

ANALISIS MOMEN TULANGAN SISTEM RANGKA TERHADAP KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG

Pieter Lourens Frans

Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Ambon

[pflourens@gmail.com](mailto:pflourens@gmail.com)

ABSTRACT

The bar used for concrete beams is generally in the form of shear or stirrups mounted perpendicular to the beam axis. The idea underlying this editorial problem arises from the writer's observation of the use of reinforced concrete beams by changing the configuration of vertical shear reinforcement to less sloping reinforcement which would be less relevant to the theory of its use. This study aims to analyze the bending moment capacity of the reinforcing beams of the skeletal system and produce a theoretical equation of bending moment of the reinforcement of the skeletal system. This study is a laboratory experimental study with twelve specimens consisting of three normal beams (BN) as control variable beams and nine frame reinforcement beams (BTR) as independent variables. Data were analyzed using the strength design method. The results showed that the use of the reinforcement of the frame system increases the strength of the beam when it reaches the ultimate load on the flexural capacity with the retaining moment of the MPF frame on the BTR25 beam by 10.23%, the BTR50 beam by 7.47% and the BTR75 beam by 4.60% of the beam BN and equation  $M_{PF} = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + (f_{yd} A_d \sin \theta + f_y A_s') \frac{1}{16} \frac{h \tan \theta}{(1 + s \sin^2 \theta)} (d - d')$  can be used for practical calculations of the magnitude of the retaining beam frame system (BTR).

ABSTRAK

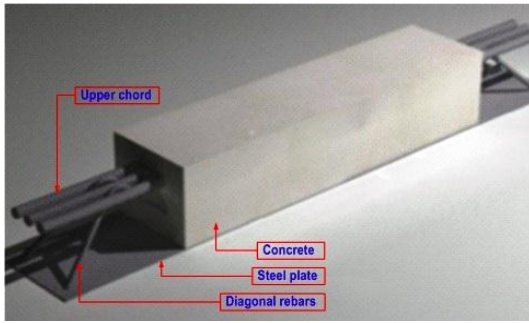
Tulangan yang digunakan untuk balok beton pada saat ini umumnya berupa tulangan geser atau sengkang dipasang secara tegak lurus terhadap sumbu balok. Gagasan yang melatari tajuk permasalahan ini timbul dari hasil pengamatan penulis terhadap penggunaan tulangan sistem rangka balok beton bertulang dengan mengubah konfigurasi tulangan geser vertikal menjadi tulangan miring yang kurang akan teori terkait penggunaannya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas momen lentur balok beton tulangan sistem rangka dan menghasilkan persamaan teoritis momen lentur penahan tulangan sistem rangka. Penelitian ini merupakan penelitian ekeperimental laboratorium dengan rancangan benda uji sebanyak dua belas benda uji yang terdiri dari tiga balok normal (BN) sebagai balok variabel kontrol dan sembilan balok tulangan sistem rangka (BTR) sebagai variabel bebas. Data dianalisis dengan menggunakan metode kekuatan (*strength design method*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan tulangan sistem rangka meningkatkan kekuatan balok pada saat mencapai beban ultimit terhadap kapasitas lentur dengan momen penahan rangka  $M_{PF}$  pada balok BTR25 sebesar 10,23%, balok BTR50 sebesar 7,47% dan balok BTR75 sebesar 4,60% dari balok BN dan persamaan  $M_{PF} = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + (f_{yd} A_d \sin \theta + f_y A_s') \frac{1}{16} \frac{h \tan \theta}{(1 + s \sin^2 \theta)} (d - d')$  dapat digunakan untuk perhitungan praktis besarnya momen penahan balok tulangan sistem rangka (BTR).

