

KEKUATAN BETON BERTULANG *PIERHEAD* JEMBATAN KANTILEVER GANDA – KAJIAN NUMERIK *STRUT – AND - TIE METHOD* (STM) SNI 2847:2019

(*Strength of Reinforced Concrete Double Cantilever Bridge Pierhead – Numerical Study Strut – and – Tie - Method (STM) SNI 2847:2019*)

Fery Riswanto¹, Pariatmono Sukamdo¹

Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana¹

E-mail: feryriswanto10@gmail.com

Diterima 20 Maret 2023, Disetujui 23 Agustus 2023

ABSTRAK

Tegangan geser yang terjadi pada *pierhead* jembatan kantilever ganda yang diakibatkan oleh adanya diskontinuitas geometri dan beban pada girder menuju kolom, akan berpotensi menyebabkan retak diagonal pada struktur. *Strut and Tie Method* (STM) cocok digunakan untuk desain struktur *pierhead* yang menahan geser sangat besar dari girder (Piscesa & Tavio, 2020). Saat ini ketentuan STM dikembangkan dengan balok tinggi berbentuk persegi (Varney et al., 2015). Mengembangkan pengaplikasian STM dalam desain untuk mendekati perilaku *pierhead* jembatan kantilever ganda saat mendistribusikan beban, perlu dilakukan verifikasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk men-verifikasi keandalan STM SNI 2847:2019 pasal 23 dalam memprediksi kekuatan pada struktur. Struktur *pierhead* didesain menggunakan SNI 2847:2019 dengan 3 spesimen (S1-0.3-1; S1-0.4-1.2; S1-0.5-1.5). Untuk menemukan rangka batang pada STM digunakan program BESO2D. Hasil dari rangka batang selanjutnya dianalisa dengan ETABS. Mencari kapasitas nominal desain dengan ketentuan STM SNI 2847:2019. Kemudian dilakukan investigasi performa ultimit dengan menggunakan program berbasis MEH (Abaqus). Hasil **(1)** distribusi beban pada masing – masing spesimen terkonfirmasi sama antara STM dan MEH. **(2)** Rasio kekuatan, V_{MEH}/V_{STM} pada spesimen berturut-turut 1.12; 1.09; 1.29, dengan ≥ 1 desain menggunakan STM konservatif. **(3)** Defleksi yang didapat berturut – turut 12.88mm; 7.96mm; 2.048mm (batas ijin 18.75mm).

Kata Kunci: *Pierhead* Jembatan Kantilever Ganda, STM, MEH, BESO2D

ABSTRACT

*Shear stress in the double cantilever bridge pierhead due to geometric discontinuity and load transferred from girder to column have a potentially diagonal crack in the structure. Strut-and-Tie Method (STM) is suitable to design pierheads that resist large shear stress (Piscesa & Tavio, 2020). STM provision has developed with rectangular deep beams (Varney et al., 2015). To expand the application of STM, knowing the behavior of a double cantilever bridge while transferring load, must be verified. This research aims to verify the feasibility of STM SNI 2847:2019 chapter 23 to predict its strength. The structure has been designed using SNI 2847:2019 with 3 specimens (S1-0.3-1; S1-0.4-1.2; S1-0.5-1.5). To find the truss system in the STM using BESO2D programs. The truss system output is analyzed with ETABS. Knowing nominal capacity design with the provision STM SNI 2847:2019. Then investigated ultimate performance using Finite Element Method, FEM software (Abaqus). The finding result is **(1)** load distribution of each specimen was confirmed same between STM and FEM. **(2)** Strength ratio, V_{FEM}/V_{STM} in the specimens respectively at 1.118; 1.09; 1.293, with more than 1 mean design using STM is conservative. **(3)** Deflection occurs respectively at 12.88mm; 7.96mm; 2.048mm (allowable limit is 18.75mm).*

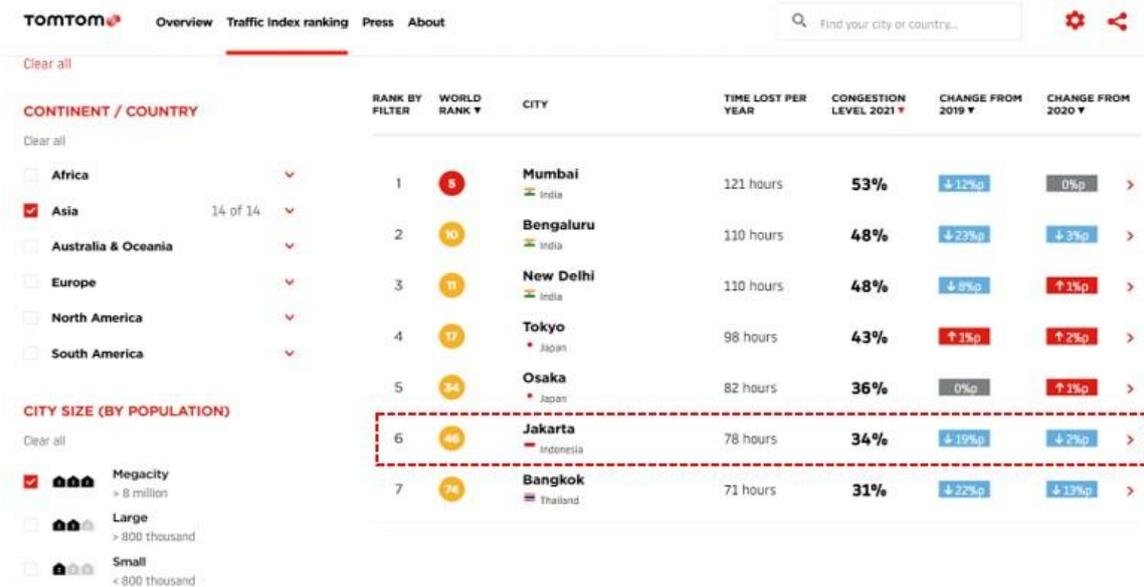
Keywords: Double cantilever bridge pierhead, STM, FEM, BESO2D

PENDAHULUAN

Terbatasnya ketersediaan lahan pada area padat penduduk, dan adanya urgensi untuk pembangunan infrastuktur jalan akibat kapasitas yang sudah tidak memenuhi, terutama jaringan jalan di daerah Jakarta dan sekitarnya. (Lihat **Gambar 1.**) diambil dari TOMTOM perusahaan terkenal di dunia yang memproduksi peta digital dan perangkat navigasi, telah mengumpulkan data lalu lintas dan setiap tahun merilis “Indeks Lalu Lintas” yang menunjukkan Jakarta merupakan *megacity* dengan jumlah populasi lebih dari 8 juta penduduk, dimana mempunyai waktu produktif hilang akibat perjalanan sebesar 78 jam/tahun. Walaupun pada peringkat ini Jakarta mengalami penurunan (-2% dari tahun 2019) perlu dicatat bahwa manajemen permintaan lalu lintas yang dipaksakan

seperti kebijakan “ganjil-genap” sedang dilaksanakan di Jakarta. Hal ini mengindikasikan infrastruktur jalan dikota mungkin tidak mencukupi untuk permintaan lalu lintas saat ini dan mendatang.

