

PENGARUH PENGENCANGAN BAUT TERHADAP LENDUTAN PADA MODEL JEMBATAN RANGKA BAJA

Stefanus Suharto, Sugeng P. Budio, Eva Arifi

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono 167 Malang, 65145, Jawa Timur – Indonesia
Email: stefanussuharto@gmail.com

ABSTRAK

Pada pelaksanaan sesungguhnya, lendutan pada jembatan rangka baja tidak boleh melebihi lendutan izin untuk dapat memenuhi aspek keamanan dan kenyamanan. Pengencangan sambungan baut pada jembatan rangka baja menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi lendutan yang terjadi pada jembatan. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengujian lendutan terhadap model jembatan rangka baja dengan variasi nilai pengencangan baut. Pengencangan baut dilakukan menggunakan kunci torsi dari nilai pengencangan tinggi ke rendah (2,0 kgfm - 1,2 kgfm - 0,2 kgfm) dan dari rendah ke tinggi (0,2 kgfm - 1,2 kgfm – 2,0 kgfm).

Hasil pengujian beban 500 kg di tengah bentang menunjukkan bahwa pada pengencangan baut dari tinggi ke rendah, didapatkan hasil lendutan rata-rata di tengah bentang mengalami pertambahan seiring dengan pengurangan kuat kencang baut. Sedangkan pengencangan baut dari rendah ke tinggi menunjukkan bahwa lendutan mengalami pengurangan seiring dengan penambahan kuat kencang baut. Sehingga dapat disimpulkan pada pengujian beban elastis semakin besar kuat kencang baut, maka semakin kecil nilai lendutan yang dihasilkan jembatan. Hal tersebut juga berpengaruh terhadap kekakuan struktur, dimana semakin besar kuat kencang baut maka semakin besar nilai kekakuan struktur yang dimiliki jembatan.

Kata kunci : jembatan rangka baja, sambungan baut, lendutan, kekakuan, kunci torsi.

ABSTRACT

In the real implementation, deflection of steel truss bridge must be not exceed the the deflection limits in order to fullfill safety and comfortability. Bolt connection tightening of steel truss bridge can be one of the factors that influence the deflection of the bridge. Therefore, the deflection test to steel truss bridge model need to be done with variation in applied torque to the bolts. Bolt Tightening is done by using torque wrench from high to low torque levels (2,0 kgfm - 1,2 kgfm - 0,2 kgfm) and from low to high torque levels (0,2 kgfm - 1,2 kgfm – 2,0 kgfm).

Loading test 500 kg in the middle of the bridge results show that at the bolt tightening from high to low torque level, obtained the result on average joint deflection at the middle of the bridge increases with decrease in tightening of bolt. While at the bolt tightening from low to high torque level, obtained the result on average joint deflection at the middle of the bridge decrease with increase in tightening of bolt. So can be concluded at elastic loading test that when the level of bolt tightening is getting higher then the joint deflection of the bridge value will be getting smaller. It also affects the stiffness of the structure, when the level of bolt tightening is getting higher then the structure stiffness of the bridge value will be getting higher.

Keyword : steel truss bridge, bolted connection, deflection, stiffness, torque wrench.

I. PENDAHULUAN

Kondisi geografis wilayah Indonesia sebagian besar didominasi oleh wilayah perairan serta memiliki bentuk topografi yang bermacam-macam. Hal tersebut menyebabkan permukaan wilayah Indonesia memiliki banyak rintangan pemisah transportasi antar daerah seperti pegunungan, bukit, dan sungai-sungai. Oleh karena itu, Indonesia memerlukan infrastruktur penghubung yang mampu menghubungkan satu daerah ke daerah lain yang terpisahkan oleh rintangan, yaitu konstruksi jembatan.