**Kata kunci** : kapasitas momen; balok tulangan sistem rangka

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, berbagai metode dikembangkan untuk meningkatkan kekuatan lentur balok beton bertulang. Semua metode ini difokuskan pada peningkatan kekuatan lentur balok beton dengan mengubah geometri sistem tulangan atau dengan memperkenalkan alat bantu tambahan di daerah lentur balok. Oleh karena itu, metode tersebut menghasilkan peningkatan biaya dan waktu, serta upaya tambahan. Jika sistem penguat di dalam balok beton itu sendiri dapat memberikan kekuatan lentur yang lebih baik tanpa mengubah geometri tulangan atau dengan menggunakan alat bantu tambahan di daerah terjadi lentur, maka akan ekonomis dan juga nyaman untuk mengatasi metode konvensional. Banyak peneliti

terdahulu merekomendasikan penggunaan tulangan sistem rangka pada balok beton menunjukkan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan sistem batang vertikal (Saju, S. M et al., 2016), (Rudy Djameluddin et al., 2014). Baru-baru ini di industri konstruksi, balok komposit beton khusus yang disebut dengan *Hybrid Steel Trussed Concrete Beams* (HSTCBs) diperkenalkan, di mana tuas rangka prefabrikasi tertanam di dalam beton (Trentadue, F et al., 2014). HSTCB direncanakan guna mewakili tipologi struktural balok komposit yang biasanya digunakan sebagai solusi pelaksanaan struktural yang efisien untuk industrialisasi ringan dan dibentuk oleh tulangan rangka baja prefabrikasi yang disematkan pada penampang balok.



sumber : Campinone, G et al., 2016

**Gambar 1. Hybrid Steel Trussed Concrete Beams**

Gambar 1, diperlihatkan penampang HSTCB dengan struktur rangka biasanya dibuat dengan atau tanpa pelat baja atau pelat beton pracetak, yang merupakan akord dasar. Daya dukung muatan HSTCB ditemukan lebih besar dari pada balok RC konvensional (Campinone, G et al., 2016), (Leopoldo Tesser et al., 2013).

Dalam hal ini, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas momen lentur balok beton tulangan sistem rangka dan menghasilkan persamaan teoritis momen lentur penahan tulangan sistem rangka. Selama pengujian, beban yang diterapkan, regangan pada daerah tekan beton, baja tarik pada rentang pertengahan, dan defleksi pada rentang pertengahan diukur sampai dengan kegagalan. Respon balok diperiksa dan didiskusikan dalam bentuk defleksi, regangan, kapasitas beban, pola retak dan mode kegagalan.

**2. TINJAUAN PUSTAKA**

**2.1. Perilaku Lentur**

Lentur pada balok merupakan akibat adanya regangan yang timbul karena adanya beban luar. Apabila bebanya bertambah, maka pada balok terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan timbulnya atau bertambahnya retak lentur di sepanjang bentang balok. Asumsi-asumsi dasar regangan, tegangan dan gaya-gaya dalam pada analisis kapasitas lentur (*strength design method*) berdasar pada kondisi penampang seimbang, yang diberikan oleh *Whitney*, dapat dihitung gaya tekan C pada beton dan gaya tarik T pada tulangan :

$$C = T \dots\dots\dots (1)$$

$$M_n = T (d - \frac{1}{2} a) \dots\dots\dots (2)$$

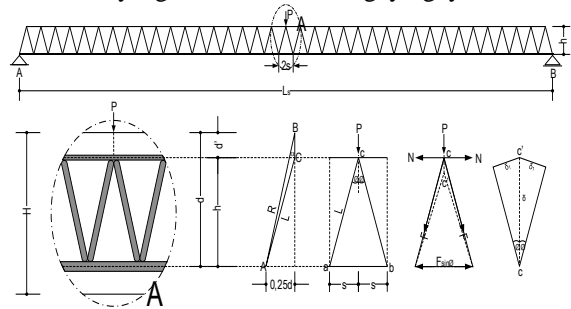
dengan :

- M<sub>n</sub> = kuat lentur balok (Nmm)
- d = tinggi efektif balok (mm)
- a = tinggi blok tegangan (mm)

