

Studi Parametrik Balok Tinggi Beton Bertulang Dengan Bukaannya (Web Openings) Menggunakan Metode Strut and Tie

Parametric Study of Reinforced Concrete Deep Beams with Web Openings Using Strut and Tie Method

Fransiskus L. Kapitan¹, Remigildus Cornelis^{2*}, Sudiyo Utomo³

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 65145, Indonesia

² Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 65145, Indonesia

³ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 65145, Indonesia

Article info:

Kata kunci:

Balok tinggi, bukaan, Metode *Strut and Tie*

Keywords:

Deep beams, web openings, *Strut and Tie Methods*

Article history:

Received: 25-04-2022

Accepted: 20-05-2022

*Koresponden email:

1dyokapitan3@gmail.com

2remi_cor@yahoo.com

3diyotomo@gmail.com

Abstrak

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh bukaan (*web opening*) terhadap perilaku struktur, konfigurasi penulangan, dan perilaku mekanik pada balok tinggi menggunakan Metode *Strut-and-Tie*. Model balok tinggi yang digunakan berperletakan sederhana dengan panjang 6 m dan tinggi 2 m. Variasi pemodelan diterapkan pada posisi bukaan yaitu pada daerah geser dan daerah lentur. Hasil dari penelitian menunjukkan bukaan pada daerah geser menyebabkan peningkatan perilaku struktur yang cukup besar sehingga diperlukan tulangan tambahan pada setiap sisi bukaan. Pada balok tinggi beton bertulang yang didesain untuk menahan beban yang sama, bukaan pada daerah geser menyebabkan struktur balok tinggi beton bertulang semakin getas sedangkan bukaan pada daerah lentur menyebabkan struktur balok tinggi beton bertulang semakin daktail.

Abstract

The purpose of this study was to determine the effect of web opening on structural behavior, reinforcement configurations, and mechanical behavior of deep beams using the *Strut-and-Tie Method*. The deep beams model used is a simple supported with a length of 6 m and a height of 2 m. Modeling variations are applied to the opening position i.e. on the shear area and bending area. The results showed that the opening in the shear area causes a considerable increase in the behavior of the structure so that additional reinforcement is required on each side of the opening. In reinforced concrete deep beam designed to withstand the same load, openings in the shear area cause the reinforced concrete deep beam structure to be more brittle, while the openings in the bending area cause the reinforced concrete deep beam structure to be more ductile.

Kutipan: Diisi oleh Editor

1. Pendahuluan

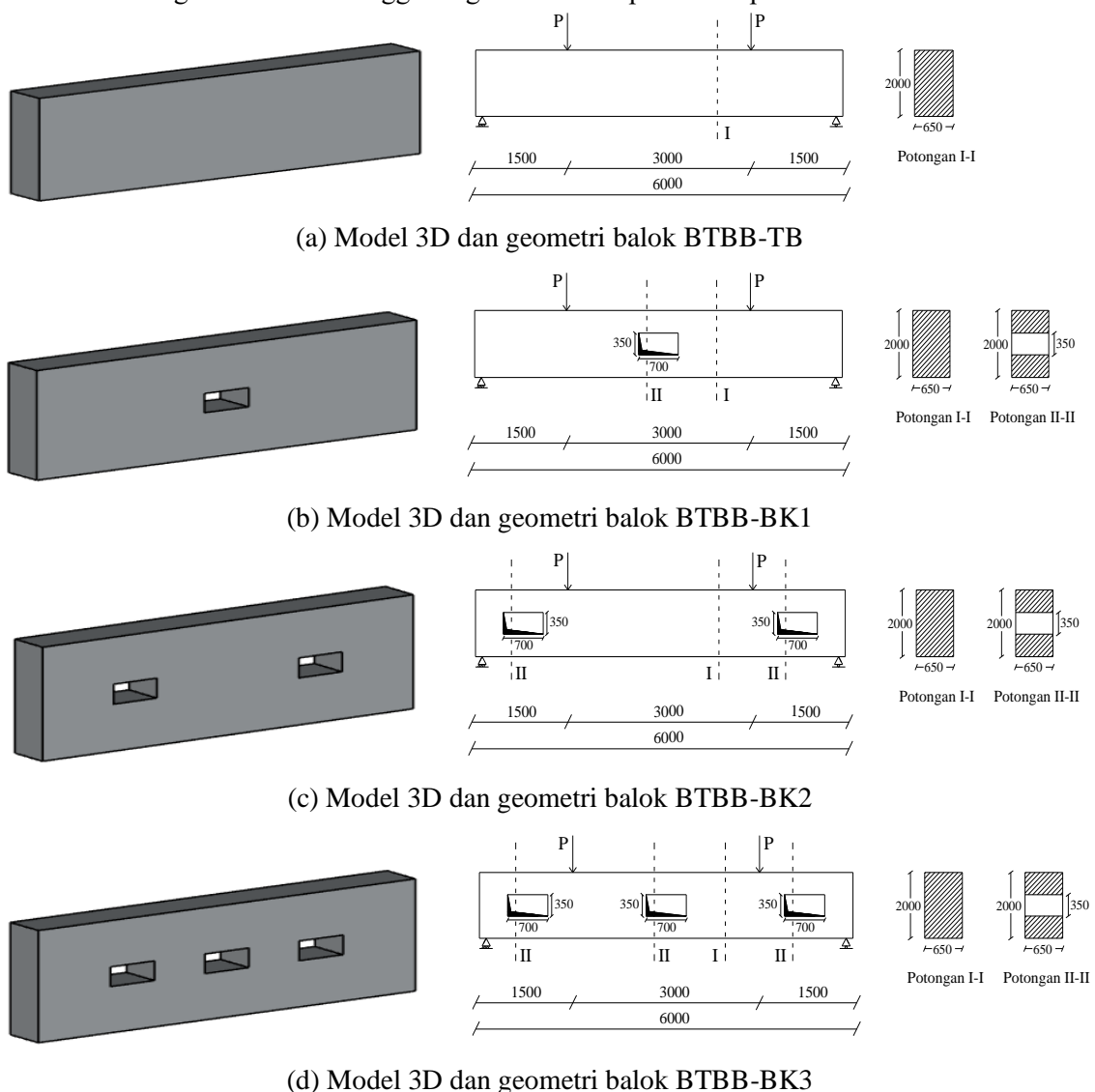
Balok tinggi didefinisikan sebagai komponen struktur dengan beban bekerja pada salah satu sisinya dan perletakan pada sisi lainnya sehingga *strut* tekan dapat terbentuk di antara beban dan perletakan (ACI 2002). Mekanisme transfer beban pada balok tinggi diteruskan ke tumpuan melalui dorongan tekan (*compression strut*) (MacGregor et al. 1997). Balok tinggi sering dijumpai pada dinding pondasi (*foundation wall*), dinding geser (*shear wall*), topi pancang (*pile cap*), balok transfer (*Transfer girder*) dari bangunan tinggi dan elemen struktur lainnya. Dalam beberapa kasus

