

Diterima : 08 Juni 2023 | Selesai Direvisi : 17 Juni 2023 | Disetujui : 20 Juni 2023 | Dipublikasikan : Juli 2023

DOI : <http://dx.doi.org/10.24853/jk.14.2.149-162>

Copyright © 2023 Jurnal Konstruksia

This is an open access article under the CC BY-NC licence (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## ***Strut and Ties Method Pierhead* Jembatan Menentukan Rangka Batang dan Perbandingan Kekuatan *Ties* antara SNI dan AASHTO**

**Fery Riswanto<sup>1</sup>, dan Pariatmono Sukamdo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Prodi Magister Teknik Sipil, Universitas Mercu Buana, Jl. Raya, RT.4/RW.1, Meruya Sel., 11650

Email korespondensi: [feryriswanto10@gmail.com](mailto:feryriswanto10@gmail.com)

### **ABSTRAK**

Perencanaan struktur dengan metode STM (*Strut & Tie Method*) dapat digunakan untuk mendekati perilaku struktur dengan tegangan geser yang besar dan mempunyai regangan *non linier* disepanjang penampang struktur. Menentukan rangka batang pada STM merupakan langkah yang *iterative* dan melibatkan proses *trial and error*. Hal ini membutuhkan upaya lebih dalam penggunaan, utamanya bagi pemula yang baru mengenal STM. Estimasi kekuatan rangka batang STM antara SNI 2847:2019 dan AASHTO LRFD 2017 mempunyai perbedaan. Penelitian ini berfokus pada cara menentukan rangka batang STM dan perbedaan estimasi kekuatan *ties* antara kedua standar. BESO2D digunakan dalam mempelajari alur gaya untuk menentukan rangka batang STM, kemudian estimasi kekuatan *ties* dilakukan dari hasil rangka batang tersebut. Studi kasus dilakukan pada *pierhead* jembatan kantilever ganda, dengan 3 spesimen yang dibedakan dengan variabel rasio lebar dan tinggi penampang ( $\frac{a}{d}$  ratio). Hasil: (1) Dalam mendalami alur gaya dari beban ke tumpuan dengan BESO2D pada *pierhead* kantilever ganda, usulan rangka batang dapat dilihat pada tulisan ini. (2) Estimasi kekuatan *ties* yang didasarkan pada SNI 2847:2019 dan AASHTO LRFD 2017 mempunyai kemiripan. Hasil desain tulangan *ties*, AASHTO LRFD 2017 lebih efisien dalam penggunaan tulangan dibandingkan dengan SNI 2847:2019. Ini disebabkan oleh perbedaan faktor reduksi kekuatan,  $\phi$ . Dalam SNI 2847:2019 faktor reduksi diambil  $\phi = 0.75$  sedangkan pada AASHTO LRFD 2017 faktor reduksi kekuatan,  $\phi = 0.9$ .

**Kata kunci:** STM, BESO 2D, *Pier Head*.

### **ABSTRACT**

*Structural planning using the STM (strut & tie method) can be used to approximate the behavior of structures with large shear stresses and non-linear strains along the cross-section of the structure. Determining the truss system in STM is an iterative step and involves the process of trial and error. This requires more effort, especially for beginners who are new to STM. The estimation of the strength of the STM between SNI 2847:2019 and AASHTO LRFD 2017 has differences. This study focuses on how to determine the truss system in the STM and the differences in the estimated strength of the ties between the two standards. BESO2D is used in studying the force flow to determine the STM truss, then the estimation of the tie strength is carried out from the results of the truss. The case study was carried out on a double cantilever bridge pierhead, with 3 specimens that were distinguished by the variable ratio of the width and height of the cross-section (a/d ratio). Results: (1) In exploring the force flow from load to support with BESO2D on double cantilever pierheads, the proposed truss can be seen in this paper. (2) The estimation of the strength of ties based on SNI 2847:2019 and AASHTO LRFD 2017 is similar. The results of the tie reinforcement design, AASHTO LRFD 2017 is more efficient in reinforcement than SNI 2847:2019. This is due to the difference in the strength*

reduction factor,  $\phi$ . In SNI 2847:2019, the reduction factor is taken  $\phi=0.75$ ; in AASHTO LRFD 2017, the strength reduction factor is  $\phi=0.9$ .

**Keywords:** STM, BESO 2D, Pier Head.

## 1. PENDAHULUAN

*Pier head* merupakan komponen pada struktur jembatan yang mempunyai fungsi sebagai tumpuan balok induk (*girder*) jembatan yang berfungsi menyalurkan beban terhadap elemen dibawahnya. Salah satu tipe *pierhead* pada konstruksi jembatan adalah *pierhead* kantilever ganda (*double cantilever pierhead*) (Lihat gambar 1). Penampang geometrik yang hanya memiliki satu kolom pada tengah bentang (dilihat dari penampang melintang jalan), penyaluran beban dari masing-masing girder ke kolom akan mempunyai lintasan beban yang berbeda, hal ini menyebabkan tegangan geser. Tegangan geser pada *pier head* kantilever ganda yang diakibatkan oleh adanya diskontinuitas geometri dan beban pada *girder* menuju ke kolom, lebih tepat jika didekati dengan metode *stut and tie method* (STM) [3].



Gambar 1. Contoh *Pierhead* Kantilever Ganda [8]

STM dari model analogi rangka batang (*Truss-Analogy-Model*) yang pertama kalinya diperkenalkan oleh Ritter (1899) dan Morsch (1902). Saat ini ketentuan STM dikembangkan menggunakan balok tinggi berbentuk persegi [14]. Walaupun dikembangkan dari balok tinggi berbentuk persegi, beberapa peneliti di dunia telah berhasil mengembangkan penggunaan

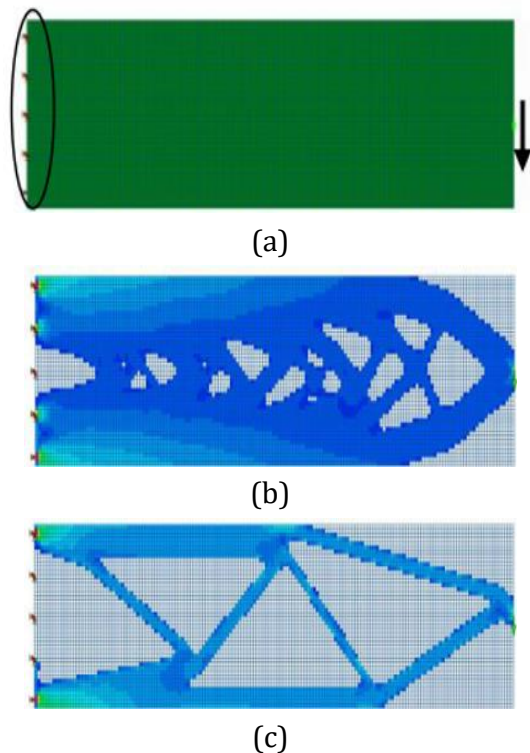
STM untuk berbagai keperluan desain struktur. Pada struktur *pierhead* penulis menemukan peneliti-peneliti yang telah berhasil mengembangkan dan memvalidasi penggunaan STM seperti penggunaan *inverted T beam* [6], *bent cap* persegi [15], *pierhead* kantilever ganda [11] dsb. Penelitian ini akan meneruskan peneliti-peneliti lain dengan geometri penampang dan pembebanan struktur yang berbeda. Ini dimaksudkan agar sedekat mungkin merepresentasikan *pierhead* yang dibangun di lapangan.