**2.2. Analogi rangka batang pada balok**

Sistem struktur rangka batang merupakan suatu sistem yang terdiri dari batang-batang lurus yang dirangkai menjadi suatu bentuk segitiga yang menghasilkan bentuk struktur stabil. Balok beton bertulang dapat disesuaikan dengan sebuah struktur rangka batang oleh teori mekanika rekayasa pada

metode potongan dapat diketahui momen lentur akibat beban luar yang ditimbulkan oleh gaya-gaya tersebut.



sumber : Penulis, 2019

**Gambar 2. Balok beton dengan analogi rangka**

Perhitungan teoritis momen rangka batang (M<sub>F</sub>) dilakukan dengan pendekatan mekanika rekayasa statis tertentu dan berdasarkan hukum *Hooke*  $\sigma = E \cdot \epsilon$  dengan pemanjangan batang  $\delta = \frac{PL}{EA}$ . seperti pada Gambar 2.

**3. METODE PENELITIAN**

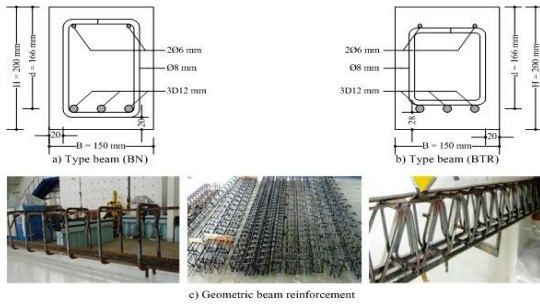
**3.1. Benda Uji**

Tabel 1, menunjukan benda uji sebanyak dua belas balok beton dengan panjang balok 3300 mm sesuai variasi untuk balok normal (BN) dengan sengkang vertikal sebanyak tiga benda uji. Pada balok dengan sengkang diagonal dengan jarak 0,25d (BTR25) sebanyak tiga benda uji, jarak 0,50d (BTR50) sebanyak tiga benda uji dan jarak 0,75d (BTR75) sebanyak tiga benda uji. Tulangan baja 2Ø6 mm sebagai tulangan longitudinal atas dan tulangan ulir 3D12 mm dipasang sebagai tulangan longitudinal bawah dan tulangan polos Ø8 mm untuk tulangan sengkang vertikal dan sengkang diagonal dengan ukuran penampang balok 150 x 200 mm, seperti diperlihatkan pada Gambar 3.

**Tabel 1. Tipe benda uji**

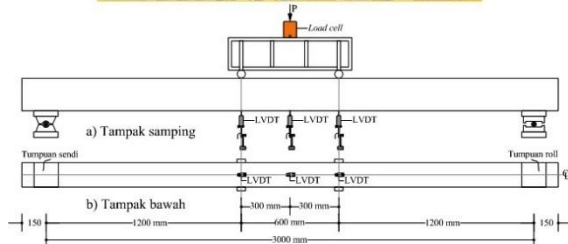
NO.	Kode	Profil Benda Uji
1	BN-01	
2	BN-02	
3	BN-03	
4	BTR25-01	
5	BTR25-02	
6	BTR25-03	
7	BTR50-01	
8	BTR50-02	
9	BTR50-03	
10	BTR75-01	
11	BTR75-02	
12	BTR75-03	

sumber : Penulis, 2019



sumber : Penulis, 2019

Gambar 3. Detail ukuran balok beton



sumber : Penulis, 2019

Gambar 4. Setup benda uji

### 3.2. Alat dan Metode Pembebanan

Gambar 4, diperlihatkan *setup* benda uji dimana beban diaplikasikan pada jack hidrolik pada bingkai kontras baja yang terpasang. Jack dikontrol oleh unit kontrol hidrolik dengan laju 0,2 mm/detik. Sebuah sel beban dengan kapasitas 200 kN ditempatkan di antara jack dan balok distributor untuk mengukur kekuatan yang diterapkan secara tepat. Selama pembebanan dicatat melalui data logger. *Transduser diferensial variabel linier* (LVDT) digunakan untuk memantau pemindahan vertikal spesimen.