Pemerintah Indonesia saat ini telah mencoba untuk mengimplementasikan perluasan kapasitas jalan dengan “*double decking*” atau struktur jembatan layang karena lahan untuk pelebaran tidak tersedia di wilayah Jakarta dan sekitarnya. Jakarta-Cikampek II yang disebut juga JAPEK II, yang sekarang dibangun karena situasi diatas (Lihat **Gambar 2.**). Dalam pembangunan infrastruktur jembatan layang “*double decking*” memerlukan elemen – elemen struktur untuk dapat memfasilitasi distribusi beban ke tanah, dari kendaraan sebagai fungsi utama jembatan dan juga beban – beban lainnya akibat adanya sistem struktur jembatan layang.



Gambar 1. Traffic Index Jakarta dengan Kota Besar di Asia. Sumber: (TOMTOM, 2022)

Pierhead atau *hammerhead* merupakan komponen pada struktur jembatan, berfungsi sebagai tumpuan balok induk (*girder*) jembatan yang akan menyalurkan beban terhadap elemen dibawahnya. Salah satu tipe *pierhead* pada kontruksi jembatan adalah *pierhead* kantilever ganda (*double cantilever*) (Lihat **Gambar 3.**). Karena mempunyai penampang geometrik dengan hanya memiliki satu kolom pada tengah bentang (dilihat secara penampang melintang) jalan, penyaluran beban ke kolom dari setiap *girder* mempunyai lintasan beban yang berbeda, sehingga menyebabkan tegangan geser. Tegangan geser yang terjadi pada *pier head* kantilever ganda yang diakibatkan oleh adanya diskontinuitas geometri dan beban pada *girder* menuju ke kolom akan berpotensi menyebabkan resiko retak diagonal pada struktur (lihat **Gambar 4.**).

persegi (Varney et al., 2015). Walaupun dikembangkan dari balok tinggi berbentuk persegi, beberapa peneliti telah mengembangkan penggunaan STM untuk berbagai desain elemen struktur. Pada desain struktur *pierhead* penulis menemukan peneliti – peneliti yang telah menvalidasi penggunaan STM seperti penggunaan *inverted T beam* (Garber et al., 2017), *bent cap* persegi (Baniya & Guner, 2019), *Pierhead* kantilever ganda (Geevar & Menon, 2019) dsb. Penelitian ini akan meneruskan peneliti – peneliti lain dengan geometri penampang dan pembebanan struktur yang berbeda, yang sedekat mungkin merepresentasikan *pierhead* yang dibangun di lapangan.

Strut-and-tie model (STM) cocok digunakan untuk desain struktur *pierhead* yang menahan tegangan geser sangat besar dari *girder* (Piscesa & Tavio, 2020). Cikal bakal STM dari konsep analogi rangka batang (*Truss-Analogy-Model*) untuk pertama kalinya diperkenalkan oleh Ritter (1899) dan Morsch (1902). Saat ini ketentuan STM dikembangkan dengan balok tinggi berbentuk

Dalam menvalidasi penggunaan STM, untuk mendesain struktur selain balok tinggi berbentuk persegi, sejumlah variabel digunakan oleh beberapa peneliti untuk mengetahui performa dari perilaku struktur ketika mendistribusikan beban. Pengklasifikasian terhadap daerah terganggu yang ada pada SNI 2847:2019 Pasal 23.1 mengenai struktur dengan area terganggu. Dibagi menjadi 2 klasifikasi, yaitu stuktur dengan diskontinuitas geometri dan diskontinuitas geometri & beban, struktur *pierhead* kantilever ganda ini masuk kedalam struktur

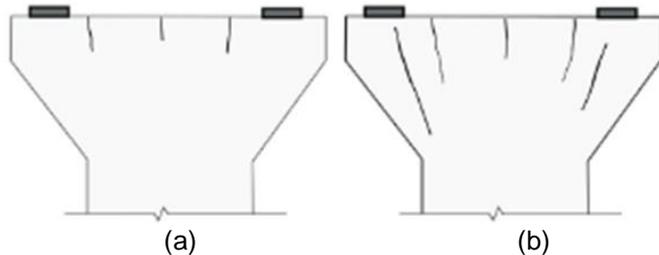
terganggu dengan diskontinuitas geometri & beban dalam pendistribusian beban.



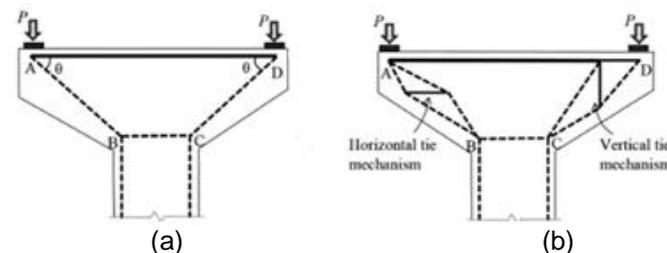
Gambar 2. Struktur jembatan layang (*double-decking*) JAPEK 2. Sumber: (KPPIP, 2019)



Gambar 3. Contoh *pierhead* kantilever ganda. Sumber:(Detik Finance, 2018)



Gambar 4. Potensi retak diagonal pada *pierhead* kantilever ganda akibat diskontinuitas geometri dan beban (a) initial *flexural crack* (b) *initiation and extension of diagonal crack*. Sumber: (Geevar & Menon, 2019)



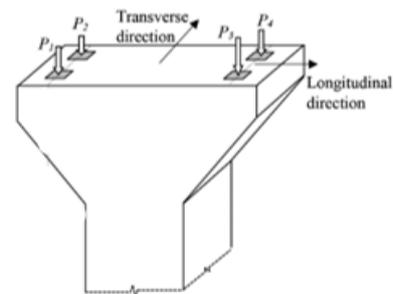
Gambar 5. (a) mekanisme strut langsung, (b) Mekanisme tie vertikal dan horisontal. Sumber:(Geevar & Menon, 2019)

Lebih dalam lagi, dalam penelitian yang dilakukan oleh (Geevar & Menon, 2019), tipe pendistribusian beban pada *pierhead* kantilever ganda terjadi melalui 3 mekanisme :

- *Direct strut mechanism* (mekanisme *strut* secara langsung) (Lihat **Gambar 5a.**)
- *Vertical tie mechanism* (mekanisme *tie* vertikal) (Lihat **Gambar 5b.**)
- *Horizontal tie mechanism* (mekanisme *tie* horisontal) (Lihat **Gambar 5b.**)

Mekanisme pada *strut* secara langsung merupakan mekanisme pendistribusian beban kekolom dengan mekanisme tekan pada *pierhead*. Sedangkan pada dua lainnya selain mekanisme tekan juga terjadi mekanisme tarik.