dibutuhkan bukaan untuk keperluan utilitas dalam hal ini jaringan air bersih, pembuangan air kotor, instalasi AC sentral, jaringan listrik, dan lainnya. Bukaan pada balok tinggi dapat mempengaruhi kekuatan struktur dan perilaku mekanik, maka perlu dilakukan peninjauan desain terhadap struktur balok beton tersebut.

Balok tinggi beton bertulang dengan bukaan merupakan salah satu contoh daerah terganggu (D-Region) pada elemen struktur (S Juwana 2005). Seiring berkembangnya ilmu pengetahuan, beberapa metode dikembangkan untuk mendesain beton yang termasuk D-Region. Salah satunya Metode *Strut and Tie*. Dalam Metode *Strut and Tie*, aliran tegangan dapat digambarkan dengan bentuk seperti rangka batang dimana beton dapat menahan tekan dan tulangan baja menahan tarik. Dalam penelitian ini dilakukan study untuk mengetahui pengaruh bukaan (*web opening*) yang ditempatkan pada daerah geser dan daerah lentur terhadap perilaku struktur, konfigurasi penulangan, dan perilaku mekanik pada balok tinggi beton bertulang.

2. Bahan dan Metode

Model 3D dan geometri balok tinggi dengan bukaan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Model 3D dan geometri balok tinggi dengan variasi bukaan

Penelitian ini dimulai dengan menentukan data yang terdiri dari data material beton bertulang, data dimensi balok tinggi dengan bukaan, dan beban yang bekerja. Pembebanan pada balok tinggi

berupa beban terpusat dengan memperhatikan pengurangan beban akibat adanya bukaan. Data – data yang memperlihatkan variasi pemodelan balok tinggi dapat dilihat pada Tabel 1.

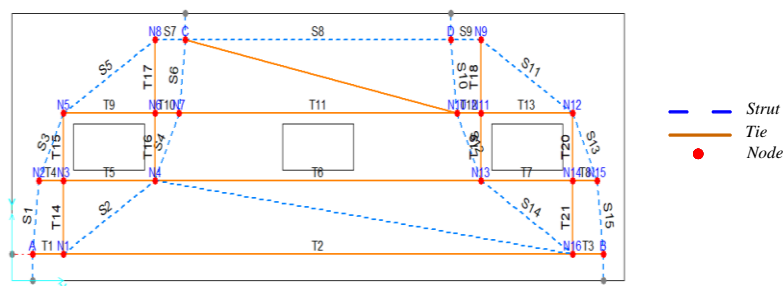
Tabel 1. Model balok tinggi dengan variasi bukaan

Tipe Pemodelan	Nama Pemodelan	Jumlah Bukaan	Ukuran 1 Bukaan (mm x mm)	Beban (P)	Panjang Balok (mm)	Tinggi Balok (mm)	Lebar Balok (mm)
Balok Tinggi Beton Bertulang	BTBB-TB	-	-	1000	6000	2000	650
	BTBB-BK1	1	700 x 350	998,09	6000	2000	650
	BTBB-BK2	2	700 x 350	996,18	6000	2000	650
	BTBB-BK3	3	700 x 350	994,27	6000	2000	650

Setiap model dianalisis secara numerik dengan *software* ForcePAD untuk memperoleh trajektori tegangan guna menentukan rangka batang sebagai Model *Strut and Tie*. Selanjutnya dilakukan analisis struktur dan desain tulangan balok tinggi menggunakan Metode *Strut and Tie* secara manual berdasarkan langka-langka pada yang dijelaskan oleh (Reineck 2002) dan diverifikasi dengan *software* CAST. Hasil penulangan balok tinggi ini kemudian dimodelkan secara numerik menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) dengan bantuan *software* VecTor2 untuk analisis lendutan, tegangan, dan regangan.

2.1. Metode *Strut and Tie*

“*Strut and Tie Model*” berasal dari “*Truss-analogy-model*” yang diperkenalkan pertama kali oleh Ritter pada tahun 1899 dan Morsch pada tahun 1902 (Hardjasaputra and Tumilar 2002). Elemen dari *Strut-and-Tie-Model* yaitu *strut*, *tie*, dan *node*. Model *Strut and Tie* dapat digambarkan dalam bentuk rangka batang yang mewakili trajektori tegangan utama. Pada struktur dua dimensi, analisis elemen hingga diperlukan untuk menentukan arah tegangan atas beban yang diberikan (Schlaich, Schäfer, dan Jennewein 1987). Dalam pengembangan Model *Strut and Tie*, terserah perancang untuk menggunakan metode jalur beban atau mengandalkan analisa linear elastis untuk melacak lintasan tegangan (El-Metwally dan Chen 2017). Gambar 2 menampilkan Model *Strut and Tie* yang dikembangkan pada struktur elemen balok tinggi dengan bukaan.