### 3.3. Karakteristik Bahan

Kuat tekan beton diperoleh setelah umur 28 hari dengan kuat tekan rata-rata  $f'_c = 18,50$  MPa. Kuat tarik baja diperoleh sesuai SNI 03-686.2-2002 untuk tulangan polos Ø8 kuat leleh  $f'_y = 382,81$  MPa dan tulangan ulir D12 dengan kuat leleh  $f'_y = 373,94$  MPa.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Kapasitas Momen Lentur

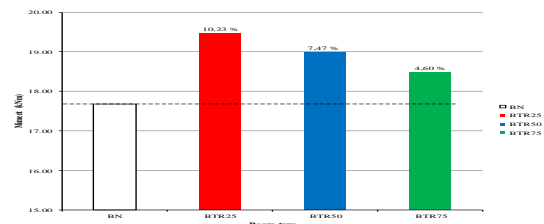
Hasil pengujian beban-lendutan menunjukkan bahwa lentur balok hingga batas beban ultimit  $P_u$  pada balok BTR25, BTR50 dan BTR75 yang cenderung meningkat dari balok BN. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada saat balok dibebani hingga batas beban

ultimit  $P_u$  terjadi lendutan maksimum di tengah bentang dengan besar lendutan bervariasi sesuai besaran kekakuan penampang untuk balok BN maupun balok BTR. Tabel 2, diperlihatkan hasil analisis kapasitas momen lentur yang diperoleh tambahan kapasitas beban ultimit  $P_u$  pada balok BTR25 bertambah sebesar 10,72%, pada balok BTR50 bertambah sebesar 7,83% dan pada balok BTR75 bertambah sebesar 4,82% dari balok BN. Peningkatan kapasitas balok tersebut dipengaruhi oleh adanya perubahan geometrik tulangan sengkang vertikal menjadi tulangan sengkang diagonal sesuai variasi jarak spasi yang memberikan penguatan tarik ke tulangan tarik longitudinal sebagai luas beton pengganti ( $nA_s$ ). Selanjutnya berdasarkan tambahan kapasitas beban ultimit  $P_u$  menjadikan kekakuan balok BTR bertambah kaku dengan kapasitas momen ultimit  $M_u$  lebih besar dari balok BN.

Tabel 2. Persentase  $M_u$

Balok Uji	Hasil Uji		Persentase	
	$P_u$ (kN)	$M_u$ (kNm)	$P_u$ (%)	$M_u$ (%)
Balok BN	28,11	17,67	-	-
Balok BTR25	31,12	19,48	10,72	10,23
Balok BTR50	30,31	18,99	7,83	7,47
Balok BTR75	29,46	18,49	4,82	4,60

sumber : Penulis, 2019



sumber : Penulis, 2019

Gambar 5. Persentase momen ultimit  $M_u$

Gambar 5, memperlihatkan peningkatan kapasitas momen pada balok BN dan balok BTR. Hasil tambahan tersebut terukur berdasarkan persentase  $M_u$  pada balok BTR25 sebesar 10,23%, balok BTR50 sebesar 7,47% dan balok BTR75 sebesar 4,60% dari balok BN.

### 4.2. Validasi momen hasil uji dengan teoritis

Perhitungan teoritis momen rangka batang dilakukan dengan pendekatan mekanika rekayasa statis tertentu yang mengalami perpanjangan batang pada saat dibebani secara aksial. Keseimbangan gaya-gaya batang horisontal  $F$  dan  $N$  :

$$F=N=\frac{P}{2\sin\theta}+\frac{P}{2}=\frac{P}{4\sin\theta}$$

Perpanjangan batang  $\delta$  :

$$\delta_1=\frac{F.L}{EA}=\frac{\frac{P}{4\sin\theta}\times h.\tan\theta}{EA}=\frac{Ph.\tan\theta}{EA.4\sin\theta}$$

$$\delta=\frac{\delta_1}{2\sin\theta}=\frac{\frac{Ph.\tan\theta}{EA.4\sin\theta}}{2\sin\theta}=\frac{Ph.\tan\theta}{EA.8\sin^2\theta}$$

