



Korelasi Nilai Tegangan dan Sudut Trajektori terhadap Rasio Dimensi pada Balok Tinggi

*Kukuh C. Adi Putra, Yulita Arni Priastiwi, Sukamta

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

*)kukuhcadiputra@gmail.com

Received: 8 Juni 2020 Revised: 15 Juni 2021 Accepted: 21 Juni 2021

Abstract

According to SNI 2847-2019, deep beam definition is a structural component that is loaded one side and supported on the opposite face so that compressive components such as Struts can form between loads and supports. It is also outlined the ratio of the beam's net span compared to the beam's height must meet the requirements $(l/h) < 4$. The purpose of this study is to find the value of stresses correlation and the trajectory angle to the ratio of the l/h 's beam with a span of 4 meters when given a point load, $P = 2,000$ kN. In the process of analysis using SAP v.14 to find the value of stresses and trajectory angles of variations l/h . The results obtained from this study is ratio of l/h of deep beam affects the magnitude of the stress and the angle of the trajectory. Increasingly the width of the beam has no significant effect on the resulting trajectory angle.

Keywords: Deep beam, stress, trajectory angle

Abstrak

Menurut SNI 2847-2019 pengertian balok tinggi adalah komponen struktur yang dibebani satu sisi dan ditopang pada muka yang berlawanan sedemikian hingga komponen tekan seperti strut dapat terbentuk diantara beban dan tumpuan. Dijabarkan pula rasio bentang bersih balok dibandingkan tinggi balok harus memenuhi persyaratan $(l/h) < 4$. Tujuan dari penelitian ini adalah mencari nilai korelasi tegangan dan sudut trajektori terhadap rasio l/h balok dengan bentang 4 meter ketika diberikan beban terpusat, $P = 2.000$ kN. Dalam proses analisisnya menggunakan software SAP v.14 untuk mencari nilai tegangan dan sudut trajektori berbagai variasi l/h . Hasil yang didapat dari penelitian ini yaitu rasio l/h balok tinggi mempengaruhi besarnya tegangan dan sudut trajektori, dimana semakin kecil rasio l/h balok semakin kecil pula tegangan dan semakin besar sudut trajektori yang dihasilkan. Semakin bertambah lebar balok, semakin kecil tegangan tarik dan tekan maksimumnya. Semakin bertambah lebar balok tidak berpengaruh signifikan terhadap sudut trajektori yang dihasilkan.

Kata kunci: Balok tinggi, tegangan, sudut trajektori

Pendahuluan

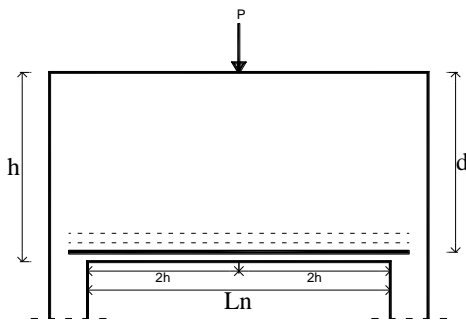
Balok tinggi didefinisikan sebagai balok dengan bentangan bersih (L_n) tidak lebih dari empat kali tinggi balok (h) untuk pembebanan merata atau dua kali tinggi efektif balok ($2d$) dari permukaan perletakan untuk balok dengan pembebanan terpusat (SNI 2847:2019). Balok tinggi dapat berupa bentangan tunggal maupun menerus. Balok tinggi dapat diklasifikasikan sebagai elemen struktur yang mengalami diskontinu tegangan yaitu termasuk dalam daerah D, yaitu daerah dimana distribusi tegangannya tidak linear (Hardjasaputra

& Tumilar, 2002). Permodelan *strut and tie* diterapkan pada desain beton dengan kategori daerah D.

Sejak diperkenalkan oleh Schlaich *et al.* (1987), metode *strut and tie* (STM), yang didasarkan pada teori plastisitas batas bawah, telah berfungsi sebagai alat desain dan analitik untuk elemen struktural. Selain itu, program komputer untuk membantu insinyur menganalisis dan merancang menggunakan STM sudah dikembangkan oleh Tjhin & Kuchma (2007). Zhang (2007) mengusulkan model *strut and tie* yang didasarkan

pada kriteria kegagalan *Mohr Coulomb*. Beberapa peneliti lain mengembangkan model *strut and tie* yang memenuhi tiga prinsip *Navier*, seperti *strut and tie* berbasis kompatibilitas yang menggunakan formulasi kekakuan garis potong dan model *strut and tie* yang diperhalus. Partogi (2017) menjelaskan adanya pengaruh rasio l/h terhadap tegangan dan sudut trajektori. Disebutkan dalam penelitiannya, dimana semakin kecil rasio bentang per tinggi balok (l/h), maka semakin besar tegangan dan sudut trajektori yang dihasilkan. Sebelumnya, Lodoviko (2017) kemudian Partogi (2017) telah membandingkan dengan baik kondisi balok tinggi ketika diberikan beban merata, kemudian diatur sedemikian rupa sehingga rasio l/h untuk mengetahui signifikansi perbedaan perancangannya.

Menurut SNI 2847:2019, pengertian balok tinggi yang diilustrasikan pada Gambar 1 adalah komponen struktur yang dibebani satu sisi dan ditopang pada muka yang berlawanan sedemikian hingga komponen tekan seperti *strut* dapat terbentuk diantara beban dan tumpuan. Rasio bentang bersih balok dibandingkan tinggi balok harus memenuhi persyaratan $(l/h) < 4$. Disajikan sketsa balok tinggi pada Gambar 1 yang diberi beban terpusat dimana jarak beban terpusat sebesar $2h$ dari muka tumpuan.