Selain dengan tipe pendistribusian beban, variabel jumlah beban juga digunakan dalam mendalami perilaku struktur *pierhead*. Dalam uji eksperimental yang dilakukan oleh (Geevar & Menon, 2019) *pierhead* kantilever ganda diuji secara eksperimental dengan 4 beban terpusat dengan komposisi terlihat pada **Gambar 6**. Meneruskan penelitian tersebut, penelitian ini akan menggunakan titik pembebanan dengan konfigurasi yang sama tetapi dengan jumlah yang lebih banyak, yang dimaksudkan dapat merepresentasikan sedekat mungkin dengan *pierhead* yang ada pada kondisi sesungguhnya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk men-verifikasi keandalan STM SNI 2847:2019 pasal 23 dalam memprediksi kekuatan pada struktur.



Gambar 6. Titik penelitian Geevar dan Menon. Sumber: (Geevar & Menon, 2019)

METODE

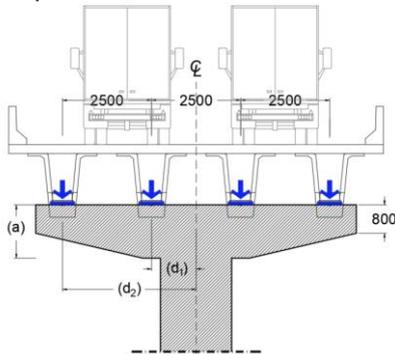
Desain Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan untuk meng-investigasi performa dari *pierhead* kantilever ganda merupakan penelitian kuantitatif. *Pierhead* kantilever ganda akan didesain dengan *strut-and-tie model* (STM) menggunakan SNI 2847:2019 yang dikeluarkan oleh (BSN, 2019). Untuk menemukan sistem rangka batang (*truss system*) pada metode STM akan digunakan perangkat lunak berupa BESO2D. Hasil model rangka batang yang telah ditemukan, analisa rangka batang tarik dan tekan dilakukan dengan program analisa struktur seperti ETABS. Dilanjutkan dengan desain rangka batang tekan (*strut*) dan tarik (*tie*) beserta *node*-nya secara manual sehingga masing-masing elemen diketahui kapasitas nominalnya. Hasil analisa dan desain yang telah dilakukan, kemudian akan dilakukan

investigasi performa ultimit dari *pierhead* kantilever ganda dengan menggunakan perangkat lunak berbasis MEH, pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak Abaqus.

Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan merepresentasikan sedekat mungkin mewakili *pierhead* pada kondisi sesungguhnya (Lihat **Gambar 7.**). Spesimen yang digunakan pada penelitian ini merupakan jalan 2 lajur 1 arah dengan tinggi spesimen, *a* dibuat berbeda. Perubahan tinggi spesimen ini dimaksudkan untuk mengetahui distribusi beban dari spesimen yang ada. Adapun jenis variabel yang akan digunakan pada penelitian ini ditabulasikan dalam **Tabel 1**. Spesimen memiliki karakteristik material seperti yang ada pada **Tabel 2**.



Gambar 7. Spesimen pierhead yang digunakan

Tabel 1. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini

Variabel Ter-ikat	Variabel Bebas
<ul style="list-style-type: none"> Tinggi spesimen (rasio <i>a/d</i> 0.3, 0.4, 0.5, 1, 1.2, 1.5) 	<ul style="list-style-type: none"> Jenis pendistribusian beban (Geevar & Menon, 2019) Kuat tekan nominal (AASHTO-LRFD-8thEdition, 2017) (V_{STM}) Kuat tekan nominal (SNI 2847, 2019) (V_{STM}) Rasio kuat tekan MEH vs STM (V_{MEH} / V_{STM}) Kemampulayanan struktur (Lendutan, U_y)

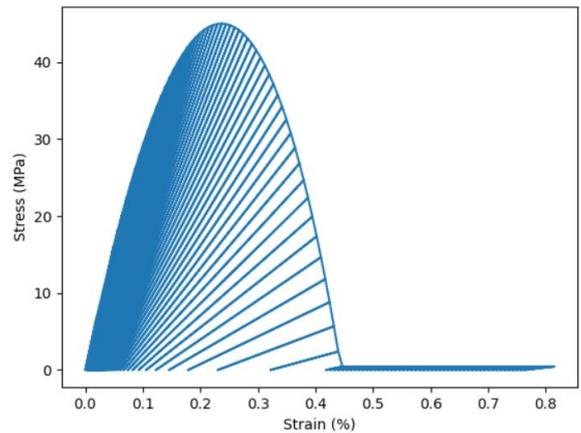
Material Struktur

Tabel 2. Karakteristik Material

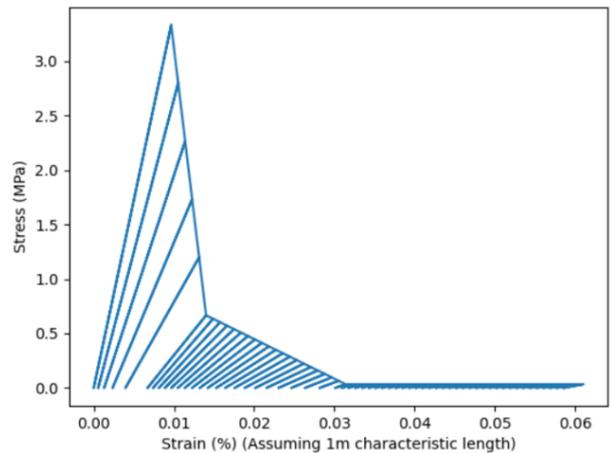
Nama Material	Mutu
<ul style="list-style-type: none"> Beton 	Kuat tekan, $F_c' = 45 \text{ Mpa}$ Elastisitas, $E_c = 4700 * (f_c')^{0.5}$ Poisson rasio, $\nu = 0.2$ Koefisien suhu termal = $11.10 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ Koefisien shringkage = 0.0002
<ul style="list-style-type: none"> Baja tulangan 	BJTS 420B Kuat leleh, $F_y = 420 \text{ Mpa}$; Kuat luluh, $f_u = 560 \text{ Mpa}$ Elastisitas, $E_s = 210000 \text{ Mpa}$ Poisson rasio, $\nu = 0.3$ Koefisien termal = $12.10 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Diameter tulangan yang akan digunakan untuk tulangan utama menggunakan D25 dan tulangan lainnya menggunakan D16. Karena posisi struktur terekspose cuaca selimut beton yang akan digunakan pada spesimen digunakan sebesar 50mm.