Jembatan yang telah beroperasi sebagai infrastruktur penghubung harus mampu memberikan aspek keamanan dan kenyamanan pada pengguna yang hendak melewati jembatan agar tidak timbul rasa kekhawatiran dari para pengguna jembatan. Lendutan dapat menjadi salah satu hal yang harus diperhatikan dalam perencanaan konstruksi jembatan, dimana lendutan yang terjadi pada jembatan tidak boleh melebihi nilai lendutan ijin yang telah ditetapkan berdasarkan aspek keamanan dan kenyamanan jembatan.

Tipe jembatan rangka baja yang menggunakan sambungan baut sebagai penyambung antar elemen rangka merupakan salah satu alternatif yang banyak digunakan di berbagai wilayah Indonesia. Pada jembatan rangka baja, sambungan merupakan komponen yang berperan penting untuk dapat menjaga hubungan antar elemen rangka tetap kokoh dalam menahan beban yang bekerja pada jembatan.

Penelitian yang dilakukan oleh Balagopal dkk (2013) menunjukkan bahwa ada pengaruh pengencangan sambungan baut terhadap lendutan yang terjadi pada struktur rangka baja berupa menara transmisi. Mengingat jembatan rangka baja juga merupakan salah satu jenis struktur rangka baja, maka pengencangan sambungan baut berupa variasi nilai kuat kencang baut pada jembatan rangka baja dapat memberikan pengaruh terhadap nilai lendutan yang dihasilkan oleh jembatan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Sifat Mekanik Material Baja

Menurut Setiawan (2008), model pengujian yang dapat menggambarkan sifat mekanik dari material baja adalah melakukan uji tarik terhadap benda uji baja yang menghasilkan grafik hubungan tegangan dengan regangan. Pada daerah linier, berlaku persamaan hukum Hooke :

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Dimana :

$$\sigma = \text{Tegangan Aksial (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\epsilon = \text{Regangan Aksial}$$

$$P = \text{Gaya Aksial (kg)}$$

$$L = \text{Panjang struktur mula-mula (cm)}$$

$$E = \text{Modulus Elastisitas (kg/cm}^2\text{)}$$

$$A = \text{Luas Penampang Batang (cm}^2\text{)}$$

$$\Delta L = \text{Pertambahan panjang struktur (cm)}$$

SNI 03-1729-2002 membagi mutu baja berdasarkan tegangan leleh dan tegangan putus minimum sebagai berikut :

Tabel 2.1 Klasifikasi Mutu Baja

Jenis Baja	Tegangan Putus minimum fu (MPa)	Tegangan Leleh minimum fy (MPa)
BJ 34	340	210
BJ 37	370	240
BJ 41	410	250
BJ 50	500	290
BJ 55	550	410

(Sumber : Setiawan 2008)

Jembatan Rangka Baja

Seiring perkembangan zaman, pengetahuan dan teknologi dalam hal penggunaan material jembatan terus mengalami perkembangan. Penggunaan material baja sebagai gelagar induk sering diaplikasikan dalam tipe jembatan rangka baja. Menurut Thamrin (2012), jembatan rangka baja adalah salah satu tipe jembatan yang tersusun dari elemen-elemen batang yang saling terhubung pada suatu pelat buhul menggunakan alat sambung berupa baut, las, atau paku keling. Dimana pada

setiap elemen rangka batang hanya bekerja gaya aksial yang berupa tarik atau tekan.

Pada jembatan rangka baja, beban yang bekerja harus terdistribusi pada titik sambungan/titik bukul yang diasumsikan sebagai “sendi sempurna”. Untuk pertimbangan stabilitas struktur, bentuk dasar dari rangkaian elemen batang jembatan rangka baja umumnya adalah berupa bentuk segitiga. (Suhendro, 2010).

Sambungan Baut

Sambungan merupakan bagian dari suatu struktur yang berfungsi sebagai penyambung antar dua atau lebih komponen struktur yang hendak disambung. Pada jembatan rangka baja, umumnya menggunakan sambungan baut mutu tinggi yang memiliki cengkraman friksi. Dimana besarnya gaya friksi yang diberikan oleh sambungan baut ditentukan oleh tingkat kekencangan baut (Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015).