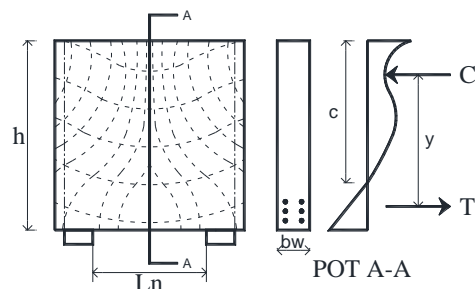
Sumber: SNI 2847:2019 Ps.9.9

Gambar 1. Balok tinggi

Dimana P merupakan beban terpusat (kN), h merupakan tinggi keseluruhan balok (m), d merupakan jarak dari serat tekan terjauh ke pusat tulangan tarik longitudinal (m), L_n merupakan panjang bentang bersih yang diukur dari muka ke muka tumpuan (m).

Contoh dari struktur balok tinggi adalah balok bentang pendek dengan beban berat, balok transfer geser, dinding vertikal dengan beban gravitasi, dinding geser, dan pelat lantai yang dikenai beban horisontal. Dalam proses desain, balok dengan kategori balok tinggi harus mempertimbangkan distribusi non linier dari regangan longitudinal sepanjang tinggi balok serta tekuk lateral.

Hardjasaputra & Tumilar (2002), menjelaskan bahwa suatu benda elastis yang dibebani sebelum retak akan menghasilkan medan tekan (*compression field*) dan medan tarik (*tension field*). Garis trajektori utama adalah garis tempat kedudukan titik-titik dari suatu tegangan utama (*principal stress*) yang memiliki nilai yang sama yang terdiri dari garis trajektori tekan dan trajektori tarik. Garis-garis trajektori menunjukkan arah dari tegangan utama pada setiap titik yang ditinjau. Jadi trajektori tegangan merupakan suatu kumpulan garis-garis kedudukan dari titik-titik yang mempunyai tegangan utama dengan nilai tertentu. Ilustrasi trajektori tegangan disajikan pada Gambar 2.



Sumber: Setiawan (2016)

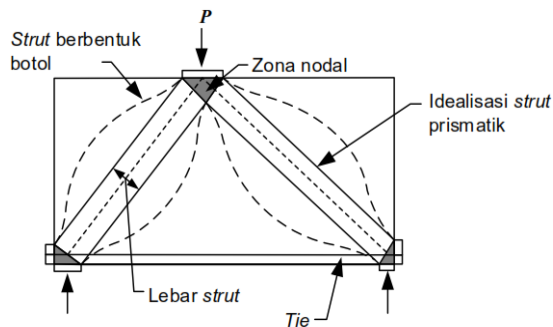
Gambar 2. Trajektori tegangan

Beberapa karakteristik penting dari trajektori tegangan adalah terdapat trajektori tekan dan trajektori tarik yang saling tegak lurus, pada komponen struktur yang dibebani terdapat suatu kelompok trajektori tekan dan kelompok trajektori tarik, trajektori tekan dan trajektori tarik berakhir pada sisi tepi dengan sudut 90° , di dalam titik-titik di garis netral arah trajektori-trajektori adalah 45° , lebih dekat jarak antara trajektori-trajektori lebih besar nilai tegangan utamanya, dan terakhir trajektori tegangan pada daerah B jauh lebih teratur (*smooth*), dibandingkan pada daerah D (*turbulent*).

Lim & Hwang (2016), telah menyusun dasar perancangan untuk FEM metode *strut and tie*. Perlu diperhatikan, tidak semua elemen struktur dapat dianalisa dengan STM. Praktiknya, *strut and tie* model lebih banyak dipakai pada daerah D, sedangkan pada daerah B yang lebih dikhususkan pada perancangan terhadap pengaruh geser dan torsi. Penerapan *strut and tie* dalam perancangan struktur diawali dengan penentuan daerah D dan B. Pada struktur yang sesungguhnya, daerah D dan B dapat terjadi bersamaan, oleh karena itu diperlukan pengenalan pembagian daerah-daerah pada struktur agar prosedur desain yang sesuai dapat diterapkan. Untuk desain pada daerah B digunakan teori *Bernoulli* dan pada daerah D digunakan metode *strut and tie*. Untuk dapat menentukan daerah D dengan jelas, perlu ditentukan terlebih

dulu garis batas antara daerah D dan daerah B. Konsep *Saint-Venant* dapat digunakan untuk tujuan ini. “*Strut and tie model*” berawal dari *truss analogy model*” yang pertama kali diperkenalkan oleh Ritter kemudian Mörsh. “*Truss analogy model*” ini menggambarkan aliran gaya (*load path*) yang terjadi pada beton bertulang yang mengalami pembebanan dimana ditandai dengan terbentuknya pola retak pada beton bertulang tersebut. Penggambaran rangka batang yang diusulkan oleh Mörsh terdiri dari rangka batang tekan dan tarik, sejajar dengan arah memanjang dari balok, batang tekan diagonal dengan sudut 45° dan batang tarik vertikal. Tulangan geser pada beton yang mengalami gaya lintang digambarkan sebagai batang tarik vertikal. Sedangkan beton yang mengalami beban tekan akan digambarkan sebagai batang tekan diagonal. (Hardjasaputra & Tumilar, 2002).