Peraturan/standar yang akan dilakukan untuk menginvestigasi *pierhead* kantilever ganda dalam menemukan rangka batang dan tinjauan terhadap perbandingan kekuatan antar spesimen adalah [5] dan [1]. Untuk menemukan sistem rangka batang (*truss system*) pada STM akan digunakan program bantu berupa BESO2D. Dari hasil model rangka batang yang telah ditemukan, analisa rangka batang tarik dan tekan dilakukan dengan program analisa struktur, untuk mencari kuat perlu struktur,  $R_u$ . Dilanjutkan dengan desain rangka batang sehingga masing-masing rangka batang diketahui kapasitas nominalnya,  $R_n$  dan kapasitas nominal tereduksinya,  $\phi R_n$ . Hasil analisa dan desain yang telah dilakukan, akan dibandingkan antara kedua peraturan yang dimaksud.

### Menentukan Rangka Batang STM Dengan Optimalisasi Topologi Struktur

Pada perencanaan struktur berbasis STM diasumsikan seluruh tegangan pada struktur seakan-akan “dipadatkan” dalam batang tekan dan batang tarik yang tergabung pada titik sendi, seperti pada teori rangka batang. Maka untuk perencanaan beton struktural dengan STM tugas utama dari perencana adalah menentukan model yang paling optimal

dari STM itu sendiri. Teknik alur gaya dapat digunakan, tetapi diakui akan menjadi sulit dan memerlukan waktu lama untuk menemukan STM yang baik pada struktur yang mempunyai pembebanan dan geometri yang kompleks. Penggunaan program *finite element analysis* dapat digunakan untuk mengkonstruksikan rangka batang pada STM dengan melihat trajektori tegangan utama dari pembebanan menuju ke tumpuan.



Gambar 2. (a) Pias *finite element* dari balok kantilever dengan beban terpusat di pinggir balok, (b) sesegera saat proses optimisasi 80% (c) *Final* proses optimisasi 35%. [9]

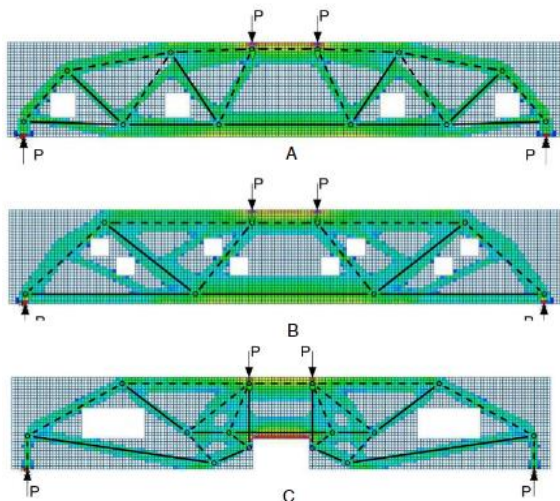
Cara lain yang dapat digunakan untuk menemukan rangka batang STM adalah dengan metode evolusi (*Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures*) yang dikembangkan oleh [17], sebagai alat untuk memudahkan penemuan rangka batang STM. Konsep dasar dari metoda optimisasi topologi struktur secara evolusi adalah mencari struktur yang paling efisien (optimal) dengan cara menghilangkan material

struktur yang tidak efisien sedikit demi sedikit, berdasarkan suatu kriteria tertentu. Melalui proses penghilangan material, struktur yang tadinya merupakan struktur yang utuh (*continuum*) berevolusi sedikit demi sedikit menjadi struktur yang tidak utuh, tetapi menjadi struktur yang optimal yang mana struktur ini membentuk struktur “serupa” dengan struktur rangka batang.

Sebagai contoh pada gambar 2, ditunjukkan proses optimisasi topologi struktur dari suatu balok kantilever dengan beban terpusat pada ujung balok. Terlihat struktur yang awalnya merupakan struktur kontinum berubah bertahap menjadi struktur yang tidak lagi kontinum, yaitu dengan menghilangkan beberapa bagian dari stuktur yang tidak memenuhi kriteria (bagian struktur yang tidak efisien). Yang ditetapkan pada proses optimisasi dengan cara menghilangkan material dengan kategori sebagai material yang tidak efisien.

Agar proses berjalan secara terstruktur dan baik, Yang (1999) mengembangkan metoda *Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization* (BESO). Untuk melakukan optimisasi topologi struktur program BESO2D yang dikembangkan oleh Innovative Structure Group-RMIT-Australia, digunakan program komputer BESO2D.

Contoh mengkonstruksikan rangka batang dengan menggunakan program BESO2D dipublikasikan oleh [9] dengan judul “*Evolutionary Structural Optimization as Tool in Finding Strut-and-Tie Models for Designing Reinforced Concrete Deep Beam*” Gambar 3.



Gambar 3. Model Balok yang Dioptimalisasi dari Sebuah Balok Utuh (*continuum*), dari hasil BESO2D [9]