Berdasarkan tahanan yang direncana, tipe sambungan baut terdiri dari sambungan tipe tumpu dan tipe friksi. Pada sambungan tipe tumpu, kuat rencananya disalurkan oleh gaya geser pada baut dan adanya gaya tumpu pada bidang kontak antara baut dan pelat yang disambung. Sedangkan pada sambungan tipe friksi timbul tahanan friksi yang berupa cengkeraman antara kedua permukaan bidang yang disambung.

Kunci Torsi

Kunci torsi merupakan alat yang berfungsi untuk memberikan kuat kencang dengan ukuran kuat kencang tertentu pada sambungan baut. Dimana ukuran kuat kencang tersebut dinyatakan dalam satuan gaya kali panjang. Pada pelaksanaan di lapangan, kunci torsi sering digunakan saat akhir pengrajan setelah baut dikencangkan terlebih dahulu. Selain memberikan ukuran kuat kencang, kunci torsi juga dapat memperkirakan nilai kuat kencang baut yang sesuai agar dapat menghindari gaya jepitan yang berlebihan.

Kekakuan (*Stiffness*)

Kekakuan merupakan satuan gaya yang dibutuhkan suatu struktur untuk menghasilkan satu satuan lendutan. Berdasarkan hukum Hooke, nilai kekakuan struktur merupakan sudut kemiringan dari hubungan antara beban dan lendutan :

$$k = \frac{P}{y}$$

Dimana :
P = beban yang terjadi (kg)
y = defleksi searah beban (mm)
k = kekakuan elemen (kg/mm)

Lendutan Struktur Rangka Batang

Lendutan struktur rangka batang akibat suatu beban tertentu merupakan deformasi total dari semua elemen rangka pada titik-titik pertemuannya akibat adanya gaya aksial dalam masing-masing elemen rangka. Dimana masing-masing elemen rangka tersebut mengalami deformasi akibat adanya *displacement* yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta L = \frac{P \cdot L}{E \cdot A}$$

Akibat adanya *displacement* pada masing-masing elemen rangka, maka struktur rangka batang secara menyeluruh akan mengalami lendutan pada suatu titik bukul yang dapat ditentukan dengan metode kerja maya (*Method Of Virtual Work*) yang memiliki persamaan sebagai berikut :

$$\Delta = \sum_{i=0}^n \frac{p_i P_i L}{E A}$$

Dimana :

ΔL = *Displacement* searah elemen batang

Δ = Lendutan pada titik tertentu

n = Jumlah rangka batang

P = Gaya aksial elemen batang akibat beban sebenarnya

p = Gaya aksial elemen batang akibat beban maya

L = Panjang efektif elemen batang

E = Modulus Elastisitas elemen batang

A = Luas penamoang elemen batang

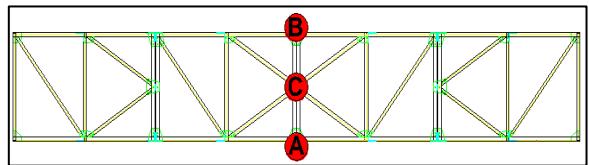
III. METODE PENELITIAN

Data Model Jembatan

Tipe : Jembatan Rangka Baja tipe *K-Truss*
Bentang : 6 meter (jarak as ke as tumpuan)
Tinggi : 0,5 meter (sisi luar ke luar)
Lebar : 0,9 meter (sisi dalam ke dalam)
Tumpuan : Sendi-Rol
Berat jembatan : 173 kg
Sambungan : Baut grade 8.8 diameter 8 mm