Ditinjau dari efektifitas penggunaan tulangan balok, Nasution (2014) membuktikan rata-rata nilai penulangan yang didapatkan dengan metode *strut and tie* lebih sedikit 15,93% dari penulangan konvensional. Munir *et al.* (2014) menyimpulkan metode *strut and tie model* akurat digunakan untuk desain penulangan balok tinggi (*deep beam*), baik analisa yang dilakukan secara manual maupun dengan menggunakan bantuan program CAST (*computer aided strut and tie*). Ilustrasi STM disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Deskripsi model strut and tie,
Partogi (2017)

Analisis yang didasarkan pada model *strut and tie* merupakan metode yang rasional dan akan memberikan penulangan yang efisien (Afrizal, 2011). Meskipun demikian, patut diperhatikan kelemahannya yang diakibatkan oleh kebebasan perencana dalam memilih model rangka, solusi yang baik dapat ditandai dengan keefektifan model dan terpenuhinya syarat-syarat batas. Kelemahan lain, metode STM menjadi tidak konservatif lagi bila mutu beton ditingkatkan $f'_c > 41$ MPa (Sudarsana, 2006), untuk balok tinggi beton bertulang tanpa adanya tulangan badan baik beton bermutu normal maupun beton mutu tinggi,

prediksi kuat geser metode STM secara umum tidak konservatif.

Penelitian lainnya menyebutkan semakin besar sudut model rangka yang dibentuk, maka semakin kecil gaya normal pada tension yang terjadi. Sehingga penentuan sudut rangka pengaruhnya sangat signifikan (Dwi *et al.*, 2011). Kemudian penelitian ini dipilih model rangka yang mengacu kepada hasil keluaran distribusi tegangan trajektori yang diolah menggunakan program analisis struktur SAP v.14. Kemudian ditentukan sudut trajektori yang efektif dalam penyusunannya.

Partogi (2017) telah menyajikan model balok tinggi dengan rasio l/h ketika diberikan beban merata dan pengaruhnya terhadap perancangan luas tulangan. Penelitian ini mencoba melengkapi perilaku model balok tinggi ketika diberi beban terpusat. Namun bukan untuk perancangan luas tulangan, tetapi fokus mengetahui korelasi antara rasio balok terhadap tegangan dan sudut trajektori ketika balok diberi beban terpusat.

Penelitian ini mencoba mengembangkan dan fokus kepada nilai korelasi antara rasio balok terhadap tegangan dan sudut trajektori. Mengacu kondisi penelitian sebelumnya oleh Partogi (2017), kali ini digunakan beberapa batasan kondisi untuk beban terpusat, $P = 2.000$ kN, bentang balok = 4 m, dan lebar balok bervariasi dengan nilai 0,6 m; 0,7 m; 0,8 m serta rasio l/h balok digunakan nilai 4; 2,67; 2; 1,60; 1,33.

Metode

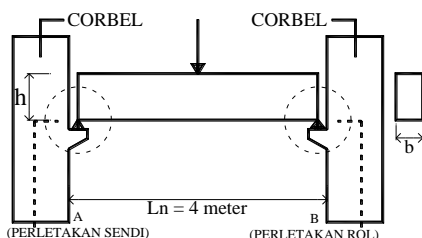
Wulansari (2007) menyarankan analisis dan desain struktur balok tinggi menggunakan metode *strut and tie* akan lebih mudah menggunakan program analisis struktur, terutama dalam mencari kontur tegangan dan gaya dalam. Dalam penelitian akan dianalisis model balok tinggi dengan parameter pengujian variasi tebal balok dan perbandingan l/h dengan metode STM. Bentang balok diambil sama yaitu 4,0 m, sedangkan lebar/tebal balok diambil variasi 0,6; 0,7; dan 0,8 m. Tinggi balok dibuat bervariasi satu hingga tiga meter dengan interval variasi 0,5 m. Detail model balok tinggi ditampilkan dalam Tabel 1 dan Gambar 4.

Untuk kemudahan perhitungan, beban rencana ditentukan dengan beban terpusat sebesar 2000 kN. Model elemen dan jenis pembebanan disajikan pada Gambar 4. Langkah analisisnya sebagai berikut. Pertama, melakukan pemodelan struktur elemen balok tinggi yang dimodelkan dalam elemen *plane stress* material homogen elasto plastis. Kedua, menginput beban pada struktur balok hasil pemodelan.

Tabel 1. Data dimensi penampang balok tinggi

Tipe pemodelan	Nama pemodelan	Panjang balok (m)	Tinggi balok (m)	l/h
Variasi balok 1 (b = 60 cm)	VB.01.a	4	1,0	4,00
	VB.01.b	4	1,5	2,67
	VB.01.c	4	2,0	2,00
	VB.01.d	4	2,5	1,60
	VB.01.e	4	3,0	1,33
Variasi balok 2 (b = 70 cm)	VB.02.a	4	1,0	4,00
	VB.02.b	4	1,5	2,67
	VB.02.c	4	2,0	2,00
	VB.02.d	4	2,5	1,60
	VB.02.e	4	3,0	1,33
Variasi balok 3 (b = 80 cm)	VB.03.a	4	1,0	4,00
	VB.03.b	4	1,5	2,67
	VB.03.c	4	2,0	2,00
	VB.03.d	4	2,5	1,60
	VB.03.e	4	3,0	1,33

Ketiga, pada penelitian sebelumnya balok tinggi diberi beban merata, pada penelitian kali ini beban yang dipikul adalah beban terpusat. Pemodelan FEM dilakukan dengan SAP v.14 untuk mendapatkan pola distribusi tegangan serta intensitasnya.