**STM SNI 2847:2019 dan AASHTO LRFD 2017 dalam estimasi kekuatan ties**

Tabel 1. Tabel Perbandingan Kekuatan Ties SNI 2847:2019 dan AASHTO LRFD 2017

<i>SNI 2847:2019</i>	<i>AASHTO LRFD 2017</i>
$\phi F_{nt} \geq F_{ut}$ (Pasal 23.3.1) (1)	$\phi P_n \geq P_u$ (Pasal 5.8.2.3) (2)
Dengan $\phi$ = Faktor reduksi 0.75 (Pasal 21.2), $F_{nt}$ = Kuat tarik nominal tie, N, $F_{ut}$ = Gaya tarik terfaktor didaerah tie, N.	Dengan elemen tarik STM: beton bertulang $\phi = 0.90$ , Beton prategang $\phi = 1.00$ , $P_n$ = Kuat tarik nominal tie, kips, $P_u$ = Gaya tarik terfaktor didaerah tie, kips.
<b>Kekuatan nominal ties, <math>F_{nt}</math></b>	<b>Kekuatan nominal ties, <math>P_n</math></b>
$F_{nt} = A_{ts}f_y + A_{tp}(f_{se} + \Delta f_p)$ (pasal 23.7) (3)	$P_n = f_y A_{st} + A_{ps}[f_{pe} + f_y]$ (pasal 5.8) (4)
Dengan $(f_{se} + \Delta f_p)$ tidak boleh melebihi $f_{py}$ dan $A_{tp}$ adalah nol untuk komponen struktur nonprategang, $\Delta f_p$ boleh diambil sama dengan 420 Mpa untuk tulangan prategang dengan lekatan dan 70 Mpa untuk tulangan prategang tanpa lekatan. Nilai $\Delta f_p$ yang lebih tinggi boleh diambil jika dibuktikan dari analisis, $A_{ts}$ = Luas tulangan nonprategang dalam suatu ikatan, mm <sup>2</sup> , $A_{tp}$ = Luas baja prategang dalam suatu ikatan, mm <sup>2</sup> , $f_y$ = Kekuatan leleh tulangan yang disyaratkan, Mpa, $f_{py}$ = Kekuatan leleh baja prategang yang disyaratkan, Mpa, $f_{se}$ = Tegangan efektif dalam baja prategang (setelah semua kehilangan prategang terjadi), Mpa.	Dengan $A_{st}$ = Luasan tulangan nonprategang, in <sup>2</sup> , $A_{ps}$ = Luasan baja prategang, in <sup>2</sup> , $f_y$ = Kekuatan leleh tulangan yang disyaratkan, ksi, $f_{pe}$ = Tegangan efektif baja prategang setelah kehilangan prategang, ksi.
	Note: jumlah dari $f_{pe}$ dan $f_y$ tidak boleh lebih dari kekuatan leleh baja prategang.

Di Indonesia peraturan yang mengatur mengenai perancangan STM diatur melalui [16] dimulai pada edisi 2013 pada Appendix A dan kemudian diperbarui pada tahun 2019 pada pasal 23. Peraturan-peraturan lain yang juga membahas mengenai STM seperti [1] pertama kali mengadopsi STM pada tahun 1994 dan

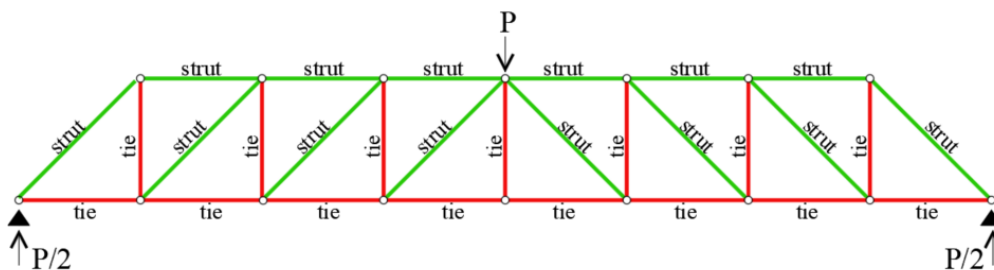
terbaru tahun 2017 pada pasal 5.8 “*Design of D Region*”. Sedangkan [2] memasukkan STM mulai tahun 2002 dengan pembaharuan terakhir 2019 pada pasal 23 “*Strut-and-Tie Method*”.

Definisi dari STM menurut [2] pasal 23 adalah sebuah model struktur rangka dari

suatu komponen atau dari sebuah *D-Region* yang didasarkan pada asumsi dapat dianalisa dan dirancang menggunakan sambungan sendi (*pin jointed*) rangka batang yang terdiri dari *strut* dan *tie* yang terhubung pada *node* gambar 4.

Menurut [13] berdasarkan distribusi regangan yang bekerja pada struktur, penampang struktur dibagi menjadi 2 bagian. Penampang dimana distribusi regangan bersifat *linier* disebut daerah B (Beam, Bernouli), didaerah ini berlaku

dasar Bernouli yaitu bahwa bidang datar penampang akan tetap merupakan bidang datar setelah pembeban. Daerah ini mempunyai trajektori tegangan dengan pola aliran yang relatif teratur dan seragam [12]. Dalam perencanaan daerah B, kita dapat memberikan rencana penulangan berdasarkan standar penulangan yang tersedia, dimana perhitungan penulangan memang didasarkan pada kondisi hipotesa bernouli yang berlaku [10].



Gambar 4. Ilustrasi *Strut, Tie and Node*

Daerah yang lain selain daerah B disebut daerah D (*discontinuity, disturbance*), berbeda dengan daerah B, daerah D mempunyai trajektori tegangan dengan pola aliran yang tidak teratur atau bersifat turbulen. Pada daerah D distribusi regangan pada penampang bersifat *non-linier* sehingga hipotesa Bernouli tidak berlaku. Untuk itulah pada daerah D perlu direncanakan dengan cara tersendiri, yaitu dengan STM [10]. Daerah D dalam [13] dan [2] dikategorikan menjadi dua klasifikasi besar yaitu daerah D akibat diskontinuitas geometri dan kombinasi antara diskontinuitas geometri dan beban.

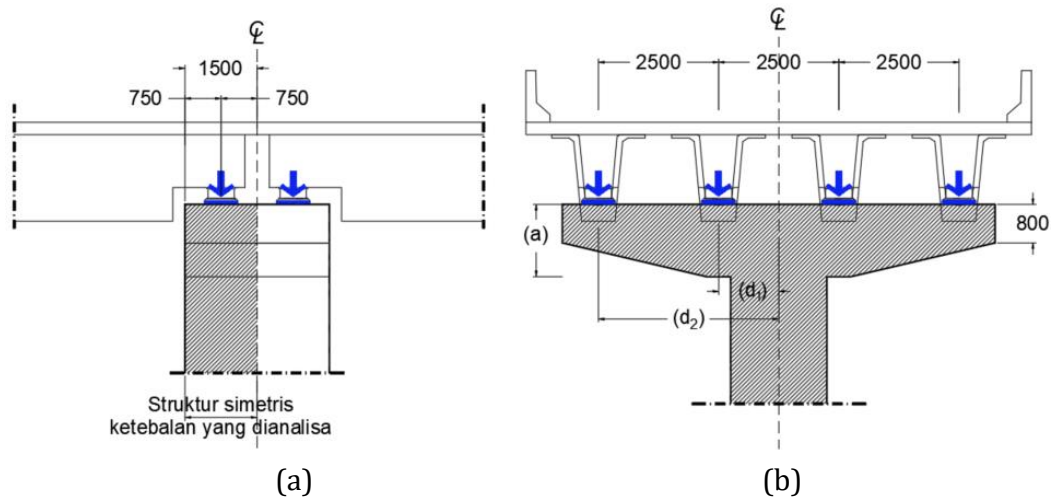
Elemen struktur yang teridentifikasi mempunyai daerah D, dapat didesain dengan STM. Perencanaan STM terhadap alur gaya dari beban ke tumpuan akan disimplifikasi dan di-idealisasikan dengan rangka batang (sebagai elemen aksial) yang dapat mewakili aliran tegangan yang sangat kompleks dalam struktur [7].