Prosedur Penelitian

1. Melakukan pengukuran dimensi jembatan, profil, dan penentuan metode pengujian lendutan
2. Melakukan uji tarik profil baja untuk mengetahui data mutu baja. Pada penelitian ini, diasumsi profil siku yang diuji memiliki mutu yang sama dengan profil siku yang digunakan sebagai elemen rangka model jembatan yang akan diuji.
3. Menetapkan nilai beban uji yang diberikan agar menimbulkan lendutan dalam batas elastis. Ditetapkan beban uji yang diberikan di tengah bentang sebesar 500 kg secara bertahap sebanyak 10 kali ($=10 \times 50$ kg) dengan *hydraulic jack*.
4. Mempersiapkan peralatan kunci momen, kunci blok, dan ratchet untuk memberikan variasi pengencangan baut. *Loading Frame*, *Load Cell*, *Hydraulic Jack*, dan *Spreader Beam* untuk pembebahan model jembatan rangka. Dan LVDT untuk pengukuran lendutan di tengah bentang.
5. Meletakkan jembatan pada *Loading Frame*, kemudian memasang LVDT pada tiga titik buhul di tengah bentang. Untuk penamaan 3 titik buhul di tengah bentang yaitu sebagai berikut :
 - Titik A, Titik B = Titik buhul struktur rangka utama di tengah bentang. Digunakan sebagai acuan grafik P- Δ dan analisis kekakuan struktur.
 - Titik C = Titik pada tengah balok melintang tengah bentang. Hanya digunakan sebagai pembanding untuk mengetahui lendutan di tengah balok melintang.



Gambar 3.1 Penamaan Titik Buhul pengukuran lendutan di tengah bentang

6. Mengencangkan sambungan baut menggunakan kunci torsi yang dilakukan 2 tahap, yaitu :
 - Tahap pertama, yaitu pengencangan dari kuat kencang tinggi ke rendah (T-R) secara berurutan dari kuat kencang 2,0 kgfm - 1,2 kgfm - 0,2 kgfm.
 - Tahap kedua, yaitu kelanjutan dari tahap pertama dari pengencangan rendah ke tinggi (T-R) secara berurutan dari kuat kencang 0,2 kgfm - 1,2 kgfm - 2,0 kgfm.Untuk membedakan hasil pada pengujian pada tahap pertama dan tahap kedua, maka dibuat notasi sebagai berikut :
 - 2,0 kgfm (T-R) : Pemberian kuat kencang sambungan baut sebesar 2,0 kgfm pada tahap pertama (pengencangan tinggi ke rendah).
 - 1,2 kgfm (T-R) : Pemberian kuat kencang sambungan baut sebesar 1,2 kgfm pada tahap pertama (pengencangan tinggi ke rendah).
 - 1,2 kgfm (R-T) : Pemberian kuat kencang sambungan baut sebesar 1,2 kgfm pada tahap kedua (pengencangan rendah ke tinggi).
 - 2,0 kgfm (R-T) : Pemberian kuat kencang sambungan baut sebesar 2,0 kgfm pada tahap kedua (pengencangan rendah ke tinggi).
7. Setelah proses pengencangan baut pada setiap tahap pengencangan, dilakukan bacaan LVDT di tengah bentang untuk memperoleh nilai lendutan awal.
8. Melakukan proses pembebahan pada tengah bentang jembatan setiap tahap pengencangan. Pembebahan dilakukan secara statik bertahap sebanyak 10 kali dengan beban uji maksimum 500 kg.
9. Proses pencatatan LVDT di titik buhul tengah bentang jembatan pada saat

pembebaan bertahap 10×50 kg dan pada saat *unloading*.

10. Mengolah data lendutan aktual pada model jembatan dan membandingkan hasilnya dengan lendutan teoritis hasil analisis program STAAD.Pro V8i.