Gambar 4. Sketsa model pembebanan

Tegangan maksimum didapat dari *output* program. S11 (tegangan pada arah sumbu 1-1) yang mewakili tegangan tarik maksimum. S22 (tegangan pada arah sumbu 2-2) yang mewakili tegangan tekan maksimum, dan SVM (tegangan geser maksimum) yang mewakili bentuk rangka batang dari balok tinggi. Semua titik tinjauan tegangan berada di bawah beban terpusat. Gambar trajektori yang didapat menentukan model rangka batang balok yang diperlukan untuk penentuan sudut trajektori.

Langkah keempat, menggambar pemodelan *strut and tie* dalam bentuk rangka batang berdasarkan trajektori tegangan pada aplikasi *AutoCAD* 2013 digambar dengan garis *polyline* untuk menghubungkan titik tinjauan tegangan di bawah titik beban dengan tumpuan kanan-kiri balok tinggi. Selanjutnya kelima, mengukur sudut yang dibentuk batang *strut and tie* hasil dengan perintah *dimangular* yang sebelumnya sudah dibentuk dengan garis *polyline*, keenam, mengelompokkan nilai tegangan maksimum dari

opsi S11 tarik maks dan S22 tekan maks kemudian diplot ke dalam grafik. dan ketujuh, mendeskripsikan korelasi antara tegangan dan sudut trajektori dengan rasio l/h pada balok tinggi.

Hasil dan Pembahasan

Bentuk trajektori tegangan

Pemodelan ini sangat diperlukan untuk memperkirakan sudut trajektori batang yang akan dibuat secara manual sebagai langkah awal dalam membuat desain balok tinggi menggunakan metode *strut and tie*. Rekapitulasi hasil tegangan ditabulasikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi nilai tegangan

Tipe pemodelan	Nama pemodelan	Tarik maksimum (S11) N/mm ²	Tekan maksimum (S22) N/mm ²
Variasi balok 1 (b = 60 cm)	VB.01.a	-38,16	-49,21
	VB.01.b	-29,36	-49,18
	VB.01.c	-23,68	-47,98
	VB.01.d	-20,97	-46,60
	VB.01.e	-19,62	-46,31
Variasi balok 2 (b = 70 cm)	VB.02.a	-38,16	-49,21
	VB.02.b	-25,19	-44,21
	VB.02.c	-20,32	-41,50
	VB.02.d	-17,99	-40,39
	VB.02.e	-16,83	-40,22
Variasi balok 3 (b = 80 cm)	VB.03.a	-28,69	-37,25
	VB.03.b	-22,06	-37,00
	VB.03.c	-17,80	-36,64
	VB.03.d	-15,75	-35,74
	VB.03.e	-14,73	-35,66

Berdasarkan nilai tegangan dapat dilihat bahwa untuk balok tinggi dengan beban terpusat semakin kecil nilai rasio l/h, maka semakin kecil pula nilai tegangannya, baik itu tegangan tarik maksimum,

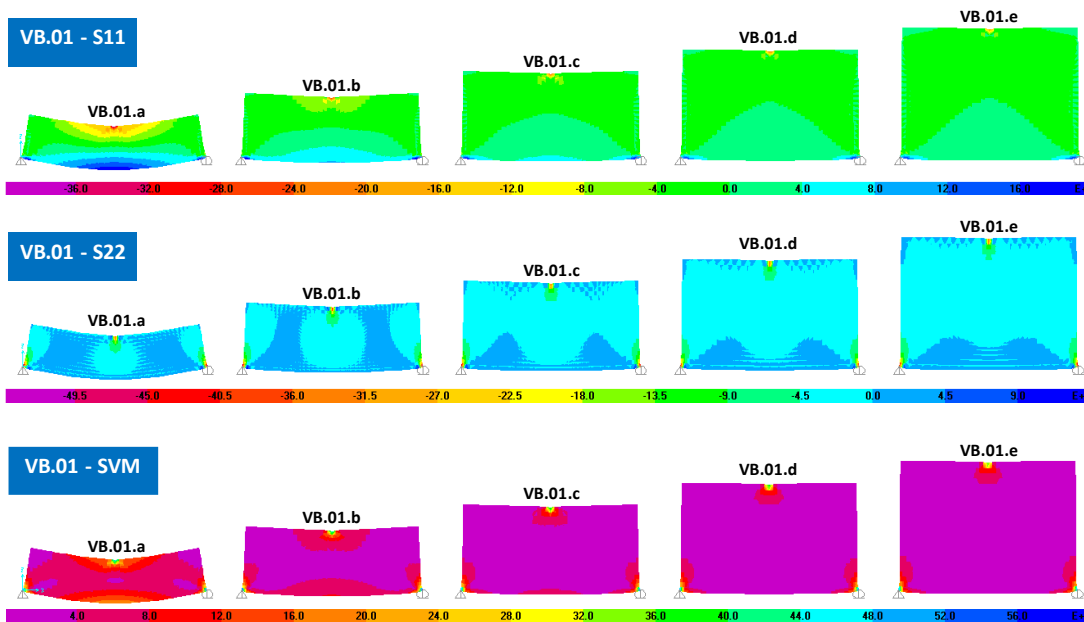
maupun tegangan tekan. Kemudian diketahui pula semakin bertambahnya lebar balok, semakin kecil tegangan tarik dan tekan maksimumnya. Dengan demikian, dimensi dari balok juga dapat mempengaruhi nilai tegangan trajektori dari balok itu sendiri. Bentuk tegangan untuk variasi balok yang ada diberikan pada Gambar 5, 6 dan 7.