Tegangan tekan ditahan oleh beton dinotasikan sebagai *strut*, tegangan tarik akan ditahan oleh tulangan dengan notasi *tie* dan pertemuan antar elemen disebut dengan *node*. Dalam mengestimasi masing-masing elemen pada STM SNI dan AASHTO memiliki perbedaan. tabel 1 adalah perbandingan cara estimasi kekuatan *tie* yang akan dibahas pada penelitian ini.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian ini spesimen yang akan diteliti secara tipikal akan mempunyai penampang seperti pada gambar 5. Dikarenakan bentuknya simetris terhadap longitudinal jalan, maka dalam analisa dan desain akan dilakukan setengah dari penampang longitudinal *pierhead*. Penentuan variabel-variabel yang digunakan dibuat sedekat mungkin merepresentasikan *pier head* yang ada pada kondisi sesungguhnya tabel 2.

### Variabel penelitian



Gambar 5. Bentuk pierhead (a) tampak longitudinal jalan (b) tampak melintang jalan

Tabel 2. Variabel Penelitian

Variabel Terikat	Variabel Bebas
<ul style="list-style-type: none"> <li>Tinggi spesimen (<math>a/d</math> 0.3, 0.4, 0.5, 1, 1.2, 1.5)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Jenis pendistribusian beban, menentukan rangka batang [6]</li> <li>Kuat perlu terkombinasi, <math>R_u</math></li> <li>Kuat nominal, <math>F_{nt}</math> &amp; kuat nominal tereduksi, <math>\phi F_{nt}</math> [8]</li> <li>Kuat nominal, <math>F_{nt}</math> &amp; kuat nominal tereduksi, <math>\phi F_{nt}</math> [7]</li> </ul>

### Material Struktur

Tabel 3. Karakteristik Material

Nama Material	Mutu
Beton	$F_c' = 45 \text{ Mpa}$ $E_c = 4700 * (f_c')^{0.5}$ $\nu = 0.2$
Baja tulangan	BJTS 420B $F_y = 420 \text{ Mpa}$ ; $f_u = 560 \text{ Mpa}$ $E_s = 210000 \text{ Mpa}$ $\nu = 0.3$

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.

### Deskripsi Kombinasi

Pembuatan kombinasi untuk mempermudah indeks pada setiap spesimen maka akan dibuat nomenklatur dalam memberi nama pada setiap spesimen (Lihat tabel 4).

Tabel 4. Nomenklatur Indeks Penamaan

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

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 5.

Tabel 5. 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 *pier head* (spesimen) merupakan beban dari *girder*, pelat lantai dll, yang merupakan beban statis. Beban yang telah dianalisa (beban *upper structure* jembatan) menggunakan SNI 1725 [4], didapat reaksi tumpuan tabel 8. Kemudian beban tersebut diaplikasikan pada titik-titik tumpuan pada *pierhead* seperti pada gambar 6.

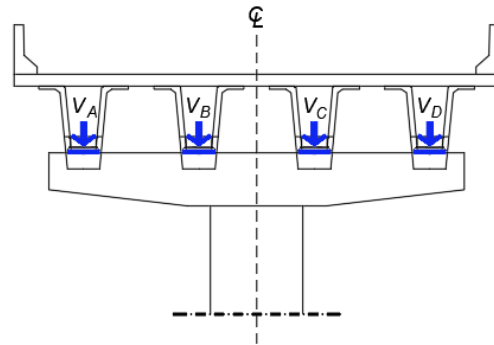
Tabel 6. Beban Tumpuan Girder

No	(MS)	(MA)	(TD)	Komb.
	(kN)	(kN)	(kN)	Kuat 1 (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

**Desain Penelitian**

*Pierhead* kantilever ganda akan didesain dengan *strut-and-tie* model (STM) menggunakan dua peraturan yaitu (SNI 2847, 2019) dan (AASHTO-LRFD-8thEdition, 2017). Untuk menemukan sistem rangka batang (*truss system*) pada metode STM akan digunakan program

berupa BESO2D. Dari hasil model rangka batang yang telah ditemukan, analisa rangka batang tarik dan tekan dilakukan dengan program analisa struktur. Dilanjutkan dengan desain rangka batang tarik (*ties*) untuk mengetahui kapasitas nominalnya.



Gambar 6. Letak Pembebanan *Pierhead*

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

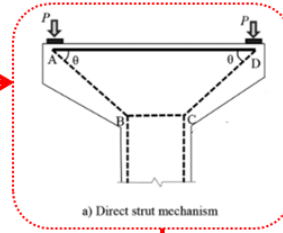
**Mekanisme Penyebaran Beban, Menentukan Rangka Batang**

Pendistribusian beban pada *pierhead* kantilever ganda menurut [11] diklasifikasikan menjadi 3 macam seperti yang dijeskan pada gambar 8 dibawah ini.

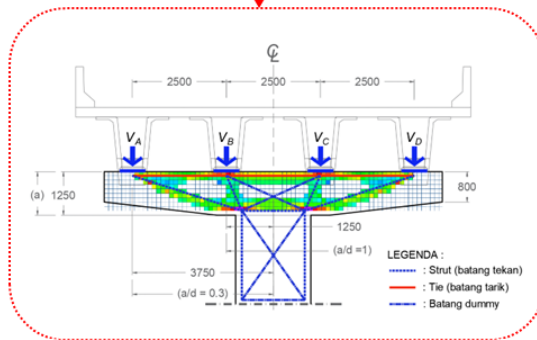
Dari hasil investigasi STM dengan rangka batang yang diusulkan, elemen rangka batang struktur akan mengalami tarik pada batang tarik (*ties*), dan tertekan pada batang tekan (*strut*). Dari hasil evaluasi perangkat lunak BESO 2D, kemudian didalami kembali untuk diusulkan menjadi elemen rangka batang. Rangka batang yang dihasilkan, kemudian perlu dievaluasi agar memenuhi syarat kesetimbangan rangka batang, sehingga dapat dilakukan analisa lanjutan untuk mengetahui gaya-gaya batang yang bekerja.

