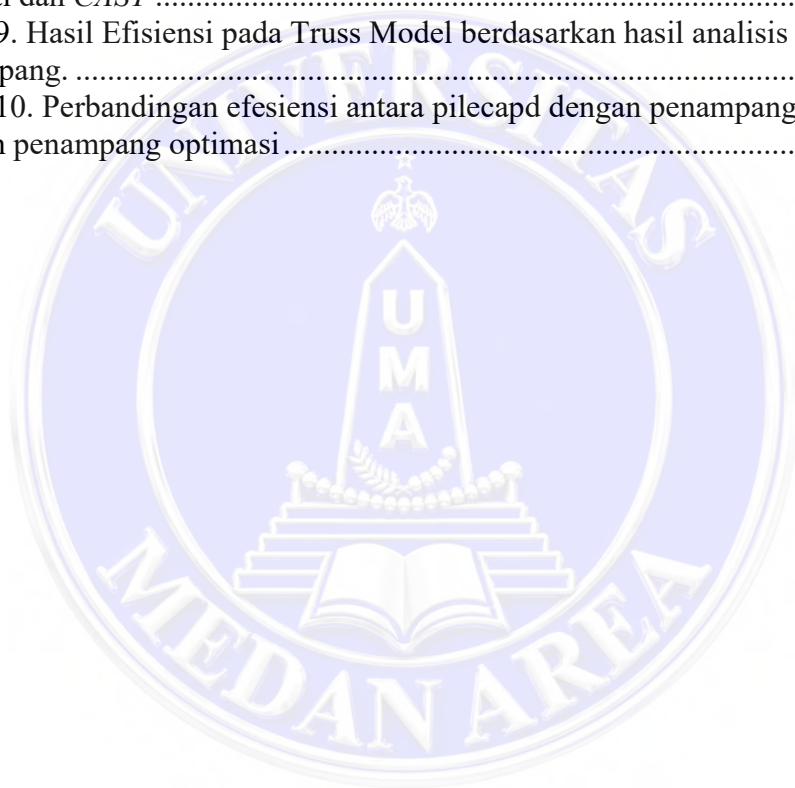
DAFTAR ISI

	Halaman
COVER	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI	
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
RIWAYAT HIDUP	vi
KATA PENGHANTAR	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
 BAB I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
 BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Perbedaan Dengan Penelitian Terdahulu	8
2.3 Teori-teori umum pilecap	8
2.4 Teori-teori Strut and Tie Model	11
2.4.1 Konsep Dasar dan Prinsip <i>Strut-and-Tie method</i>	
(STM).....	12
2.4.2 Elemen-elemen model (Strut and Tie)	14
2.4.3 Tipe-tipe Strut dalam model (Strut and Tie)	15
2.4.4 Kekuatan Desain <i>Strut, Tie</i> , dan Zona Nodal.....	20
2.4.5 Metode Pengembangan Model (<i>Model</i>	
<i>Development Methods</i>).....	26
2.4.6 Asumsi dan Persyaratan Desain Model <i>Strut-and-</i>	
<i>Tie</i> Berdasarkan SNI 2847-2019.....	28
2.5 Teori-teori Computer Aided Strud and Tie (CAST).....	32
2.6 Teori Lebar Efektif dan Rasionalitas Desain STM.....	35
 BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Umum.....	37
3.2 Penetapan parameter perencanaan	38
3.3 Analisis.....	39
3.3.1 Analisis Menggunakan Perhitungan Manual STM ..	40

3.3.2 Analisis Menggunakan <i>COMPUTER AIDED STRUT and TIE (CAST)</i>	43
3.3.3 Perbandingan Hasil.....	45
3.4 Alur Penelitian.....	46
BAB IV. ANALISIS DAN HASIL	
4.1 Analisis Geometri dan Parameter Perencanaan	47
4.2 Analisis Aliran Tegangan (<i>Stress Path</i>).....	48
4.3 Idealisasi Model Rangka Batang (<i>Truss Model</i>)	49
4.4 Desain penulangan	51
4.5 Verifikasi Hasil Analisis (Manual vs Software CAST)	52
4.6 Optimasi Analisis melalui Reduksi Lebar Efektif Penampang (<i>Effective Width Refinement</i>).....	54
4.6.1 Dasar Teoretis Reduksi Lebar Efektif.....	55
4.6.1 Penentuan Lebar Efektif Baru	55
4.6.1 Hasil Analisis Optimasi (Lebar Efektif 1800 mm)	56
4.6.1 Pembahasan Hasil Optimasi.....	56
4.7 Ringkasan Hasil Analisis dan Pembahasan.....	57
BAB IV. SIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	60
5.2 Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN 1	
LAMPIRAN 2	
LAMPIRAN 3	
LAMPIRAN 4	
LAMPIRAN 5	
LAMPIRAN 6	

DAFTAR TABEL

	Halaman
Halaman	
Tabel 1. Koefisien strut β_s	21
Tabel 2. Koefisien zona nodal β_n	25
Tabel 3. Parameter geometri perencanaan	38
Tabel 4. perencanaan material.....	39
Tabel 5. Gaya-gaya Rangka Batang Dalam Truss Model.....	50
Tabel 6. Hasil Perhitungan Lebar Strut dan Tie pada Truss Model.....	50
Tabel 7. Hasil Efisiensi Tiap Strut dan Tie.....	52
Tabel 8. Hasil Perbandingan Efisiensi pada Truss Model Antara Perhitungan Manual dan <i>CAST</i>	54
Tabel 9. Hasil Efisiensi pada Truss Model berdasarkan hasil analisis optimasi penampang.	56
Tabel 10. Perbandingan efesiensi antara pilecapd dengan penampang eksisting dengan penampang optimasi	58



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Bentuk Permodelan Strut and Tie Model	5
Gambar 2. Deformasi struktur dinding yang dibebani beban terpusat P	6
Gambar 3. Representasi Strut-and-Tie Model (STM) dengan beban aksial dari kolom	7
Gambar 4. Representasi dasar dari model Strut-and-Tie (STM) yang digunakan untuk menganalisis dan merancang pilecap	7
Gambar 5. Pembagian Daerah B dan Daerah D	9
Gambar 6. Strut and tie model pada pilecap	10
Gambar 7. Daerah-D dan diskontinuitas	13
Gambar 8. Deskripsi model strut, tie dan zona Nodal	14
Gambar 9. Strut berbentuk botol	18
Gambar 10. Strut berbentuk kipas	19
Gambar 11. Tulangan melintasi sebuah strut	22
Gambar 12. Zona perpanjangan nodal menjangkar dua <i>tie</i>	24
Gambar 13. Metode jalur beban	27
Gambar 14. Lintasan tegangan elastis	28
Gambar 15. Resolusi gaya pada zona nodal	29
Gambar 16. Nodal hidrostatik	30
Gambar 17. Zona nodal yang diteruskan menunjukkan efek distribusi gaya ..	30
Gambar 18. Klasifikasi Nodal	31
Gambar 19. perbedaan perilaku dan kapasitas beban antara analisis STM linier dan non-linier,	33
Gambar 20. Denah Pondasi rencana	37
Gambar 21. Potongan melintang Pondasi type CT-14 (eksisting)	39
Gambar 22. Aliran Tegangan pada Pile cap Menggunakan SAP2000.	40
Gambar 23. Truss Model	41
Gambar 24. Geometri dan kondisi batas pilecap	43
Gambar 25. Pendefinisian properti material	43
Gambar 26. Tahapan-tahapan penelitian	46
Gambar 27. Permodelan Dimensi pilecap	47
Gambar 28. Aliran Tegangan Hasil Analisis Menggunakan SAP 2000	47
Gambar 29. Idealisasi Model Rangka Batang	48
Gambar 30. Hasil Desain Penulangan Pile cap dengan STM	51
Gambar 31: Hasil Analisis Menggunakan <i>CAST</i> untuk <i>Truss Model</i>	52
Gambar 32: Permodelan Dimensi <i>pilecap (optimasi)</i>	54
Gambar 33: Hasil Analisis optimasi penampang optimasi	55

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pilecap adalah elemen struktur penting dalam rekayasa bangunan yang berfungsi menyalurkan beban dari kolom ke beberapa tiang pancang secara merata. Secara umum, *pilecap* berfungsi sebagai pengikat kelompok tiang pancang dan menyalurkan beban aksial dari struktur atas ke pondasi bawah secara merata, dengan dimensi dan ketebalan yang disesuaikan berdasarkan jumlah tiang pancang dan jarak antar tiang. Standar seperti SNI 2847:2019 menentukan ketebalan minimum *pilecap* sekitar 300 mm dan aturan lain terkait penulangan untuk memastikan keamanan struktur terhadap berbagai beban, termasuk beban lateral gempa. Namun, meskipun perhitungan konvensional menggunakan pendekatan teori lentur masih umum, distribusi gaya internal di *pilecap* sebenarnya sangat kompleks karena adanya diskontinuitas aliran gaya pada pertemuan kolom, *pilecap*, dan tiang pancang, yang dikenal sebagai daerah diskontinuitas atau *D-region*.

Dalam perancangan ini, *pilecap* dikategorikan sebagai *deep beam* (balok tinggi) di mana daerah diskontinuitas (*D-Region*) mendominasi distribusi tegangan. Oleh karena itu, penggunaan metode konvensional (teori balok Bernoulli) tidak lagi akurat, sehingga diperlukan pendekatan *Strut-and-Tie Model* (STM) untuk memodelkan aliran gaya internal secara lebih representatif sesuai dengan ketentuan SNI 2847:2019.

Untuk mengatasi tantangan pemodelan gaya internal di *pilecap*, terutama pada *D-region*, metode *Strut-and-Tie Method* (STM) telah menjadi alternatif yang lebih representatif dibandingkan metode tradisional. Pendekatan ini memberikan

gambaran detail tentang pola aliran gaya internal, distribusi tegangan, dan kebutuhan penulangan aktual, sehingga menghasilkan desain yang lebih aman dan efisien serta dapat dipertanggungjawabkan secara teoritis dan praktis. Penerapan *Strut and Tie Method* dengan bantuan perangkat lunak diharapkan dapat menyediakan validasi visual dan numerik dari model distribusi gaya internal di *pilecap*, yang pada akhirnya meningkatkan kualitas perencanaan struktur pondasi.

Strut and Tie Modeling memodelkan aliran gaya tekan sebagai elemen strut dan gaya tarik sebagai elemen *tie* sehingga pola distribusi tegangan tekan dan tarik dapat divisualisasikan dengan lebih realistis. Dengan menggunakan software seperti *Computer Aided Strut and Tie (CAST)*, analisis STM dapat mempermudah evaluasi kapasitas *pilecap* dalam menahan beban aksial dan mendistribusikannya secara optimal ke tiang pancang.

Dengan demikian, penelitian dan penerapan *Strut and Tie Method (STM)* berbasis *Finite Element Modeling (FEM)* memberikan kontribusi penting dalam pengembangan desain *pilecap* yang lebih presisi, memperhitungkan perilaku aliran gaya internal yang kompleks dan meningkatkan keandalan serta efisiensi desain struktur pondasi tiang pancang.

1.2 Perumusan masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, adapun rumusan masalah yang akan di bahas pada penelitian ini antara lain:

1. Mengetahui perilaku aliran gaya internal pada *pilecap* ketika dimodelkan menggunakan pendekatan *Strut-and-Tie Method (STM)* dengan bantuan software *Computer Aided Strut and Tie (CAST)*.

2. menganalisis distribusi tegangan tekan pada elemen *strut* dan tegangan tarik pada elemen *tie* dalam *pilecap* akibat beban aksial (P) berdasarkan analisis dengan metode *Strut and Tie Model (STM)*.
3. Seberapa besar kapasitas *pilecap* dalam menyalurkan beban dari kolom ke tiang pancang menurut hasil analisis yang menggunakan metode *STM*, dan bagaimana perbandingannya dengan pendekatan *CAST*

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian antara lain:

1. Untuk menganalisis perilaku aliran gaya internal pada *pilecap* dengan menggunakan pendekatan *Strut-and-Tie Method (STM)* dengan bantuan *software Computer Aided Strut and Tie (CAST)*.
2. Untuk menentukan distribusi tegangan tekan pada elemen *strut* dan tegangan tarik pada elemen *tie* di dalam *pilecap* akibat beban aksial (P) berdasarkan hasil analisis *STM*.
3. Untuk mengevaluasi kapasitas *pilecap* dalam menyalurkan beban dari kolom ke tiang pancang berdasarkan analisis menggunakan metode *Strut and Tie Method (STM)*, serta membandingkan hasil tersebut dengan pendekatan *CAST*.

1.4 Batasan Masalah

Agar kajian tentang *pilecap* ini tidak terlalu luas serta sesuai dengan tujuan yang ditetapkan, maka pada penelitian ini diberikan pembatasan masalah yaitu:

Struktur Atas

1. Penampang *pilecap* adalah persegi panjang.
2. Data material yang digunakan adalah sebagai berikut:

Mutu beton: $= 25 \text{ MPa}$

Mutu tulangan baja: $= 420 \text{ MPa}$
3. *Pilecap* duduk di atas steel base plate pada kedua tumpuan.

4. Balok tinggi terletak di atas dua tumpuan sederhana dengan dua beban terpusat di atas *pilecap*. Beban yang bekerja merupakan beban ultimit.
5. Beban terpusat terletak pada $1/3$ dan $2/3$ bentang bersih.
6. Bentuk *compression strut* dianggap *prismatic*.
7. *pilecap* yang dianalisis bersifat umum dan ditujukan tidak untuk penggunaan pada bagian struktur tertentu.
8. Analisis ini tidak membahas aspek Rencana Anggaran Biaya (RAB) atau estimasi biaya proyek terkait dengan desain *pilecap*. Fokusnya adalah pada analisis struktural dan teknis,
9. Analisis tidak mencakup perhitungan atau desain tiang pancang secara detail, maupun interaksi *pilecap* dengan kondisi tanah di bawahnya. Tiang pancang dianggap sebagai elemen tumpuan yang menerima beban dari *pilecap*, dan karakteristik tanah dianggap sebagai data masukan yang telah ditentukan.

1.5 Manfaat Penelitian

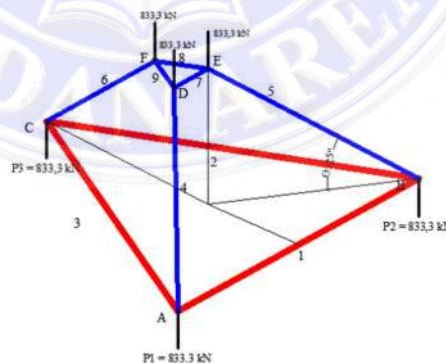
1. Agar hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan oleh praktisi dan akademisi sebagai referensi dalam merencanakan *pilecap* sesuai dengan SNI 2847-2019 dan *Strut and Tie Method (STM)*.
2. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi dasar atau acuan bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan desain *pilecap* menggunakan SNI 2847-2019 dan *Strut and Tie Method (STM)*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam upaya mengkaji dan mengembangkan metode perancangan *pilecap*, terutama pada zona diskontinuitas, sejumlah penelitian telah dilakukan yang memberikan kontribusi penting pada penerapan *Strut-and-Tie Method (STM)* dan analisis numerik berbantuan perangkat lunak. Berikut adalah beberapa penelitian terdahulu yang relevan:

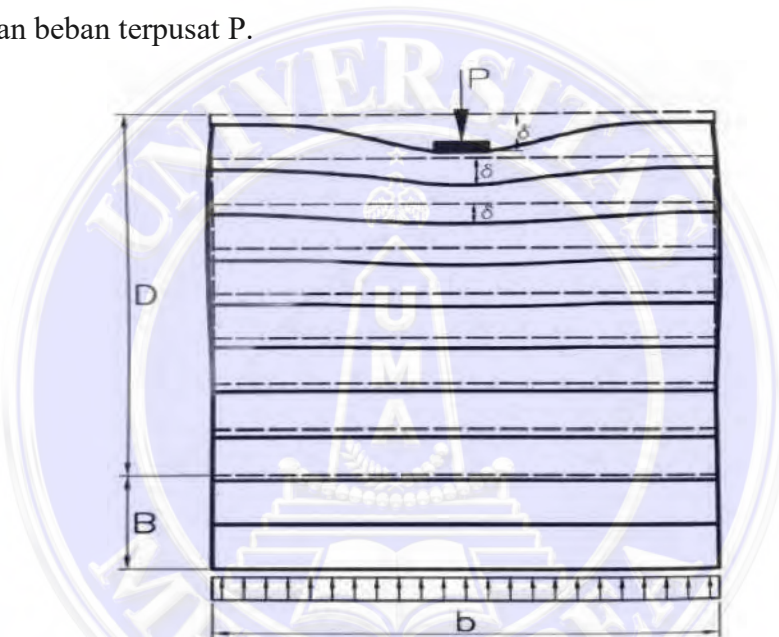
Sedayu et al. (2019) Melakukan penelitian pada perancangan pile cap tiga tiang dengan metode *Strut-and-Tie Model (STM)*. Penelitian ini menunjukkan bahwa kebutuhan tulangan dengan *Strut-and-Tie Model (STM)* meningkat sebesar 14,24% dibandingkan metode konvensional. Namun, penempatan tulangan pada *Strut-and-Tie Model (STM)* lebih fokus mengikuti pola aliran gaya sehingga desain menjadi lebih efisien dan aman secara struktural, seperti dapat di lihat pada gambar 1.



Gambar 1. Bentuk Permodelan *Strut and Tie Model* (Sedayu et al, 2019)

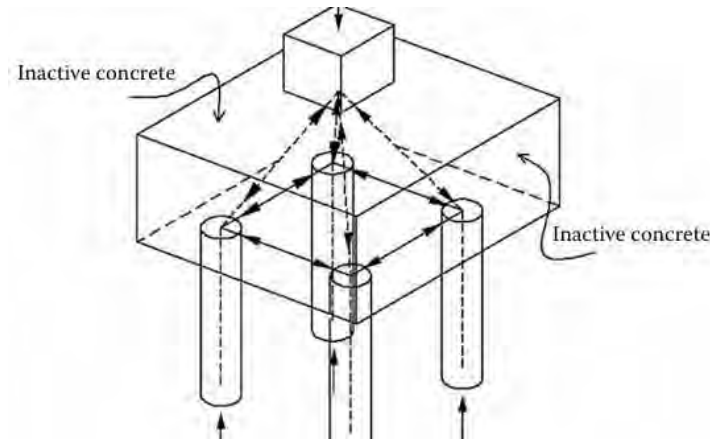
Hardjasaputra dan tumilar (2016). Membahas keunggulan metode *Strut-and-Tie Model (STM)* untuk *modeling* daerah diskontinuitas pada struktur beton bertulang, terutama *pilecap*. Penelitian ini menekankan bahwa *Strut-and-Tie Model*

(STM) mampu memodelkan secara realistis pola distribusi tegangan tekan dan tarik dibandingkan metode lentur tradisional yang mengabaikan kompleksitas aliran gaya di zona *D-region*. Untuk memahami perbedaan secara fisik antara daerah *diskontinuitas* (D) dan daerah *homogen* (B), kita dapat mengamati perbedaan deformasi atau perubahan bentuk pada wilayah sekitar area diskontinuitas dibandingkan dengan wilayah yang jauh dari area tersebut. Sebagai ilustrasi, pada Gambar 2, ditunjukkan pola deformasi pada kolom pendek dengan lebar b yang diberikan beban terpusat P .



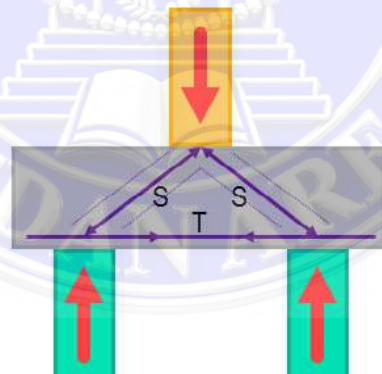
Gambar 2. Deformasi struktur dinding yang dibebani beban terpusat P (Hardjasaputra dan tumilar, 2016).

El-Metwally dan Chen (2018). Melakukan studi numerik menggunakan *Strut-and-Tie Method (STM)* pada *pilecap* dengan beban aksial. Penelitian ini menunjukkan bahwa distribusi tegangan pada elemen *strut* dan *tie* dapat divisualisasikan secara detail, memfasilitasi evaluasi kapasitas struktur dan kebutuhan penulangan yang tepat, seperti dapat di lihat pada gambar 3.



Gambar 3. representasi *Strut-and-Tie Model (STM)* dengan beban aksial dari kolom (El-Metwally dan Chen, 2013).

Beghini et al. (2008). Mengembangkan perangkat lunak *Computer Aided Strut and Tie (CAST)* yang dapat membantu desain dan analisis *Strut-and-Tie Model (STM)* dalam *pilecap* maupun elemen struktur lainnya. Penelitian ini memperlihatkan kemudahan validasi visual dan numerik pola aliran gaya internal sehingga desain pile cap dapat dioptimalkan secara praktis dan teoritis, dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. representasi dasar dari model *Strut-and-Tie (STM)* yang digunakan untuk menganalisis dan merancang *pilecap* (Beghini et al, 2008).