Sudut antara batang *strut* dan *tie* yang dibentuk dari trajektori tegangan

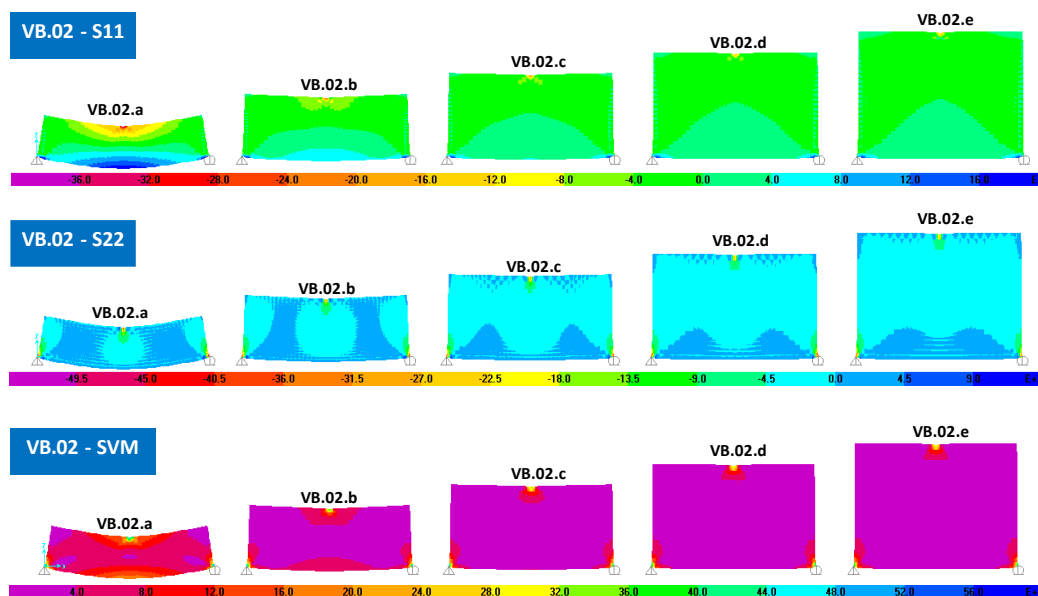
Sudut trajektori yang dibentuk menentukan pemodelan rangka batang yang dibutuhkan untuk pendesainan balok tinggi. Sudut ini ditentukan dari gambar trajektori yang didapatkan dari program.

Melihat kecenderungan batang *strut*, model *truss* dibagi menjadi dua yakni model *simplified truss* dan *refined truss*. Penelitian kali ini cenderung pada model *simplified truss* yang menggambarkan secara sederhana perilaku batang *strut* yang menyerupai pola model rangka batang.

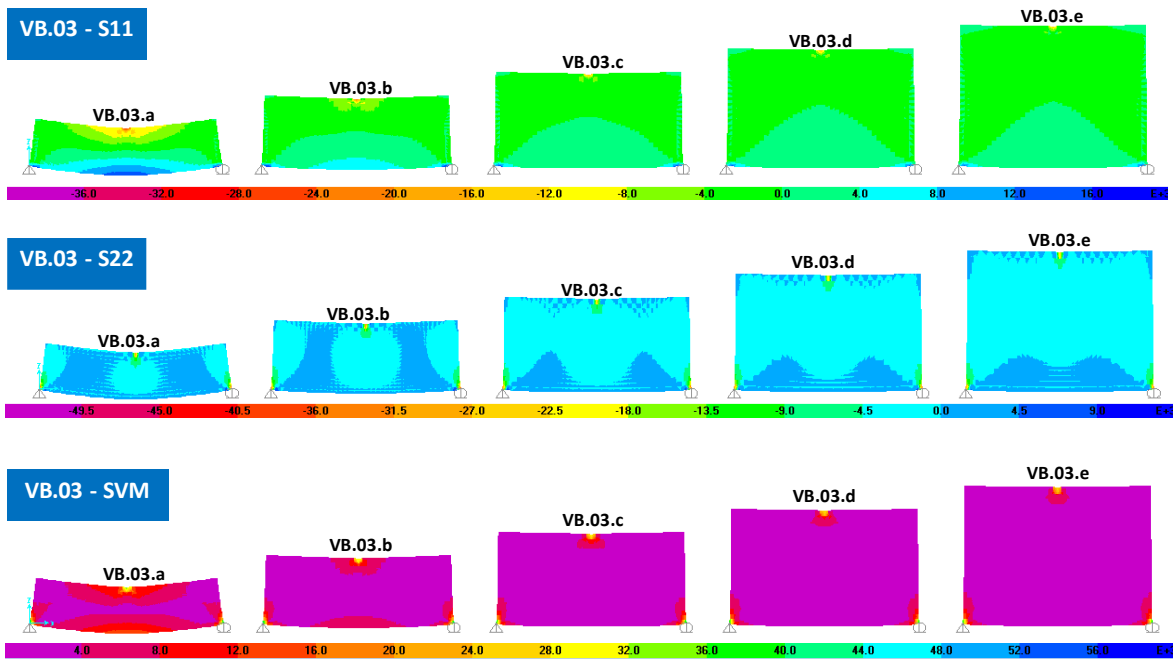
Bentuk model rangka untuk variasi balok diberikan pada Gambar 8, dan dapat diambil kesimpulan semakin kecil nilai rasio antara bentang dan tinggi balok, maka semakin besar sudut antara batang *strut* and *tie*. Kesimpulan kedua adalah semakin bertambahnya variasi lebar balok ternyata tidak berpengaruh signifikan terhadap sudut trajektori yang dihasilkan.