Substitusi  $\delta$  ke persamaan gaya-gaya batang :

$$F_{\sin\phi} = \frac{EA \sin\phi \frac{Ph \cdot \tan\phi}{EA \cdot 8 \sin^2\phi}}{2s} = P \cdot \sin\phi \frac{h \cdot \tan\phi}{16s \cdot \sin^2\phi}$$

$$N = \frac{EA \frac{Ph \cdot \tan\phi}{EA \cdot 8 \sin^2\phi}}{2s} = P \frac{h \cdot \tan\phi}{16s \cdot \sin^2\phi}$$

Gaya batang horizontal ( $T_F$ ) :

$$T_F = (f_{yd} A_d \cdot \sin\phi + f_y A_s) \frac{1}{16s \cdot \sin^2\phi} h \cdot \tan\phi$$

Bila momen rangka dinotasikan dengan ( $M_F$ ) :

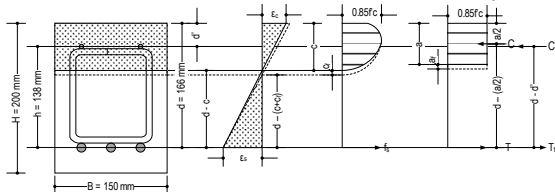
$$M_F = (f_{yd} A_d \cdot \sin\phi + f_y A_s) \frac{1}{16s \cdot \sin^2\phi} (d-d')$$

Momen penahan BTR dinotasikan dengan ( $MP_F$ ) :

$$MP_F = M_n + M_F$$

Atau dituliskan rumus empiris menjadi :

$$MP_F = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) + (f_{yd} A_d \cdot \sin\phi + f_y A_s) \frac{1}{16s \cdot \sin^2\phi} (d-d')$$



sumber : Penulis, 2019

Gambar 6. blok tegangan Whitney

Tabel 3. Rasio momen  $MP_F$  hasil uji dengan teoritis

	Hasil Uji		Teoritis		Rasio (%)	
	$P_F$ (kN)	$MP_F$ (kNm)	$P_F$ (kN)	$MP_F$ (kNm)	$P_F$	$MP_F$
BN	28,11	17,67	28,05	17,64	0,99	0,99
BTR25	31,12	19,48	32,67	20,41	1,05	1,05
BTR50	30,31	18,99	29,73	18,65	0,98	0,98
BTR75	29,46	18,49	29,14	18,29	0,97	0,99

sumber : Penulis, 2019

Perhitungan momen penahan balok BTR dilakukan dengan pendekatan teori blok tegangan segiempat ekuivalen Whitney dengan asumsi tegangan tekan merata sebesar  $0.85f_c$  terdistribusi merata di daerah tekan ekuivalen yang dibatasi oleh tepi penampang suatu garis lurus yang sejajar sumbu netral sejarak  $a = \beta_1 \cdot c$  dari serat beton yang mengalami regangan tekan  $\epsilon_c$  maksimum. Berdasarkan SNI 2847.2013 pasal 10 memberikan nilai  $\beta_1 = 0.85$ . Dengan pendekatan keseimbangan gaya  $T = C$  diperlihatkan pada Gambar 6. Selanjutnya perhitungan momen teoritis untuk balok BN dan balok BTR dilakukan dengan mensubstitusi beban-lendutan  $P$  hasil pengujian ke Persamaan momen lentur dimana,  $M = 0,81 + 0,60 P$ , maka diperoleh momen nominal ( $M_n$ ) dan momen penahan rangka ( $MP_F$ ) untuk balok BN dan balok BTR sesuai yang terdapat pada Tabel 3. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kapasitas momen hasil uji dibandingkan dengan momen hasil teoritis mempunyai nilai rasio 0,97 sampai dengan 1,05 atau dengan menggunakan rumus umum skala rasio 0,90 - 1,0 dikategorikan sangat baik.