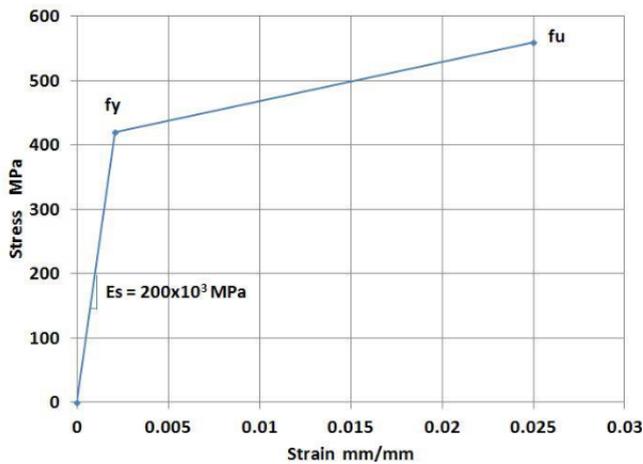
Untuk keperluan metode elemen hingga (MEH) dengan perangkat lunak Abaqus. Material yang telah dispesifikasikan pada **Tabel 2** perlu untuk dibuatkan model material berupa tegangan dan regangan. Model material yang akan digunakan pada material beton adalah model material *Concrete Damage Plasticity* (CDP). CDP yang akan digunakan merupakan CDP dari program bantu yang telah dibuat oleh Francis, Philips. Kurva tegangan dan regangan ini lah yang nanti akan diinput pada program bantu Abaqus, Lihat **Gambar 8 - 9**.



Gambar 8. Kurva tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) tekan untuk beton 45 Mpa dengan model CDP material



Gambar 9. Kurva tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) tarik untuk beton 45 Mpa dengan model CDP material



Gambar 10. Kurva tegangan dan regangan baja tulangan 420 Mpa

Material beton yang dimodelkan sebagai CDP saat dibebani tekan, tegangan dan regangan dimodelkan menjadi 3 zona :

- Elastic properties* (respon material saat dalam kondisi elastis)
- Plastic properties* (respon material dalam kondisi plastic, *flow role* dan evolusi kelelahan permukaan).
- Damage properties* (hal ini ditujukan untuk mengetahui deteriorasi kekuatan material saat *loading* dan *unloading*, beban siklik).

Dalam penelitian ini karena model akan dibebani secara statik, maka tegangan dan regangan beton yang akan digunakan adalah tegangan dan regangan *elastic properties* dan *plastic properties*. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan grafik tegangan dan regangan beton digunakan persamaan:

$$\sigma = \sigma_{cu} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \dots \dots (1)$$

Dengan:

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_{c1}} \dots \dots (2)$$

$$k = \frac{1.05 \times E_c \times \epsilon_{c1}}{\sigma_{cu}} \dots \dots (3)$$

Persamaan (1), (2) dan (3) membutuhkan parameter yang perlu diketahui yaitu modulus elastisitas, tegangan tekan ultimit beton dan regangan. Sebagai pendekatan, parameter E_c dan ϵ_{c1} dapat menggunakan **tabel 3.1** dalam **Eurocode 2**. Elastisitas beton normal juga dapat didekati dengan persamaan dari SNI 2847:2019

$$E_c = 2400 \times \sqrt{f'_c} \dots \dots (4)$$

Dengan tegangan saat regangan maksimum $\epsilon'_c = 0.002$ dan saat kondisi ultimit $\epsilon_{cu} = 0.003$.

Tegangan tarik beton berkisar 8 – 15% dari kuat tekannya. Regangan saat tegangan tarik berada pada kondisi ultimit adalah 0.0001 (tarik murni) dan 0.00014 – 0.0002 (lentur) (James K. Wight, 2016). Kuat tarik beton menurut ACI commentary R19.2.4 **Persamaan 5.**

$$f_{cr} = 0.33\sqrt{f'_c} \dots \dots (5)$$

Beton akan berada pada kondisi linier elastik, E_c ketika tertarik sampai dengan tegangan tarik ultimit tercapai. Kemudian tegangan akan berbalik turun dengan regangan

bertambah signifikan, pada kondisi ini tegangan dan regangan beton dapat didekati dengan :

$$\frac{E_c}{5} \text{ sampai dengan } \frac{E_c}{10} \dots \dots (6)$$

Selain tegangan dan regangan material beton, tegangan dan regangan pada material baja tulangan juga akan dimodelkan. Pemodelan tegangan dan regangan baja tulangan lebih mudah jika dibandingkan dengan beton. Dalam penelitian ini untuk mempermudah pemodelan dengan data pada **Tabel 2**, regangan dan tegangan baja tulangan akan dimodelkan sebagai material *elastic plastic bilinear* seperti pada **Gambar 11**. Hubungan tegangan dan regangan dideskripsikan menggunakan 3 parameter: tegangan saat leleh, f_y tegangan ultimit, f_u dan elastisitas modulus, E . Tegangan leleh, f_y dan ultimit, f_u pada tulangan direferensikan pada (SNI 2052:2017, 2017) pasal 6.5 dengan modulus elastisitas, $E = 200.0000 \text{ Mpa}$.

Deskripsi Kombinasi

Pembuatan kombinasi untuk mempermudah indek pada setiap spesimen maka akan dibuat nomenklatur dalam memberi nama pada setiap spesimen (Lihat **Tabel 3**).

Tabel 3. Nomenklatur indek penamaan spesimen

Kode Variabel	Deskripsi
S1	Variabel spesimen 1 jalur
0.3; 0.4; 0.5; 1; 1.2; 1.5...	Variabel rasio (a/d)

Sehingga dalam suatu nomenklatur penamaan spesimen menjadi S1-0.4-0.3 yang berarti spesimen 1 jalur, a/d_2 0.4 dan a/d_1 0.3. sehingga dalam penelitian ini mempunyai kombinasi pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Nama kombinasi spesimen

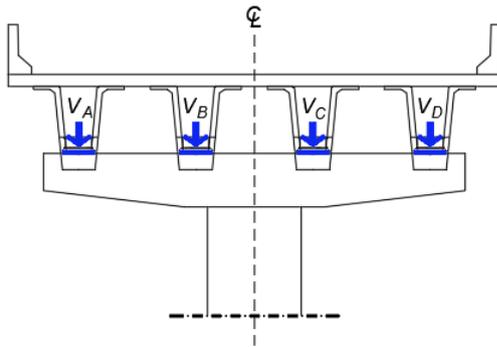
No	Kombinasi	Deskripsi
1	S1-0.3-1	Spesimen 1 jalur, a/d 0.3 dan 1
2	S1-0.4-1.2	Spesimen 1 jalur, a/d 0.4 dan 1.2
3	S1-0.5-1.5	Spesimen 1 jalur, a/d 0.5 dan 1.5

Pembebanan

Beban *upper structure* yang akan ditransfer kepada *pierhead* (spesimen) merupakan beban dari *girder*, pelat lantai dll, yang merupakan beban statis. Beban yang telah dianalisa (beban *upper structure* jembatan) menggunakan SNI 1725 (BSN, 2016), didapat reaksi tumpuan **Tabel 5**. Kemudian beban tersebut diaplikasikan pada titik – titik tumpuan pada *pierhead* seperti pada **Gambar 11**.