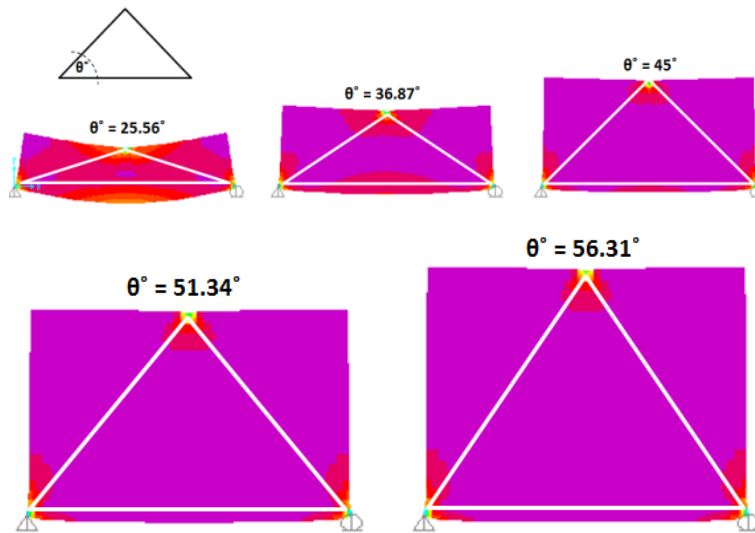
Gambar 5. Bentuk trajektori untuk variasi pemodelan balok 01 ($b = 60 \text{ cm}$) – dalam kN/m^2



Gambar 6. Bentuk trajektori untuk variasi pemodelan balok 02 ($b = 70 \text{ cm}$) – dalam kN/m^2



Gambar 7. Bentuk trajektori untuk variasi pemodelan balok 03 (b = 80 cm) – dalam kN/m²



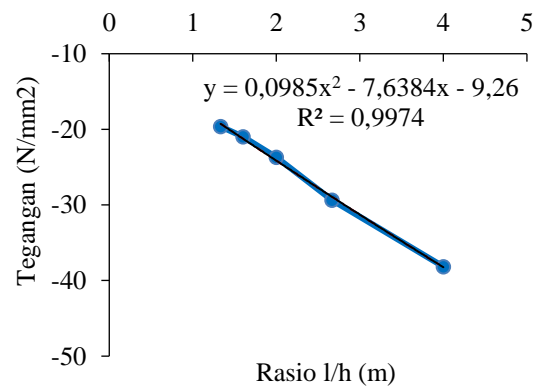
Gambar 8. Bentuk rangka untuk variasi pemodelan (balok 01, 02, dan 03)

Nilai korelasi tegangan terhadap rasio dimensi balok tinggi

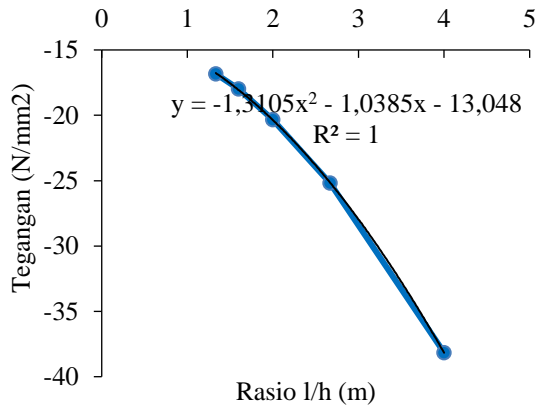
Kurva hubungan antara variasi balok 01 dengan tegangan S11 tarik maksimum disajikan pada Gambar 9 yang merupakan persamaan linier dengan koefisien korelasi $R^2 = 0,9974$ pada Persamaan 1.

$$S_{11\ tr.maks} = 0,0985x^2 - 7,6384x - 9,26 \quad (1)$$

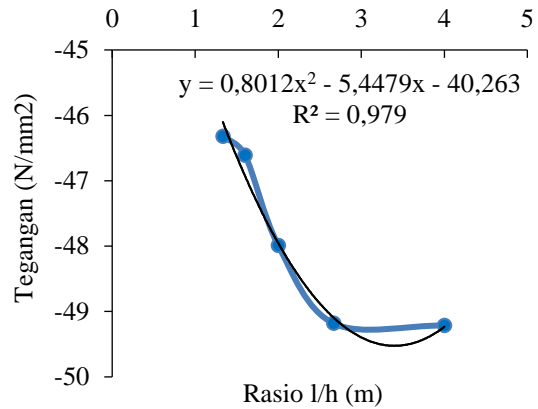
Kurva hubungan antara variasi balok 02 dengan tegangan S11 tarik maksimum disajikan pada Gambar 10 dan kurva hubungan antara variasi balok 03 dengan tegangan S11 tarik maksimum ditampilkan pada Gambar 11.



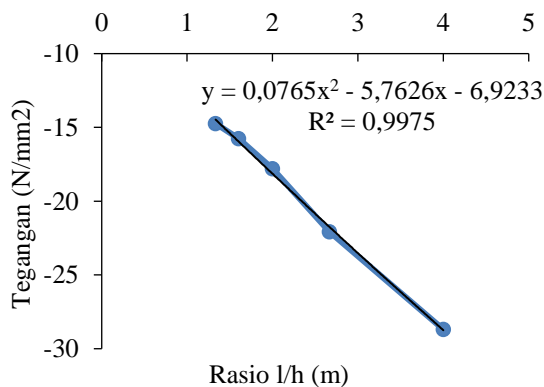
Gambar 9. Tegangan S11 tarik maks untuk variasi balok 01 (b = 60 cm)