### 4.3. Simulasi

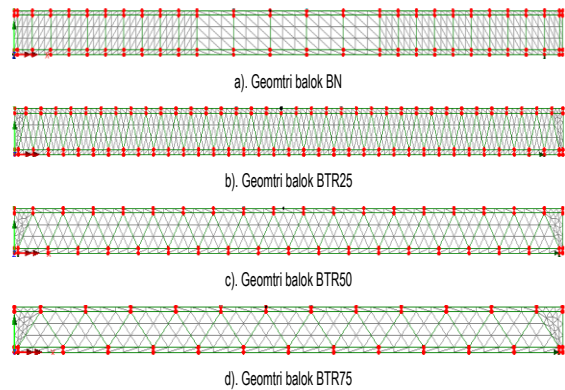
Simulasi lendutan balok yang terjadi di tengah bentang balok dengan menggunakan metode analisa *Finite Element Method* (FEM) digunakan dengan cara *isotropic*, *orthotropic* dan *anisotropic*. Material tulangan baja dan beton dimodelkan sebagai elemen garis (*line*) dan dianalisis dengan model menggunakan elemen 2D dengan cara :

a. Memodelkan geometri,

Menggambarkan atribut geometris pada beton dengan tinggi penampang beton 200 mm dan tinggi selimut beton 20 mm. Dengan tulangan tarik 3D12, tulangan tekan 2Ø6 dan tulangan sengkang Ø8 untuk vertikal dan diagonal sesuai variasi balok. Selanjutnya melakukan pengelompokan guna memudahkan dalam pemberian *attribute* terhadap model untuk masing - masing elemen balok seperti pada Gambar 7.

b. Mendefinisikan properti material

Properti material meliputi modulus elastis beton 20.222,37 MPa dengan tegangan beton 18,50 MPa.



sumber : Penulis, 2019

Gambar 7. Model geometri elemen balok

Tabel 4. Rasio momen ultimit  $M_u$  dengan FEM

Balok Uji	Hasil FEM		Hasil Uji		Rasio	
	$P_u$ (kN)	$M_u$ (kNm)	$P_u$ (kN)	$M_u$ (kNm)	$P_u$ (%)	$M_u$ (%)
BN	28,93	18,17	28,11	17,67	1,02	1,02
BTR25	33,58	20,96	31,12	19,48	1,01	1,07
BTR50	31,21	19,54	30,31	18,99	1,00	1,03
BTR75	29,43	18,47	29,46	18,49	0,99	0,99

sumber : Penulis, 2019

Modulus elastis baja 200.000 MPa dengan baja untuk sengkang 382,81 MPa dan untuk tulangan tarik 373,94 MPa. *Poisson ratio* untuk beton 0,20 dan pada baja 0,30. Dalam mendefinisikan material yang dipilih adalah model *isotropic*. Untuk beton model yang dipilih adalah *concrete* (model 94) dan untuk tulangan baja model yang dipilih adalah *stress potential von misses*.

Tabel 4, hasil analisis beban-lendutan balok BN dan BTR untuk kapasitas beban ultimit  $P_u$  dan kekakuan momen ultimit  $M_u$  dengan menggunakan FEM dibandingkan dengan analisis berdasarkan pengujian kapasitas lentur balok diperoleh rasio antara

0,99 sampai 1,07. Rasio ini oleh rumusan umum dengan skala rasio 0,90 – 1,0 dikategori sangat baik.

## 5. PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

1. Meningkatkan kekuatan balok pada saat mencapai beban ultimit terhadap kapasitas lentur dengan momen penahan rangka  $MP_F$  pada balok BTR25 sebesar 10,23%, balok BTR50 sebesar 7,47% dan balok BTR75 sebesar 4,60% dari balok BN.
2. Merekomendasikan rumus empiris momen penahan rangka  $MP_F$ :

$$MP_F = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + (f_{yd} A_d \sin \phi + f_y A_s') \frac{1}{16} \frac{h \tan \phi}{s \sin^2 \phi} (d - d')$$

### 5.2. Saran

Perlu penelitian lanjutan terkait perubahan spasi dan geometris tulangan sistem rangka terhadap keruntuhan tekan geser dan pada struktur bangunan yang mempunyai bentuk yang sulit.