Tabel 5. Beban tumpuan *girder* ke *pierhead*

No	Beban Sendiri (MS)	Beban Mati Tambahan (MA)	Traffic Load (TD)	Komb. Kuat 1
	(kN)	(kN)	(kN)	
VA	588.3	381.9	496.5	2363.46
VB	575.6	118.1	451.4	1739.44
VC	575.6	118.1	451.4	1739.44
VD	588.3	381.9	496.5	2363.46



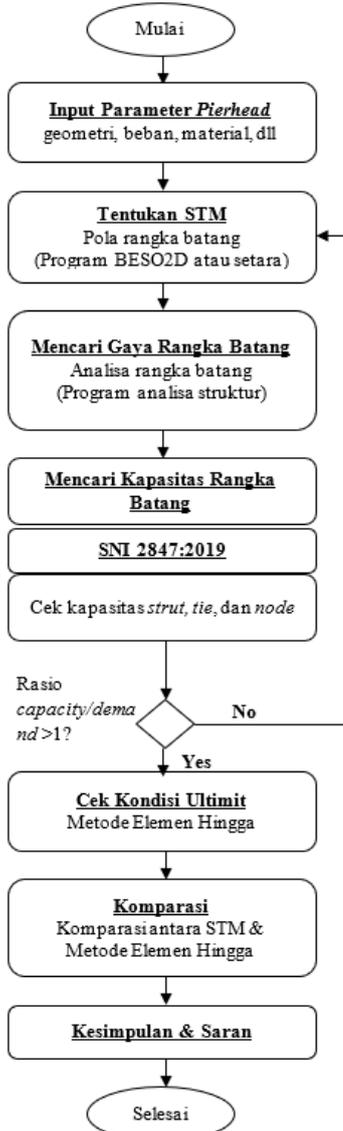
Gambar 11. Letak pembebanan pierhead

Prosedur Pembebanan

Untuk mendapatkan kondisi ultimit maka beban desain akan diterapkan pada struktur secara bertahap dengan *amplitudo* ditingkatkan secara *linier* sampai 200% atau tercapai kapasitas ultimitnya (Tabel 6. dan Gambar13.).

Diagram Alir

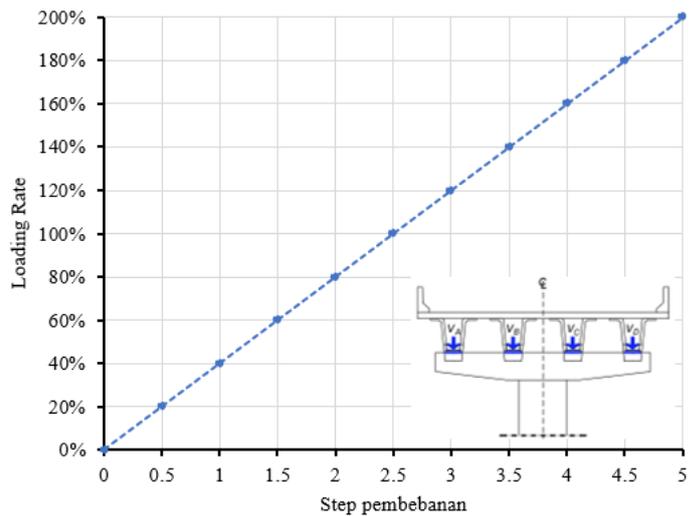
Untuk memperjelas proses penelitian **Gambar 12** merupakan diagram alir dari penelitian ini.



Gambar 12. Diagram Alir Penelitian

Tabel 6. Tahapan pembebanan

Step	Loading Rate	VA=VB (kN)	VC=VD (kN)
0	0%	0.00	0.00
0.5	20%	475.69	347.89
1	40%	945.38	695.78
1.5	60%	1418.08	1043.66
2	80%	1890.77	1392.55
2.5	100%	2363.46	1739.44
3	120%	2863.46	2087.33
3.5	140%	3308.84	2435.22
4	160%	3781.54	2783.10
4.5	180%	4254.23	3130.99
5	200%	4726.92	3478.88



Gambar 13. Grafik tahap pembebanan

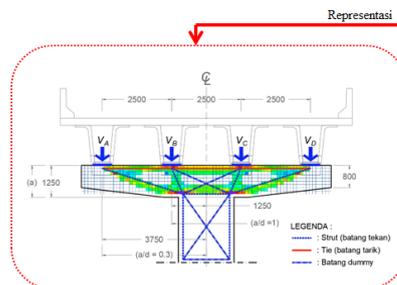
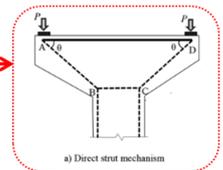
HASIL DAN PEMBAHASAN

Mekanisme Penyebaran Beban

Pendistribusian beban pada *pierhead* kantilever ganda menurut (Geevar & Menon, 2019) diklasifikasikan menjadi 3 macam seperti yang dijeskan pada **Gambar 14** dibawah ini.

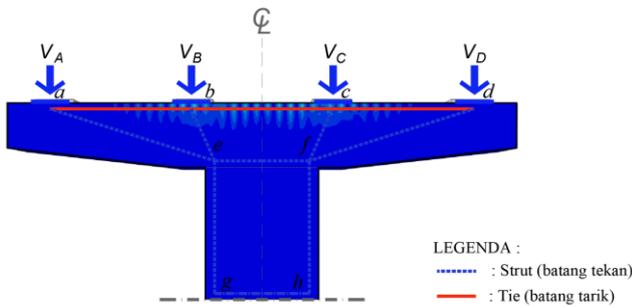
Pedistribusian beban (*load transmission*) dalam *pierhead* dapat terjadi melalui 3 mekanisme yang berbeda :

- *Direct strut mechanism* (mekanisme strut secara langsung)
- *Vertical tie mechanism* (mekanisme tie vertikal)
- *Horizontal tie mechanism* (mekanisme tie horisontal)

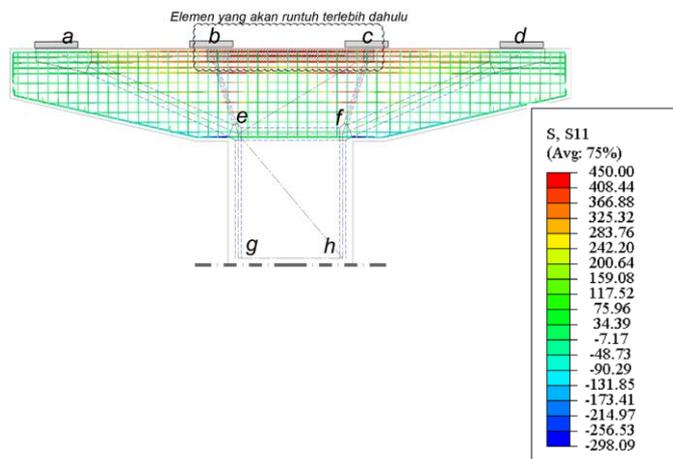


Gambar 14. Mekanisme penyebaran beban penelitian ini menurut (Geevar & Menon, 2019) dengan BESO2D