Gambar 2. Model *Strut and Tie* pada benda uji BTBB-BK3 menggunakan *software* CAST

2.1.1. Batang Tekan (*Strut*)

Elemen *strut* merupakan idealisasi dari medan tegangan tekan beton dimana arah dari *strut* searah dengan tegangan tekan beton. Berdasarkan (ACI 2002), kuat tekan nominal *strut* tanpa tulangan longitudinal harus diambil lebih kecil dari:

$$F_{ns} = f_{cu} \times A_c \tag{1}$$

$$F_{cu} = 0,85 \times \beta_s \times f_{c'} \tag{2}$$

$$A_c = b_w \times w_s \quad (3)$$

Dimana:

- F_{ns} : kekuatan nominal strut (kN)
- f_{cu} : kekuatan efektif (Mpa)
- A_c : Luasan daerah tekan (mm^2)
- β_s : faktor reduksi kekuatan tekan pada *strut*
- f'_c : mutu beton (Mpa)
- b_w : lebar balok (mm)
- w_s : lebar *strut* (mm)

2.1.2. Batang Tarik (Tie)

Berdasarkan (ACI 2002), gaya tarik dan kekuatan nominal dari batang *tie* dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\phi F_{nt} \geq F_{ut} \quad (4)$$

$$F_{nt} \geq A_{st} f_y + A_{ps} (f_{se} + \Delta f_p) \quad (5)$$

Dimana:

- ϕ : factor reduksi = 0,75
- F_{nt} : kekuatan nominal *tie* (KN)
- F_{ut} : gaya pada batang *tie* akibat pembebanan
- A_{st} : luasan tulangan (mm^2)
- A_{ps} : luasan baja tendon prategang (mm^2)
- f_y : mutu baja (Mpa)
- f_{se} : tegangan efektif yang hilang pada baja tandon prategang (Mpa)
- Δf_p : penambahan gaya prategang disamping level load ($f_{se} + \Delta f_p$)

2.1.3. Titik Simpul (Node)

Titik simpul/*node* merupakan titik tangkap dari *strut* dan *tie* dengan berbagai kombinasi yang diidealisasikan sebagai sendi. Berdasarkan (ACI 2002), kuat tekan dari zona nodal harus diambil sebagai berikut:

$$F_{nn} = f_{cu} \times A_n \quad (6)$$

$$F_{cu} = 0,85 \times \beta_n \times f'_c \quad (7)$$

$$A_n = b_w \times w_s \quad (8)$$

$$A_n = b_w \times w_t \quad (9)$$

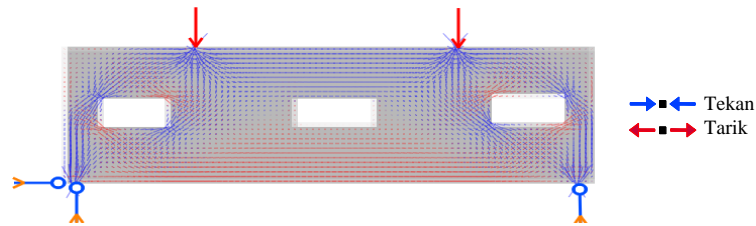
Dimana:

- F_{nn} : kekuatan nominal strut (kN)
- f_{cu} : kekuatan efektif (Mpa)
- A_n : Luasan daerah tekan (mm^2)
- β_n : faktor reduksi kekuatan tekan pada *strut*
- f'_c : mutu beton (Mpa)
- b_w : lebar balok (mm)
- w_s : lebar *strut* (mm)
- w_t : lebar *tie* (mm)

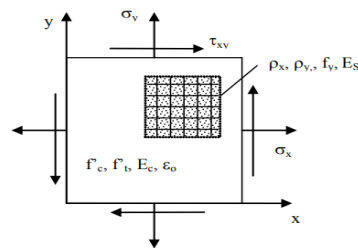
2.2. Metode Elemen Hingga (Finite Element Method)

Dalam penelitian ini, pemodelan benda uji secara numerik terdiri dari pemodelan trajektori tegangan menggunakan *software* ForcePad dan pemodelan *finite element* menggunakan *software* VecTor2 sebagai program berbasis *Finite Element*. Program VecTor2 didasarkan pada *Modified Compression Field Theory* (MCFT) yang merupakan model analitik untuk memprediksi respon beban-deformasi dari elemen membrane beton bertulang yang mengalami geser dan tegangan normal, menentukan regangan dan tegangan rata-rata beton dan tulangan, serta menentukan lebar dan orientasi retakan sepanjang respon beban-deformasi elemen (Wong, Vecchio, dan Trommels

2013). Model trajektori tegangan menggunakan *software* ForcePad, *plain stress* pada elemen beton bertulang dalam MCFT, dan model *finite element* menggunakan *software* VecTor2 pada benda uji secara berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 3 sampai Gambar 5.