Pedistribusi 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)



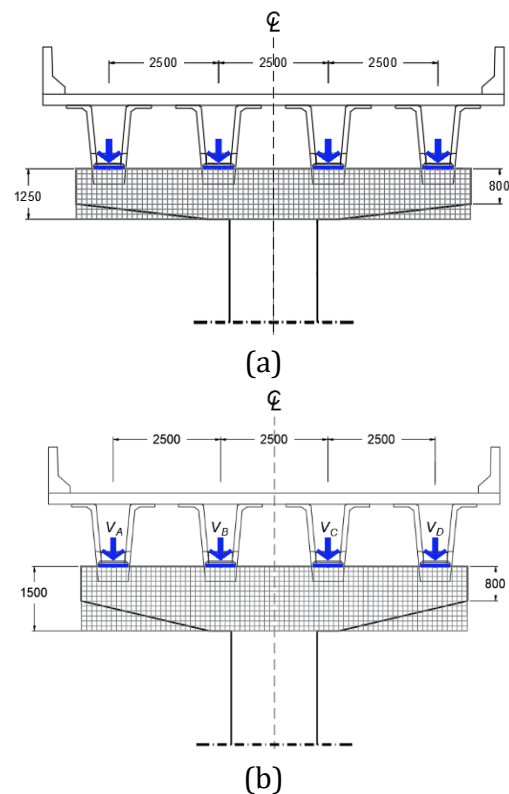
Representasi spesimen S1



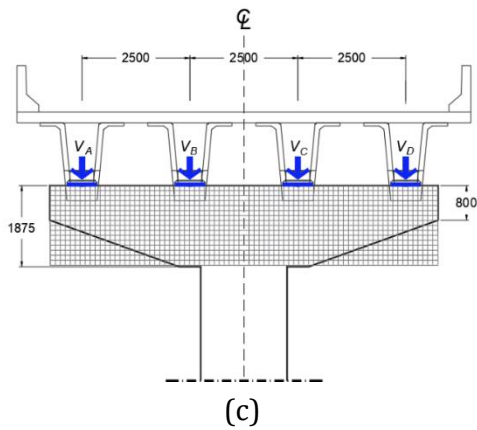
Gambar 7. Mekanisme Penyebaran Beban Penelitian menurut [11] dengan BESO2D

Seperti telah dijelaskan pada sebelumnya, proses penentuan rangka batang akan sangat iteratif sehingga setiap individu yang merencanakan rangka batang STM akan memiliki pola rangka yang berbeda-beda, hal ini lah yang sering membingungkan penggunaan metode STM ini [10]. Dalam beberapa kasus, rangka batang untuk struktur-struktur yang umum seperti balok tinggi, korbel, *pile cap* telah banyak peneliti yang mengusulkannya. Tetapi untuk elemen-elemen struktur yang khusus (*customized*) perlu dibuat *trial and error* untuk menentukan rangka batang yang efisien.

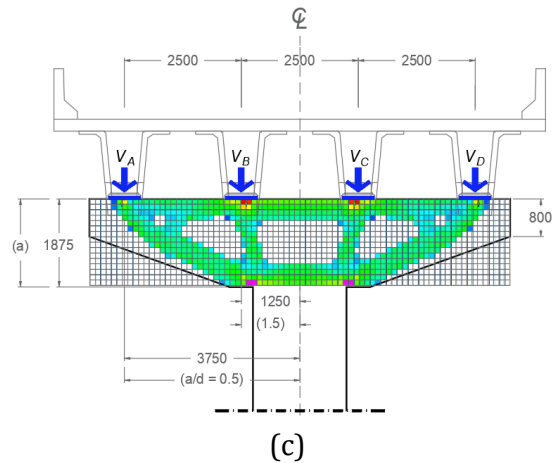
Rangka batang yang baik merupakan rangka batang yang dapat mewakili alur beban menuju ke tumpuan (*load path*). Untuk mempermudah proses dalam menentukan rangka batang maka program BESO 2D digunakan pada penelitian ini. gambar 9 merupakan pembagian pias pada *pier head* pada program BESO 2D. Hasil dari program BESO 2D dapat dilihat pada gambar 10.



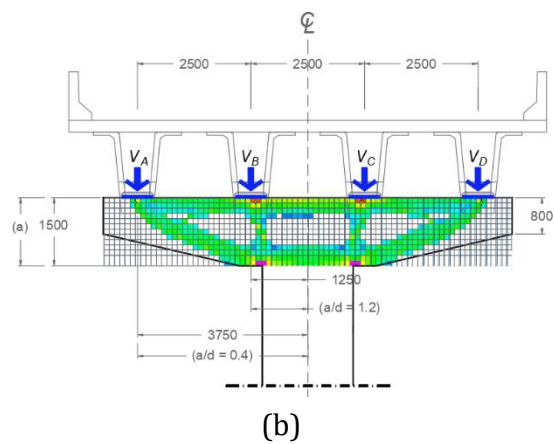
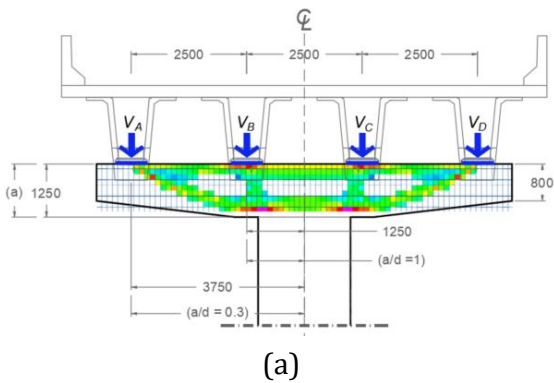




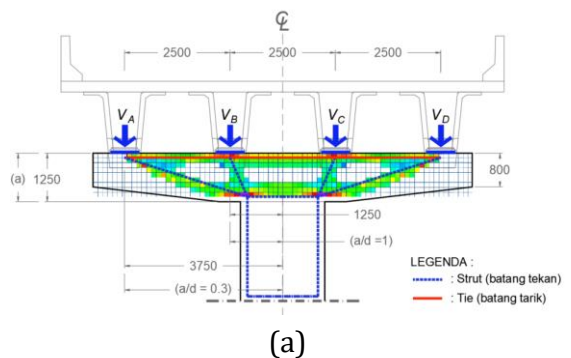
Gambar 8. Pembagian Pias setiap Spesimen (a) S1-0.3-0.1 (b) S1-0.4-1.2 (c) S1-0.5-1.5

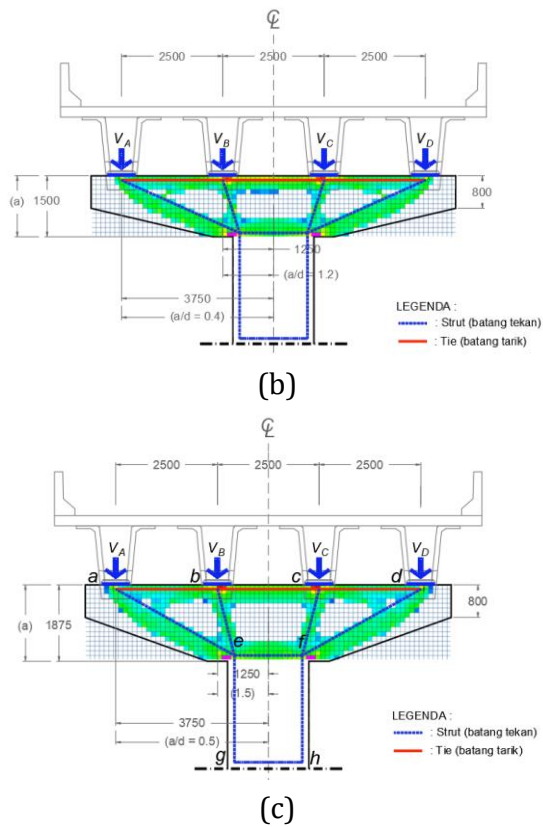


Gambar 9. Hasil Optimisasi BESO 2D pada Spesimen (a) S1-0.3-1 (b) S1-0.4-1.2 (c) S1-0.5-1.5