11. Menggambarkan grafik $P-\Delta$ dan menghitung kekakuan struktur dari model jembatan.



Gambar 3.2 Perletakan Model Jembatan pada *Loading Frame* tampak samping



Gambar 3.3 Posisi Pembebaan Beban Uji pada Model Jembatan Rangka Baja



Gambar 3.4 Posisi Perl letakan LVDT di Tengah Bentang Model Jembatan Rangka

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Tarik Baja

Pengujian uji tarik baja dimaksudkan untuk dapat mengetahui data mutu baja yang digunakan sebagai penyusun elemen rangka dari model jembatan rangka baja yang digunakan dalam penelitian ini. Pengujian dilakukan pada 5 sampel benda uji. Hasil uji tarik baja diperoleh nilai batas beban leleh rata-rata (Py) sebesar 34 kN dan batas beban putus rata-rata (Pu) sebesar 49,6 kN. Kemudian dengan membagi hasil Py dan Pu dengan luas penampang benda uji, maka diperoleh nilai tegangan tegangan leleh rata-rata (f_y) sebesar 353,041 MPa dan tegangan putus rata-rata (f_u) sebesar 514,773 MPa. Hasil tersebut menunjukkan profil baja siku yang diuji memiliki mutu baja BJ-50.

Hasil Lendutan Awal di Tengah Bentang

Lendutan awal diukur untuk dapat mengetahui bagaimana posisi jembatan pada masing-masing kuat pengencangan sesaat sebelum dibebani beban uji apabila diukur dari satu garis referensi yang sama. Pada penelitian ini, ditetapkan garis referensi sumbu 0 nilai lendutan yaitu kondisi jembatan pada saat setelah dilakukannya pengencangan tahap pertama sebesar 2,0 kgfm. Berikut hasil lendutan awal aktual tengah bentang pada titik buhul A, B dan C dengan variasi nilai pengencangan baut :

Tabel 4.1 Hasil Lendutan Awal Aktual

No	Kondisi	Lendutan Awal Aktual diukur terhadap kondisi awal pengencangan 2,0 kgfm (mm)		
		Titik A	Titik B	Titik C
1	Setelah pengencangan 2,0 kgfm (referensi titik 0 lendutan)	0	0	0
2	Setelah pengencangan 2,0 kgfm (referensi titik 0 lendutan) sampai dengan	Setelah pengurangan kuat kencang ke 1,2 kgfm	0,71	2,14
3	Setelah pengencangan 2,0 kgfm (referensi titik 0 lendutan) sampai dengan	Setelah pengurangan kuat kencang ke 0,2 kgfm	2,08	5,9
4	Setelah pengencangan 2,0 kgfm (referensi titik 0 lendutan) sampai dengan	Setelah pengencangan kembali ke kuat kencang 1,2 kgfm	4,32	23,26
5	Setelah pengencangan 2,0 kgfm (referensi titik 0 lendutan) sampai dengan	Setelah pengencangan kembali ke kuat kencang 2,0 kgfm	4,35	23,31
				13,66

Hasil pada tabel 4.1 menunjukkan bahwa apabila diukur dari garis referensi yang sama, pada pengujian tahap pertama (pengencangan tinggi ke rendah) hingga

pengujian tahap kedua (pengencangan rendah ke tinggi) memberikan hasil nilai lendutan awal terus mengalami pertambahan.

Sebagai perbandingan terhadap hasil eksperimen, maka dibuat analisis teoritis untuk lendutan awal aktual dengan bantuan program STAAD.Pro V8i sebagai berikut :

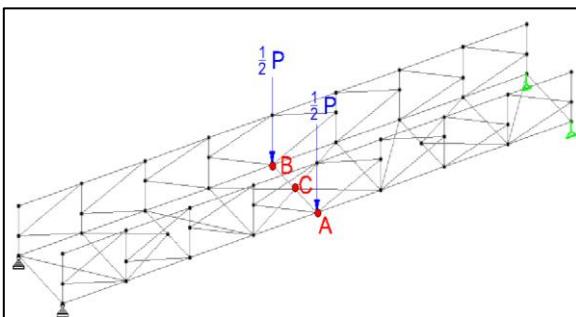
Tabel 4.2 Hasil Lendutan Awal Teoritis

Lendutan Awal Teoritis (mm)		
Titik A	Titik B	Titik C
0,292	0,289	0,346

Terdapat perbedaan hasil lendutan awal aktual maupun teoritis. Perbedaan tersebut dikarenakan pada analisis teoritis berdasarkan STAAD.Pro V8i diasumsikan model jembatan berada pada kondisi pertama kali dibebani. Sementara pada penelitian yang sesungguhnya, model jembatan diberi pembebanan berulang kali secara berurutan dengan variasi pengencangan baut dari tinggi ke rendah maupun dari rendah ke tinggi.