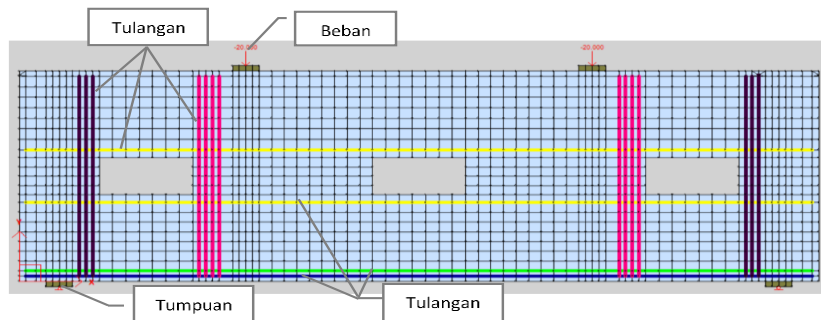


Gambar 3. Pemodelan trajektori tegangan menggunakan *software* ForcePad



Gambar 4. Membran elemen beton bertulang yang diberikan tegangan bidang (*plain stress*)

Pemodelan *finite element* untuk analisis tegangan, regangan, dan lendutan dilakukan terhadap benda uji yang telah dihitung penulangannya seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Pemodelan *finite element* benda uji BTBB-BK3 pada *software* VecTor2

3. Hasil dan Pembahasan

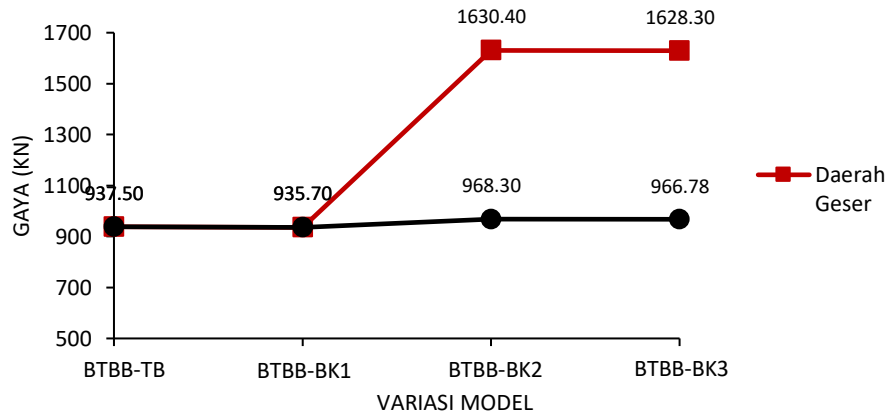
3.1. Pengaruh Bukaan (*Web Opening*) Terhadap Perilaku Struktur Balok Tinggi Beton Bertulang dengan Metode *Strut-And-Tie*

Hasil analisa perilaku struktur setiap model balok tinggi dengan variasi bukaan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil analisis perilaku struktur balok tinggi dengan variasi bukaan

Variasi Model	Daerah Geser		Daerah Lentur	
	Strut (kN)	Tie (kN)	Strut (kN)	Tie (kN)
BTBB-TB	-937.50	937.50	-937.50	937.50
BTBB-BK1	-935.70	935.70	-935.70	935.70
BTBB-BK2	-1630.40	1630.40	-968.30	968.30
BTBB-BK3	-1628.30	1628.30	-966.78	966.78

Grafik perilaku struktur balok tinggi dengan variasi bukaan dapat dilihat pada Gambar 6.

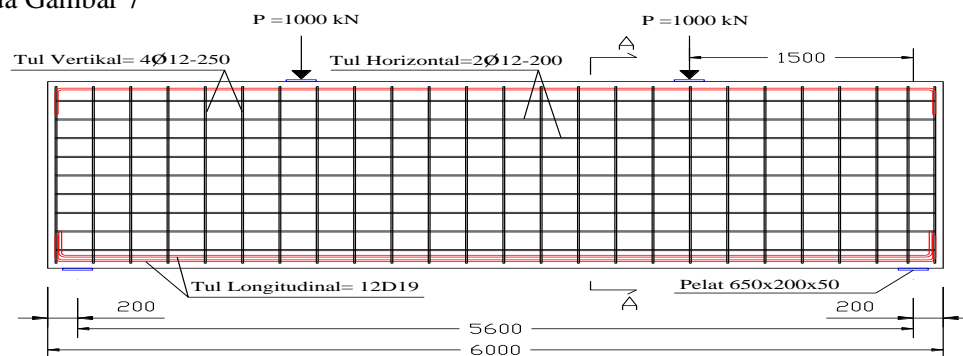


Gambar 6. Grafik perilaku struktur balok tinggi dengan variasi bukaan

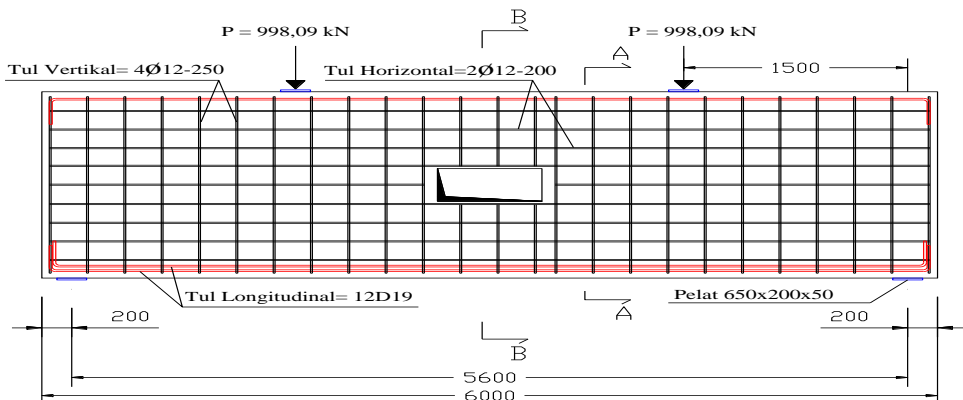
Gambar 6 menunjukkan peningkatan perilaku struktur yang cukup besar (73,80 %) pada daerah geser dan relative kecil (3,20 %) pada daerah lentur manakala bukaan ditempatkan di daerah geser (BTBB-BK2 dan BTBB-BK3). Sementara itu akibat bukaan pada daerah lentur (BTBB-BK1), terjadi penurunan perilaku struktur pada daerah geser maupun lentur yang tidak begitu signifikan (0,19 %). Hal ini menandakan bahwa, daerah geser merupakan daerah jalur beban sehingga ketika terdapat bukaan padanya maka akan menimbulkan peningkatan perilaku struktur yang berarti dibandingkan bukaan pada daerah lentur.