## DAFTAR PUSTAKA

- Campinone, G., Colajanni, P. and Monaco, A. (2016). *Analytical evaluation of steel-concrete composite trussed beam shear capacity*, Materials and Structures, Vol. 49, pp. 3154-3176.
- Leopoldo Tesser, Roberto Scotta 2013. *Flexural and shear capacity of composite steel truss and concrete beams with inferior precast concrete base*. Journal Engineering Structures, 49 (2013), Elsevier 25 December 2012, 135-145.
- Magda I. Mousa 2015. *Effect of bond loss of tension reinforcement on the flexural behaviour of reinforced concrete beams*. HBRC Journal Production and hosting by Elsevier 8 January 2015, 1687-4048.
- Piero Colajanni, Lidia La Mendola, Giuseppe Mancini, Antonino Recupero, Nino Spinella 2014. *Shear capacity in concrete beams reinforced by stirrups with two different inclinations*. Journal Engineering Structures, 81 (2014), Elsevier 28 October 2014, 444-453.
- Pieter Lourens Frans, Herman Parung, Rudy Djamaluddin, Rita Irmawaty, 2019, *The Effect Of Space Bar In The Truss Reinforcing System To The Flexural Capacity Of Reinforced Concrete Beams*, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), Volume 10, Issue 04, April 2019, pp. 754-762 Article ID: IJCIET\_10\_04\_080, ISSN : 0976-6308, Scopus.
- Pieter Lourens Frans, Herman Parung, Rudy Djamaluddin, Rita Irmawaty, 2017, *Effects of Truss System Reinforcements on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams*, Proceedings Annual Conference on Engineering and Applied Science (ACEAT) Fukuoka, Japan ISBN: 978-986-90827-7-8.
- Pieter Lourens Frans, Herman Parung, Rudy Djamaluddin, Rita Irmawaty, 2017, *Perilaku Lentur Balok Beton Bertulangan Rangka*, Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2017, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta, ISSN: 2459-9727.
- Pieter Lourens Frans, Herman Parung, Rudy Djamaluddin, Rita Irmawaty, 2017, *Pengaruh Spasi Tulangan Sistem Rangka Terhadap Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang*, Publikasi Ilmiah Hasil Penelitian S3 Teknik Sipil Unhas, Maret 2019, Volume XLVIII , Program Doktor Universitas Hasanuddin Makassar, ISSN:2087-7986.
- Rudy Djamaluddin, Yasser Bachtiar, Rita Irmawati, Abd. Madjid Akkas, Rusdi Usman Latief 2014. *Effect of the Truss System to the Flexural Behavior of the External Reinforced Concrete Beams*. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering Vol:8, No:6, 2014.
- Rudy Djamaluddin 2013. *Flexural Behaviour of External Reinforced Concrete Beams*. Procedia Engineering 54 ( 2013 ) Elsevier 23 March 2013, 252 – 260.
- SNI 2847:2013 *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung* berdasarkan BSN 2013 - ICS 91.080.40., Jakarta.
- Saju, S. M., and Usha, S. (2016). *Study on flexural strength of truss reinforced concrete beams*, International Research Journal of Engineering and Technology, pp. 1541-1545.
- Trentadue, F., Mastromarino, E., Quaranta, G., Petrone, F., Monti, G., and Marano, G. C. (2014), *Bending stiffness of truss-reinforced steel-concrete composite beam*, Open Journal of Civil Engineering, Vol. 4, pp. 285-300.
- Yasser, Herman Parung, Muhammad W. Tjaronge, and Rudy Djamaluddin 2015. *Flexural Characteristics of Reinforced Concrete Beam Using Styrofoam Filled Concrete (SFC) in Tension Zone*. IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol. 7, No. 1, February 2015.