Dari hasil BESO2D, tegangan-tegangan pada elemen struktur dari stuktur utuh (*continuum*) yang mempunyai tegangan yang tidak signifikan dieliminasi. Dari proses eliminasi tegangan yang dilakukan oleh program BESO2D, didapat tegangan-tegangan yang berpengaruh dalam menahan beban yang membentuk alur gaya. Hasil ini lah yang akan digunakan untuk mengkonstruksikan rangka batang pada STM. Gambar 11 merupakan konstruksi dari rangka batang yang dihasilkan oleh BESO2D, penentuan batang tekan (*strut*) dan batang tarik (*tie*) ditentukan sesuai dengan kaidah-kaidah analisa struktur rangka batang.



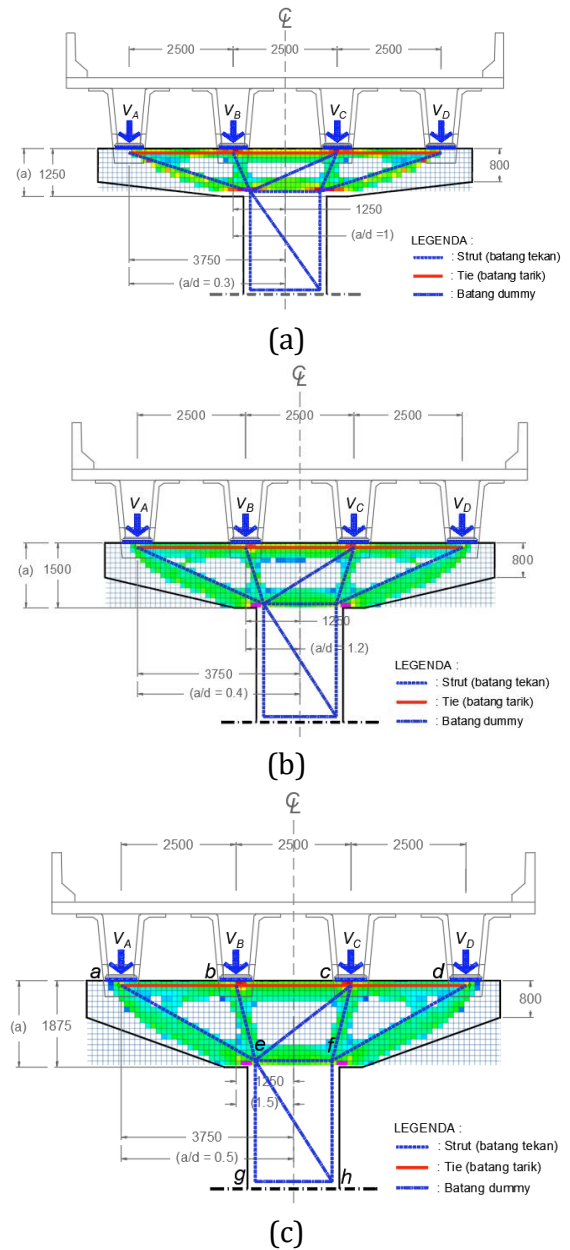


Gambar 10. Rangka Batang Hasil dari BES02D (a) S1-0.3-1 (b) S1-0.4-1.2 (c) S1-0.5-1.5

Sebelum dilakukan analisa untuk mendapatkan gaya dalam pada setiap rangka batang, struktur yang dihasilkan dari BES02D perlu dilakukan pengecekan terhadap stabilitas rangka batang. Pengecekan stabilitas dilakukan dengan rumus sebagai berikut:

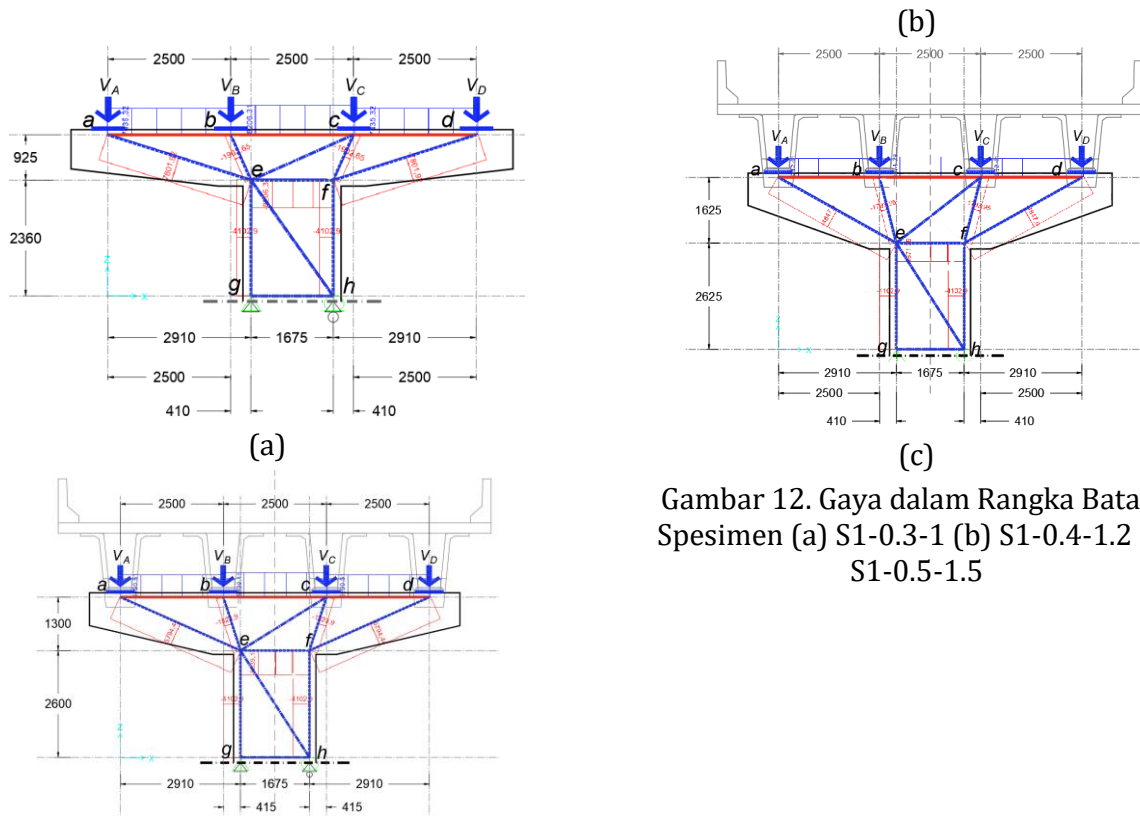
$$m \geq 2j - 3 \quad (5)$$

dengan  $m$  = jumlah batang,  $j$  = jumlah joint. Struktur yang dihasilkan oleh BES02D tidak stabil. Diperlukan modifikasi dengan menambahkan batang *dummy*. Geometri pemasangan rangka *dummy* diacukan pada rangka *dummy* yang diusulkan oleh [10]. Selanjutnya rangka *dummy* tersebut akan diaplikasikan pada masing-masing spesimen yang telah didapat dari BES02D gambar 12.