Wijaya et al. (2024) Menerapkan *finite element modeling (FEM)* berbasis *Strut-and-Tie Model (STM)* pada *pilecap* dan menemukan peningkatan akurasi dalam memprediksi kapasitas *pilecap* serta perilaku retak dibandingkan

perhitungan manual dengan teori lentur. Metode ini mendukung perancangan yang lebih efektif dan fleksibel terhadap berbagai kondisi beban.

2.2 Perbedaan Dengan Penelitian Terdahulu

Berdasarkan tinjauan penelitian terdahulu di atas, penelitian yang penulis lakukan memiliki beberapa perbedaan dan kontribusi spesifik antara lain:

1. Integrasi penggunaan *Strut-and-Tie Method (STM)* dengan bantuan *software Computer Aided Strut and Tie (CAST)*. secara khusus difokuskan pada validasi visual dan numerik perilaku aliran gaya internal *pilecap*, yang belum banyak dijelaskan secara rinci oleh penelitian sebelumnya, terutama dalam konteks standar perancangan beton terbaru seperti SNI 2847:2019,
2. Pada Penelitian ini juga menggabungkan analisis distribusi tegangan tekan dan tarik dalam elemen strut dan tie secara komprehensif akibat beban aksial (P), sehingga mampu memberikan gambaran pola tegangan yang lebih lengkap dan representatif,
3. Selain itu, penelitian ini membandingkan kapasitas pile cap hasil analisis *Strut-and-Tie Model (STM)* dengan metode konvensional seperti teori lentur dan perancangan manual, memberikan nilai tambah berupa rekomendasi praktis bagi perencanaan pondasi sesuai standar nasional.

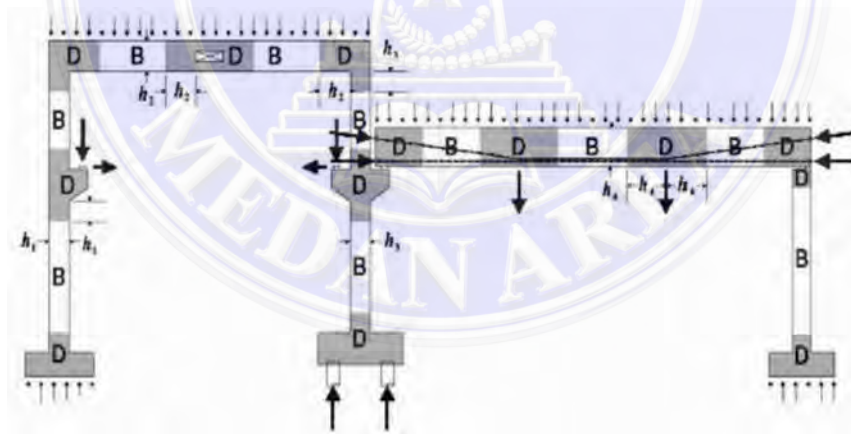
Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi baru dalam hal penerapan metode *Strut-and-Tie Model (STM)* berbasis *software Computer Aided Strut and Tie (CAST)* pada desain *pilecap* yang sesuai dengan standar SNI.

2.4 Teori Umum *Pilecap*

Pilecap merupakan salah satu komponen struktural yang memiliki peranan krusial dalam sistem pondasi bangunan. Perannya terutama dalam mentransfer

beban dari elemen atas seperti kolom ke tiang pancang, yang kemudian meneruskannya ke lapisan tanah di bawahnya (Sukarman dan Irawati, 2019).

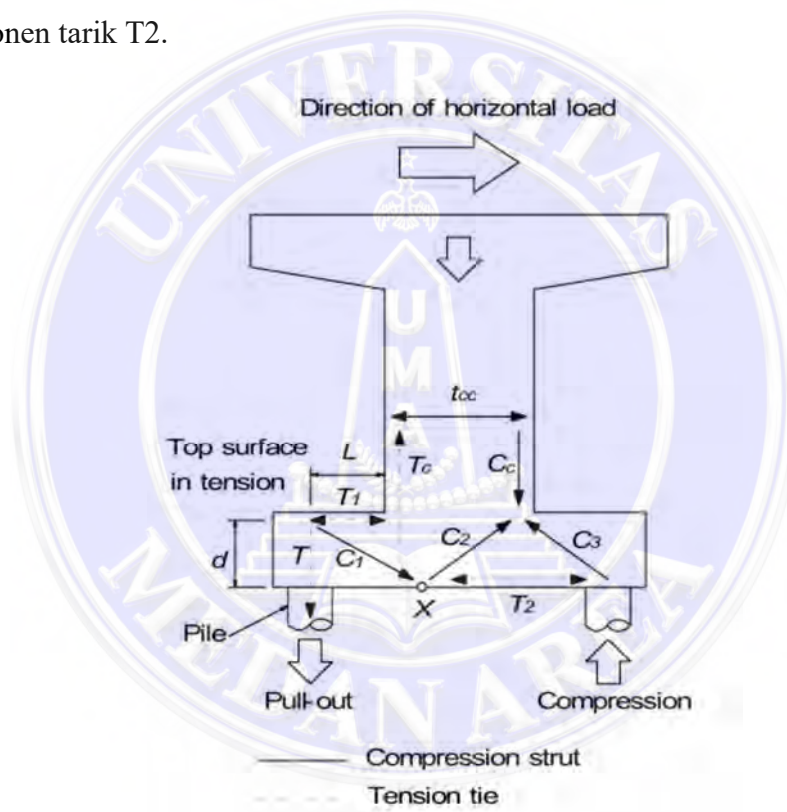
Dalam perancangan *pilecap*, terdapat dua pendekatan utama. Pendekatan pertama memperlakukan pile cap sebagai balok tinggi yang dianalisis terhadap gaya geser pada lokasi kritis. Pendekatan kedua membagi struktur menjadi dua wilayah yaitu: daerah B (*Bernoulli*) yang mengikuti distribusi regangan linier sesuai teori lentur, dan daerah D (*Disturbed/Discontinuity*) yang mengalami gangguan akibat diskontinuitas geometrik atau beban terpusat, sehingga tidak mengikuti asumsi regangan linier. Pendekatan kedua ini dikenal sebagai model *strut-and-tie*, di mana gaya tekan disalurkan melalui elemen tekan (*strut*) menuju simpul (*node*) di atas tiang pancang, sementara gaya tarik ditahan oleh elemen tarik (*tie*) yang dibentuk oleh tulangan baja (Putera et al. 2019). Pembagian daerah B (*bernoulli*) dan daerah D (*dusturb/discontinuity*) dapat di lihat pada gambar 5.



Gambar 5. Pembagian Daerah B dan Daerah D (Putera et al. 2019).

El-Metwally dan Chen (2018). menyatakan bahwa, Karena bentuk geometrisnya, *pilecap* (pelat kepala tiang pancang) diklasifikasikan sebagai area struktur yang mengalami gangguan atau ketidakaturan tegangan (*D region*). Untuk itu, metode *Strut-and-Tie Model (STM)* digunakan dalam perancangan *pilecap*. Metode ini memetakan jalur gaya-gaya tekan (*strut*) dan tarik (*tie*) yang

terjadi akibat beban konsentrasi dari kolom yang diteruskan ke tiang pancang. *Strut* merepresentasikan zona beton yang menahan gaya tekan, sedangkan *tie* berupa tulangan beton bertulang yang menahan gaya tarik. Gambar 6, menunjukkan lintasan aliran gaya (tegangan) dalam pile cap, di mana garis kontinu mewakili elemen tekan (*strut*) dan garis terputus menggambarkan elemen tarik (*tie*). Pada bagian kanan gambar, dijelaskan bahwa reaksi dari tiang pancang ditahan melalui pembentukan suatu “segitiga gaya” yang melibatkan komponen tekan C_3 dan komponen tarik T_2 .



Gambar 6. *Strut and tie model* pada *pilecap* (Putera et al. 2019).

Secara mekanisme, gaya utama yang bekerja pada *pilecap* meliputi:

1. Gaya tekan vertikal

Beban dari kolom disalurkan secara langsung ke kepala tiang pancang melalui jalur beton yang bekerja sebagai batang tekan atau *strut*. Beton pada jalur ini menahan beban tekan yang cukup besar dan menjadi media utama

penyalur gaya vertikal dari struktur atas menuju pondasi tiang pancang. Mekanisme ini menjadikan *strut* sebagai elemen utama dalam memindahkan beban tekan secara efisien dalam *pilecap*,

2. Gaya tarik

Sebagai reaksi dari gaya tekan pada *strut*, muncul gaya tarik yang harus ditahan oleh tulangan pada elemen yang disebut *tie*. Tulangan ini berfungsi untuk menahan gaya tarik agar beton *pilecap* tidak mengalami retak tarik atau kerusakan disebabkan gaya tarik tersebut. Oleh karena itu, penentuan ukuran dan penempatan tulangan tie didasarkan pada analisis besar gaya tarik dalam *model Strut-and-Tie*, sehingga transfer beban dari kolom ke tiang pancang dapat berlangsung dengan aman dan optimal,

3. Gaya geser

Gaya geser bekerja untuk menahan pergeseran akibat beban yang diterima *pilecap* dari kolom dan diarahkan ke *pile*. Gaya ini terutama muncul di zona transisi antara kolom dan *pilecap*, yang seringkali mengalami distribusi regangan *non-linier* (daerah D). Pengendalian gaya geser sangat penting untuk mencegah kegagalan struktur secara tiba-tiba, seperti retak berat atau putus sambungan antara *pilecap* dan kepala tiang pancang. Oleh karena itu, desain *pilecap* harus memperhitungkan kapasitas geser baik dari beton maupun tulangan geser agar *pilecap* mampu menahan gaya geser yang bekerja selama masa layanan struktur.

2.4 Teori *Strut and Tie Model*

Strut-and-Tie Model (STM) adalah pendekatan desain yang memungkinkan insinyur untuk memodelkan aliran gaya internal dalam elemen beton bertulang,

khususnya di daerah diskontinuitas (*D-regions*) di mana distribusi tegangan tidak linear. Berbeda dengan pendekatan lentur tradisional yang berfokus pada analisis tegangan dan regangan pada penampang, *Strut-and-Tie Model (STM)* memvisualisasikan struktur sebagai rangka batang yang terdiri dari elemen-elemen tekan (*struts*) dan elemen-elemen tarik (*ties*), yang dihubungkan pada simpul (*nodes*). Pendekatan ini memberikan representasi yang lebih intuitif dan realistis tentang bagaimana beban ditransfer melalui jalur-jalur diskrit dalam beton, terutama saat struktur mencapai kapasitas ultimatnya.

2.4.1 Konsep Dasar dan Prinsip *Strut-and-Tie (STM)*

Model Strut-and-Tie (STM) adalah pendekatan rasional dan konsisten untuk desain daerah diskontinuitas (Daerah-D) pada struktur beton bertulang, yang memvisualisasikan aliran gaya internal sebagai sistem rangka internal yang terdiri dari elemen tekan (*strut*) dan elemen tarik (*tie*). Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh Ritter (1899) dan Mörsch (1902, 1906, 1909) sebagai analogi rangka geser, kemudian dikembangkan secara sistematis oleh Marti (1985) dan Schlaich et al. (1987) untuk diterapkan pada hampir semua jenis struktur beton, (Hardjasaputra dan tumilar 2016).

Strut-and-Tie Model (STM) berakar pada teorema batas bawah (*lower-bound theorem*) dari teori plastisitas sempurna, yang menyatakan bahwa jika distribusi tegangan dalam keseimbangan dapat ditemukan yang menyeimbangkan beban yang diterapkan, dan tegangan tersebut di mana-mana berada di bawah atau pada titik leleh material, maka struktur tidak akan runtuh. Pendekatan ini secara inheren memberikan solusi desain yang aman, karena kapasitas beban yang dihitung akan selalu kurang dari atau sama dengan kapasitas beban sebenarnya.

Namun, validitasnya bergantung pada daktilitas beton yang memadai, yang memungkinkan redistribusi tegangan inelastis tanpa keruntuhan. Penting untuk membedakan antara:

a. Daerah-D (*Discontinuity/Disturbed Regions*)

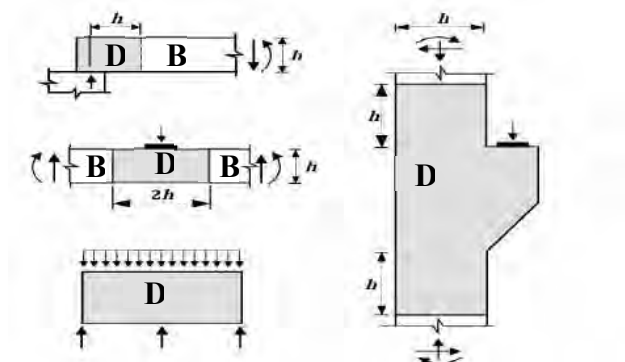
Bagian struktur di mana distribusi regangan longitudinal *non-linear* secara signifikan akibat diskontinuitas gaya atau geometri (misalnya, balok tinggi, korbel, sambungan rangka, bukaan, *pilecap*). Hipotesis penampang bidang (*Bernoulli*) tidak berlaku di sini.

b. Daerah-B (*Bernoulli/Bending Regions*)

Bagian struktur di mana asumsi penampang bidang berlaku dan tegangan lentur bervariasi secara linear. Metode desain lentur tradisional memadai untuk daerah ini.

Batas antara daerah-D dan daerah-B diasumsikan sekitar jarak h (tinggi keseluruhan komponen) dari titik diskontinuitas, sesuai Prinsip *Saint Venant* (Milutinović, et al. 2023).

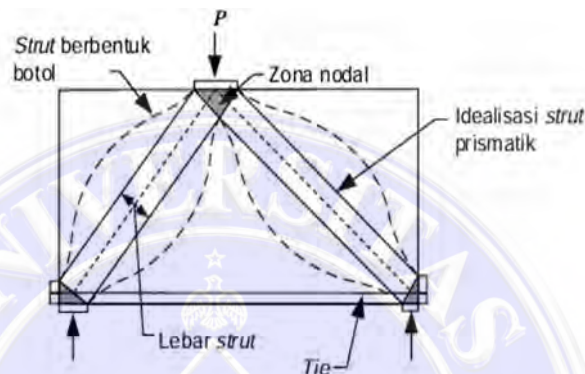
Untuk visualisasi yang lebih jelas mengenai konsep daerah-D dan batasannya, yang fundamental untuk penerapan STM, dapat merujuk pada Gambar 7. Gambar ini secara jelas mengilustrasikan tipikal daerah-D dalam elemen struktural, menunjukkan area di mana asumsi distribusi regangan linear tidak berlaku karena beban terpusat atau diskontinuitas geometris.



Gambar 7. Daerah-D dan diskontinuitas (SNI-2847, 2019)

2.4.2 Elemen-elemen Model (*Strut-and-Tie*)

Elemen-elemen ini bekerja sama untuk mentransfer beban dari titik aplikasi ke tumpuan. Gambar 8, memberikan gambaran umum komponen *Strut-and-Tie Model (strut, tie, nodal zone)*."



Gambar 8. Deskripsi model *strut, tie* dan zona *Nodal* (SNI-2847-2019)

Strut-and-Tie model (STM) terdiri dari tiga elemen utama:

a. *Strut* (Batang Tekan)

Strut adalah komponen tekan dalam STM, yang merepresentasikan resultan dari bidang tekan paralel atau berbentuk kipas (*fan-shaped compression field*) dalam beton (Pasal 2.3). *Strut* berfungsi untuk menahan gaya-gaya tekan yang terjadi dalam beton. Dalam desain, *strut* biasanya di idealkan sebagai komponen tekan prismatik untuk penyederhanaan analisis,

b. *Tie* (Batang Tarik)

Tie adalah komponen tarik dalam STM, di mana gaya ditahan oleh tulangan normal (nonprategang), tulangan prategang, atau dalam kasus tertentu, kekuatan tarik beton (Pasal 2.3). Namun, dalam praktik desain

yang aman, kekuatan tarik beton seringkali diabaikan, dan tulangan baja menjadi elemen utama yang menahan gaya tarik. Tulangan dalam tie dapat terdiri dari satu atau beberapa lapisan, dan gaya tie diasumsikan bekerja pada pusat lapisan-lapisan ini,

c. *Nodal Zone* (Zona Nodal)

Zona nodal adalah volume beton di sekitar sebuah node yang diasumsikan mentransfer gaya-gaya strut dan tie melalui node tersebut, *Node* sendiri adalah titik di mana sumbu-sumbu *strut*, *tie*, dan gaya terpusat yang bekerja pada sambungan berpotongan (Pasal 2.3). Untuk mencapai keseimbangan gaya pada titik tersebut, setidaknya tiga gaya harus bekerja pada setiap *node*. Zona nodal merupakan area kritis karena di sinilah terjadi konsentrasi tegangan yang tinggi, sehingga desain dan pendetailan yang cermat sangat diperlukan (SNI 2847-2019).

2.4.3 Tipe-Tipe Strut dalam Model (*Strut-and-Tie*)

Strut merepresentasikan elemen tekan dalam beton, dan kekuatannya bergantung pada kondisi tegangan transversal dan geometrinya.

a. *Strut Prismatik* (*Prismatic Struts*)

Strut prismatik adalah jenis *strut* yang paling dasar dan ideal. *Strut* ini memiliki luas penampang melintang yang relatif seragam di sepanjang panjangnya. Jenis strut ini biasanya ditemukan di sepanjang flensa tekan balok, di daerah di mana tegangan tekan bersifat searah, atau di daerah di mana tegangan dalam strut tidak menyebar secara signifikan. Tegangan dalam *strut* prismatik cenderung seragam dan bersifat searah. Karena penampang melintangnya konstan, tegangan tarik transversal yang

diinduksi di dalam strut ini minimal atau tidak ada. Ini berarti kekuatan tekannya tidak berkurang secara signifikan oleh efek tarik transversal, sehingga dapat memanfaatkan kekuatan tekan beton secara penuh.

Kekuatan desain yang direkomendasikan untuk *strut* prisma, sesuai dengan *Eurocode 2*, adalah f_{cd} (kekuatan tekan beton desain). Dalam konteks *ACI 318-14* (yang diadopsi oleh SNI 2847-2019), kekuatan tekan efektif beton (f_{ce}) untuk strut prisma dihitung sebagai:

$$0,85 * f_c * \beta_s \quad (1).$$

Dimana :

f_c adalah kekuatan silinder beton dan

β_s adalah faktor efektivitas strut yang diambil sebesar 1,0 (Pasal-23.4.)

Penting untuk memastikan bahwa *strut* tidak saling bersilangan atau tumpang tindih di luar daerah nodal, karena hal ini dapat menyebabkan tegangan beton melebihi kekuatan desain di area tumpang tindih dan menyebabkan kegagalan prematur (SNI-2847, 2019).

b. *Strut Berbentuk Botol (Bottle-Shaped Struts)*

Strut berbentuk botol adalah strut yang melebar dari satu titik singular (misalnya, di bawah beban terpusat atau di zona nodal yang sempit) ke area yang lebih luas di sepanjang panjangnya. Bentuknya menyerupai botol karena tegangan dalam *strut* menyebar ke samping saat bergerak menjauh dari titik beban atau area tumpuan yang lebih kecil.

Penyebaran lateral gaya tekan ini menginduksi tegangan tarik transversal (tegangan tegak lurus terhadap arah utama tekan *strut*) di dalam *strut*.

Tegangan tarik transversal ini dapat menyebabkan retak *longitudinal* pada *strut*, yang pada gilirannya akan mengurangi kekuatan tekan efektif dari *strut* tersebut. Fenomena ini mirip dengan efek uji silinder terbelah (*split cylinder test*).

Jika pendekatan yang lebih ketat tidak digunakan untuk menentukan hilangnya kekuatan tekan, nilai yang direkomendasikan dalam *Eurocode 2* adalah:

$$0,6 * v * f_{cd} \quad (2).$$

Dimana:

v adalah faktor reduksi kekuatan tekan beton yang retak.

Dalam konteks *ACI/SNI*, kekuatan efektif beton (f_{ce}) untuk *strut* berbentuk botol adalah

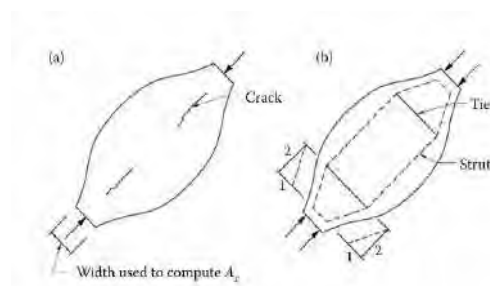
$$0,85 * f'_c * \beta_s. \quad (3)$$

Nilai β_s adalah 0,75 jika tulangan transversal disediakan untuk menahan tegangan tarik lateral sesuai dengan model yang ditunjukkan pada Gambar 11. atau jika $f'_c \leq 44$ MPa dan tulangan yang melintasi *strut* memenuhi,

$$\sum A_{si} \sin \gamma_i / b_{si} \geq 0,003$$

Jika tulangan transversal tidak memenuhi persyaratan ini, β_s adalah $0,60\lambda$. di mana (λ) adalah faktor modifikasi untuk beton ringan (SNI: 2847-2019).

Sama seperti *strut* prismatik, *strut* berbentuk botol tidak boleh saling bersilangan atau tumpang tindih di luar daerah nodal untuk menghindari kelebihan tegangan mengendalikan retak.