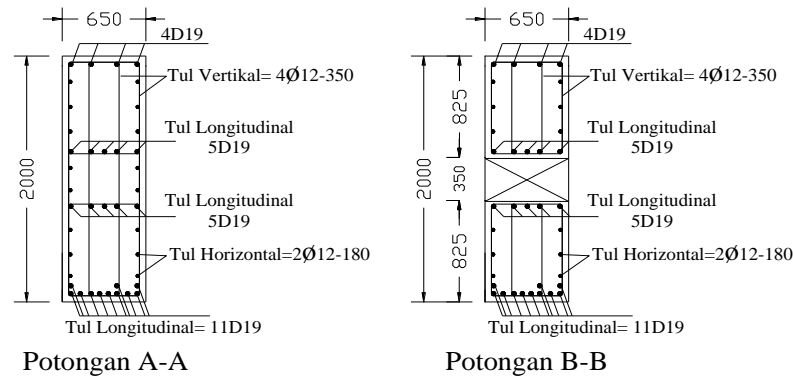
3.2. Pengaruh Bukaan (Web Opening) Terhadap Konfigurasi Tulangan Pada Balok Tinggi Beton Bertulang

Hasil analisa konfigurasi penulangan setiap model balok tinggi dengan variasi bukaan dapat dilihat pada Gambar 7



(a) Balok tinggi model BTBB-TB



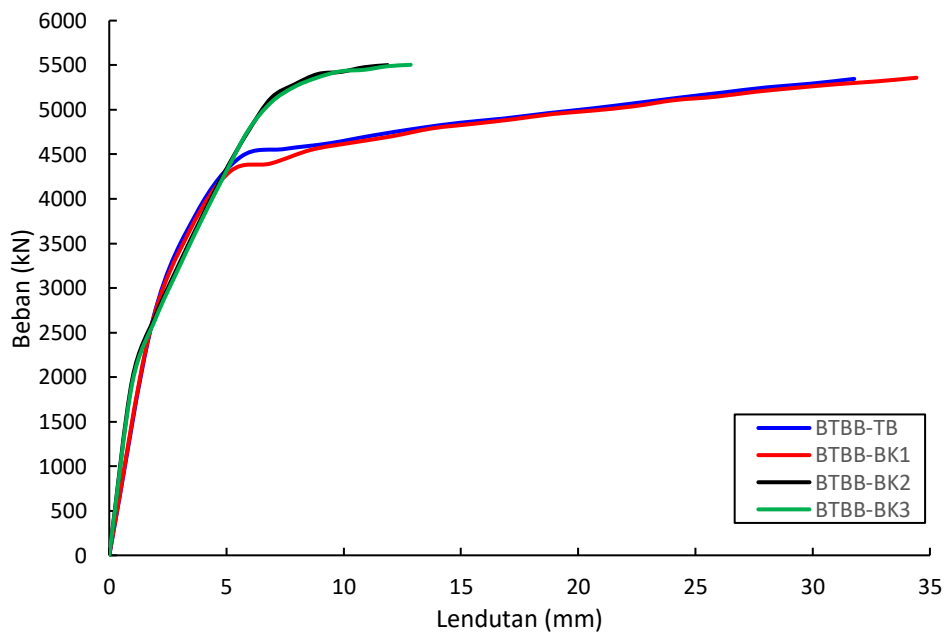


Gambar 8. Detail penulangan balok tinggi model BTBB-TB dan model BTBB-BK1 (Satuan panjang dalam mm)

Pada dasarnya konfigurasi penulangan balok tinggi mengikuti model *Strut and Tie* yang diasumsikan dari trajektori tegangan. Dimana tulangan longitudinal mewakili batang *tie* dan tulangan sengkang vertikal dan horizontal mewakili tulangan minimum pengontrol retak. Untuk pengaruh bukaan terhadap konfigurasi penulangan pada balok tinggi, hasil analisa yang diperoleh yaitu pada setiap model balok tinggi diperlukan tulangan tarik dan tulangan minimum namun untuk model BTBB-BK2 dan BTBB-BK3 diperlukan tambahan tulangan vertikal dan horizontal pada setiap sisi bukaan. Hal ini juga dilakukan untuk mencegah terjadinya retak geser pada daerah sekitar bukaan seperti yang dijelaskan oleh (Kong 1991).