Tinjauan terhadap kekuatan jika dibandingkan antara STM dengan MEH pada elemen *ties* dapat dilihat pada **Gambar 22**, grafik tersebut menunjukkan kuat nominal rata – rata, \bar{F}_n pada *tie* antara MEH dan STM pada masing – masing spesimen. Terlihat kekuatan yang dihasilkan dari MEH lebih tinggi dari STM (MEH > STM). Ini mengidentifikasi STM konservatif dalam mengkuantifikasi atau memprediksi kekuatan. Sedangkan tren grafik menurun antar spesimen (S1-0.3-1 > S1-0.4-1.2 > S1-0.5-1.5), ini disebabkan karena tinggi spesimen, a yang digunakan semakin tinggi (S1-0.5-1.5 > S1-0.4-1.2 > S1 -0.3-1) tinggi spesimen inilah menyebabkan kebutuhan tulangan *ties* mengalami penurunan, sehingga kapasitas *tie* akan menurun dari masing – masing spesimen.



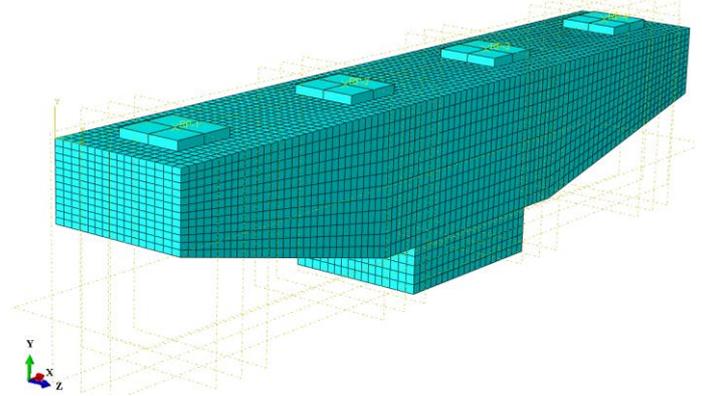
Gambar 19. Tipikal retak pada spesimen hasil MEH



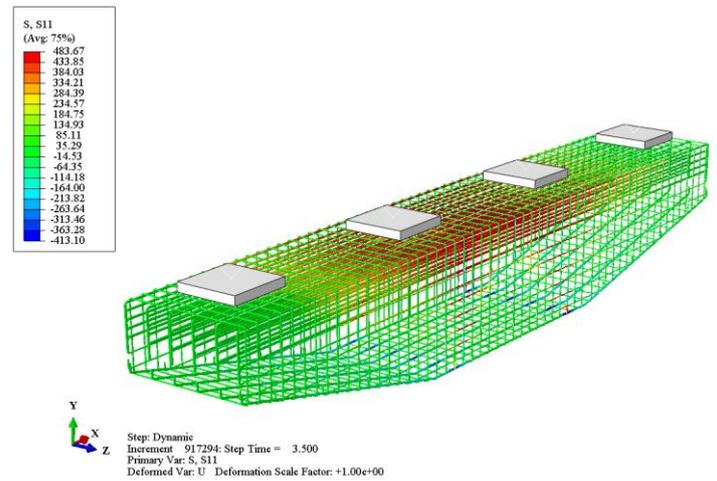
Gambar 160. Kondisi tegangan tekan dan tarik pada tulangan



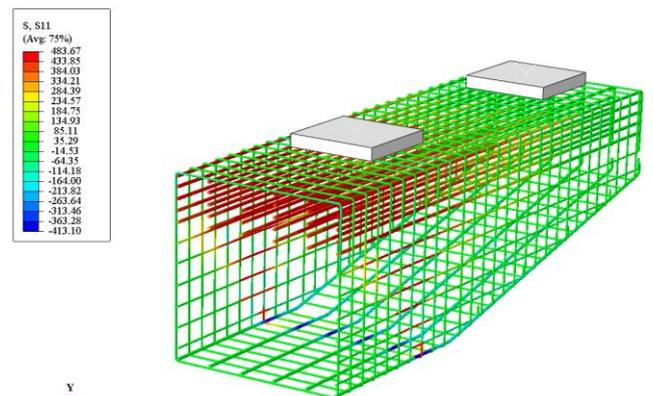
(a)



(b)

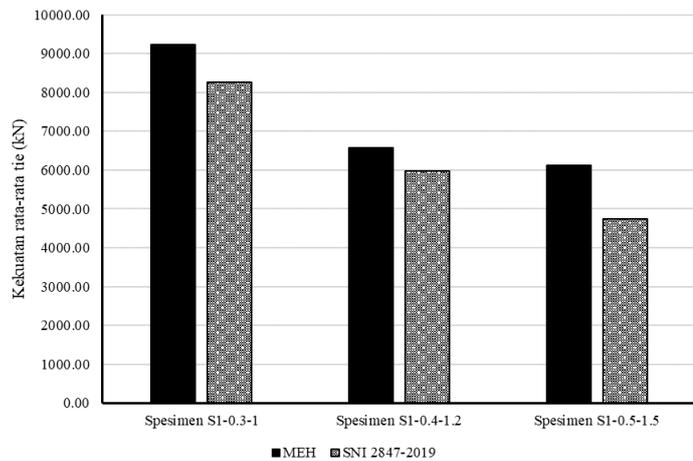


(c)



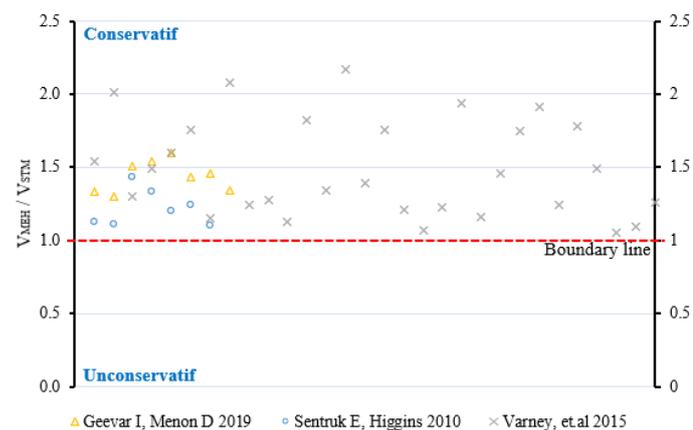
(d)