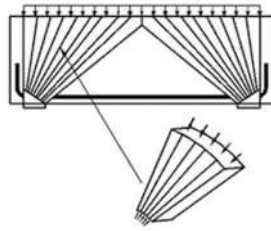


Gambar 9. *strut* berbentuk botol (El-Metwally & Chen, 2018): (a) retak pada penyangga dan (b) model *strut* berbentuk botol.

c. *Strut Kipas Tekan (Fan-Shape Struts / Compression Fan)*

Strut kipas tekan adalah jenis *strut* yang menyebar dari satu titik singular (misalnya, titik beban atau tumpuan) ke area nodal yang lebih luas atau ke daerah di mana tegangan tekan menyebar secara alami. Ini dapat dianggap sebagai bentuk transisi antara *strut* prismatic dan berbentuk botol. Contoh paling sederhana dari kipas tekan adalah *strut* yang membawa beban terdistribusi secara seragam ke reaksi tumpuan pada balok dalam (*deep beam*).

Mirip dengan *strut* berbentuk botol, *strut* kipas tekan juga dapat mengalami tegangan tarik transversal karena penyebaran tegangan. Namun, efek "berbentuk botol" mungkin kurang signifikan dibandingkan dengan *strut* berbentuk botol murni, dan *strut* kipas tekan diasumsikan memiliki kelengkungan yang dapat diabaikan, sehingga tidak mengembangkan tegangan tarik transversal yang signifikan. seperti dapat di lihat pada gambar 10.



Gambar 10. *strut* berbentuk kipas (El-Metwally & Chen, 2018).

Kekuatan desain untuk *strut* kipas tekan juga akan dipengaruhi oleh adanya tegangan tarik transversal jika melintasi zona tekan yang retak. Dalam konteks *ACI/SNI*, kekuatan efektif beton (f_{ce}) untuk *strut* kipas tekan adalah

$$0.85 * f'_c * \beta_s \quad (4).$$

Dimana:

β_s adalah 0,60 (Pasal 23.4.3).

Nilai β_s yang lebih rendah ini mencerminkan bahwa *strut* mungkin terletak di daerah tarik komponen struktur atau di daerah di mana retakan diagonal paralel cenderung membagi *web* menjadi *strut*, dan *strut* cenderung dilintasi oleh retakan pada sudut tertentu terhadap *strut* (SNI:2847-2019).

Secara umum, kekuatan tekan nominal *strut* tanpa tulangan longitudinal (F_{ns}) dihitung pada kedua ujung *strut*, dan nilai yang lebih kecil digunakan. Desain *strut* harus didasarkan pada:

$$\phi F_{ns} \geq F_{us} \quad (5).$$

Dimana:

F_{us} adalah gaya terfaktor terbesar yang bekerja pada *strut*, dan

ϕ adalah faktor reduksi kekuatan material (0,75 untuk *strut*)

Pemilihan jenis strut dan pertimbangan desain spesifiknya sangat penting untuk memastikan keamanan dan efisiensi desain struktur beton bertulang, terutama di daerah diskontinuitas (*D-regions*).

2.4.4 Kekuatan Desain *Strut*, *Tie*, dan Zona Nodal

Untuk setiap kombinasi beban terfaktor yang ada, kekuatan desain setiap strut, tie, dan zona nodal dalam suatu model strut-and-tie harus memenuhi,

$$\phi F_n \geq F_u \quad (6).$$

Dimana:

F_n adalah kekuatan nominal elemen,

F_u adalah kekuatan perlu (gaya terfaktor), dan

ϕ adalah faktor reduksi kekuatan.

Persyaratan ini berlaku untuk:

a. Kekuatan *Strut* (Pasal 23.4)

a) Kekuatan Tekan Nominal Strut (F_{ns})

Kekuatan tekan nominal *strut*, F_{ns} , harus dihitung berdasarkan luas penampang efektif strut (A_{cs}) dan kekuatan tekan efektif beton (f_{ce}).

Untuk strut tanpa tulangan longitudinal,

$$F_{ns} = f_{ce} * A_{cs} \quad (7).$$

Jika strut memiliki tulangan longitudinal, kontribusi tulangan tersebut juga diperhitungkan:

$$F_{ns} = f_{ce} * A_{cs} + A_s' * f_s' \quad (8).$$

Dimana:

A_s' adalah luas tulangan tekan sepanjang strut, dan

f_s' adalah tegangan tulangan tekan pada kekuatan tekan nominal *strut*.

b) Kekuatan Tekan Efektif Beton (f_{ce})

Kekuatan tekan efektif beton dalam sebuah *strut*, f_{ce} , dihitung dengan formula:

$$f_{ce} = 0.85 * f_c * \beta_s \quad (9).$$

Koefisien strut β_s memperhitungkan pengaruh retak dan tulangan kontrol retak pada kekuatan tekan efektif beton, serta kondisi tegangan dan geometri strut. Nilai β_s ditentukan berdasarkan Tabel 1 (SNI-2847, 2019).

Tabel 1. Koefisien strut β_s (SNI-2847, 2019 Pasal 23.4.3)

Geometri dan Lokasi Strut	Tulangan Melewati <i>Strut</i>	β_s
Strut dengan luas penampang pada seluruh panjangnya seragam (Prismatik)	NA	1.0
Strut yang terletak di daerah sebuah komponen di mana lebar beton yang tertekan pada tengah panjang strut dapat melebar ke arah lateral (Berbentuk Botol)	Memenuhi 23.5	0.75
Strut yang terletak di daerah sebuah komponen di mana lebar beton yang tertekan pada tengah panjang strut dapat melebar ke arah lateral (Berbentuk Botol)	Tidak memenuhi 23.5	0.60 λ
Strut yang terletak di komponen struktur tarik atau di daerah tarik komponen struktur (Kipas Tekan)	NA	0.40
Kasus lainnya	NA	0.60 λ

Catatan: λ adalah faktor modifikasi untuk beton ringan.

c) Tulangan yang Melewati *Strut* Berbentuk Botol (Pasal 23.5)

Untuk strut berbentuk botol yang didesain dengan $\beta s = 0,75$ tulangan yang menahan tarik melintang akibat adanya penyebaran gaya tekan pada strut harus melewati sumbu strut. Gaya tarik melintang ini dapat ditentukan dengan mengasumsikan gaya tekan pada strut berbentuk botol menyebar dengan kemiringan paralel 2:1 tegak lurus terhadap sumbu strut. Tulangan yang disyaratkan ini harus diteruskan melewati strut sesuai dengan Pasal 25.4.

Sebagai alternatif, untuk $f'_c < 40$ MPa, distribusi tulangan yang dihitung sesuai dengan Persamaan (10) dapat digunakan untuk memenuhi persyaratan 23.5.1. Persamaan ini adalah:

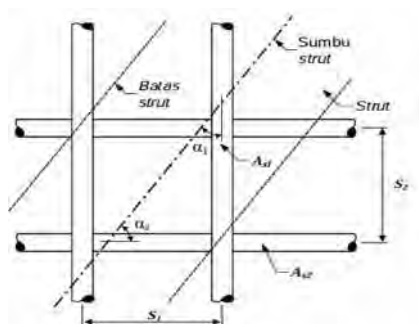
$$\sum(A_{si} * \sin \alpha_i) / (b_s * s_i) \geq 0,003 \quad (10).$$

Dimana:

A_{si} adalah luasan total tulangan yang terdistribusi dengan spasi,

s_i pada arah i dari tulangan yang melewati *strut* pada sudut (α_i) terhadap sumbu *strut*, dan b_s adalah lebar dari *strut*.

Untuk memperjelas tulangan melintasi *strut*, dapat merujuk pada Gambar 11, Tulangan ini harus dipasang tegak lurus dengan sudut α_1 dan α_2 terhadap sumbu *strut*, atau pada satu arah dengan sudut α_1 paling tidak 40 derajat terhadap sumbu *strut*.



Gambar 11. Tulangan melintasi sebuah strut (SNI-2847, 2019)

b. Kekuatan *Tie* (Pasal 23.7)

1) Kekuatan Tarik Nominal *Tie* (F_{nt})

Tulangan tie dapat berupa tulangan nonprategang atau prategang.

Kekuatan tarik nominal dari tie, (F_{nt}), dihitung sebagai berikut:

$$F_{nt} = A_s * f_y + A_{tp} * (f_{se} + \Delta f_p). \quad (11).$$

Dimana:

A_s adalah luas tulangan nonprategang,

f_y adalah kekuatan leleh tulangan,

A_{tp} adalah luas baja prategang,

f_{se} adalah tegangan efektif baja prategang, dan

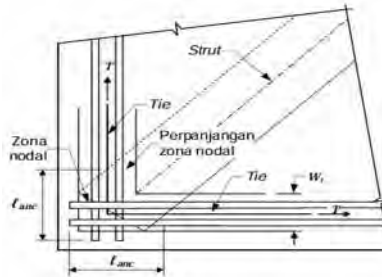
Δf_p adalah peningkatan tegangan baja prategang.

Nilai $(f_{se} + \Delta f_p)$ tidak boleh melebihi f_{py} (kekuatan leleh baja prategang), dan Δf_p adalah nol untuk komponen struktur nonprategang. Nilai Δf_p boleh diambil sama dengan 420 MPa untuk tulangan prategang dengan lekatan dan 70 MPa untuk tulangan prategang tanpa lekatan. Nilai Δf_p yang lebih tinggi boleh diambil jika dibuktikan dari analisis.

2) Pendetailan Tulangan *Tie* (Pasal 23.8)

Pendetailan tulangan *tie* sangat penting untuk memastikan transfer gaya yang efektif. Titik berat dari tulangan *tie* harus sesuai dengan sumbu *tie* yang diasumsikan pada model *strut-and-tie*. Tulangan *tie* harus diangkur dengan alat mekanis, alat angkur pascatarik, kait standar, atau penyaluran lurus tulangan sesuai dengan Pasal 23.8.3.

Untuk visualisasi zona perpanjangan nodal menjangkar dua *tie*, dapat merujuk pada Gambar 12.



Gambar 12. Zona perpanjangan nodal menjangkar dua *tie* (SNI-2047, 2019).

Tulangan *tie* harus diteruskan sesuai dengan persyaratan:

- a) Perbedaan antara gaya *tie* pada satu sisi dari sebuah titik dan gaya *tie* pada sisi lainnya harus diteruskan pada zona nodal, atau
- b) Pada zona nodal yang mengangkurkan satu atau lebih *ties*, gaya *tie* pada setiap arah harus diteruskan apa titik berat tulangan melebihi perpanjangan zona nodal
- c. Kekuatan Zona Nodal (Pasal 23.9)
 - 1) Kekuatan Nominal Zona Nodal (F_{nn})

Kekuatan nominal dari zona nodal, F_{nn} , harus dihitung dengan formula:

$$F_{nn} = f_{ce} * A_{nz} \quad (12).$$

Dimana:

f_{ce} adalah kekuatan tekan efektif beton pada muka dari zona nodal, dan

A_{nz} adalah luas muka zona nodal.

2) Kekuatan Tekan Efektif Beton (f_{ce}) pada Zona Nodal

Kekuatan tekan efektif beton pada muka dari zona nodal, f_{ce} , dihitung dengan:

$$f_{ce} = 0.85 * f_c * \beta_n \quad (13)$$

Koefisien zona nodal β_n mencerminkan peningkatan derajat gangguan di zona nodal karena inkompatibilitas regangan tarik dalam tie dan regangan tekan dalam strut. Nilai β_n ditentukan berdasarkan Tabel 2, (SNI 2847, 2019)

Tabel 2. Koefisien zona nodal β_n (SNI 2847, 2019)

Konfigurasi Zona Nodal	β_n
Zona nodal yang dibatasi oleh strut, area tumpuan atau keduanya	1.0
Zona nodal yang mengangkurkan satu tie	0.80
Zona nodal yang mengangkurkan dua atau lebih tie	0.60

Tegangan pada setiap zona nodal atau pada setiap penampang yang melewati zona nodal tidak boleh melebihi nilai yang diberikan oleh Pers. (13). Jika tulangan pengekangan dipasang pada zona nodal dan efeknya tercatat oleh pengujian dan analisis, maka diizinkan untuk meningkatkan nilai f_{ce} ketika menghitung F_{nn} .

3) Luas Muka Zona Nodal (A_{nz})

Luasan dari setiap muka zona nodal, A_{nz} , harus diambil nilai terkecil antara:

- Luasan dari muka zona nodal yang tegak lurus dengan garis aksi dari F_{us} , atau

- b. Luasan dari penampang zona nodal yang tegak lurus dengan garis aksi dari resultan gaya yang bekerja pada penampang tersebut.

2.4.5 Metode Pengembangan Model (*Model Development Methods*)

Dalam pemodelan *Strut-and-Tie* (STM), penentuan dimensi penampang *strut* merupakan aspek kritis yang menentukan akurasi hasil analisis. Pada elemen beton masif seperti *pile cap* yang memiliki lebar fisik jauh lebih besar daripada dimensi kolom di atasnya, tidak seluruh lebar beton bekerja secara efektif dalam memikul gaya tekan diagonal

. Beban terpusat yang bekerja pada kolom akan mengalir menuju titik-titik tumpuan (tiang pancang) melalui jalur terpendek dan terkaku. Area di luar jalur aliran tegangan utama ini sering kali bersifat pasif atau hanya berfungsi sebagai pengekan (*confinement*). Menurut Schlaich, Dkk, aliran gaya dalam daerah diskontinuitas (*D-Region*) dapat divisualisasikan sebagai medan tegangan yang menyebar dari area pembebanan. Jika lebar fisik elemen (bw) sangat besar, maka lebar efektif *strut* (ws) dibatasi oleh geometri nodal dan distribusi lateral beban yang mampu dikembangkan oleh beton.

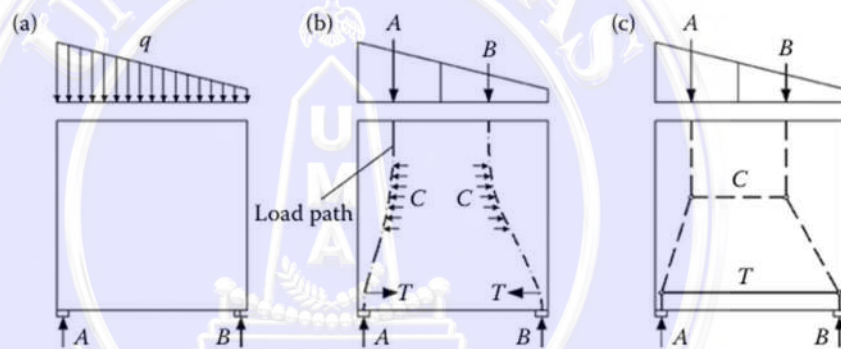
Pengembangan *Model Strut-and-Tie* (STM) yang efektif memerlukan pengalaman desain yang baik untuk menetapkan tujuan desain yang tepat, seperti keamanan dan ekonomi. Proses ini seringkali bersifat iteratif dan melibatkan kombinasi intuisi rekayasa dengan alat analisis, seperti:

- a. Pendekatan Jalur Beban (*Load Path Method*)

Metode jalur beban adalah pendekatan utama untuk mengembangkan *Strut-and-Tie Model*. Ini melibatkan penelusuran aliran gaya melalui

daerah-D. Diagram tegangan dari gaya-gaya batas dibagi sedemikian rupa sehingga resultan tegangan individual pada sisi berlawanan dari daerah-D sesuai dalam besaran dan dapat dihubungkan oleh garis aliran (*streamlines*) yang tidak saling berpotongan .

Penting untuk memahami aliran gaya yang melibatkan "*U-turn*" dalam jalur beban, seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 13, Konsep "*U-turn*" menunjukkan bahwa tidak semua gaya harus ditransfer langsung dari satu sisi ke sisi lain daerah-D. Beberapa gaya mungkin berputar dan keluar pada sisi yang sama dari daerah-D,

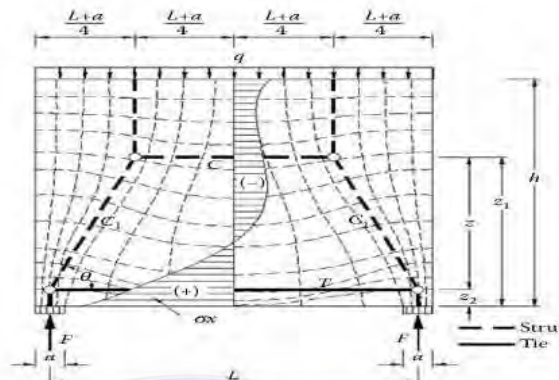


Gambar 13. Metode jalur beban (Hardjasaputra, dan Tumilar, 2016): (a) beban wilayah dan batas, (b) jalur beban melalui wilayah tersebut, dan (c) STM yang sesuai

b. Pemanfaatan Analisis Tegangan Elemen Hingga Elastis (*FEA*)

Pengembangan *Strut-and-Tie Model* dapat disederhanakan dengan melakukan analisis elemen hingga elastis untuk mendapatkan tegangan elastis dan arah tegangan utama. Informasi ini dapat digunakan sebagai panduan awal untuk menempatkan lokasi dan arah *struts* dan *ties* di pusat

diagram tegangan. Gambar 14, menunjukkan bagaimana lintasan tegangan elastis dapat menginformasikan penentuan STM.



Gambar 14. Lintasan tegangan elastis, informasi penentuan STM.
(Hardjasaputra, dan Tumilar, 2016)

2.4.6 Asumsi dan Persyaratan Desain Model *Strut-and-Tie* Berdasarkan SNI 2847-2019.

SNI 2847-2019, yang mengadopsi *ACI 318M-14*, menyediakan ketentuan rinci untuk desain menggunakan *Model Strut-and-Tie* di Pasal 23. Ketentuan ini memastikan bahwa aplikasi *STM* konsisten dengan prinsip-prinsip keamanan dan kinerja struktur beton.

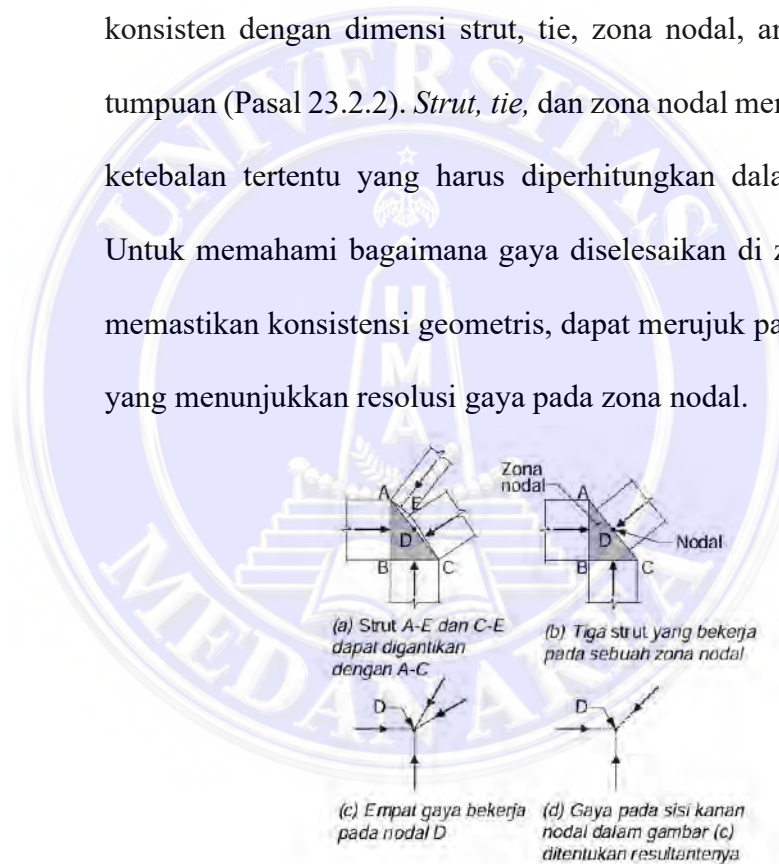
a. Ruang Lingkup dan Penerapan

Pasal 23.1.1 (SNI-2847, 2019) menyatakan bahwa *Model Strut-and-Tie* digunakan untuk desain komponen struktur beton, atau bagian dari komponen struktur, bila beban atau diskontinuitas geometri menyebabkan distribusi *nonlinier* pada regangan *longitudinal* sepanjang penampang. Ini menegaskan bahwa *STM* adalah alat khusus untuk daerah-D. Selanjutnya, (Pasal 23.1.2), mengizinkan setiap komponen atau daerah diskontinu didesain dengan memodelkan komponen atau daerah yang diidealisasikan sebagai rangka batang sesuai dengan pasal ini.

b. Persyaratan Umum Model

Beberapa persyaratan umum harus dipenuhi dalam pengembangan dan analisis *Model Strut-and-Tie*:

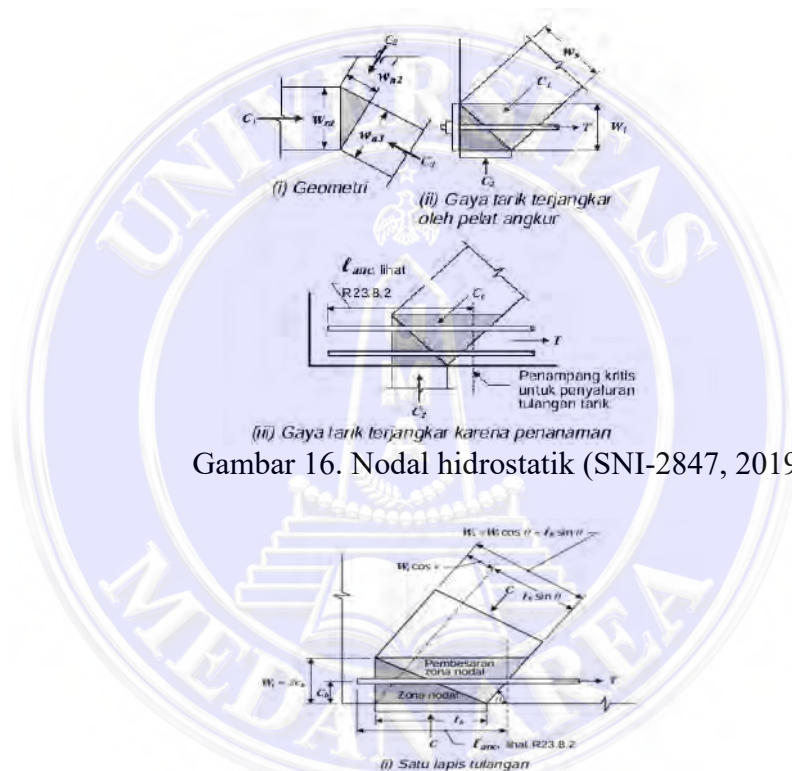
- 1) Keseimbangan Gaya: Gaya internal dalam model *strut-and-tie* harus dalam posisi seimbang dengan beban dan reaksi yang bekerja pada struktur (Pasal 23.2.4). Ini adalah prinsip dasar mekanika yang harus selalu dipenuhi.
- 2) Geometri Konsisten: Geometri idealisasi rangka batang harus konsisten dengan dimensi strut, tie, zona nodal, area tumpu, dan tumpuan (Pasal 23.2.2). *Strut*, *tie*, dan zona nodal memiliki lebar dan ketebalan tertentu yang harus diperhitungkan dalam pemodelan. Untuk memahami bagaimana gaya diselesaikan di zona nodal dan memastikan konsistensi geometris, dapat merujuk pada Gambar 15, yang menunjukkan resolusi gaya pada zona nodal.