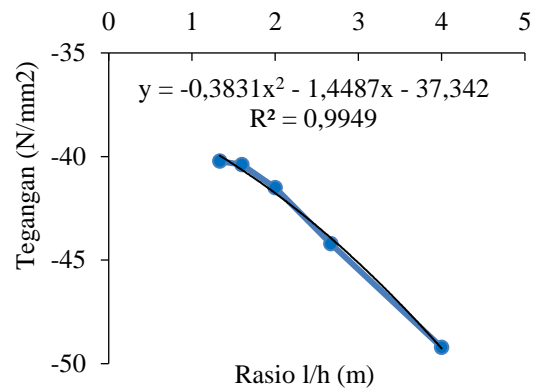
Gambar 10. Tegangan S11 tarik maks untuk variasi balok 02 (b = 70 cm)



Gambar 12. Tegangan S22 tekan maks untuk variasi balok 01 (b = 60 cm)



Gambar 11. Tegangan S11 tarik maks untuk variasi balok 03 (b = 80 cm)



Gambar 13. Tegangan S22 tekan maks untuk variasi balok 02 (b = 70 cm)

Persamaan linier yang didapat dari kurva hubungan antara variasi balok 02 dengan tegangan tersebut disajikan dalam Persamaan 2 dan mempunyai korelasi kuat dengan koefisien korelasi $R^2 = 1$. Sedangkan balok 03 ditunjukkan oleh Persamaan 3 dengan koefisien korelasi $R^2 = 0,9975$.

$$S_{11 \text{ tr,maks}} = -1,3105x^2 - 1,0385x - 13,04 \quad (2)$$

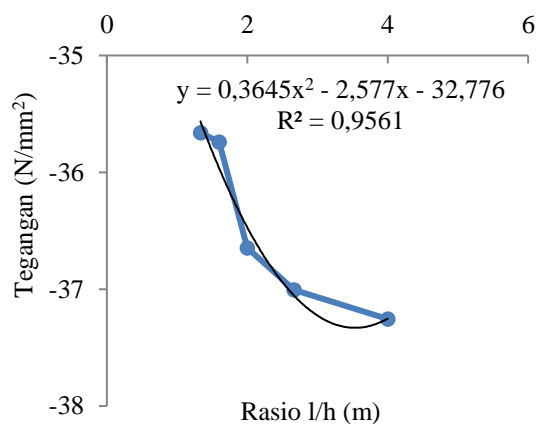
$$S_{11 \text{ tr,maks}} = 0,765x^2 - 5,7626x - 6,9233 \quad (3)$$

Perlu diingat, tegangan maksimum dari *output* nilai S11 dan S22 masing-masing mewakili tegangan tarik maks dan tegangan tekan maks. Kurva hubungan antara variasi balok 01 dengan tegangan S22 tekan maksimum, disajikan pada Gambar 12.

Sedangkan kurva hubungan antara variasi balok 02 dan balok 03 dengan tegangan S22 tekan maks, disajikan pada Gambar 13 dan 14.

Persamaan linier untuk kurva hubungan antara variasi balok 01 dengan tegangan S22 tekan maksimum disajikan pada Persamaan 4 dengan koefisien korelasi $R^2 = 0,979$.

$$S_{22 \text{ t.maks}} = -0,8012x^2 - 5,4479x - 40,26 \quad (4)$$



Gambar 14. Tegangan S22 tekan maks untuk variasi balok 03 (b = 80 cm)

Kemudian persamaan linier yang didapat dari kurva hubungan antara variasi balok 02 dengan tegangan S22 tekan maksimum disajikan pada Persamaan 5 dengan koefisien korelasi $R^2 = 0,9949$.

Sedangkan persamaan linier yang didapat dari kurva hubungan antara variasi balok 03 dengan tegangan S22 tekan maksimum disajikan pada

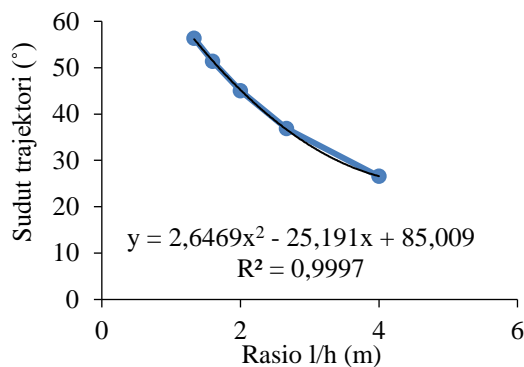
Persamaan 6 dengan koefisien korelasi $R^2 = 0,9561$.

$$S_{22 t.maks} = -0,3831x^2 - 1,4487x - 37,342 \quad (5)$$

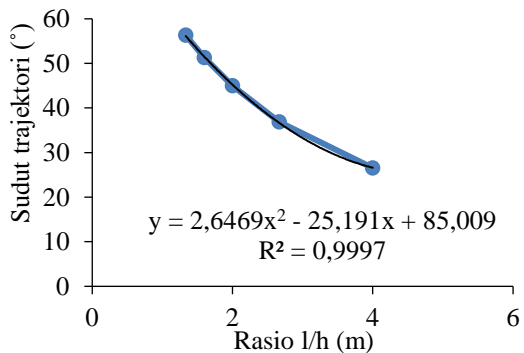
$$S_{22 t.maks} = 0,3645x^2 - 2,577x - 32,776 \quad (6)$$

Nilai korelasi sudut trajektori terhadap rasio dimensi balok tinggi

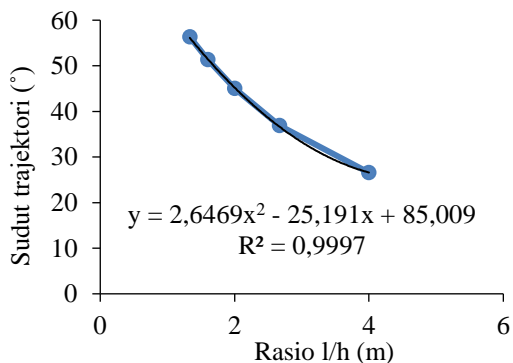
Kurva hubungan antara sudut trajektori terhadap rasio dimensi balok tinggi untuk variasi balok 01, 02 dan 03 yang tipikal ditampilkan pada Gambar 15, 16 dan 17.