Gambar 21. Model MEH (a) Modelling tulangan (b) Meshing model (c) Hasil tegangan pada tulangan setelah dibebani (d) Potongan 1/2 spesimen



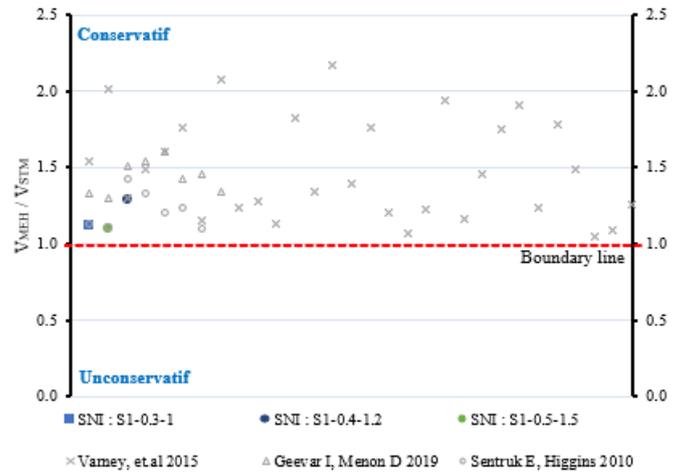
Gambar 172. Perbandingan kekuatan rata - rata ties, \bar{F}_n antara MEH dan STM

Sebelum penelitian ini, peneliti sebelumnya telah meneliti spesimen *pierhead* dengan masing-masing geometri yang berbeada - beda untuk memvalidasi STM pada *pierhead* jembatan. Seperti (Varney et al., 2015) mengamati *inverted T beam*, (Geevar & Menon, 2019) mengamati *pier caps* jembatan dan (Ekin Sentruk; Chistoper Higgins, 2010) *Bent cap* jembatan. Hasil yang telah didapat dari peneliti – peneliti tersebut, kemudian dibuat menjadi rasio antara kuat ultimit *back calculation* dari MEH, V_{MEH} dengan kuat nominal dari STM, V_{STM} , atau secara matematis ditulis rasio V_{MEH}/V_{STM} . **Gambar 23** adalah ringkasan V_{MEH}/V_{STM} dari ketiga peneliti yang disebutkan. Terlihat bahwa keseluruhan spesimen yang diamati berada diatas 1 mengidentifikasi STM menunjukkan hasil yang konservatif.



Gambar 183. V_{MEH}/V_{STM} dari spesimen yang telah diteliti dari peneliti terdahulu

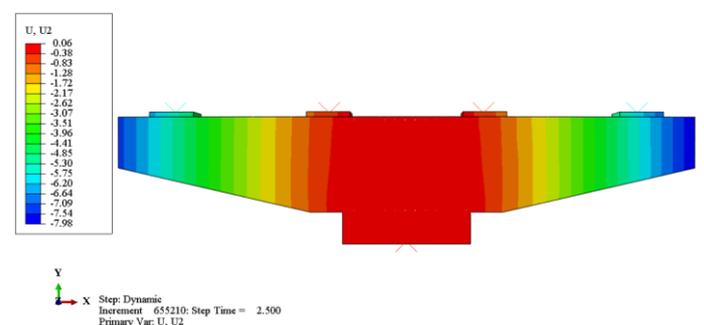
Dari hasil yang telah didapat, jika ditumpuk (*superimposed*) dengan penelitian sebelumnya. Dapat dilihat pada **Gambar 24**. Mengulang pembahasan sebelumnya pada spesimen S1-0.3-1; S1-0.4-1.2; S1-0.5-1.5 terlihat V_{MEH}/V_{STM} berada diatas 1 (garis merah : *boundary line*), menunjukkan bahwa STM konservatif jika digunakan untuk desain *pier head* kantilever ganda. Dengan detail berturut – turut S1-0.3-1 12% konservatif; S1-0.4-1.2 9% konservatif; dan S1-0.5-5 29% konservatif dibandingkan dengan hasil dari *back analysis* kondisi ultimit MEH.



Gambar 194. *Superimpose* penelitian ini dengan penelitian terdahulu

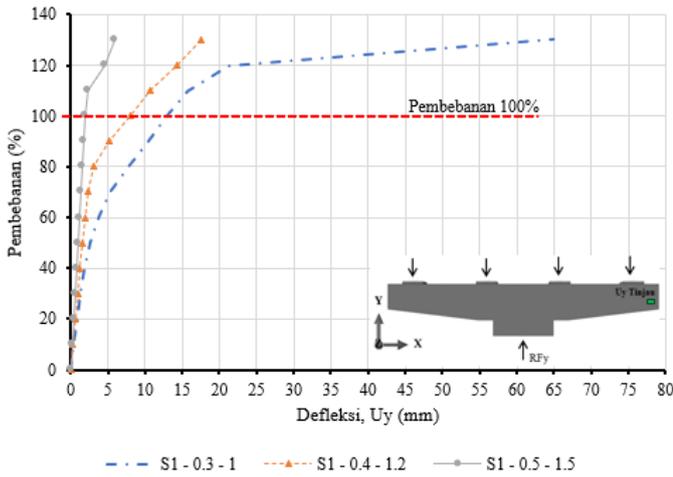
Kemampulayanan Struktur : Defleksi Yang Terjadi

Jika ditinjau defleksi pada spesimen **Gambar 25**. Akibat beban yang diaplikasikan pada pembebanan 100 %, *pierhead* berdeformasi arah Y (U_y) dengan nilai pada **Gambar 26**. Nilai ini hanya sebagai informasi, karena kenyataannya *pierhead* yang diklasifikasikan sebagai daerah D (*disturbance*), kerusakan yang akan terjadi adalah kerusakan dominan geser (*brittle*) dari pada lentur yang terlebih dahulu teridentifikasi lendutan yang signifikan. Akan tetapi untuk meyakinkan bahwa semua spesimen terkontrol terhadap lendutan untuk memenuhi kemampulayanan struktur dalam kondisi layanan (*service*). Maka dalam penelitian ini pengecekan lendutan diacukan pada batasan lendutan SNI 2847:2019 pasal 24.2 mengenai kemampulayanan struktur. Dimana defleksi akibat beban layanan tidak boleh lebih dari $L/240$. Atau dengan kata lain $4500\text{mm} / 240 = 18.75 \text{ mm}$ (Lihat **Gambar 27**).