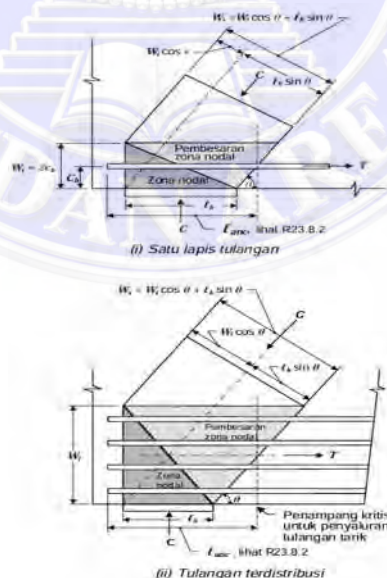
Gambar 15. Resolusi gaya pada zona nodal (SNI-2847, 2019)

- 3) Perpotongan *Strut* dan *Tie*: *Ties* diizinkan melintasi *strut* dan *ties* lainnya (Pasal 23.2.5). Namun, *strut* hanya boleh berpotongan atau saling tumpang tindih pada nodal (Pasal 23.2.6). Aturan ini penting untuk mencegah tegangan berlebihan di luar zona nodal. Untuk

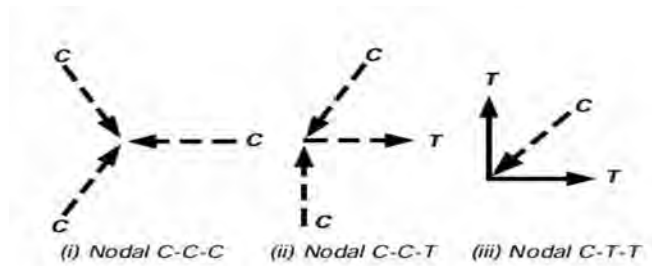
klasifikasi nodal dan pemahaman tentang bagaimana *strut* dan *tie* bertemu, dapat merujuk pada Gambar 16 (Nodal hidrostatik), dan Gambar 17 (Zona nodal yang diteruskan menunjukkan efek distribusi gaya), dan Gambar 18 (Klasifikasi nodal). Gambar-gambar ini membantu memvisualisasikan berbagai konfigurasi nodal (*C-C-C*, *C-C-T*, *C-T-T*) dan pentingnya area efektif nodal (SNI-2847, 2019).



Gambar 16. Nodal hidrostatik (SNI-2847, 2019)



Gambar 17. Zona nodal yang diteruskan menunjukkan efek distribusi gaya (SNI-2847, 2019)



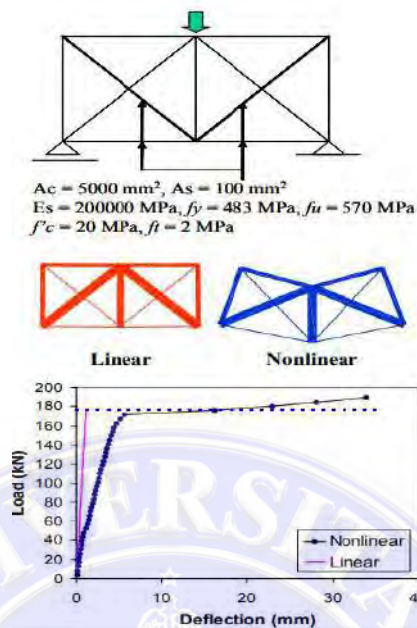
Gambar 18. Klasifikasi Nodal (SNI-2847, 2019)

- 4) Sudut Minimum: Sudut antara sumbu-sumbu sebarang *strut* dan *tie* yang memasuki sebuah nodal tidak boleh diambil kurang dari 25 derajat (Pasal 23.2.7). Pembatasan sudut ini bertujuan untuk mencegah retak yang tidak diinginkan dan menghindari ketidaksesuaian karena pemendekan *strut* dan perpanjangan *tie* yang terjadi pada arah yang sama, yang dapat mengurangi efektivitas transfer gaya.
- 5) Transfer Beban: Model *strut-and-tie* harus mampu mentransfer semua beban terfaktor ke tumpuan atau daerah B yang berdekatan (Pasal 23.2.3). Ini memastikan bahwa seluruh lintasan beban dari aplikasi beban hingga tumpuan akhir telah diperhitungkan.
- 6) Kontrol Retak: Meskipun standar ini tidak selalu secara eksplisit mensyaratkan tingkat minimum tulangan distribusi di semua daerah-D, tulangan terdistribusi dalam daerah-D akan meningkatkan kinerja kemampuan layan, terutama dalam mengendalikan lebar retak (Pasal 23.2.3). Lebar retak dalam *tie* dapat dikontrol menggunakan ketentuan Pasal 24.3.2, dengan asumsi *tie* dilingkupi dalam prisma beton yang sesuai dengan area *tie*.

2.7 Teori *Computer Aided Strut and Tie (CAST)*

Analisis Strut and Tie dengan bantuan komputer melibatkan pemanfaatan perangkat komputasi, utamanya melalui metode elemen hingga non-linier (*FEM*), untuk mengatasi keterbatasan Model *Strut and Tie* (*STM*) konvensional. Pendekatan ini bertujuan untuk memberikan desain yang lebih akurat dan ekonomis untuk struktur beton bertulang, khususnya pada daerah diskontinuitas (*D-regions*). Garis besar dari *STM* berbantuan komputer terletak pada kemampuannya untuk melakukan analisis *non-linier* dan prosedur iteratif guna menyempurnakan desain.

Aspek krusial dari *STM* berbantuan komputer, terutama pada pendekatan canggih seperti *Model Strut and Tie Non-Linier (NLSTM)*, adalah penggunaan *FEM non-linier*. Ini sangat penting untuk menentukan tata letak awal atau garis tengah dari batang tekan (*strut*) dan batang tarik (*tie*). *FEM non-linier* memperhitungkan ketidaklinieran material seperti retaknya beton, pelunakan beton, dan lelehnya baja. Hal ini memungkinkan redistribusi gaya internal dan reorientasi tegangan utama, yang dapat mengarah pada orientasi batang tekan yang lebih realistis dan seringkali memiliki sudut kemiringan yang lebih tinggi, pada akhirnya menghasilkan desain yang lebih ekonomis. Gambar 19, membantu memvisualisasikan perbedaan perilaku dan kapasitas beban antara analisis *STM* linier dan non-linier, biasanya menunjukkan kurva beban-defleksi dan kemungkinan perubahan visual pada model strut-tie itu sendiri, Salem dan Maekawa, (2006).



Gambar 19. perbedaan perilaku dan kapasitas beban antara analisis STM linier dan non-linier,(Salem dan Maekawa, 2006)

Prosesnya sering dimulai dengan analisis *FEM non-linier* pada struktur beton bertulang untuk mendapatkan lintasan tegangan tekan utama. Lintasan ini kemudian berfungsi sebagai panduan untuk menetapkan garis tengah batang tekan dan batang tarik dalam model. Meskipun insinyur berpengalaman mungkin menggunakan akal sehat untuk kasus sederhana, situasi yang kompleks sangat bergantung pada lintasan tegangan ini untuk orientasi batang tekan yang akurat.

Program komputer untuk *STM* menerapkan prosedur iteratif untuk memastikan konvergensi dan akurasi dalam desain:

1. Setelah definisi awal garis tengah batang tekan dan tarik, analisis elastis *STM* dilakukan. Ini melibatkan asumsi luas penampang awal dan *Modulus Young*. Program menghitung gaya-gaya pada anggota, dan selanjutnya, luas penampang anggota berdasarkan tegangan izin untuk beton dan baja.

Jika STM bersifat statis tak tentu, proses ini diulang secara iteratif dengan luas penampang anggota yang baru ditentukan hingga konvergensi tercapai.

2. Setelah konvergensi analisis elastis, kompatibilitas geometris anggota diperiksa. Jika anggota jatuh di luar batas struktural atau zona nodal lebih lebar dari pelat tumpuan, program menyesuaikan lebar anggota dan, jika perlu, garis tengahnya, lalu menjalankan kembali analisis elastis.
3. Akhirnya, analisis *non-linier STM* dilakukan. Selama fase ini, tingkat tegangan pada batang tekan dan zona nodal diperiksa terhadap kriteria kegagalan. Jika terindikasi kegagalan, program menguji peningkatan lebar anggota di zona kritis dan mengulangi analisis *non-linier*. Luas tulangan dihitung, dan iterasi lebih lanjut dari analisis *non-linier* dilakukan sampai luas tulangan yang dihitung *konvergen* dengan yang digunakan dalam analisis, atau sampai kinerja keseluruhan diverifikasi hingga kegagalan. Dengan menggabungkan teknik *non-linier* dan prosedur komputasi iteratif,

Program komputer seperti *Computer Aided Strut and Tie (CAST)* adalah contoh bagaimana metode strut and tie diterapkan untuk desain dan analisis praktis. Studi telah menunjukkan bahwa perhitungan yang dilakukan menggunakan program komputer semacam itu dapat menghasilkan luas tulangan dan gaya yang sedikit berbeda, kadang-kadang lebih besar, dibandingkan dengan perhitungan manual, menyoroti ketepatan dan sifat yang berpotensi konservatif (lebih aman) dari desain berbantuan komputer.

2.8 Teori Lebar Efektif dan Rasionalitas Desain STM

Dalam pemodelan Strut-and-Tie (STM), terutama pada elemen beton masif seperti pile cap, sering kali terdapat perbedaan signifikan antara lebar fisik struktur dengan jalur aliran tegangan sebenarnya. Menurut Schlaich et al. (1987), gaya tidak tersebar merata ke seluruh lebar beton (b_w), melainkan terkonsentrasi pada jalur terpendek dan terkaku antara titik beban (kolom) dan tumpuan (tiang pancang).

Penggunaan lebar fisik total pada komponen yang sangat lebar dapat menghasilkan nilai kapasitas yang tidak realistis (*overestimated*). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan lebar efektif (w) yang dibatasi oleh geometri zona nodal dan dimensi kolom. Penentuan lebar efektif ini memberikan model yang lebih konservatif dan akurat dalam mendeteksi kekuatan inti beton pada jalur beban utama (*core stress path*).

Keamanan suatu elemen dalam STM ditentukan oleh nilai Force Ratio, yaitu perbandingan antara beban yang bekerja (F_u) terhadap kuat nominal terkoreksi (ϕF_n). Berdasarkan SNI 2847:2019, syarat mutlak keamanan adalah:

$$Force\ ratio = \frac{F_u}{\phi F_n} \leq 1.0$$

Namun, dalam perspektif desain yang rasional, nilai force ratio tidak hanya harus di bawah 1.0, tetapi juga harus menunjukkan efisiensi material yang optimal.

1. Kondisi *Under-utilized*: Nilai *force ratio* yang terlalu rendah (misalnya < 0.5) mengindikasikan adanya *idle capacity* atau kapasitas yang menganggur. Pada pile cap lebar, hal ini sering terjadi jika seluruh lebar fisik dimasukkan dalam perhitungan.

2. Kondisi Optimal: Desain dianggap rasional apabila *force ratio* berada pada rentang 0.75 hingga 0.95. Angka ini menunjukkan bahwa dimensi yang dipilih telah bekerja secara efektif memikul beban sesuai kapasitas materialnya, tanpa terjadi pemborosan volume beton yang berlebihan

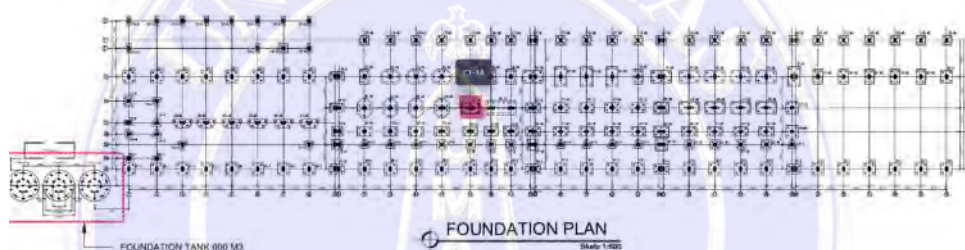
. Beban terpusat yang bekerja pada kolom akan mengalir menuju titik-titik tumpuan (tiang pancang) melalui jalur terpendek dan terkaku. Area di luar jalur aliran tegangan utama ini sering kali bersifat pasif atau hanya berfungsi sebagai pengekan (*confinement*). Menurut Schlaich, aliran gaya dalam daerah diskontinuitas (D-Region) dapat divisualisasikan sebagai medan tegangan yang menyebar dari area pembebanan. Jika lebar fisik elemen (*bw*) sangat besar, maka lebar efektif strut (*ws*) dibatasi oleh geometri nodal dan distribusi lateral beban yang mampu dikembangkan oleh beton.

BAB III

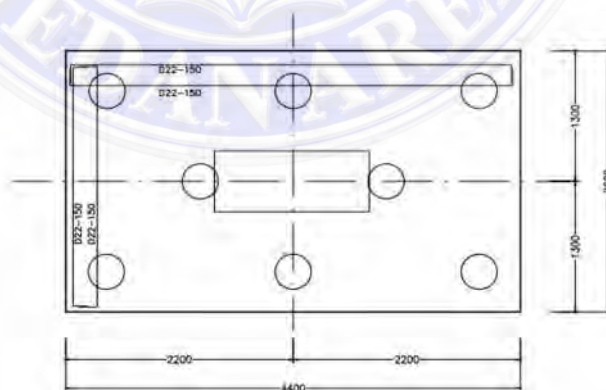
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Umum

Dalam penelitian ini dilakukan kajian yang bersifat analisis. Adapun pilecap yang di analisis pada penelitian ini yaitu pondasi type CT-14 pada proyek pembangunan pabrik kertas di Tanjung Morawa, dapat dilihat pada Gambar 20 (a). Denah pondasi rencana, (b). Detail pondasi type CT-14.



Gambar 20(a). Denah Pondasi Rencana,



Gambar 20(b). Detail pondasi type CT-14 (Data Proyek, 2025).

3.2 Penetapan parameter perencanaan

Perancangan dan analisis dalam penelitian ini didasarkan pada data teknis aktual yang diperoleh dari Proyek Pembangunan Pabrik Kertas Tanjung Morawa. Seluruh parameter material dan geometri disesuaikan dengan kondisi riil di lapangan (*as-built data*) untuk kemudian dievaluasi menggunakan metode *Strut-and-Tie* (STM) berdasarkan ketentuan SNI 2847:2019.

Adapun parameter-parameter utama yang ditetapkan dalam perencanaan ini adalah sebagai berikut:

1. Data Geometri Pilecap (Data Aktual Proyek)

Geometri pilecap ditentukan berdasarkan gambar kerja proyek yang menunjukkan dimensi sebagai berikut:

Tabel 3. Parameter geometri perencanaan, (Data Proyek, 2025).

No	Parameter Geometri	Simbol	Nilai Aktual	Satuan
1	Panjang bentang keseluruhan	L	4400	mm
2	Panjang bentang bersih	L_n	4100	mm
3	Lebar <i>Pilecap</i>	b_w	2600	mm
4	Tinggi/Tebal <i>Pilecap</i>	h	950	mm
5	Tinggi Efektif	d	750	mm
6	Lebar Kolom	b_p	600	mm
7	Panjang Kolom	b_c	1500	mm
8	Jarak Antar Tiang	s	4250	mm
9	Diameter Tiang Pancang	D	300	mm
10	Tebal selimut beton	C_c	75	mm

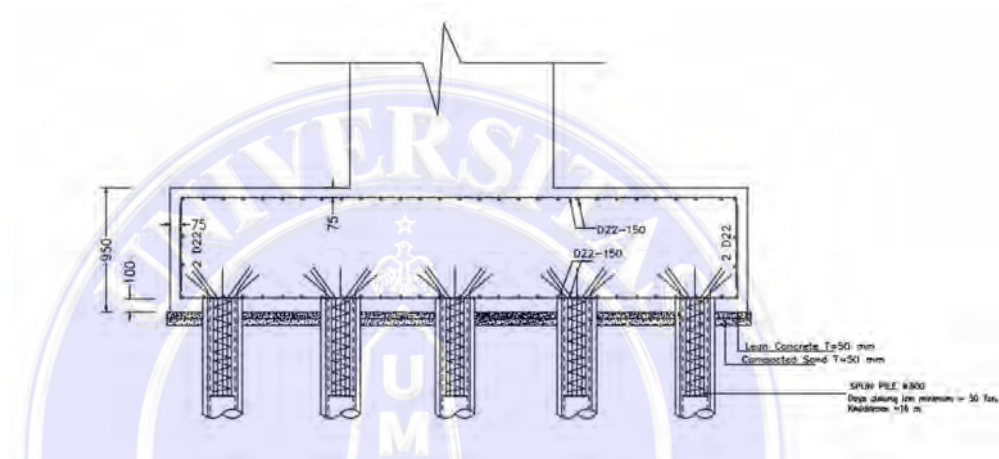
2. Parameter Material

Karakteristik material yang digunakan mengacu pada spesifikasi teknis yang diterapkan di lapangan:

Tabel 4. perencanaan material(Data Proyek, 2025).

No	Kategori	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Beton	Mutu Beton	f_c	30	MPa
		Modulus Elastisitas	E_c	25742,96	MPa
		Berat Jenis Beton	w_c	2400	kg/m ³
2	Baja	Mutu Baja Tulangan	f_y	420	MPa
		Modulus Elastisitas Baja	E_s	200000	MPa
3	Beban	Beban Aksial Kolom	P_u	1625,55	kN
		Jenis Beban	-	Terpusat	-

$$E_c = 4700 \times \sqrt{f'_c}$$



Gambar 21. Potongan melintang Pondasi type CT-14 (Data Proyek, 2025)

3.3 Analisis

Setelah seluruh parameter perencanaan ditetapkan, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis struktural yang terbagi menjadi dua pendekatan utama. Tahap pertama adalah perhitungan manual menggunakan prinsip kesetimbangan gaya untuk menentukan geometri rangka batang (*truss model*) dan gaya-gaya internal pada elemen strut serta tie. Tahap kedua adalah verifikasi menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Strut and Tie* (CAST) untuk memvalidasi hasil perhitungan manual serta mendapatkan distribusi tegangan yang lebih visual dan presisi.