Gambar 15. Kurva hubungan θ° terhadap l/h untuk variasi balok 01 (b = 60 cm)



Gambar 16. Kurva hubungan θ° terhadap l/h untuk variasi balok 02 (b = 70 cm)



Gambar 17. Kurva hubungan θ° terhadap l/h untuk variasi b alok 03 (b = 80 cm)

Dari kurva tersebut didapatkan persamaan linier dengan regresi 0.997 ditulis :

$$\text{sudut } \theta^\circ = 2,6469x^2 - 25,191x + 85,009 \quad (7)$$

Persamaan linier yang didapat dari kurva hubungan sudut trajektori terhadap rasio dimensi balok tinggi untuk variasi balok 02 dan 03 adalah sama dengan Persamaan 7. Variabel x merupakan pengganti notasi rasio bentang dibanding tinggi balok (l/h).

Kesimpulan

Pengaruh variasi lebar balok terhadap sudut trayektori menunjukkan semakin besar nilai rasio antara bentang dan tinggi balok, maka semakin kecil sudut antara batang *strut and tie*, dimana bertambahnya lebar balok tidak berpengaruh signifikan terhadap sudut trajektori yang dihasilkan.

Variasi lebar balok berpengaruh terhadap tegangan, dimana semakin bertambah lebar balok, semakin kecil tegangan tarik dan tekan maksimumnya. namun tidak dengan sudut trajektorinya. Rasio l/h pada balok tinggi mempengaruhi besarnya tegangan dan sudut trajektori, dimana semakin kecil rasio l/h akan semakin kecil pula tegangan dan semakin besar sudut trajektori yang dihasilkan. Dengan metode STM, jika sudut trajektori tegangan membentuk sudut 30° hingga 45° akan memberikan efek ekonomis dan desain yang efektif. Variasi balok dengan rasio l/h dengan nilai 2 – 2,7 merupakan desain balok yang sangat efektif

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik berkat bantuan dari berbagai pihak, untuk itu peneliti mengucapkan terima kasih kepada Universitas Diponegoro, khususnya Bapak/Ibu dosen, staf pengajar, dan teman-teman MTS angkatan 2019 atas ide serta saran yang membangun.

Daftar Pustaka

Afrizal, Y. (2011). Strut and tie model sebagai alternatif perancangan struktur beton bertulang. *FTUB*, 3(1), 1-7.

Badan Standarisasi Nasional Indonesia. (2019). *SNI 2847:2019 tentang persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. Jakarta: BSN.

Dwi, F.D., Septiropa, Z., & Rommel, E. (2011). Perencanaan ulang balok beton bertulang pada

gedung Rusunawa UMM dengan metode strut and tie. *Media Teknik Sipil*, 9(2), 125-131.

Hardjasaputra, H., & Tumilar, S. (2002). *Model penunjang dan pengikat (strut and tie model) pada perancangan struktur beton*. Tangerang: Universitas Pelita Harapan.

Lim, E., & Hwang, S.J. (2016). Modeling of the strut-and-tie parameters of deep beams for shear strength prediction. *Eng Struct* 2016, 108, 104-112.

Lodoviko, Oswaldo G. (2017). Studi Parametrik Balok Tinggi pada Elemen Beton Bertulang Menggunakan Trajektori Tegangan dari Metode Penunjang dan Pengikat (Strut and Tie). *Skripsi*, Indonesia: Universitas Nusa Cendana.

Munir, M., *et al.* (2014). Analisa balok tinggi beton bertulang dengan menggunakan metode strut and tie model. *Jom FTEKNIK*, 1(2), 10-25.

Nasution, P. (2014). Analisa dan Perencanaan Balok Tinggi dengan Variasi Perletakan Menggunakan Metode Strut and Tie. *Skripsi*, Indonesia: Universitas Sumatera Utara.

Partogi, H.S. (2017). Perancangan Balok Tinggi Beton Bertulang yang Memikul Beban Merata dengan Menggunakan Sap 2000, dipresentasikan pada *Seminar Nasional Teknik FST-UNDANA*.

Schlaich J., Schäfer K., & Jennewein M. (1987). Toward a consistent design of structural concrete. *PCI J*, 32(3), 74-150.

Setiawan, A. (2016). Perancangan struktur beton bertulang berdasarkan SNI 2847 : 2013. Jakarta: Erlangga.

Sudarsana, I.K. (2006). Prediksi kuat geser balok tinggi beton bertulang berdasarkan strut and tie model. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 10(1), 1-9.

Tjhin T.N., & Kuchma D.A. (2007). Integrated analysis and design tool for the strut-and-tie method. *Eng Struct* 2007, 29, 30-52.

Wulansari. (2007). Perancangan Struktur Balok Tinggi dengan Metode Strut and Tie. *Thesis*, Indonesia: Universitas Kristen Maranatha.

Zhang, T.K.H. (2007). Direct strut-and-tie model for single span and continuous deep beams. *Eng Struct* 2007, 29, 2987-3001.