3.3. Pengaruh Bukaan (*Web Opening*) Terhadap Perilaku Mekanik Pada Balok Tinggi Beton Bertulang

3.3.1. Hubungan Beban-Lendutan pada Balok Tinggi Dengan Variasi Bukaan



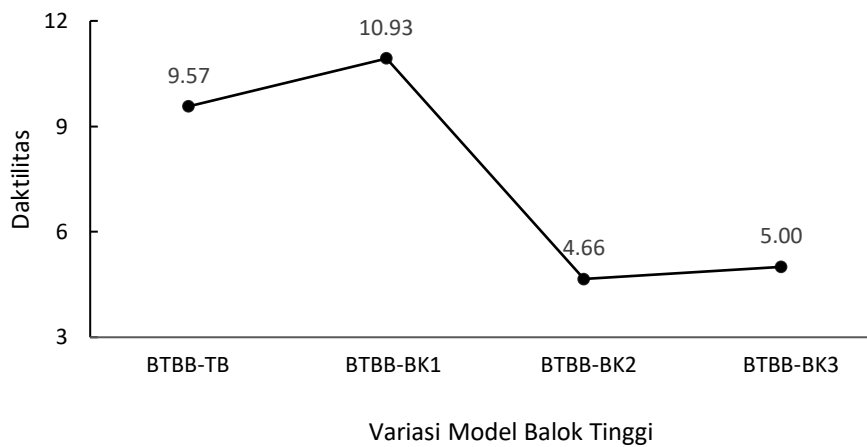
Gambar 9. Grafik hubungan beban-lendutan pada balok tinggi dengan variasi bukaan

Gambar 9 menunjukkan hubungan beban-lendutan pada balok tinggi dengan variasi bukaan. Dari hubungan beban-lendutan dapat diperhitungkan nilai beban runtuh dan nilai daktilitas seperti pada Tabel 3 berikut.

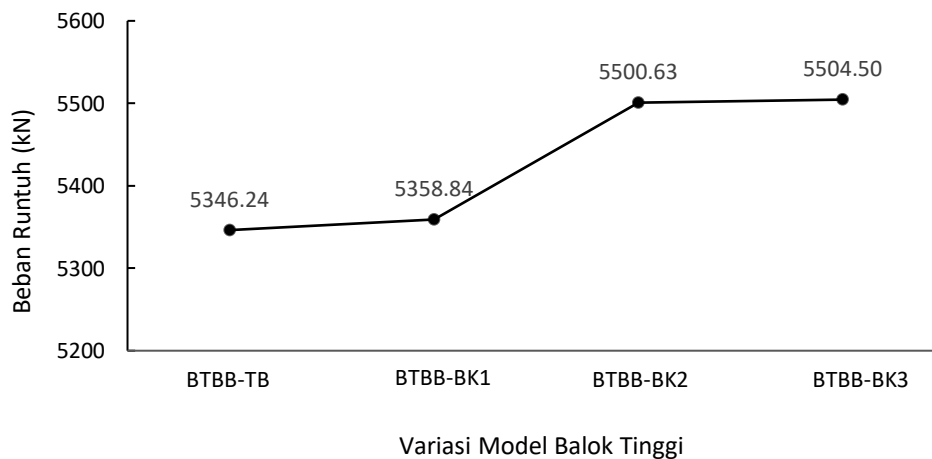
Tabel 3. Nilai daktilitas dan beban runtuh pada balok tinggi dengan variasi bukaan

Variasi Model	Jumlah Bukaan	Daktilitas	Beban Runtuh (kN)
BTBB-TB	-	9,57	5346,24
BTBB-BK1	1 Bukaan	10,93	5358,84
BTBB-BK2	2 Bukaan	4,66	5500,63
BTBB-BK3	3 Bukaan	5,00	5504,50

Grafik hubungan variasi bukaan pada balok tinggi terhadap nilai daktilitas dan beban runtuh dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10. Grafik hubungan variasi bukaan pada balok tinggi terhadap nilai daktilitas

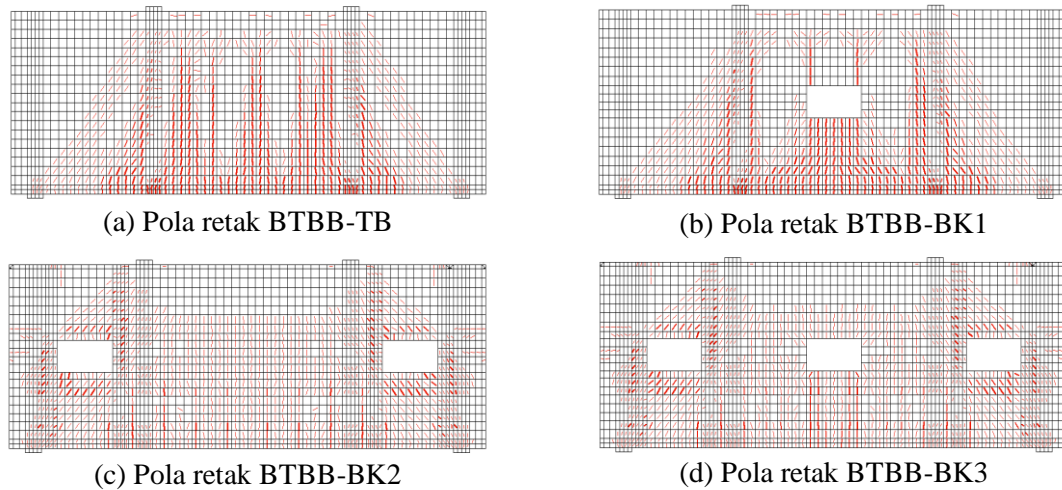


Gambar 11. Grafik hubungan variasi bukaan pada balok tinggi terhadap nilai beban runtuh

Hasil analisa yang diperoleh yaitu, ketika terdapat bukaan di daerah geser (BTBB-BK2 dan BTBB-BK3) terjadi penurunan nilai daktilitas sebesar 49,51 %. Sedangkan ketika terdapat bukaan di daerah lentur (BTBB-BK1), terjadi peningkatan nilai daktilitas sebesar 14,22 %. Sehingga dapat dikatakan bahwa bukaan pada daerah geser menyebabkan struktur balok tinggi semakin getas sedangkan bukaan pada tengah lentur menyebabkan struktur balok tinggi semakin daktil. Sementara itu untuk nilai beban runtuh ketika terdapat bukaan di daerah lentur (BTBB-BK1), terjadi peningkatan nilai beban runtuh sebesar 0,24%. Sedangkan ketika terdapat bukaan di daerah geser

(BTBB-BK2 dan BTBB-BK3) terjadi peningkatan nilai beban runtuh sebesar 2,93 %. Peningkatan nilai beban runtuh ini terjadi akibat adanya pengurangan beban pada balok tinggi dan luas tulangan terpasang yang lebih besar. Sehingga dapat dikatakan bahwa semakin banyak jumlah bukaan pada balok tinggi maka semakin meningkat pula nilai beban runtuh dengan konfigurasi penulangan yang lebih besar.