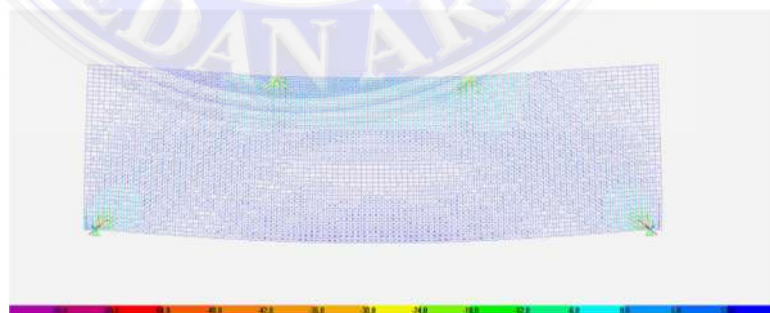
3.3.1 Analisis Menggunakan Perhitungan Manual STM

Analisis manual dilakukan untuk memahami perilaku aliran gaya internal pada pilecap secara fundamental sebelum dilakukan verifikasi dengan perangkat

lunak. Tahapan perhitungan manual ini merujuk pada ketentuan SNI 2847:2019 Pasal 23 mengenai Metode Strut-and-Tie. Langkah-langkah sistematisnya adalah sebagai berikut:

1. Penentuan aliran gaya (*Load Path*)

Analisis didahului dengan menggunakan program *Structure Analysis Program 2000* (SAP 2000). Penggunaan program ini dilakukan untuk mengetahui aliran tegangan yang terjadi pada *pilecap* yang telah dirancang sebelumnya sesuai dengan SNI 2847-2019. Aliran tegangan perlu diketahui untuk menentukan daerah tekan dan tarik sehingga dapat ditetapkan *truss model* yang tepat. pada Gambar 22 menunjukkan kondisi aliran tegangan yang terjadi pada pile cap dengan dimensi yang telah ditetapkan sebelum nya. Garis-garis berwarna kuning, hijau, dan tosca menunjukkan aliran tegangan tekan sedangkan garis-garis berwarna biru tua menunjukkan aliran tegangan tarik. Berdasarkan analisis menggunakan SAP2000 akan diperoleh area yang merupakan daerah tarik dan tekan.

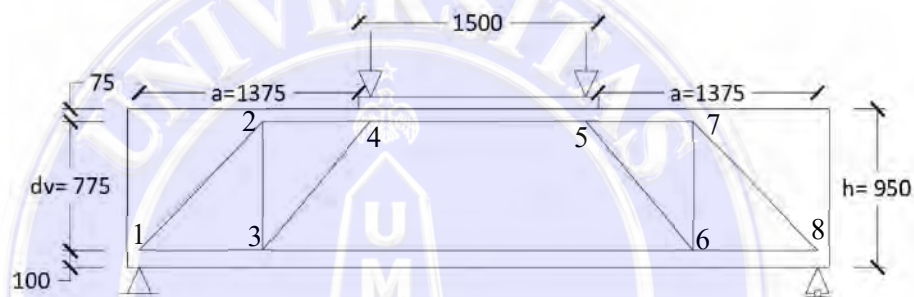


Gambar 22. Aliran Tegangan pada Pile cap Menggunakan SAP2000 (Penulis, 2025)

2. Penentuan Geometri Model Rangka Batang (*Truss Model*)

Setelah aliran tegangan diketahui, maka estimasi dimensi model STM untuk Model dapat ditentukan. Titik-titik nodal (simpul) ditetapkan

berdasarkan posisi as kolom sebagai titik tangkap beban dan as tiang pancang sebagai titik reaksi perletakan. Dalam tahap ini, sudut kemiringan strut (θ) dihitung dan dipastikan tidak kurang dari 25° sesuai syarat SNI 2847:2019 Pasal 23.2.7 guna menjamin keabsahan model rangka batang. *Truss model* yang digunakan adalah rekomendasi dari *CEB-FIP Model Code (1990)*. Model ini adalah model yang paling sederhana. Rangka batang diamsusikan berbentuk trapesium seperti dapat dilihat pada Gambar 23 sesuai dengan aliran tegangan hasil analisis SAP 2000.



Gambar 23. *Truss Mode (CEB-FIP model)*

3. Analisis Gaya Dalam pada Elemen *Strut* dan *Tie*

Dengan menggunakan metode kesetimbangan titik *simpul (method of joints)*, beban aksial kolom sebesar $P = 1625,55 \text{ kN}$ didistribusikan ke setiap elemen. Hasil dari tahap ini adalah nilai gaya tekan terfaktorasi (F_{us}) pada batang strut dan gaya tarik terfaktorasi (F_{ut}) pada batang tie.

4. Perhitungan Kapasitas Penampang Efektif

Kapasitas nominal elemen strut (F_{ns}) dan zona nodal (F_{nn}) dihitung dengan mempertimbangkan kuat tekan efektif beton (f_{ce}). Perhitungan ini menggunakan faktor efisiensi β_s untuk *strut* dan β_n untuk *zona nodal* sesuai dengan klasifikasi lokasinya (titik pertemuan antar elemen).

Kapasitas yang telah direduksi (ϕF_n) kemudian dibandingkan dengan gaya dalam (F_u).

5. Evaluasi Rasio Gaya (*Force Ratio*)

Tahap ini merupakan poin krusial untuk mengevaluasi efisiensi desain. *Force ratio* dihitung dengan membagi gaya dalam terhadap kapasitas penampang yang tersedia ($F_u / \phi F_n$). Apabila analisis terhadap dimensi aktual proyek menghasilkan *force ratio* yang sangat rendah (*di bawah 0,5*), maka struktur diidentifikasi sebagai *over-designed*. Sebagai bentuk tindak lanjut terhadap efisiensi material, dilakukan perhitungan ulang melalui Skenario Optimasi. Target optimasi ditetapkan untuk mencapai *force ratio* pada rentang 0,70 – 0,85. Angka ini dipilih berdasarkan kriteria desain rasional yang menunjukkan bahwa material beton dan baja bekerja secara optimal namun tetap berada dalam batas aman yang diizinkan.

6. Desain Penulangan pada Elemen *Tie*

Gaya tarik yang diperoleh dari analisis rangka batang dikonversikan menjadi kebutuhan luas tulangan baja (A_s). Luas tulangan ini dihitung berdasarkan mutu baja aktual proyek sebesar $f_y = 420\text{MPa}$ untuk memastikan bahwa pilecap mampu menahan gaya tarik yang terjadi pada bagian bawah struktur.

3.3.2 Analisis Menggunakan *Computer Aided Strut and Tie (CAST)*

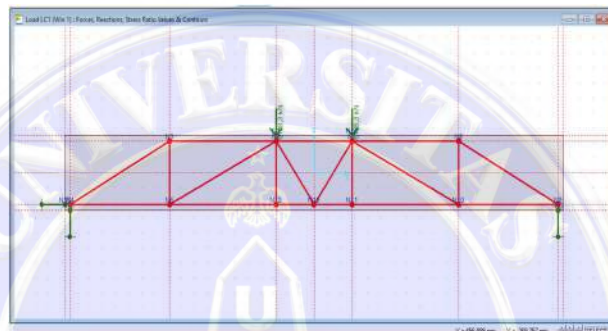
Verifikasi digital dilakukan menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Strut and Tie (CAST)* untuk memvalidasi hasil perhitungan manual serta mendapatkan visualisasi distribusi tegangan yang lebih presisi pada *D-Region*. Penggunaan CAST sangat krusial karena *software* ini mampu melakukan iterasi

lebar strut dan geometri nodal secara otomatis berdasarkan kriteria SNI 2847:2019.

Tahapan analisis dalam software ini adalah sebagai berikut:

1. Definisi Geometri dan Kondisi Batas (*Boundary Conditions*)

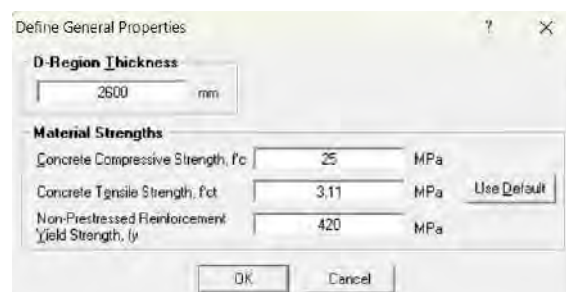
Tahap awal dimulai dengan menentukan koordinat titik simpul (*nodal*) yang mewakili posisi kolom dan tiang pancang. Kondisi batas (*restraints*) ditentukan pada simpul perletakan tiang pancang untuk mengakomodasi reaksi vertikal, seperti dapat dilihat pada gambar 24.



Gambar 24. Geometri dan kondisi batas *pilecap* (Penulis, 2025)

2. Pemilihan Tipe Elemen dan Penampang

Elemen rangka didefinisikan sebagai *strut* (tekan) dan *tie* (tarik). Pada tahap ini, ketebalan pilecap aktual diinput sebagai parameter lebar elemen beton. Karakteristik material beton (f'_c) dan baja (f_y) dimasukkan sesuai data pada Tabel 5, seperti dapat dilihat pada gambar 25.



Gambar 25. Pendefinisian properti material (Penulis, 2025)

3. Aplikasi Beban dan *Running Analysis*

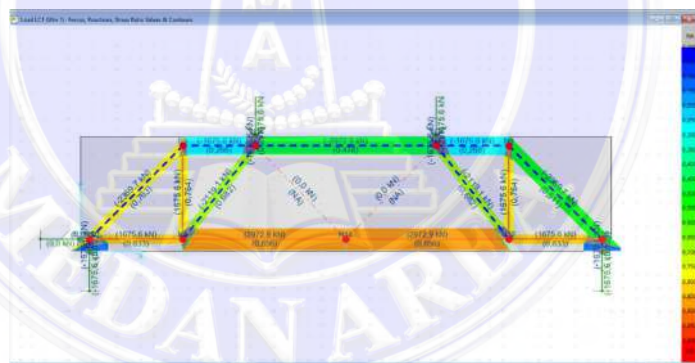
Beban terpusat P_u diaplikasikan pada nodal atas. CAST kemudian melakukan analisis linear untuk mendistribusikan beban ke seluruh elemen rangka batang. Hasil analisis akan menampilkan gaya dalam terbesar (F_u) yang bekerja pada tiap elemen, seperti dapat dilihat pada gambar26.

4. Evaluasi Kapasitas Nodal dan Strut (*Processing Results*)

CAST secara otomatis menghitung kapasitas penampang berdasarkan geometri nodal yang terbentuk (*tipe C-C-C, C-C-T, atau C-T-T*). Indikator utama yang diperhatikan adalah *Utilization Ratio (Force Ratio)*.

5. Output Visual Jalur Tegangan

Hasil akhir berupa visualisasi jalur tegangan (*stress path*) yang menunjukkan area beton yang bekerja paling dominan dalam menyalurkan beban.



Gambar26. Hasil *running* CAST (Penulis, 2025)

3.3.3 Perbandingan Hasil

Tahap akhir dari metodologi ini adalah melakukan studi komparatif antara hasil perhitungan manual dengan hasil pemodelan digital menggunakan perangkat lunak CAST. Tujuan utama dari perbandingan ini adalah untuk memvalidasi akurasi model rangka batang yang telah disusun. Parameter-parameter yang akan dibandingkan meliputi:

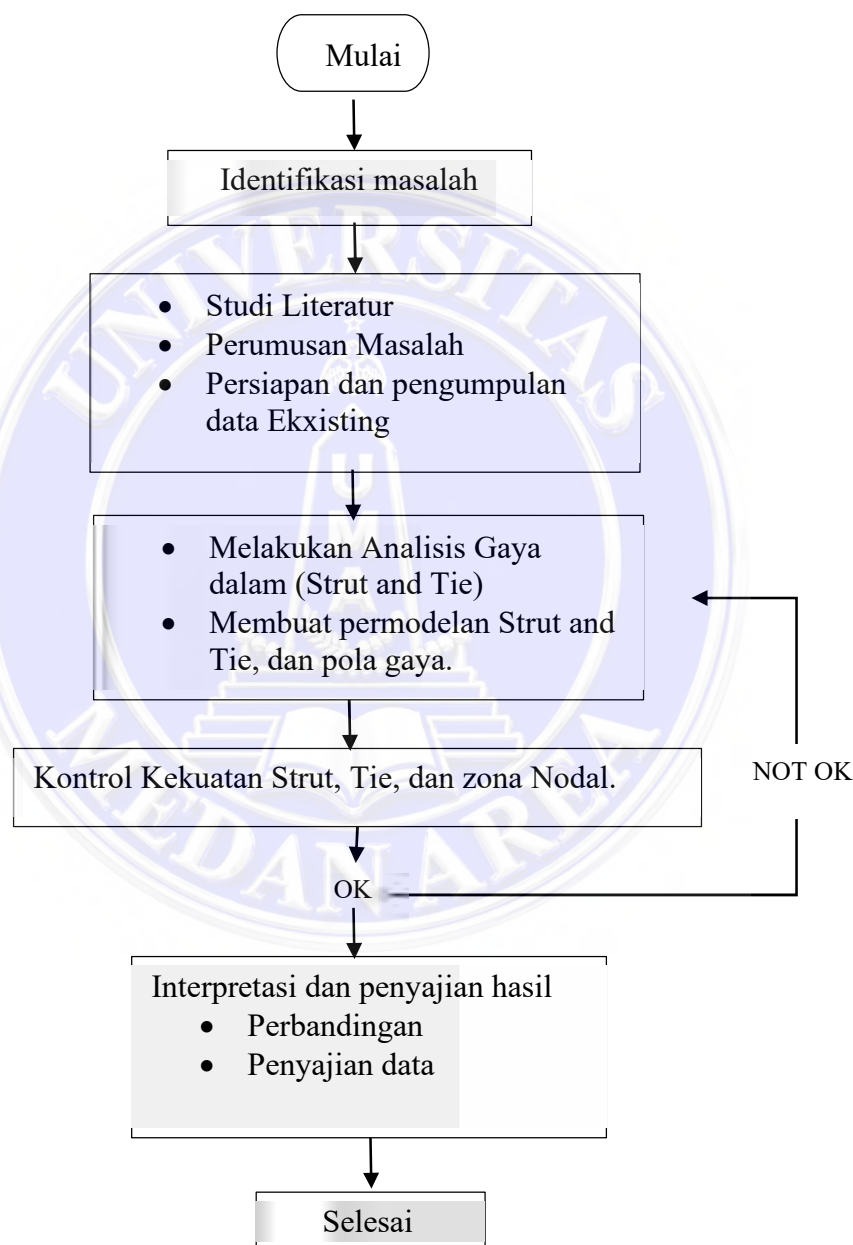
1. Gaya Batang (F_u): Membandingkan besaran gaya tekan pada *strut* dan gaya tarik pada *tie* untuk memastikan distribusi beban pada kedua metode konsisten secara mekanika statika.
2. Kapasitas Nominal (ϕF_n) : Mengevaluasi perhitungan penampang efektif pada zona nodal dan *strut* guna memastikan parameter efisiensi (β_s) yang diinput ke dalam software sinkron dengan ketentuan SNI 2847:2019.
3. *Force Ratio*: Membandingkan nilai rasio pemanfaatan kapasitas untuk menentukan tingkat keamanan struktur.

Apabila deviasi atau selisih hasil antara perhitungan manual dan CAST berada di bawah batas toleransi yang diijinkan (umumnya $< 5\%$), maka pemodelan CAST dinyatakan valid dan dapat digunakan sebagai instrumen utama dalam melakukan skenario optimasi penampang. Hasil ini sekaligus membuktikan bahwa penggunaan perangkat lunak dapat meningkatkan efisiensi waktu pengerjaan analisis *Strut-and-Tie* tanpa mengurangi tingkat akurasi dan keamanan desain struktur *pilecap*.

Setelah validasi model antara perhitungan manual dan CAST tercapai, tahap berikutnya adalah melakukan analisis sensitivitas terhadap ketebalan *pilecap* aktual. Prosedur ini bertujuan untuk mendapatkan dimensi penampang yang paling optimal melalui iterasi penurunan ketebalan struktur hingga mencapai target *force ratio* di kisaran 0,70 – 0,85, sebagaimana yang disyaratkan dalam kriteria desain rasional

3.4 Alur Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan kajian yang bersifat analisis. Adapun tahapan-tahapan atau prosedur kegiatan dari awal sampai telah terangkum dalam suatu bagan alir atau flowchart. Tahapan-tahapan kegiatan penelitian dapat dilihat pada Gambar 26.



Gambar 26. Tahapan-tahapan penelitian(Penulis, 2025)

BAB 5

SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis perhitungan manual dan pemodelan menggunakan software CAST pada pile cap proyek pembangunan pabrik kertas, maka dapat ditarik beberapa simpulan sebagai berikut::

1. Melalui pendekatan *Strut-and-Tie Model* (STM), aliran gaya internal pada pile cap teridentifikasi membentuk pola rangka batang (*truss*) yang stabil. Hasil visualisasi menunjukkan bahwa gaya tekan (*strut*) mengalir secara diagonal dari pangkal kolom menuju masing-masing titik tumpuan, sementara gaya tarik (*tie*) bekerja secara horizontal di bagian bawah pile cap untuk menjaga keseimbangan struktur. Hal ini membuktikan bahwa pile cap berfungsi sepenuhnya sebagai daerah diskontinuitas (*D-Region*).
2. Analisis distribusi tegangan menunjukkan bahwa elemen *strut* dan *node* berada dalam kondisi aman dengan nilai tegangan yang tidak melampaui kapasitas tekan beton yang diizinkan menurut SNI 2847:2019. Penggunaan tulangan tarik (*tie*) yang ditentukan berdasarkan gaya tarik hasil pemodelan STM memberikan hasil yang lebih efisien dan terukur dalam menahan beban aksial kolom sebesar $P = 1675,5$ kN.
3. Berdasarkan hasil analisis, pile cap dinyatakan aman dalam menyalurkan beban aksial kolom sebesar $P = 1625,55$ kN, di mana seluruh elemen strut, tie, dan node memiliki kapasitas nominal (ϕF_n) yang lebih besar dari gaya dalam yang bekerja (F_u). Hasil verifikasi menggunakan software CAST menunjukkan tingkat konsistensi yang sangat tinggi terhadap perhitungan

manual dengan selisih nilai yang minimal, serta validasi visual yang menunjukkan tidak adanya elemen yang melampaui batas izin (*overstressed*). Hal ini membuktikan bahwa integrasi metode STM manual dengan perangkat lunak CAST memberikan hasil evaluasi kapasitas yang akurat, reliabel, dan memenuhi standar SNI 2847:2019.

5.1 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya maupun aplikasi praktis di lapangan adalah sebagai berikut:

1. Dalam merencanakan *pile cap* yang sangat lebar, disarankan untuk tidak hanya mengandalkan perhitungan geser konvensional, tetapi juga melakukan validasi menggunakan metode STM dengan pendekatan lebar efektif untuk mendapatkan gambaran kinerja internal beton yang lebih realistis.
2. Penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan membandingkan hasil metode STM ini dengan analisis *Finite Element Method* (FEM) 3D untuk memvisualisasikan persebaran tegangan (*stress path*) secara lebih mendalam pada area di luar lebar efektif.
3. Disarankan untuk melakukan studi parametrik lebih lanjut mengenai pengaruh variasi mutu beton (f'_c) terhadap kebutuhan lebar efektif *strut*, guna mendapatkan rasio dimensi yang paling ekonomis namun tetap memenuhi kriteria keamanan SNI.

DAFTAR PUSTAKA

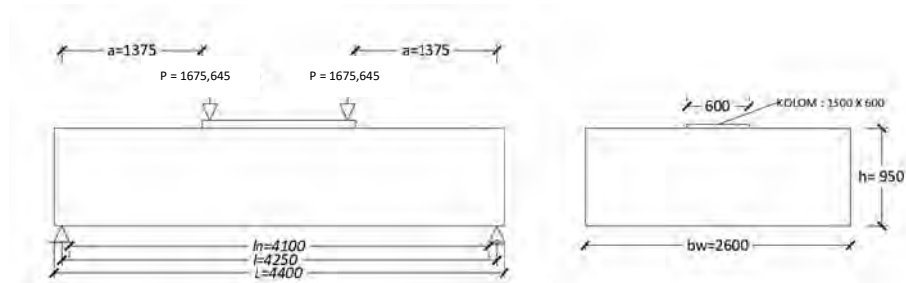
- [1] J. Sinaga, N. A. S. Siallagan, and Suhairiani, "Teknik Pelaksanaan Pekerjaan pilecap pada pondasi gedung," vol. 6, no. 1, pp. 27–33, 2021.
- [2] M. A. Sedayu, D. Sulisty, and A. Aminullah, "Eksperimen Pada Struktur Pile Cap Tiga Tiang Dengan Metode Strut and Tie Model," INERSIA Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur, vol. 15, no. 2, pp. 31–43, 2019.
- [3] H. Hardjasaputra and S. Tumilar, Perancangan Beton Struktural Berdasarkan Model Strat dan Pengikat (Strut-and-Tie Model) SNI 2847-2013, 1st ed. Jakarta, Indonesia: Universitas Pelita Harapan, 2016.
- [4] W.-F. Chen, E. Salah El-Din, and El-Metwally, Structural Concrete Strut-and-Tie Models for Unified Design. Boca Raton: CRC Press, 2018. [Online]. Available: <https://lcn.go.v/2017015368>.
- [5] A. Beghini, B. Carryer, J. Baker, and P. D. Smith, "Computer-Aided Strut-and-Tie (CAST): Modeling Tool for the Design of Disturbed Regions in Concrete Structures," PCI Journal, vol. 53, pp. 118–137, 2008.
- [6] A. Wijaya, N. Jakarta, J. D. G. A. Siwabessy, and K. Beji, "Pile Cap Design Using the Strut and Tie Model (STM) Method," 2024.
- [7] S. Sukarman, D. Sulisty, and I. S. Irawati, "Analisis Regangan Baja Tulangan Pada Struktur Pile Cap Empat Tiang Metode Strut and Tie Model," INERSIA Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur, vol. 15, no. 2, pp. 60–71, 2019.
- [8] T. A. Putera, H. M. Gultom, and F. P. Susanto, "Evaluasi Dan Perencanaan Pile Cap Pada Fly Over Jamin Ginting Kota Medan," Portal, vol. 11, no. 2, 2019.
- [9] G. Milutinović, N. Pecić, R. Hajdin, S. Mašović, and D. Bobera, "A Practical Method For Strut-And-Tie Modelling Of The Bridge Pile Cap," in Int. Sci. Conf. Planning, Design, Construction and Building Renewal, Nov. 2023, pp. 2–12. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/375718120>.
- [10] *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung, SNI 2847-2019, Badan Standar Nasional, Jakarta, 2019. [Online]. Available: www.bsn.go.id.*
- [11] H. M. Salem and K. Maekawa, "Computer-Aided Analysis of Reinforced Concrete Using a Refined Nonlinear Strut and Tie Model Approach," Japan, Jun. 2006.
- [12] R. Folić, B. Folić, and I. M. Miličić, "PRIMENA ŠTAPNIH MODELA U ANALIZI KAPE TEMELJA NA ŠIPOVIMA," Zbornik radova

Graduvinog fakulteta, vol. 34, pp. 33–40, 2018, doi:
10.14415/konferencijagfs2018.002.