Gambar 11. Penambahan Batang Dummy untuk Syarat Stabilitas Rangka Batang (a) S1-0.3-1 (b) S1-0.4-1.2 (c) S1-0.5-1.5

Rangka batang yang telah dikonstruksikan kemudian dianalisa untuk menemukan gaya-gaya dalam. Pada analisa rangka batang terdapat beberapa metode yang dapat digunakan seperti *method of Joint* (metoda kesetimbangan titik), diagram cremona, *method of section* dsb. Penelitian ini tidak menitik beratkan kepada analisa dengan metode yang telah disebutkan. Perangkat lunak analisa struktur akan digunakan untuk menemukan gaya dalam rangka batang gambar 13 dan tabel 9.



Gambar 12. Gaya dalam Rangka Batang Spesimen (a) S1-0.3-1 (b) S1-0.4-1.2 (c) S1-0.5-1.5

Tabel 7. Gaya Dalam (kuat perlu terfaktor/terkombinasi) pada Rangka Batang Masing - Masing Spesimen

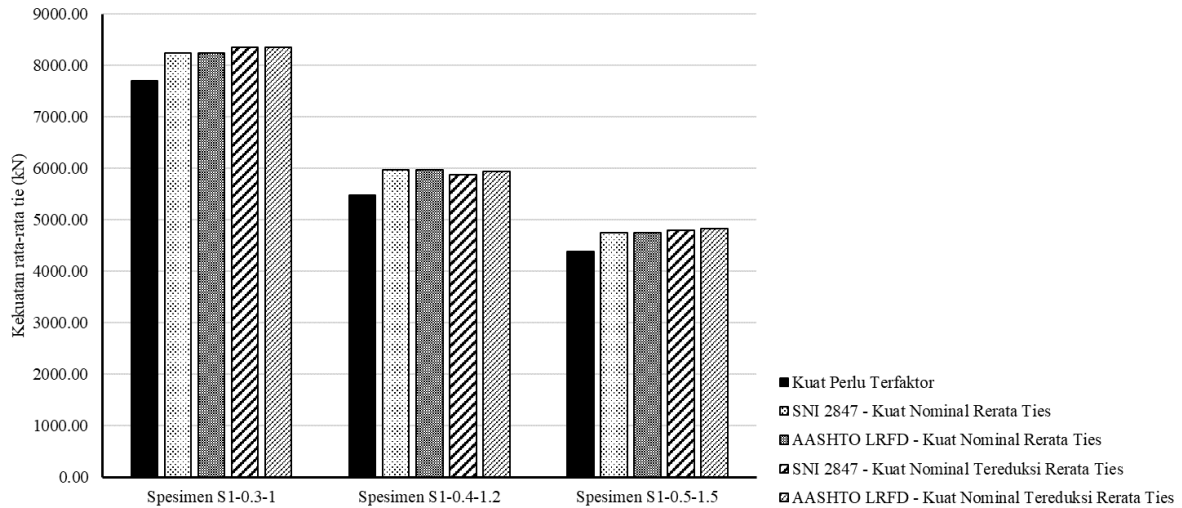
No	Batang	Gaya Dalam (kN)		
		S1-0.3-1	S1-0.4-1.2	S1-0.5-1.5
1	A - B = C - D	(+) 7435.32	(+) 5290.51	(+) 4232.41
2	B - C	(+) 8206.31	(+) 5839.11	(+) 4671.29
3	B - E = C - F	(-) 1902.65	(-) 1823.9	(-) 1793.95
4	A - E = D - F	(-) 7801.92	(-) 5794.44	(-) 4847.6
4	E - G = F - H	(-) 4102.9	(-) 4102.9	(-) 4102.9
5	E - F	(-) 8206.3	(-) 5339.1	(-) 4671.29
6	B - F = E - H = G - H	0	0	0

Note: (+) Tarik; (-) Tekan

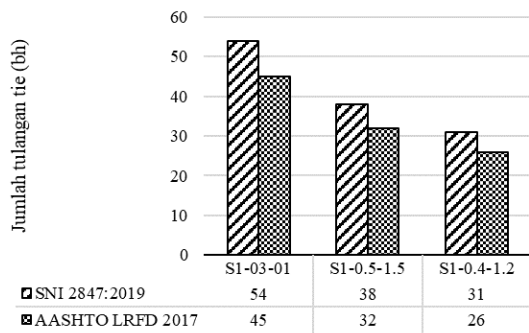
Pada spesimen S1-0.3-1 ; S1-0.4-1.2 ; S1-0.5-1.5 rangka batang yang tertarik (*ties*) ter-identifikasi terjadi pada batang *ties* A - B; B - C; C - D. Sehingga yang lain merupakan batang tekan (*strut*). Hal ini mewakili mekanisme strut secara langsung (*direct strut mechanism*) gambar 8.

**Kekuatan *ties* STM SNI 2847:2019 & AASHTO LRFD 2017**

Gambar 14 merupakan grafik perbandingan rata-rata kekuatan antara STM SNI 2847:2019 dan AASHTO LRFD 2017 pada masing-masing spesimen tanpa faktor reduksi,  $F_{nt}$  dan dengan faktor reduksi,  $\phi F_{nt}$ .