3.3.2. Pola Retak pada Balok Tinggi Dengan Variasi Bukaan

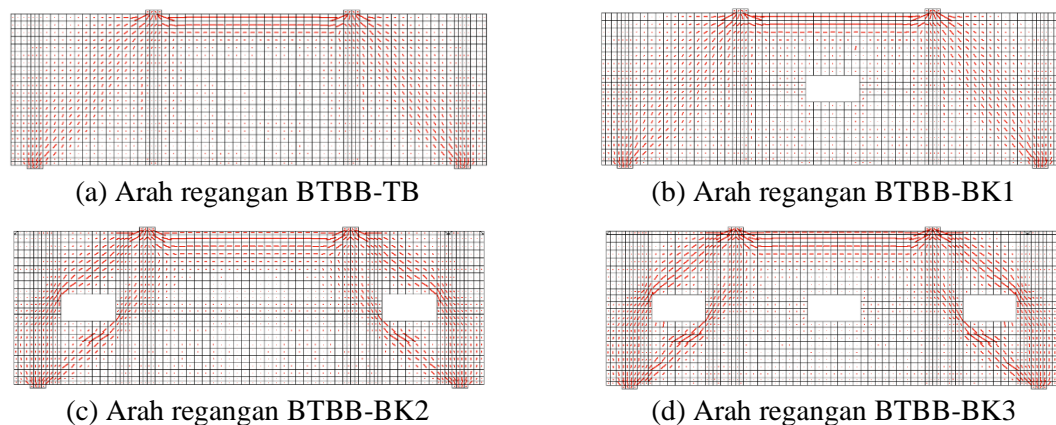


Gambar 12. Pola retak balok tinggi dengan variasi bukaan

Gambar 12 menampilkan pola retak dari setiap variasi balok tinggi ketika mencapai beban runtuh. Pada balok tinggi BTBB-TB dan BTBB-BK1, awalnya hanya terlihat retak lentur yang terjadi pada tengah bentang, tetapi ketika terjadi peningkatan beban terjadi pula retak geser sebagai retak ultimit pada daerah antara titik pembebanan dan tumpuan. Sedangkan untuk balok tinggi BTBB-BK2 dan BTBB-BK3, retak lentur pada tengah bentang dan retak geser pada sudut bukaan terjadi bersamaan. Sehingga dapat dikatakan balok tinggi beton bertulang dengan bukaan pada daerah geser dapat mempercepat terjadinya keruntuhan geser atau menyebabkan struktur balok tinggi semakin getas.

3.3.3. Distribusi Tegangan dan Regangan pada Balok Tinggi Dengan Variasi Bukaan

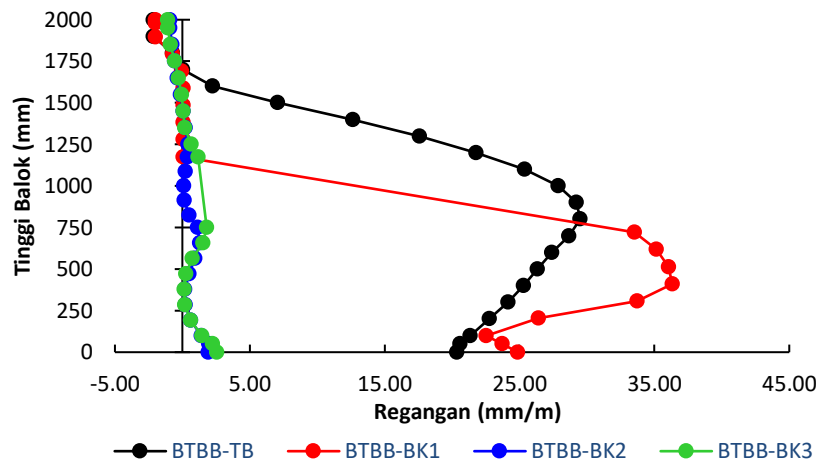
1. Arah Regangan



Gambar 13. Arah regangan balok tinggi dengan variasi bukaan

Gambar13 memperlihatkan arah regangan dari setiap variasi model balok tinggi yang menggambarkan eksistensi batang *strut*. Dari Gambar 13(a) dan 13(b), antara titik pembebanan dan tumpuan arah regangan yang terjadi membentuk *strut* seperti *bottle shape* sedangkan antara 2 titik pembeban arah regangan yang terjadi membentuk *strut* seperti *prismatic shape*. Sementara itu, dari Gambar 13(c) dan 13(d), arah regangan yang terjadi di daerah sekitar bukaan membentuk *strut* seperti *bottle shape* sedangkan antara 2 titik pembeban arah regangan yang terjadi membentuk *strut* seperti *prismatic shape*. Arah regangan ini sesuai dengan asumsi model *Strut and Tie* yang telah dilakukan sebelumnya.