LAMPIRAN 1

PERHITUNGAN MANUAL



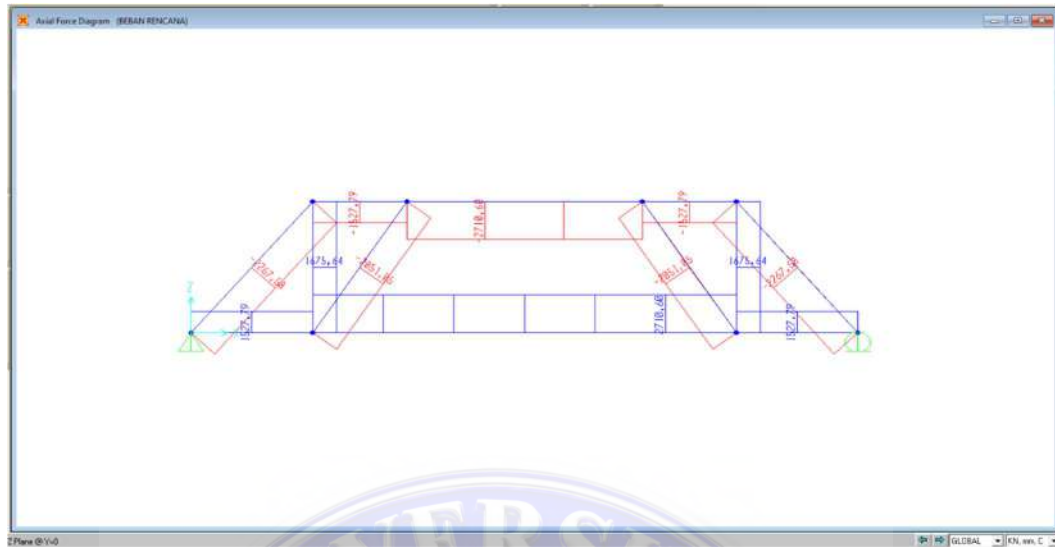
Gambar permodelan Pilecap

rangkuman data-data perancangan dimensi adalah:

- | | | |
|-----------------------------------|------------------|------------------|
| 1. Dimensi Pile cap | : $bw = 2600$ | : $h = 950$ mm |
| 2. Panjang bentang total | : $L = 4400$ | mm |
| 3. Panjang bentang bersih | : $Ln = 4100$ | mm |
| 4. Dimensi kolom | : $bp = 600$ | : $bc = 1500$ mm |
| 5. Beban terpusat | : $p = 1675,645$ | kN |
| 6. Mutu beton | : $fc = 25$ | mpa |
| 7. Mutu baja | : $fy = 420$ | mpa |
| 8. Selimut beton | : $cc = 75$ | mm |
| 9. Tinggi Nodal(atas/bawah) | : $Hn = 100$ | mm |
| 10. Jarak kolom dengan tumpuan(a) | : $a = 1375$ | mm |
| 11. Diameter tiang pancang | : $Lp = 300$ | mm |

Langkah 1 : Cek kapasitas daya pikul pada daerah pembebanan dan tumpuan

$$\begin{aligned}
 - \text{tinggi efektif (dv)} &= h - 100 - 100 \\
 &= 750 \quad \text{mm} \\
 - \text{Sudut yang di ambil } (\theta) &= \tan^{-1} \frac{750}{1375} \\
 &= 29^\circ
 \end{aligned}$$



Hasil analisis Rangka Batang Menggunakan Sap200

- Gaya batang Hasil Analisis Struktur dengan SAP2000:

Batang	Jenis Gaya	Gaya (KN)
		2267,58
F ₁₂	Tekan	
F ₁₃	Tarik	1527,79
F ₂₃	Tarik	1675,64
F ₂₄	Tekan	1527,79
F ₃₄	Tekan	2051,05
F ₃₆	Tarik	2710,06
F ₄₅	Tekan	2710,6

Langkah 2: Cek kapasitas daya pikul pada daerah pembebanan dan tumpuan

Cek terhadap gaya geser

$$\text{Harus memenuhi : } V_u \leq \Phi 0,83 \times \sqrt{f'_c} b d$$

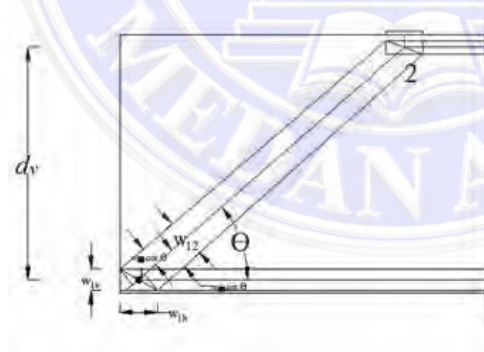
$$1675,6445 \leq 7687,88 \quad OK$$

Langkah 3: Menentukan Lebar Strut dan Tie

Konfigurasi zona nodal	β_n	
Zona nodal yang dibatasi oleh strut, area tumpuan atau keduanya	1,0	(a)
Zona nodal yang mengangkurkan satu tie	0,80	(b)
Zona nodal yang mengangkurkan dua atau lebih tie	0,60	(c)

- Nodal 1,2,7 dan 8 $C-C-T = f_{ce} = 0,85 f_c' \beta_n$
 $f_{ce}(1) = 17 \quad \text{N/mm}$
 $f_{cu}(1) = \Phi f_{ce}(1) = 12,75 \quad \text{N/mm}$
- Nodal 3 dan 6 $C-T-T = f_{ce} = 0,85 f_c' \beta_n$
 $f_{ce}(2) = 12,75 \quad \text{N/mm}$
 $f_{cu}(2) = \Phi f_{ce}(2) = 9,5625 \quad \text{N/mm}$
- Nodal 4 dan 5 $C-C-C = f_{ce} = 0,85 f_c' \beta_n$
 $f_{ce}(3) = 21,25 \quad \text{N/mm}$
 $f_{cu}(3) = \Phi f_{ce}(3) = 15,9375 \quad \text{N/mm}$

Pada perhitungan manual ini, strut dikaji pada masing-masing muka untuk mencari lebarnya.



- Tie 1-3 = $w_{1h} = \frac{F_{13}}{\phi(B_P)(f_{ce}(1))}$
 $= 79,88 \quad \text{mm}$
- Tie 3-1 = $w_{1h} = \frac{F_{13}}{\phi(B_P)(f_{ce}(2))}$

$$= 106,51 \quad \text{mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Tie 3-6} = w_{3h} &= \frac{F_{36}}{\phi_{(B_P)}(f_{ce(3)})} \\ &= 188,94 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tie 2-3} = w_{2v} &= \frac{F_{23}}{\phi_{(B_P)}(f_{ce(1)})} \\ &= 87,62 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tie 3-2} = w_{2v} &= \frac{F_{23}}{\phi_{(B_P)}(f_{ce(2)})} \\ &= 116,82 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Strut 4-2} = w_{2v} &= \frac{F_{24}}{\phi_{(B_P)}(f_{ce(3)})} \\ &= 63,91 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Strut 2-4} = w_{2v} &= \frac{F_{24}}{\phi_{(B_P)}(f_{ce(1)})} \\ &= 79,88 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Strut 4-3} = w_{3v} &= \frac{F_{34}}{\phi_{(B_P)}(f_{ce(3)})} \\ &= 142,99 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Strut 3-4} = w_{3v} &= \frac{F_{34}}{\phi_{(B_P)}(f_{ce(2)})} \\ &= 142,99 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Strut 1-2} = w_{2v} &= \frac{F_{12}}{\phi_{(B_P)}(f_{ce(1)})} \\ &= 118,57 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Strut 4-5} = w_{2v} &= \frac{F_{45}}{\phi_{(B_P)}(f_{ce(4)})} \\ &= 113,38 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan disimpulkan dalam bentuk tabel:

Element batang	Type	w(mm)
1-3	<i>Tie</i>	80
3-6	<i>Tie</i>	189
3-2	<i>Tie</i>	88
2-4	<i>Strut</i>	80
3-4	<i>Strut</i>	143
1-2	<i>Strut</i>	119
4-5	<i>Strut</i>	113
2-1	<i>Strut</i>	113
4-3	<i>Strut</i>	80
5-4	<i>Strut</i>	113
4-2	<i>Strut</i>	64

Langkah 4 : Cek keamanan strut pada daerah nodal ($\Phi F_{ns} \geq F_u$)

Karena semua strut diasumsikan prismatik maka diambil β_s adalah 1.

Kekuatan strut dapat dihitung dengan rumus :

$$f_{ce} = \beta_s (0,85 f_c')$$

maka, $f_{ce} = 21,25 \text{ N/mm}$

strut 1-2 :

$$F_{ns} = f_{ce} w bw$$

$$= 6550,79 \text{ Kn}$$

sehingga: $\Phi F_{ns} \geq F_u$

$$4913,09 \geq 2267,58 \text{ Kn} \quad OK.....$$

strut 2-1 :

$$F_{ns} = f_{ce} w bw$$

$$= 6264,50 \text{ Kn}$$

sehingga: $\Phi F_{ns} \geq F_u$

$$4698,3733 \geq 2267,58 \text{ Kn} \quad OK.....$$

strut 2-4 :

$$F_{ns} = f_{ce} w bw$$

$$\begin{aligned}
 &= 4413,62 \quad \text{Kn} \\
 \text{sehingga: } \Phi F_{ns} &\geq F_u \\
 3310,21 &\geq 1527,79 \quad \text{Kn} \quad \text{OK.....} \\
 \text{strut 4-2} &: \\
 F_{ns} &= f_{ce} w bw \\
 &= 3530,89 \quad \text{Kn} \\
 \text{sehingga: } \Phi F_{ns} &\geq F_u \\
 2648,17 &\geq 1527,79 \quad \text{Kn} \quad \text{OK.....} \\
 \text{strut 3-4} &: \\
 F_{ns} &= f_{ce} w bw \\
 &= 7900,34 \quad \text{Kn} \\
 \text{sehingga: } \Phi F_{ns} &\geq F_u \\
 5925,26 &\geq 2051,05 \quad \text{Kn} \quad \text{OK.....} \\
 \text{strut 4-3} &: \\
 F_{ns} &= f_{ce} w bw \\
 &= 4413,62 \quad \text{Kn} \\
 \text{sehingga: } \Phi F_{ns} &\geq F_u \\
 3310,21 &\geq 2051,05 \quad \text{Kn} \quad \text{OK.....} \\
 \text{strut 4-5} &: \\
 F_{ns} &= f_{ce} w bw \\
 &= 6264,50 \quad \text{Kn} \\
 \text{sehingga: } \Phi F_{ns} &\geq F_u \\
 4698,37 &\geq 2710,6 \quad \text{Kn} \quad \text{OK.....} \\
 \text{strut 5-4} &: \\
 F_{ns} &= f_{ce} w bw \\
 &= 6264,50 \quad \text{Kn} \\
 \text{sehingga: } \Phi F_{ns} &\geq F_u \\
 4698,37 &\geq 2710,6 \quad \text{Kn} \quad \text{OK.....}
 \end{aligned}$$

Langkah 5: Desain Penulangan

- Untuk Tie 3-2 :

$$AS(perlu) = \frac{F_{23}}{\phi f_y}$$

$$= 4432,9 \quad \text{mm}^2$$

GUNAKAN TULANGAN DIAMETER 22 mm

$$AS(perlu) = n \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$n = 11,667 \quad \text{DI GUNAKAN} \quad 12 \text{ btg}$$

Cek kembali keamanan :

$$AS(aktual) = n \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$= 4563,43 \quad \text{mm}^2$$

$$AS(aktual) > AS(perlu)$$

$$4563,43 > 4432,91 \quad \text{OK.....}$$

MAKA DI GUNAKAN 12 D22

Cek jarak bersih antar tulangan :

$$\text{Jarak bersih} = \frac{bw - 2Cc - \phi v - nD}{n - 1} > 25 \text{ mm}$$

$$= 127,64 \quad \text{OK.....}$$

-

Untuk Tie 3-6 :

$$AS(perlu) = \frac{F_{36}}{\phi f_y}$$

$$= 7169,47 \quad \text{mm}^2$$

GUNAKAN TULANGAN DIAMETER 22 MM

$$AS(perlu) = n \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$18,870$$

$$n = \quad \text{DI GUNAKAN} \quad 19 \text{ btg}$$

Cek kembali keamanan :

$$AS(aktual) = n \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$\begin{aligned} &= 7225,43 \quad \text{mm}^2 \\ \text{AS(aktual)} &> \text{AS(perlu)} \end{aligned}$$

$$7225,43 > 7169,47 \quad \text{OK.....}$$

MAKA DI GUNAKAN 19 D22

Cek jarak bersih antar tulangan :

$$\begin{aligned} \text{Jarak bersih} &= \frac{bw - 2Cc - \phi v - nD}{n - 1} > 25 \text{ mm} \\ &= 69,44 \quad \text{OK.....} \end{aligned}$$

-

Untuk Tie 1-3 :

$$\begin{aligned} \text{AS(perlu)} &= \frac{F_{13}}{\phi f_y} \\ &= 4041,77 \quad \text{mm}^2 \end{aligned}$$

GUNAKAN TULANGAN DIAMETER 22 mm

$$\text{AS(perlu)} = n \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$n = 10,638 \quad \text{DI GUNAKAN } 11 \text{ btg}$$

Cek kembali keamanan :

$$\begin{aligned} \text{AS(aktual)} &= n \frac{1}{4} \pi d^2 \\ &= 4183,14 \quad \text{mm}^2 \\ \text{AS(aktual)} &> \text{AS(perlu)} \end{aligned}$$

$$4183,14 > 4041,77 \quad \text{OK.....}$$

MAKA DI GUNAKAN 11 D22

Cek jarak bersih antar tulangan :

$$\begin{aligned} \text{Jarak bersih} &= \frac{bw - 2Cc - \phi v - nD}{n - 1} > 25 \text{ mm} \\ &= 142,60 \quad \text{OK.....} \end{aligned}$$

untuk tulangan badan horizontal :

$$A_{vh} = 0,0025 A_{cv}$$

$$\begin{aligned}
 A_{cv} &= b_w \cdot s_2 \\
 \text{untuk tulangan badan vertikal} &: \\
 A_v &= 0,0025 A_{cv} \\
 A_{cv} &= b_w \cdot s_1 \\
 s &= s_1 = s_2 \quad *s \text{ tidak boleh lebih dari } d/5. \\
 \text{maka digunakan} \quad s &= 55 \quad \text{mm} \\
 \text{sehingga} &=
 \end{aligned}$$

$$A_{vh} = 247,5 \quad \text{mm}^2$$

$$A_v = 247,5 \quad \text{mm}^2$$

A_{vh} dan A_v adalah sama,

$$\begin{aligned}
 \text{maka:} \quad d &= \sqrt{\frac{A_v \cdot 4}{\pi}} \\
 &= 17,75 \quad \text{mm}
 \end{aligned}$$

GUNAKAN TULANGAN DIAMETER 22 mm

$$\begin{aligned}
 A_{vt} &= \frac{1}{4} \pi d^2 \\
 &= 380,29 \quad \text{OK.....}
 \end{aligned}$$

Gunakan D22-55 pada penulangan kedua sisi vertikal dan horizontal

Langkah 6: Cek Penulangan Minimum.

$$\begin{aligned}
 \sum \frac{A_{s_i}}{b_w s_i} \sin \alpha_i &\geq 0,003 \\
 0,0070 &\geq 0,003 \quad \text{OK.....}
 \end{aligned}$$

Langkah 7: Cek Kembali kekuatan Strut, Tie, dan Nodal dengan tulangan yang telah di desain.

CEK KEKUATAN STRUT

Untuk w12 diambil $\beta_s = 1$ karena diasumsikan prismatik

$$F_{ce} =$$

$$\begin{aligned} & \beta_s(0,85 f'c \\ & = 21,25 \quad \text{N/mm}^2 \\ F_{ns} & = fce \cdot Acs = fce \cdot W12 \cdot Bw \\ & = 4535,16 \quad \text{KN} \end{aligned}$$

$$\phi F_{ns} \geq F_u$$

$$\begin{aligned} 3401,37 & \geq 2267,58 \quad \text{KN} \quad \text{OK.....} \\ Efisiensi & = 66,7\% \end{aligned}$$

Untuk w21 diambil $\beta_s = 1$ karena diasumsikan prismatik

$$\begin{aligned} F_{ce} & = \beta_s(0,85 f'c \\ & = 21,25 \quad \text{N/mm}^2 \\ F_{ns} & = fce \cdot Acs = fce \cdot W21 \cdot Bw \\ & = 4336,96 \quad \text{KN} \end{aligned}$$

$$\phi F_{ns} \geq F_u$$

$$\begin{aligned} 3252,72 & \geq 2267,58 \quad \text{KN} \quad \text{OK.....} \\ Efisiensi & = 69,7\% \end{aligned}$$

Untuk w24 diambil $\beta_s = 1$ karena diasumsikan prismatik

$$\begin{aligned} F_{ce} & = \beta_s(0,85 f'c \\ & = 21,25 \quad \text{N/mm}^2 \\ F_{ns} & = fce \cdot Acs = fce \cdot W24 \cdot Bw \\ & = 3055,58 \quad \text{KN} \end{aligned}$$

$$\phi F_{ns} \geq F_u$$

$$\begin{aligned} 2291,685 & \geq 1527,79 \quad \text{KN} \quad \text{OK.....} \\ Efisiensi & = 66,7\% \end{aligned}$$

Untuk w42 diambil $\beta_s = 1$ karena diasumsikan prismatik

$$\begin{aligned} F_{ce} & = \beta_s(0,85 f'c \\ & = 21,25 \quad \text{N/mm}^2 \\ F_{ns} & = fce \cdot Acs = fce \cdot W42 \cdot Bw \\ & = 2444,46 \quad \text{KN} \end{aligned}$$

$$\phi F_{ns} \geq F_u$$

$$\begin{aligned} 1833,348 & \geq 1527,79 \quad \text{KN} \quad \text{OK.....} \\ Efisiensi & = 83,3\% \end{aligned}$$

Untuk w34 diambil $\beta_s = 1$ karena diasumsikan prismatik

$$\begin{aligned} F_{ce} & = \\ & \beta_s(0,85 f'c \\ & = 21,25 \quad \text{N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{ns} & = fce \cdot Acs = fce \cdot W34 \cdot Bw \\ & = 5469,47 \quad \text{KN} \end{aligned}$$

$$\phi F_{ns} \geq F_u$$

$$4102,1 \geq \quad \text{KN} \quad \text{OK.....}$$

$$Efisiensi = \frac{2051,05}{50,0\%}$$

Untuk w43 diambil $\beta_s = 1$ karena diasumsikan prismatik

$$\begin{aligned} F_{ce} &= \beta_s(0,85 f'c) \\ &= 21,25 \quad \text{N/mm}^2 \\ F_{ns} &= f_{ce} \cdot A_{cs} = f_{ce} \cdot W43 \cdot B_w \\ &= 3055,58 \quad \text{KN} \\ \phi F_{ns} &\geq F_u \\ 2291,685 &\geq 2051,05 \quad \text{KN} \quad \text{OK.....} \\ Efisiensi &= 89,5\% \end{aligned}$$

Untuk w45 dan 54 diambil $\beta_s = 1$ karena diasumsikan prismatik

$$\begin{aligned} F_{ce} &= \beta_s(0,85 f'c) \\ &= 21,25 \quad \text{N/mm}^2 \\ F_{ns} &= f_{ce} \cdot A_{cs} = f_{ce} \cdot W45 \cdot B_w \\ &= 4336,96 \quad \text{KN} \\ \phi F_{ns} &\geq F_u \\ 3252,72 &\geq 2710,6 \quad \text{KN} \quad \text{OK.....} \\ Efisiensi &= 83,3\% \end{aligned}$$

CEK KEKUATAN TIE

Untuk Tie 3-2

$$\begin{aligned} F_{nt} &= A_{ts} \cdot F_y + A_{tp} (se+\Delta p) \\ F_{nt} &= A_{ts} \cdot F_y \\ &= 1916,64 \quad \text{KN} \\ \phi F_{nt} &\geq F_u \\ 1724,976 &\geq 1675,64 \quad \text{KN} \quad \text{OK.....} \\ Efisiensi &= 97,1\% \end{aligned}$$

Untuk Tie 3-6

$$\begin{aligned} F_{nt} &= A_{ts} \cdot F_y + A_{tp} (se+\Delta p) \\ F_{nt} &= A_{ts} \cdot F_y \\ &= 3034,68 \quad \text{KN} \\ \phi F_{nt} &\geq F_u \\ 2731,212 &\geq 2710,06 \quad \text{KN} \quad \text{OK.....} \\ Efisiensi &= 99,2\% \end{aligned}$$

Untuk Tie 1-3

$$\begin{aligned} F_{nt} &= A_{ts} \cdot F_y + A_{tp} (se+\Delta p) \\ F_{nt} &= A_{ts} \cdot F_y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1756,92 \quad \text{KN} \\
 \phi F_{nt} &\geq F_u \\
 1581,228 &\geq 1527,79 \quad \text{KN} \quad \text{OK.....} \\
 \text{Efisiensi} &96,62\%
 \end{aligned}$$

Hasil Perhitungan efisiensi Strut dan Tie.