Hasil Lendutan Akibat Beban Uji di Tengah Bentang

Pada penelitian ini, pemodelan beban di STAAD.Pro V8i berdasarkan pada kondisi aslinya yakni kondisi dengan beban uji. Beban yang diinputkan pada STAAD.Pro V8i antara lain beban uji di tengah bentang yang diberikan secara bertahap ($= 10 \times 50$ kg) seperti terlihat pada gambar 4.1



Gambar 4.1 Pemodelan jembatan dan beban uji pada STAAD.Pro V8i

Berikut adalah hasil lendutan teoritis yang terjadi pada jembatan akibat beban uji :

Tabel 4.3 Hasil Lendutan Teoritis akibat Beban Uji di Tengah Bentang

Beban P (kg)	Lendutan (mm)			Lendutan Rata-Rata titik A dan titik B (mm)
	Titik A	Titik B	Titik C	
0	0	0	0	0
50	0,124	0,124	0,124	0,124
100	0,248	0,248	0,247	0,248
150	0,372	0,372	0,371	0,372
200	0,496	0,496	0,495	0,496
250	0,62	0,62	0,619	0,62
300	0,744	0,744	0,742	0,744
350	0,868	0,868	0,866	0,868
400	0,992	0,992	0,99	0,992
450	1,116	1,116	1,114	1,116
500	1,24	1,24	1,237	1,24

Pada tabel 4.3 di atas, didapatkan hasil lendutan pada titik bukul rangka utama tengah bentang akibat beban uji memiliki nilai yang sama antara titik A dengan titik B. Akan tetapi pada pelaksanaan sesungguhnya di lapangan, sangat kecil kemungkinan terjadinya lendutan yang sama antara titik A dan titik B seperti hasil lendutan teoritis di atas. Hal tersebut dikarenakan pada program STAAD.Pro V8i mengasumsi bahwa jembatan dalam kondisi sangat ideal yang memiliki struktur rangka kanan dan kiri benar-benar simetris.

Untuk mendapatkan data lendutan aktual, pada penelitian ini dilakukan pengujian lendutan dengan memberikan beban uji 500 kg secara statis bertahap sebanyak 10 kali.bacaan ($= 10 \times 50$ kg) pada tengah bentang model jembatan. Pembacaan nilai lendutan akibat beban uji akan dilakukan dengan bantuan alat LVDT yang dipasang pada 3 bukul rangka utama di tengah bentang, yaitu pada titik A, titik B, dan titik C seperti pada gambar 3.1. Nilai pertambahan lendutan yang dihasilkan akibat beban uji diukur terhadap posisi jembatan pada masing-masing kuat pengencangan baut saat sebelum diberi beban uji atau setelah pemberian nilai masing-masing kuat pengencangan baut telah selesai dilakukan. Berikut adalah hasil lendutan akibat beban uji pada masing-masing kuat pengencangan baut :

Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Lentutan Aktual akibat Beban Uji dengan Pengencangan 2,0 kgfm (T-R)

Beban P (kg)	Lendutan yang terjadi (mm)			Lendutan Rata-Rata titik A dan titik B (mm)
	ΔA	ΔB	ΔC	
0	0	0	0	0
50	0,31	0,51	0,44	0,41
100	0,63	1,08	0,91	0,86
150	0,97	1,67	1,4	1,32
200	1,3	2,28	1,92	1,79
250	1,69	2,98	2,49	2,34
300	2,05	3,76	2,98	2,91
350	2,42	4,62	3,7	3,52
400	2,78	5,62	4,37	4,20
450	3,15	6,91	5,1	5,03
500	3,54	8,57	6,06	6,06

Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Lentutan Aktual akibat Beban Uji dengan Pengencangan 1,2 kgfm (T-R)

Beban P (kg)	Lendutan yang terjadi (mm)			Lendutan Rata-Rata titik A dan titik B (mm)
	ΔA	ΔB	ΔC	
0	0	0	0	0
50	0,29	0,63	0,45	0,46
100	0,63	1,26	0,92	0,94
150	0,97	1,96	1,54	1,47
200	1,33	3,01	1,95	2,17
250	1,73	4,15	2,52	2,94
300	2,06	4,55	3,11	3,31
350	2,43	6,02	3,76	4,23
400	2,82	6,62	4,6	4,72
450	3,12	8,55	5,6	5,84
500	3,36	9,45	6,39	6,41

Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Lentutan Aktual akibat Beban Uji dengan Pengencangan 0,2 kgfm

Beban P (kg)	Lendutan yang terjadi (mm)			Lendutan Rata-Rata titik A dan titik B (mm)
	ΔA	ΔB	ΔC	
0	0	0	0	0
50	0,33	0,72	0,55	0,52
100	0,77	2,12	1,4	1,45
150	1,36	4,07	2,55	2,72
200	1,98	6,89	4,05	4,44
250	2,39	10,55	5,7	6,47
300	2,88	13,67	7,42	8,28
350	3,39	15,24	9,24	9,32
400	3,90	16,71	10,97	10,30
450	4,40	18,52	12,95	11,46
500	4,90	19,71	15,1	12,30

Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Lentutan Aktual akibat Beban Uji dengan Pengencangan 1,2 kgfm (R-T)

Beban P (kg)	Lendutan yang terjadi (mm)			Lendutan Rata-Rata titik A dan titik B (mm)
	ΔA	ΔB	ΔC	
0	0	0	0	0
50	0,57	0,3	0,42	0,43
100	1,1	0,6	0,87	0,85
150	1,65	0,89	1,35	1,27
200	2,22	1,17	1,81	1,70
250	2,78	1,4	2,26	2,09
300	3,35	1,58	2,71	2,47
350	3,96	1,73	3,2	2,85
400	4,59	1,89	3,73	3,24
450	5,26	2,14	4,19	3,70
500	5,98	2,26	4,74	4,12

Tabel 4.8 Hasil Pengukuran Lentutan Aktual akibat Beban Uji dengan Pengencangan 2,0 kgfm (R-T)

Beban P (kg)	Lendutan yang terjadi (mm)			Lendutan Rata-Rata titik A dan titik B (mm)
	ΔA	ΔB	ΔC	
0	0	0	0	0
50	0,49	0,28	0,42	0,39
100	0,99	0,57	0,87	0,78
150	1,53	0,87	1,34	1,20
200	2,05	1,14	1,79	1,60
250	2,57	1,37	2,25	1,97
300	3,11	1,55	2,71	2,33
350	3,67	1,71	3,2	2,69
400	4,26	1,86	3,71	3,06
450	4,87	2,11	4,2	3,49
500	5,45	2,25	4,71	3,85

Berdasarkan hasil lendutan akibat beban uji secara aktual dan teoritis, maka dapat dilihat bagaimana perbandingan lendutan yang dihasilkan pada titik A, titik B, dan titik C akibat beban maksimum 500 kg di tengah bentang sebagai berikut :

Tabel 4.9 Hasil Perbandingan Lentutan Teoritis dan Lentutan Aktual akibat Beban Uji 500 kg di Tengah Bentang