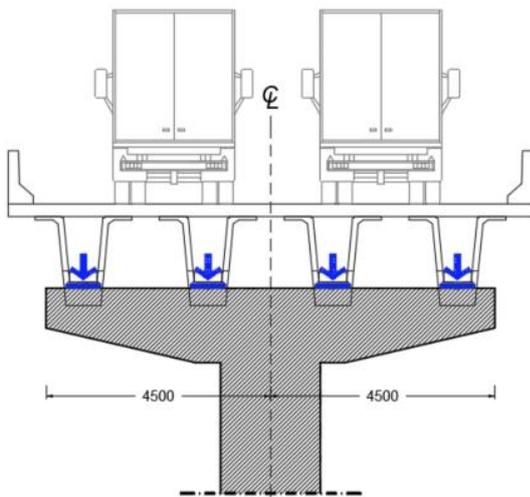


Gambar 205. Deformasi arah Y, U_y pembebanan 100%. Tertampil spesimen S1 - 0.4 -1.2

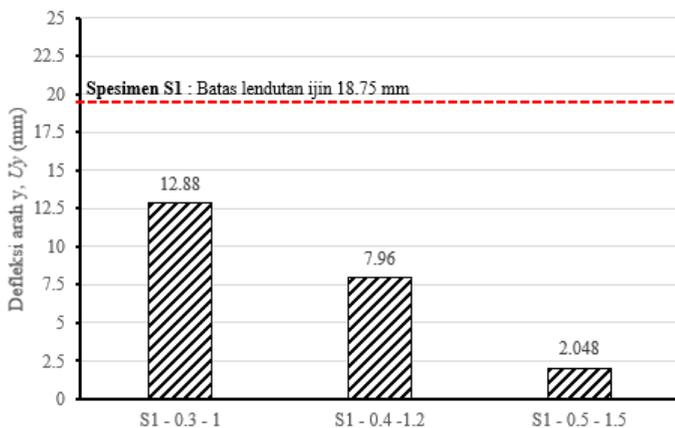
Gambar 28 merupakan grafik komparasi antara defleksi dengan pembebanan 100% yang terjadi pada masing – masing spesimen. Terlihat bahwa pada spesimen S1-0.3-1; S1-0.4-1.2; S1-0.5-1.5, defleksi yang pada struktur dibawah defleksi ijin yang telah dihitung sebelumnya. Dan jika dipelajari tren grafik mengalami penurunan antar spesimen (S1-0.3-1 > S1-0.4-1.2 > S1-0.5-1.5), ini dikarenakan tinggi *pierhead* berturut – turut S1-0.5-1.5 > S1-0.4-1.2 > S1-0.3-1 yang menyebabkan defleksi semakin menurun.



Gambar 26. Komparasi defleksi dengan pembebanan pada masing - masing spesimen



Gambar 27. Panjang kantilever dihitung dari tengah kolom jembatan



Gambar 28. Defleksi pada masing - masing spesimen pada pembebanan 100%

KESIMPULAN

Dari hasil investigasi yang dilakukan dengan STM pada perangkat lunak BESO2D untuk menemukan rangka batang dan dibandingkan dengan hasil MEH. *Pierhead* jembatan kantilever ganda pada penelitian ini memiliki kesamaan dalam mendistribusikan beban dari hasil

BESO2D dan MEH. Area terganggu pada *pierhead* jembatan kantilever ganda yang diklasifikasikan kedalam struktur terganggu dengan diskontinuitas geometri dan beban dalam pendistribusian beban. Juga dapat digolongkan sebagai elemen struktur yang mendistribusikan beban secara *direct strut mechanism* (mekanisme *strut* secara langsung).

Kekuatan dengan perbandingan rasio antara V_{MEH}/V_{STM} pada masing - masing spesimen menunjukkan hasil bahwa STM dapat memprediksi kekuatan pada *pierhead* kantilever ganda dengan konservatif. Dengan detail berturut – turut S1-0.3-1 1.12% (12% konservatif); S1-0.4-1.2 1.09% (9% konservatif); dan S1-0.5-1.5 1.29% (29% konservatif) dibandingkan dengan hasil kondisi ultimit MEH.

Tinjauan kemampulayanan struktur utamanya pada lendutan yang terjadi pada struktur. Defleksi akibat beban layan pada spesimen berturut – turut S1-0.3-1 sebesar 12.88mm; S1-0.4-1.2 sebesar 7.96mm dan S1-0.5-1.5 sebesar 2.048mm, semua defleksi pada masing – masing spesimen berada dibawah defleksi ijin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Magister Teknik Sipil Universitas Mecubuana tempat penulis menimba ilmu S2 dan juga sub departemen *Research & Development* PT. Acset Indonusa, tbk tempat penulis bekerja, yang telah mendukung penulis sampai dengan tulisan ini terselesaikan.

REFERENSI

Baniya, P., & Guner, S. (2019). Specialized strut-and-tie method for rapid strength prediction of bridge pier caps. *Engineering Structures*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109474>

BSN. (2016). SNI 1725: *Pembebanan Untuk Jembatan*.

BSN. (2019). SNI 2847-2019: *Persyaratan Beton Struktural Untuk bangunan Gedung dan Penjelasan*.

Detik Finance. (2018). *Ini Loh Sosrobahu, Teknologi RI yang Pulang Kampung*. <https://finance.detik.com/infrastruktur/d-4007489/ini-lho-sosrobahu-teknologi-ri-yang-pulang-kampung>

Ekin Sentruk; Chistoper Higgins. (2010). Evaluation of Reinforced Concrete Deck Girder Bridge Bent Caps with 1950s Vintage Details Analytical Methods. *ACI Structural Journal*, 544–533.

Garber, D. B., Varney, N. L., Fernández Gómez, E., & Bayrak, O. (2017). Performance of ledges in inverted-T beams. *ACI Materials Journal*, 114(2), 487–498. <https://doi.org/10.14359/51689451>

Geevar, I., & Menon, D. (2019). Strength of reinforced concrete pier caps-experimental validation of strut-and-tie method. *ACI Structural Journal*, 116(1), 261–274. <https://doi.org/10.14359/51711138>

- James K. Wight. (2016).** *Reinforced Concrete Mechanics and Design Seventh Edition (7th ed.)*. Pearson.
- KPPIP. (2019, July).** Progres Pembangunan Tol Layang Jakarta-Cikampek dan Tol Japek II Selatan. *KPPIP*.
<https://kppip.go.id/uncategorized/progres-pembangunan-tol-layang-jakarta-cikampek-dan-tol-japek-ii-selatan/>
- Piscesa, B., & Tavo, T. (2020).** Strut and tie model optimization for reinforced concrete bridge pier head structure using a genetic algorithm. *Journal of Civil Engineering*, 35(2), 39.
<https://doi.org/10.12962/j20861206.v35i2.8573>
- SNI 2052:2017. (2017).** *Baja tulangan beton*.
www.bsn.go.id
- TOMTOM. (2022).** *Traffic Index*.
<https://www.tomtom.com/traffic-index/>
- Varney, N. L., Fernández-Gómez, E., Garber, D. B., Ghannoum, W. M., & Bayrak, O. (2015).** Inverted-T beams: Experiments and strut-and-tie modeling. *ACI Structural Journal*, 112(2), 147–156. <https://doi.org/10.14359/51687403>

Halaman ini sengaja dikosongkan