<i>Tie</i>	<i>Ats(mm²)</i>	<i>Fnt(KN)</i>	<i>ΦFnt(KN)</i>	<i>Fu(KN)</i>	<i>Keamanan</i>	<i>Efisiensi(%)</i>
1-3	4183,14	1756,92	1581,228	1527,79	OK.....	96,62%
3-2	4563,43	1916,64	1724,976	1675,64	OK.....	97,14%
3-6	4183,14	3034,68	2731,212	2710,06	OK.....	99,23%
<i>Strut</i>	<i>W(mm)</i>	<i>Fns(KN)</i>	<i>ΦFns(KN)</i>	<i>Fu(KN)</i>	<i>Keamanan</i>	<i>Efisiensi(%)</i>
2-4	79,88	3055,58	2291,685	1527,79	OK.....	66,67%
3-4	142,99	5469,47	4102,1	2051,05	OK.....	50,00%
1-2	118,57	4535,16	3401,37	2267,58	OK.....	66,67%
4-5	113,38	4336,96	3252,72	2710,6	OK.....	83,33%
2-1	113,38	4336,96	3252,72	2267,58	OK.....	69,71%
4-3	79,88	3055,58	2291,685	2051,05	OK.....	89,50%
5-4	113,38	4336,96	3252,72	2710,6	OK.....	83,33%
4-2	63,91	2444,46	1833,348	1527,79	OK.....	83,33%

CEK KEKUATAN NODAL

Nodal (n) Jenis Nodal β _n f _{ce} (n) (N/mm ²)			
nodal(n)	Jenis nodal	β _n	f _{ce} (n) (N/mm ²)
1	C-C-T	0,8	16
2	C-C-T	0,8	16
3	C-T-T	0,6	12
4	C-C-C	1	20
5	C-C-C	1	20
6	C-T-T	0,6	12
		F _{nn} =	f _{ce} . Anz

Untuk nodal Type (C-C-C), β_n = 1

$$\begin{aligned}
 f_{ce} &= 0,85 f_c \beta_n \\
 &= 20 \quad \text{N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Untuk nodal Type (C-C-T) β_n = 0,8

$$\begin{aligned}
 f_{ce} &= 0,85 f_c \beta_n \\
 &= 16 \quad \text{N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Untuk nodal Type (C-T-T), β_n = 0,6

$$f_{ce} = 0,85 f_c \beta_n$$

$$= 12 \text{ N/mm}^2$$

	Anz	=	w.bw
untuk Tie 1-3	Anz	=	143792,0 mm ²
untuk Tie 3-6	Anz	=	340086,0 mm ²
Untuk Tie 3-2	Anz	=	157707,3 mm ²
untuk Strut 2-4	Anz	=	143792,0 mm ²
untuk Strut 3-4	Anz	=	257386,7 mm ²
untuk Strut 1-2	Anz	=	213419,3 mm ²
untuk Strut 4-5	Anz	=	204092,2 mm ²
untuk Strut 2-1	Anz	=	204092,2 mm ²
untuk Strut 4-3	Anz	=	143792,0 mm ²
untuk Strut 5-4	Anz	=	204092,2 mm ²
untuk Strut 4-2	Anz	=	115033,6 mm ²

Kekuatan Nodal dideterminasi melalui :

Tie 1-3

$$\Phi F_{nn} \geq F_u$$

$$1725,504 \geq 1527,79 \text{ KN OK.....}$$

Tie 3-6

$$\Phi F_{nn} \geq F_u$$

$$3060,7736 \geq 2710,06 \text{ KN OK.....}$$

Tie 3-2

$$\Phi F_{nn} \geq F_u$$

$$1892,4875 \geq 1675,64 \text{ KN OK.....}$$

Strut 2-4

$$\Phi F_{nn} \geq F_u$$

$$1725,504 \geq 1527,79 \text{ KN OK.....}$$

Strut 3-4

$$\Phi F_{nn} \geq F_u$$

$$2316,48 \geq 2051,05 \text{ KN OK.....}$$

Strut 1-2

$$\Phi F_{nn} \geq F_u$$

$$2561,0315 \geq 2267,58 \text{ KN OK.....}$$

Strut 4-5

$$\Phi F_{nn} \geq F_u$$

$$3061,3835 \geq 2710,60 \text{ KN OK.....}$$

Strut 2-1

$$\Phi F_{nn} \geq F_u$$

$$2449,1068 \geq 2267,58 \text{ KN OK.....}$$

Strut 4-3

$$\Phi F_{nn} \geq F_u$$

$$2156,88 \geq 2051,05 \text{ KN OK.....}$$

Strut 5-4

$$\Phi F_{nn} \geq F_u$$

$$3061,3835 \geq 2710,60 \text{ KN OK.....}$$

Strut 4-2

$$\Phi F_{nn} \geq F_u$$

$$1725,504 \geq 1675,64 \text{ KN OK.....}$$

Tabel: Hasil perhitungan nodal zone (penulis, 2025).

Langkah 8: Cek pengangkuran.

Nodal terhadap nodal		w	A_{nz}	f_{ce}	F_{nn}	ΦF_{nn}	F_u	Keamanan	Efisiensi
Nodal	Nodal	(mm)	(mm ²)	(N/mm ²)	(KN)	(KN)	(KN)		(%)
1	3	79,9	143792,0	16	2300,67	1725,50	1527,8	OK.....	88,5%
3	2	188,9	340086	12	2523,32	1892,49	1675,6	OK.....	88,5%
3	6	87,6	157707,3	12	4081,03	3060,77	2710,1	OK.....	88,5%
1	2	79,9	143792	16	3414,71	2561,03	2267,6	OK.....	88,5%
2	1	143,0	257386,7	16	3265,48	2449,11	2267,6	OK.....	92,6%
2	4	118,6	213419,3	16	2300,67	1725,50	1527,8	OK.....	88,5%
4	2	113,4	204092,2	20	2300,67	1725,50	1675,6	OK.....	97,1%
4	3	113,4	204092,2	20	2875,84	2156,88	2051,1	OK.....	95,1%
3	4	79,9	143792	12	3088,64	2316,48	2051,1	OK.....	88,5%
4	5	113,4	204092,2	20	4081,84	3061,38	2710,6	OK.....	88,5%
5	4	63,9	115033,6	20	4081,84	3061,38	2710,6	OK.....	88,5%

Pengangkuran harus memenuhi persamaan:

$$l_{dc} = \frac{0,24\psi_e f_y}{\lambda \sqrt{F_c}} \times d_b > 200$$

dimana $\psi_e = 1$ (untuk tulangan D-22 dan lebih besar) dan $\lambda = 1$ (untuk beton normal)

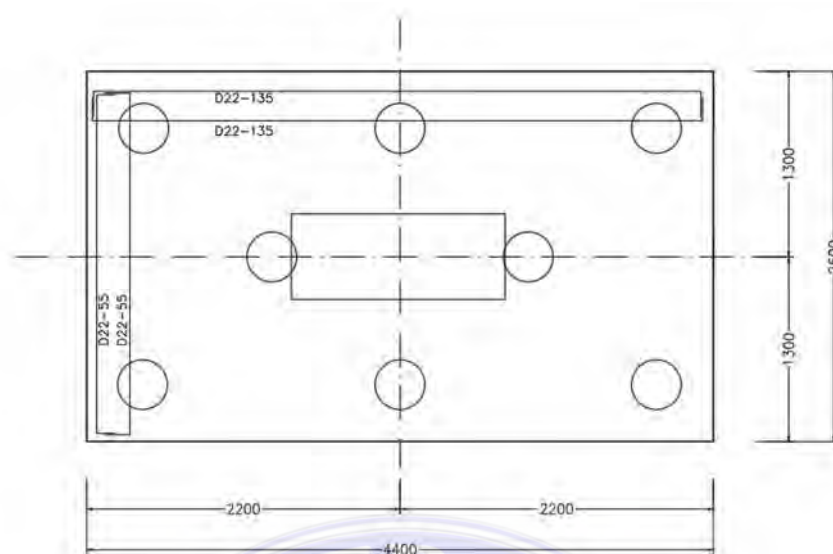
$$\begin{aligned} l_{dc} &= 628,320 \\ l_{dc} &> 200 \text{ mm} \\ 628,320 &> 200 \text{ mm} \quad \text{OK.....} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{idc aktual} &= h - C_c - \frac{D}{2} - \frac{\phi^v}{2} \\ &= 878 \text{ mm} \end{aligned}$$

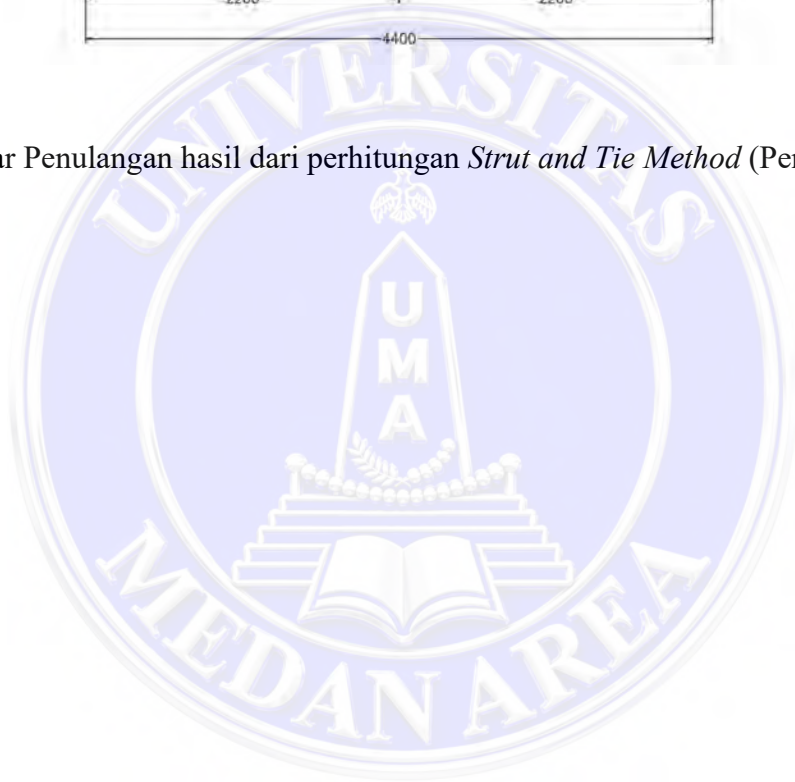
Gunakan, 850 mm

Tabel: Resume Hasil Force Ratio (penulis, 2025)

Element	Fn (KN)	ΦFn (KN)	Fu (KN)	Efesiensi (%)	Force Ratio
Tie 1-3	1756,92	1581,228	1527,79	96,62	0,97
Tie 3-6	3034,68	2731,212	2710,06	99,23	0,99
Tie 3-2	1916,64	1724,976	1675,64	97,14	0,97
Strut 2-4	3055,58	2291,685	1527,79	66,67	0,67
Strut 3-4	5469,47	4102,1	2051,05	50,00	0,50
Strut 1-2	4535,16	3401,37	2267,58	66,67	0,67
Strut 4-5	4336,96	3252,72	2710,60	83,33	0,83
Strut 2-1	4336,96	3252,72	2267,58	69,71	0,70
Strut 4-3	3055,58	2291,685	2051,05	89,50	0,89
Strut 5-4	4336,96	3252,72	2710,60	83,33	0,83
Strut 4-2	2444,46	1833,348	1675,64	91,40	0,91



Gambar Penulangan hasil dari perhitungan *Strut and Tie Method* (Penulis, 2025)



LAMPIRAN 2

PERHITUNGAN KONVENSIONAL

a. Dalam arah melintang (arah B)

$$D_x = 0,60 \quad \text{m}$$

$$d = 850 \quad \text{mm}$$

$$f_c = 25 \quad \text{MPa} \quad \text{K-300}$$

$$f_y = 420 \quad \text{MPa} \quad \text{BJTS 420B}$$

$$R_{\text{umaks}} = 125,67 \quad \text{ton} \quad : \quad 1256,7 \quad \text{kN}$$

$$M_u = 1.571 \quad \text{kN.m}$$

$$R_n = M_u / \phi b \cdot d^2 : 0,440$$

$$\rho_{\text{perlu}} = 0,85 \cdot f_c / f_y \cdot [1 - \sqrt{1 - 2R_n / 0,85 \cdot f_c}] = 0,0011 \quad \text{mm}$$

$$A_{\text{smin}} = 1.530 \quad \text{mm}^2/\text{m}$$

$$A_s \text{ pakai} = 3.956 \quad \text{mm}^2/\text{m}$$

$$d_{\text{tul.}} = 22 \quad \text{mm}$$

$$A_{2\phi} = 380 \quad \text{mm}^2$$

$$n = 11$$

$$S = 440,00 \quad \text{mm} \quad \text{Pakai, D} \quad 22 \quad 150\text{mm}$$

$$A_{s'} = 1.530 \quad \text{mm}^2$$

$$d_{\text{tul.}} = 22 \quad \text{mm}$$

$$A_{1\phi} = 380 \quad \text{mm}^2$$

$$n = 5$$

$$S = 250,00 \quad \text{mm} \quad \text{Pakai, D} \quad 22 \quad -150\text{mm}$$

b. Dalam arah memanjang (arah L)

$$D_Y = 1,50 \quad \text{m}$$

$$d = 850 \quad \text{mm}$$

$$f_c = 25 \quad \text{MPa} \quad \text{K-300}$$

$$f_y = 420 \quad \text{MPa} \quad \text{BJTS 420B}$$

$$R_{\text{umaks}} = 125,67 \quad \text{ton} \quad : \quad 1256,7 \quad \text{kN}$$

$$M_u = 785 \quad \text{kN.m}$$

$$R_n = M_u / \phi b \cdot d^2 \quad : \quad 0,465$$

$$\rho_{\text{perlu}} = 0,85 \cdot f_c / f_y \cdot [1 - \sqrt{1 - 2R_n / 0,85 \cdot f_c}] = 0,0011 \quad \text{mm}$$

$$A_{\text{smin}} = 1.530 \quad \text{mm}^2/\text{m}$$

$$A_{\text{s pakai}} = 2.472 \quad \text{mm}^2/\text{m}$$

$$d_{\text{tul.}} = 22 \quad \text{mm}$$

$$A_{2\phi} = 380 \quad \text{mm}^2$$

$$n = 7$$

$$S = 433,33 \quad \text{mm} \quad \text{Pakai, D} \quad 22 \quad -150\text{mm}$$

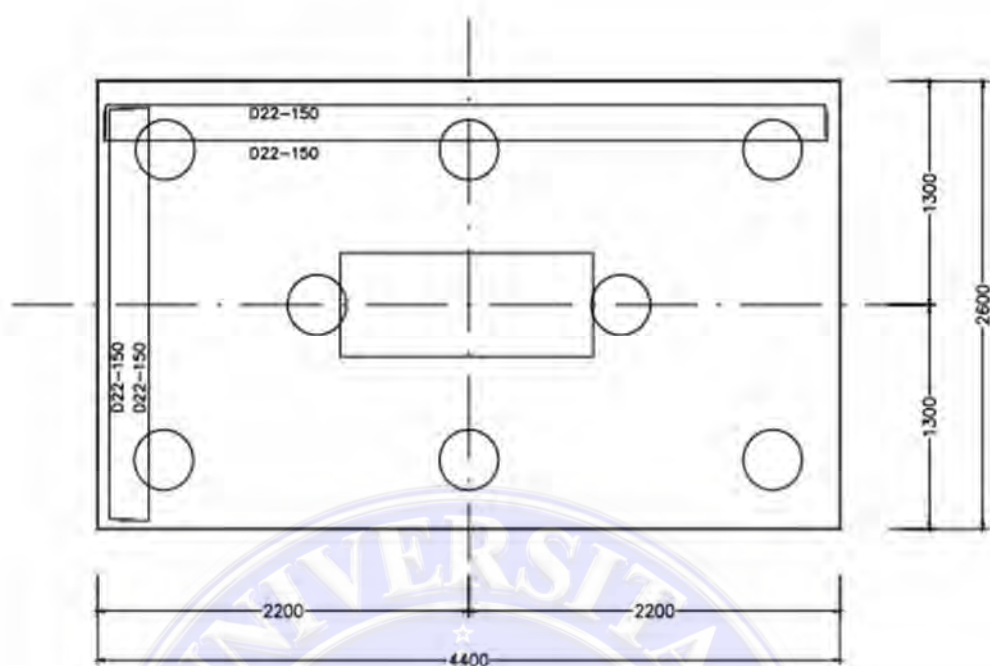
$$A_{s'} = 1.530 \quad \text{mm}^2$$

$$d_{\text{tul.}} = 22 \quad \text{mm}$$

$$A_{1\phi} = 380 \quad \text{mm}^2$$

$$n = 5$$

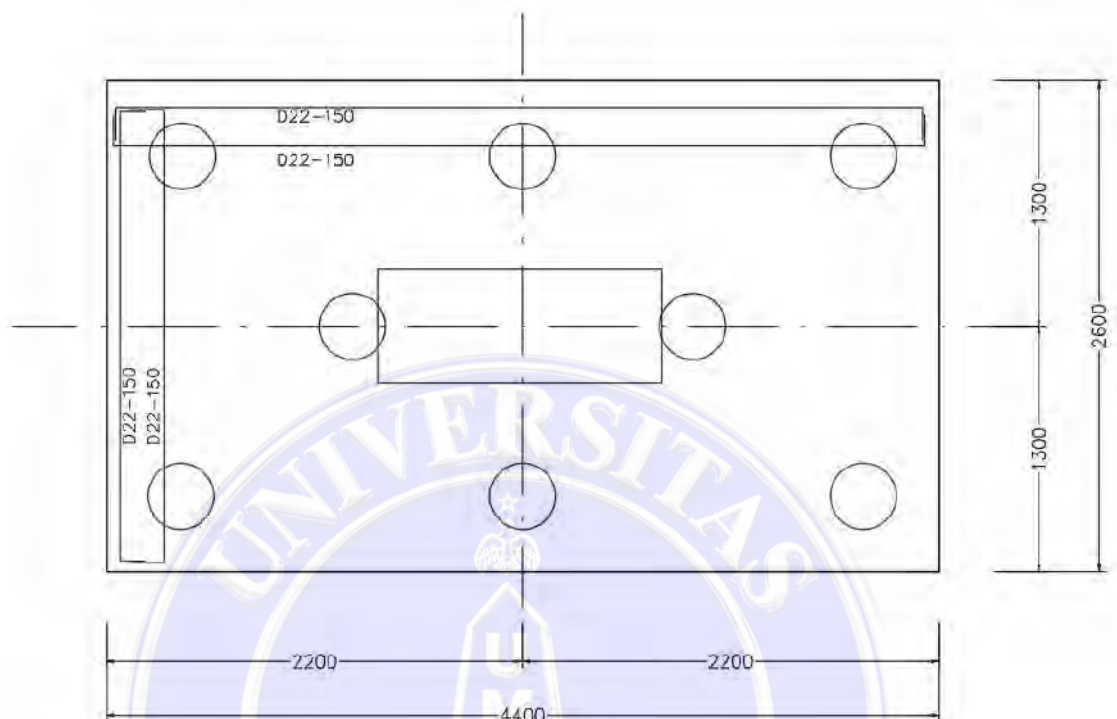
$$S = 250,00 \quad \text{mm} \quad \text{Pakai, D} \quad 22 \quad -150\text{mm}$$