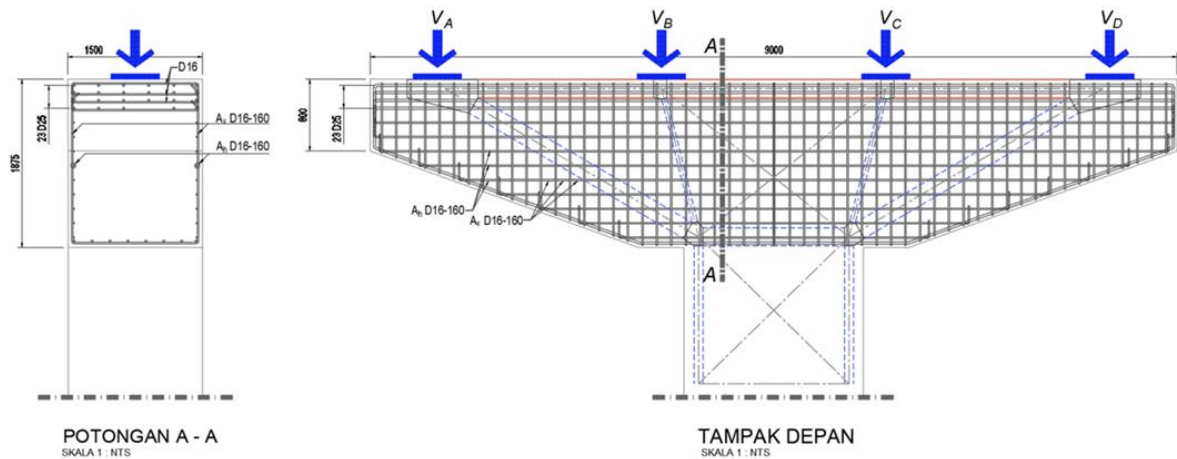


Gambar 13. Perbandingan Kapasitas Tie SNI 2847 dan AASHTO LRFD



Gambar 14. Perbandingan Penggunaan Tulangan Ties SNI 2847 dan AASHTO LRFD

Dalam mengestimasi kekuatan *ties* tanpa faktor reduksi,  $F_{nt}$  dan dengan faktor reduksi,  $\phi F_{nt}$  SNI 2847 dan AASHTO LRFD 2017 mempunyai kemiripan. Hanya saja karena faktor reduksi tarik pada kedua peraturan ini berbeda SNI 2847  $\phi = 0.75$  dan AASHTO LRFD  $\phi = 0.9$  penggunaan tulangan pada kedua peraturan ini berbeda. SNI 2847 akan lebih banyak dalam penggunaan tulangan daripada AASHTO LRFD 2017 gambar 15. Contoh pemasangan tulangan dapat dilihat pada gambar 16.



Gambar 15. Contoh Penulangan Tie pada Spesimen

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil investigasi STM dengan perangkat lunak BES02D, tegangan-tegangan yang dipadatkan dari hasil

mengeliminasi tegangan yang tidak signifikan pada elemen struktur, usulan rangka batang pada pierhead kantilever ganda dapat disusun seperti pada gambar

12 dan identifikasi batang tarik – tekan pada tabel 9. Rangka batang yang telah teridentifikasi elemen tarik dan tekan jika diklasifikasikan menurut [11] masuk sebagai elemen struktur dengan pendistribusian beban *direct strut mechanism* (mekanisme strut secara langsung).

Estimasi kekuatan *ties* yang didasarkan pada SNI 2847:2019 dan AASHTO LRFD 2017 mempunyai kemiripan. Hasil desain tulangan *ties*, AASHTO LRFD 2017 lebih efisien dalam penggunaan tulangan daripada SNI 2847:2019. Ini disebabkan oleh perbedaan faktor reduksi kekuatan,  $\phi$ . Dalam SNI 2847:2019 faktor reduksi diambil  $\phi = 0.75$  sedangkan pada AASHTO LRFD 2017 faktor reduksi kekuatan,  $\phi = 0.9$ .

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] AASHTO-LRFD-8thEdition, "AASHTO LRFD Bridge Design Specification 8th Edition," USA, 2017.
- [2] ACI-318-14, "Building Code Requirements for Structural Concrete," USA, 2014.
- [3] B. Piscesa and T. Tavio, "Strut and tie model optimization for reinforced concrete bridge pier head structure using a genetic algorithm," *Journal of Civil Engineering*, vol. 35, no. 2, p. 39, Dec. 2020, doi: 10.12962/j20861206.v35i2.8573.
- [4] BSN, "SNI 1725 : Pembebanan Untuk Jembatan," 2016.
- [5] BSN, "SNI 2847-2019 : Persyaratan Beton Struktural Untuk bangunan Gedung dan Penjelasan," Jakarta, 2019.
- [6] D. B. Garber, N. L. Varney, E. Fernández Gómez, and O. Bayrak, "Performance of ledges in inverted-T beams," *ACI Mater J*, vol. 114, no. 2, pp. 487–498, Mar. 2017, doi: 10.14359/51689451.
- [7] D. Birrcher, R. Tuchscherer, M. Huizinga, O. Bayrak, S. Wood, and J. Jirsa, "Strength and Serviceability Design of Reinforced Concrete Deep Beams (FHWA/TX-09/0-5253-1)," 2008. [Online]. Available: [www.ntis.gov](http://www.ntis.gov).
- [8] Detik Finance, "Ini Loh Sosrobahu, Teknologi RI yang Pulang Kampung," 2018. Accessed: Jun. 16, 2022. [Online]. Available: <https://finance.detik.com/infrastruktur/d-4007489/ini-lho-sosrobahu-teknologi-ri-yang-pulang-kampung>
- [9] H. Hardjasaputra, "Evolutionary structural optimization as tool in finding strut-and-tie-models for designing reinforced concrete deep beam," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2015, pp. 995–1000. doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.153.
- [10] Harjasaputra H, *Perencanaan Beton Struktural Berdasarkan Model Strut dan Pengikat (Strut-and-Tie) SNI 2847-2013*, 1st ed., vol. 1. Jakarta: Graphika Jakarta, 2016.
- [11] I. Geevar and D. Menon, "Strength of reinforced concrete pier caps-experimental validation of strut-and-tie method," *ACI Struct J*, vol. 116, no. 1, pp. 261–274, Jan. 2019, doi: 10.14359/51711138.
- [12] Imran; Hendrik, *Perancangan Lanjut Struktur Beton Bertulang*, 1st ed., vol. 2. Bandung: ITB Press, 2016.
- [13] J. Schlaich, K. Schafer, and M. Jennewein, "Toward a Consistent Design of Structural Concrete," 1987. doi: <https://doi.org/10.15554/pcij.05011987.74.150>.
- [14] N. L. Varney, E. Fernández-Gómez, D. B. Garber, W. M. Ghannoum, and O. Bayrak, "Inverted-T beams: Experiments and strut-and-tie modeling," *ACI Struct J*, vol. 112, no. 2, pp. 147–156, Mar. 2015, doi: 10.14359/51687403.
- [15] P. Baniya and S. Guner, "Specialized strut-and-tie method for rapid strength prediction of bridge pier

- caps," *Eng Struct*, vol. 198, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109474.
- [16] SNI2847, "Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung," Jakarta, 2019.
- [17] X. Huang and Y. M. Xie, "Evolutionary topology optimization of continuum structures with an additional displacement constraint," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 40, no. 1-6, pp. 409-416, Jan. 2010, doi: 10.1007/s00158-009-0382-4.