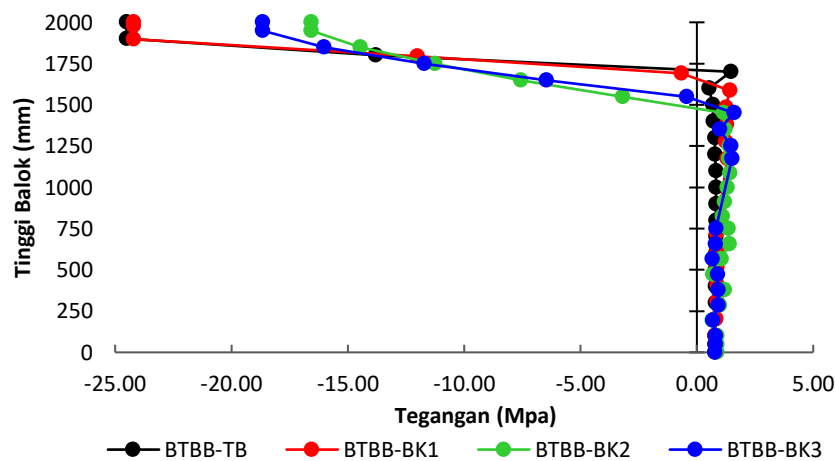
2. Regangan Lentur



Gambar 14. Grafik distribusi regangan lentur balok tinggi dengan variasi bukaan saat mencapai beban runtuh

Gambar 14 memperlihatkan grafik distribusi regangan lentur pada tengah bentang dari setiap variasi model balok tinggi saat mencapai beban runtuh. Dari grafik ini terlihat regangan lentur pada keempat model balok tinggi terdistribusi secara nonlinier yang mana sesuai dengan perilaku balok tinggi.

3. Tegangan Lentur



Gambar 15. Grafik distribusi tegangan lentur balok tinggi dengan variasi bukaan saat mencapai beban runtuh

Gambar 15 memperlihatkan grafik distribusi tegangan lentur pada tengah bentang dari setiap variasi model balok tinggi saat mencapai beban runtuh. Dari grafik ini terlihat tegangan lentur pada

keempat model balok tinggi terdistribusi secara nonlinier yang mana sesuai dengan perilaku balok tinggi yang dijelaskan oleh (Nawy, Surjaman, dan Suryoatmono 1990). Tegangan tekan meningkat dengan cepat pada sisi atas balok tinggi dan sumbu netral berpindah mendekati sisi atas balok tinggi. Sedangkan tegangan tarik relative konstan dari dasar sampai pada sumbu netral balok tinggi yaitu sebesar 2 MPa.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan dalam penelitian ini dapat disimpulkan bahwa Dengan Metode *Strut and Tie*, untuk balok tinggi dengan bukaan di daerah geser terjadi peningkatan perilaku struktur. Peningkatan perilaku struktur pada daerah geser lebih besar dibandingkan peningkatan perilaku struktur pada daerah lentur. Sedangkan untuk balok tinggi dengan bukaan di daerah lentur terjadi penurunan perilaku struktur yang relative kecil pada daerah geser dan lentur. Untuk setiap model balok tinggi diperlukan tulangan tarik dan tulangan minimum. Namun untuk balok tinggi dengan bukaan di daerah geser diperlukan tambahan tulangan vertikal dan horizontal pada setiap sisi bukaan. Pada balok tinggi beton bertulang yang didesain untuk menahan beban yang sama, bukaan pada daerah geser menyebabkan struktur balok tinggi beton bertulang semakin getas sedangkan bukaan pada daerah lentur menyebabkan struktur balok tinggi beton bertulang semakin daktail.

5. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang ada penulis dapat memberikan saran antara lain Memperhatikan pemodelan struktur, satuan, pembebanan, dan penginputan data material pada *software* untuk menghindari kesalahan analisis. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai Metode *Strut And Tie* pada balok tinggi dengan bentuk bukaan selain persegi dan variasi pembebanan selain beban terpusat agar pengetahuan *Strut And Tie* semakin berkembang.

Daftar Pustaka

- ACI, Committee318. 2002. "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI318-02)." In *American Concrete Institute*.
- El-Metwally, Salah El-Din E, and Wai-Fah Chen. 2017. *Structural Concrete: Strut-and-Tie Models for Unified Design*. CRC Press.
- Hardjasaputra, Harianto, and Steffi Tumilar. 2002. Universitas Pelita Harapan, Jakarta *Model Penunjang Dan Pengikat (Strut-And-Tie Model) Pada Perancangan Struktur Beton*.
- Kong, Fung Kew. 1991. *Reinforced Concrete Deep Beams*. CRC Press.
- MacGregor, James Grierson, James K Wight, Susanto Teng, and Paulus Irawan. 1997. *3 Reinforced Concrete: Mechanics and Design*. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Nawy, Edward G, Tjun Surjaman, and Bambang Suryoatmono. 1990. *Beton Bertulang: Suatu Pendekatan Dasar*. PT. Eresco, Bandung.
- Reineck, Karl-Heinz. 2002. *208 Examples for the Design of Structural Concrete with Strut-and-Tie Models*. Amer Concrete Inst.
- S Juwana, Ir Jimmy. 2005. *Panduan Sistem Bangunan Tinggi Untuk Arsitek Dan Praktisi Bangunan*. Erlangga.
- Schlaich, Jorg, Kurt Schäfer, and Mattias Jennewein. 1987. "Toward a Consistent Design of Structural Concrete." *PCI journal* 32(3): 74–150.
- Wong, P S, F J Vecchio, and H Trommels. 2013. "Vector2 & Formworks User's Manual Second Edition." *University of Toronto, Canada*.