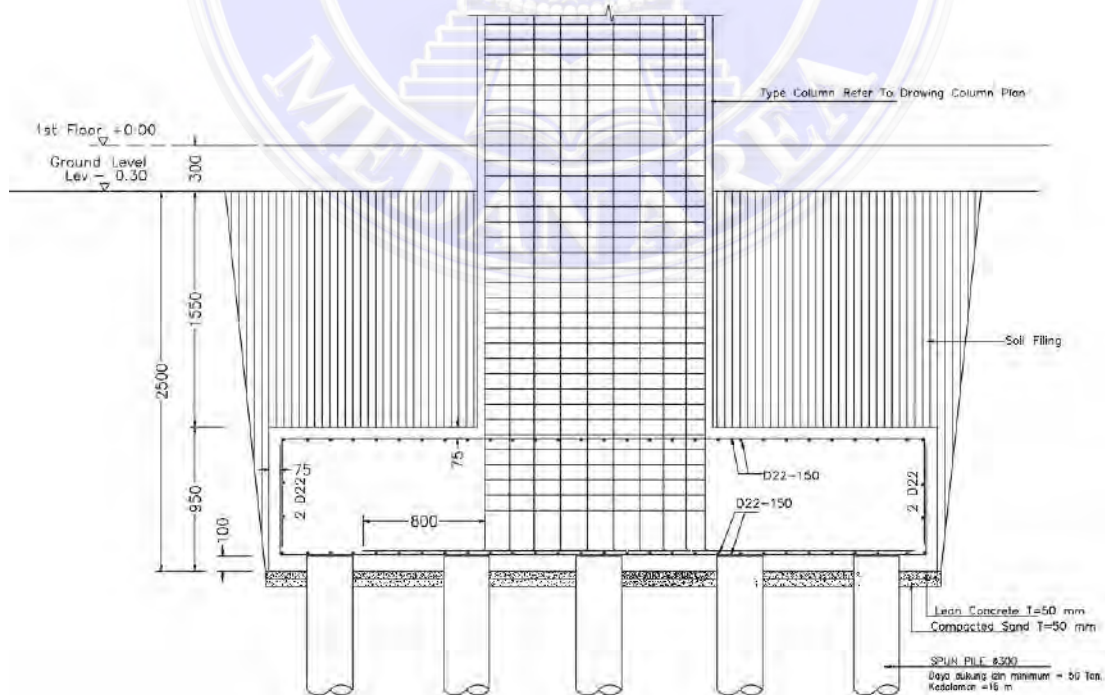
Gambar Penulangan hasil dari perhitungan Konvensional (Data Proyek, 2025)

LAMPIRAN 3

PERMODELAN PILECAP



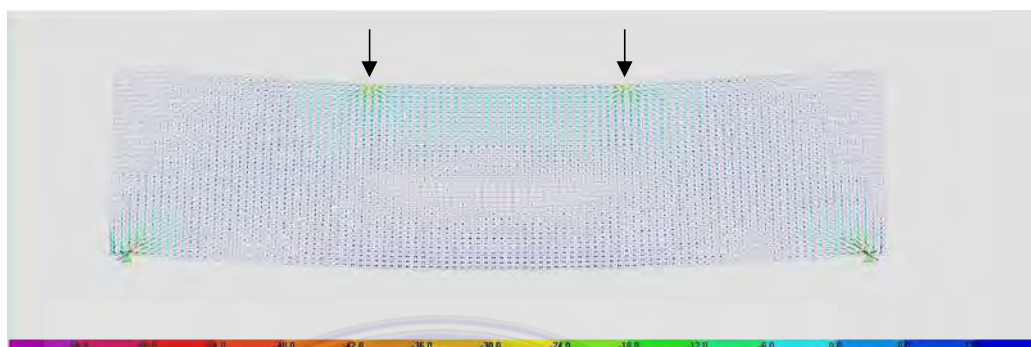
Denah Pilecap CT-14(Data Proyek, 2025))



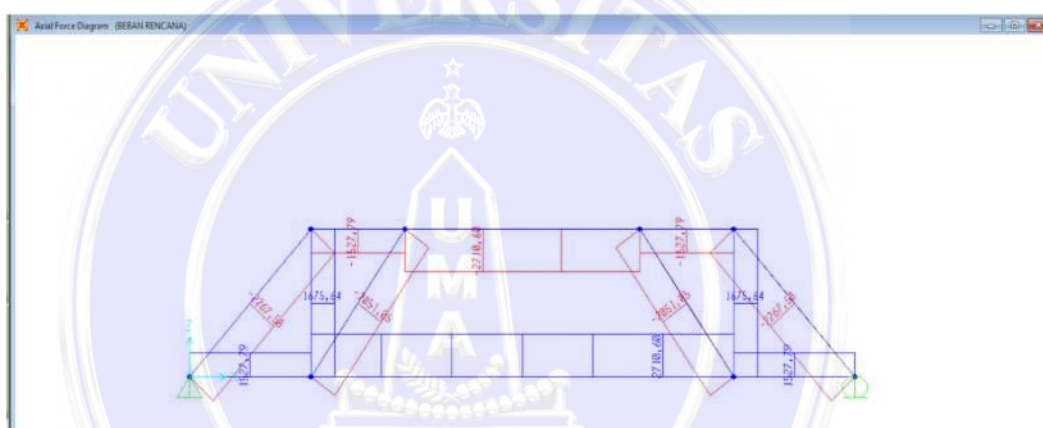
Detail Penulangan Pilecap (Data Proyek, 2025)

LAMPIRAN 4

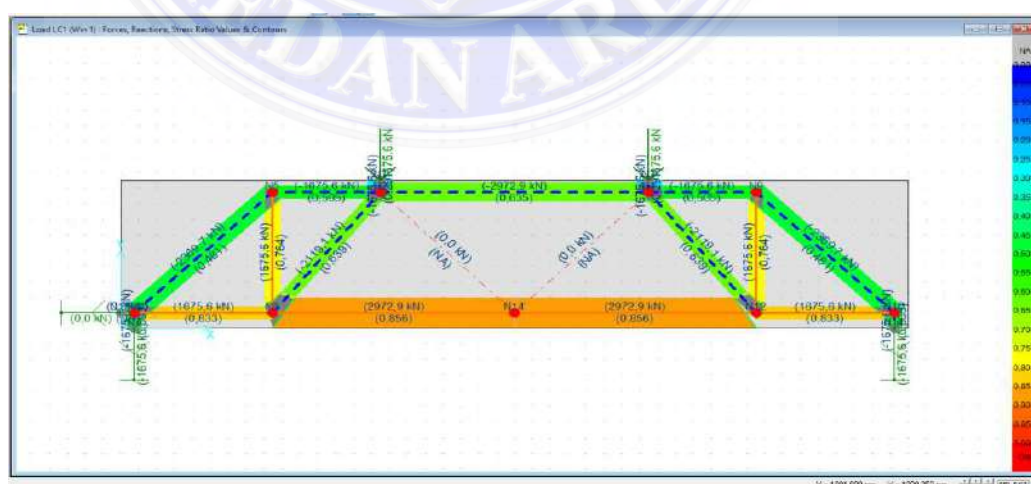
HASIL PERMODELAN PILECAP



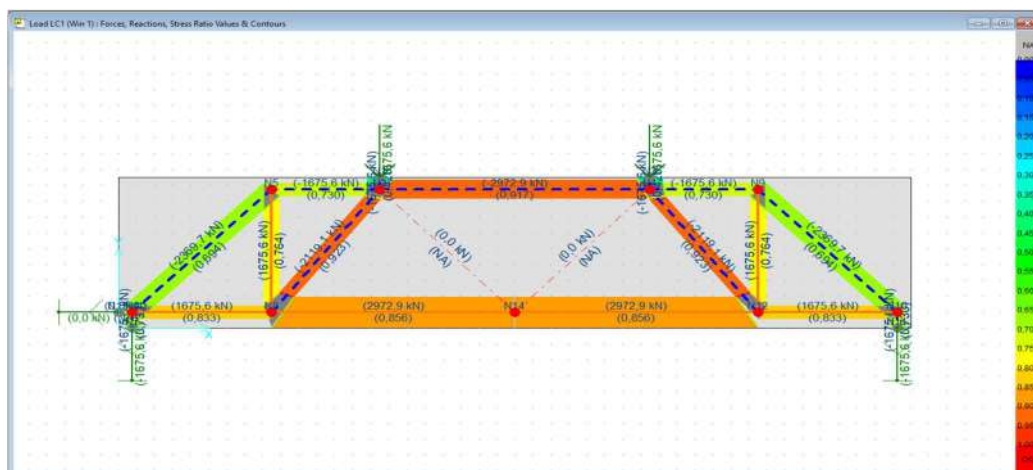
Aliran Gaya (*Load Path*) Pada Pilecap (Penulis, 2025)



Truss model yang di Aplikasi pada Pilecap (Penulis, 2025)



Hasil Analisis Menggunakan CAST (penampang eksisting).



Hasil Analisis Menggunakan CAST (penampang optimasi).



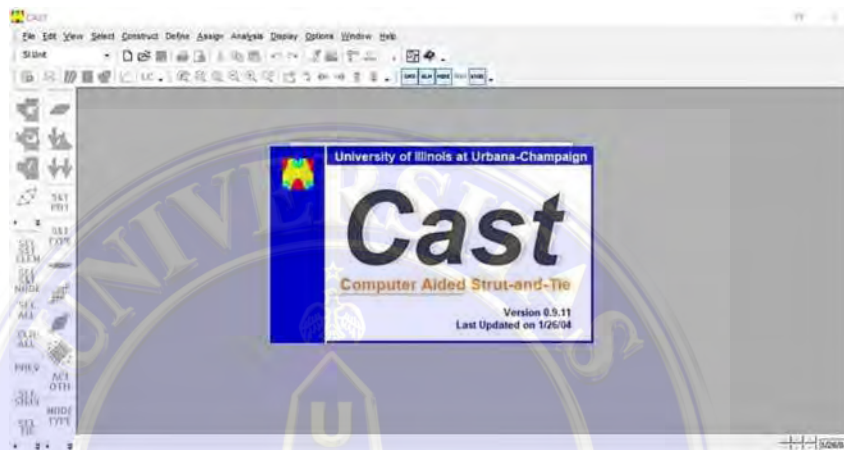
LAMPIRAN 5

LANGKAH-LANGKAH PENGGUNAAN CAST

Langkah 1: Membuka Program *CAST* (*Computer Aided Strut-and-Tie*)



. Ikon *CAST* (Penulis, 2025)



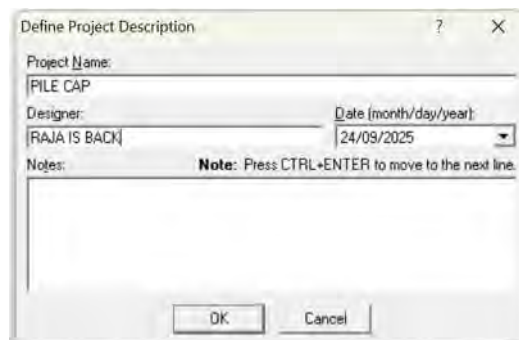
Tampilan Awal *CAST*(Penulis, 2025)

Langkah 2: Pengaturan Lembar Kerja

Dalam tahap ini, ada 3 hal yang harus dilakukan sebelum dapat memulai menggambar model dan melakukan analisis, yaitu menentukan deskripsi proyek, menentukan ketebalan wilayah-D dan kekuatan material, dan menentukan garis dan titik bantu.

a) Menentukan deskripsi proyek

Deskripsi proyek diisi sesuai dengan identitas yang diinginkan.



Pengisian Deskripsi Proyek (Penulis, 2025).

- b) Menentukan ketebalan wilayah-D dan kekuatan material

Setelah mengisi deskripsi proyek, maka akan muncul kotak dialog seperti Gambar 27. Ketebalan wilayah-D adalah ketebalan struktur yang akan dikaji. Kekuatan material diisi sesuai dengan properti yang dipakai untuk analisis.



Pengisian Properti Umum (Penulis, 2025).

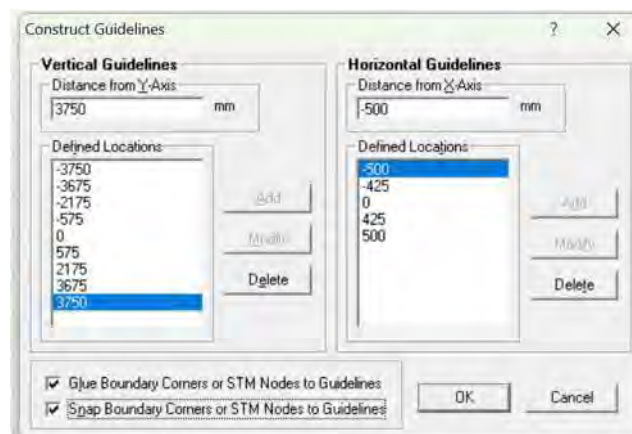
- c) Menentukan garis dan titik bantu

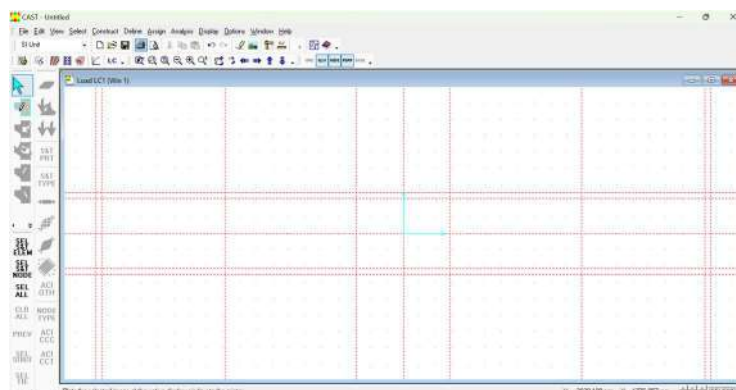
Garis dan titik bantu ditentukan sebagai koordinat titik-titik penting untuk menggambar keseluruhan struktur dengan mudah. Untuk menentukan garis dan titik bantu, klik *Guidelines* dari menu *Construct*.

Pengisian Garis dan Titik Bantu (Penulis, 2025)

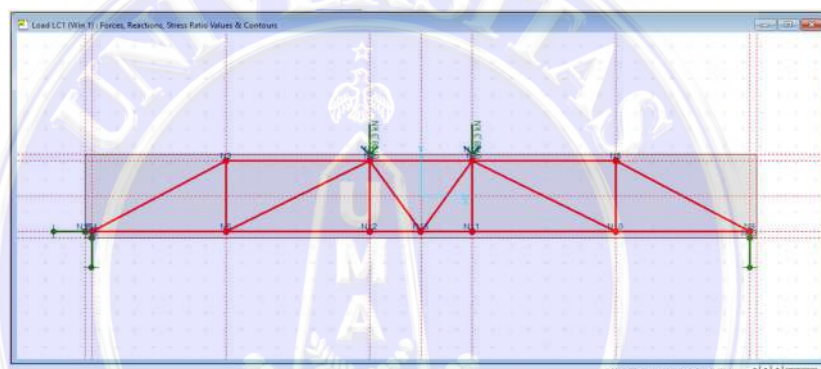
Tampilan *Workspace* Setelah Mengisi Garis dan Titik Bantu (Penulis, 2025)

Langkah 3: *Modeling*





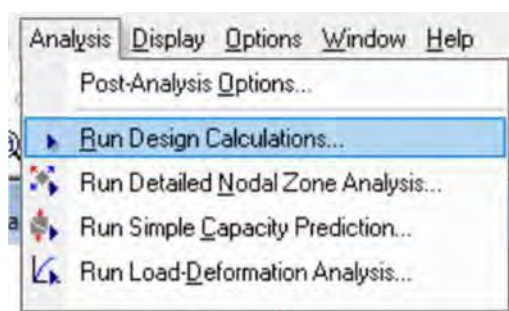
Penggambaran model dilakukan dengan menggambar batas luar struktur, menggambar model strut-and-tie, penentuan bearing plate, pembebanan dan perletakkan.



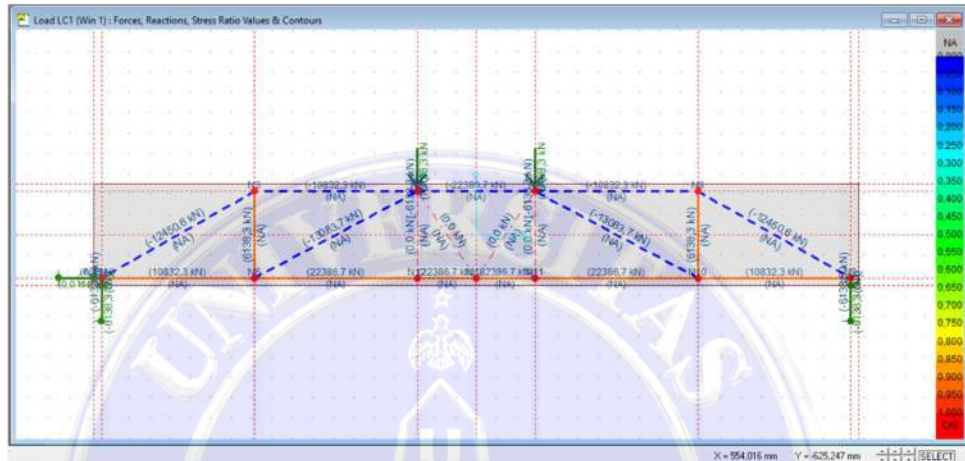
Tampilan Setelah Model Digambar (Penulis, 2025)

Langkah 4: Penentuan Gaya Batang dari Strut-and-Tie Model yang Digunakan

Rangka batang dari *model strut-and-tie* yang telah dibuat akan dianalisis oleh program CAST sendiri. Untuk melakukan analisis gaya batang, klik menu *Analysis* kemudian pilih *Run Design Calculations*.



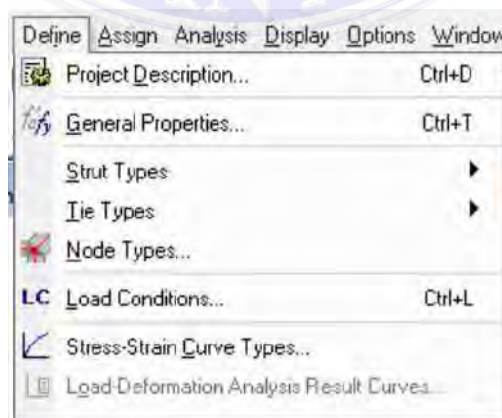
Apabila rangka batang valid digunakan, maka hasil akan keluar. Sedangkan bila rangka batang tidak valid digunakan, maka hasil tidak akan keluar. Hasil dari analisis adalah berupa besar gaya batang dan jenis batang apakah tarik atau tekan. Jenis batang tarik akan diperlihatkan berupa garis lurus sedangkan untuk jenis batang tekan akan diperlihatkan berupa garis putus-putus.



Hasil Analisis Gaya Batang dengan CAST (Penulis, 2025)

Langkah 5: Pendefinisian Properti

Properti yang didefinisi adalah properti untuk *strut*, *tie* dan *nodal zone*. Dalam pendefinisian properti ini, sesuaikan jenis tipe *strut*, *tie* dan *nodal zone* yang digunakan dengan yang terjadi pada hasil analisis. Karakteristik dari kekuatan

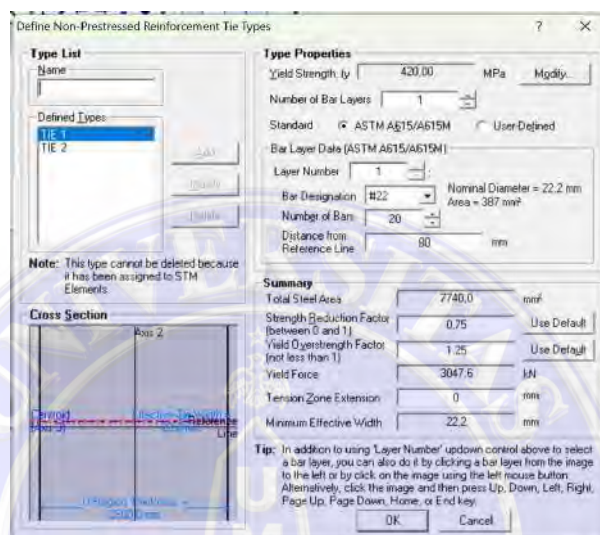


properti disesuaikan dengan peraturan yang dipakai sebagai acuan pada penelitian sesuai masing-masing *model strut-and-tie*.

Untuk menentukan properti masing masing *strut*, *tie* dan *nodal zone*, klik menu *define* kemudian pilih *strut types*, *tie types* dan *node types*.

Pengisian Properti untuk *Strut*, *Tie* dan *Nodal Zone* (Penulis, 2025)

Setelah penentuan properti, maka masukkanlah properties ke setiap elemen *strut*, *tie* dan *nodal zone* pada Gambar struktur di lembar kerja dengan klik kanan elemennya kemudian isikan *property type* dan *provided effective width*. *Provided effective width* diperoleh melalui perhitungan analisis manual.



Contoh Pengisian Properties pada Salah Satu Elemen *Strut* (Penulis, 2025)

Langkah 6 : Pengecekan Tegangan

Setelah semua elemen *Strut*, *Tie* dan *Nodal Zone* diisi dengan properties nya, kemudian lakukan kembali analisis. Untuk melakukan analisis gaya batang, klik menu Analysis kemudian pilih *Run Design Calculations*. Hasil analisis kali ini adalah berupa perbandingan *force ratio*.