Rigid (Teoritis)	2,0 kgfm (T-R)	1,2 kgfm (T-R)	0,2 kgfm (R-T)	1,2 kgfm (R-T)	2,0 kgfm (R-T)
Lendutan Titik A (mm)	1,24	3,54	3,36	4,90	5,98
Lendutan Titik B (mm)	1,24	8,57	9,45	19,71	2,26
Lendutan Titik C (mm)	1,237	6,06	6,39	15,1	4,74
Lendutan Rata-Rata Titik A dan Titik B (mm)	1,24	6,06	6,41	12,30	4,12
					3,85

Hasil perbandingan lendutan pada tabel 4.9, menunjukkan bahwa pada pengencangan baut dari tinggi ke rendah, diperoleh hasil lendutan rata-rata di tengah bentang mengalami pertambahan seiring dengan pengurangan kuat kencang baut.

Sementara dari pengencangan rendah ke tinggi menunjukkan lendutan rata-rata di tengah bentang mengalami pengurangan seiring dengan penambahan kuat kencang baut. Hal serupa juga terjadi pada lendutan di tengah balok melintang yaitu pada titik C. Selain itu dapat juga dilihat bahwa semakin tinggi nilai pengencangan baut maka menghasilkan nilai lendutan yang semakin mendekati harga lendutan teoritis yang diasumsi sambungan sangat kaku (*Rigid*). Sehingga dari hasil lendutan diatas dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai pengencangan baut, maka lendutan yang dihasilkan akan semakin kecil.

Pengaruh Pengencangan Baut terhadap Lendutan di Tengah Bentang

Pada penelitian ini, dilakukan pembacaan LVDT pada kondisi jembatan sebelum dibebani, setelah dibebani, dan setelah *unloading*. Berikut adalah pengaruh variasi pengencangan baut pada kondisi sebelum dibebani, setelah dibebani, dan setelah *unloading* :

- Pada kondisi sebelum dibebani, pengaruh pengencangan baut yaitu adanya pertambahan maupun pengurangan nilai lendutan awal yang terjadi pada saat perubahan kuat kencang baut.

Tabel 4.10 Hasil Pembacaan LVDT Pengukuran Pertambahan Lendutan Awal

No	Posisi Bacaan	Pembacaan LVDT (mm)			Pertambahan Lendutan Awal (mm)		
		Titik A	Titik B	Titik C	Titik A	Titik B	Titik C
1	Setelah <i>unloading</i> 2,0 kgfm (T-R)	50,96	30,45	0,68	0,19	1,41	0,17
	Setelah pengurangan kuat kencang ke 1,2 kgfm (T-R)	51,15	31,86	0,85			
2	Setelah <i>unloading</i> 1,2 kgfm (T-R)	51,82	32,6	1,94	0,7	3,02	1,46
	Setelah pengurangan kuat kencang ke 0,2 kgfm	52,52	35,62	3,4			
3	Setelah <i>unloading</i> 0,2 kgfm	25,73	53,01	14,15	-0,33	-0,29	-0,28
	Setelah pengencangan kembali ke 1,2 kgfm (R-T)	25,4	52,72	13,87			
4	Setelah <i>unloading</i> 1,2 kgfm (R-T)	25,72	52,87	14,09	-0,29	-0,1	-0,18
	Setelah pengencangan kembali ke 2,0 kgfm (R-T)	25,43	52,77	13,91			

Berdasarkan hasil pada tabel 4.10, dapat dilihat ketika jembatan diberi perubahan kuat kencang baut dari pengencangan tinggi ke rendah, maka akan terjadi pertambahan nilai lendutan awal. Sebaliknya ketika jembatan diberi perubahan kencang baut dari pengencangan rendah ke tinggi, maka yang

terjadi adalah pengurangan nilai lendutan awal.

- Pada kondisi setelah dibebani beban 500 kg, pengaruh pengencangan baut yaitu pada nilai lendutan total yang timbul pada jembatan. Dimana lendutan total diperoleh dengan menjumlahkan lendutan awal dengan lendutan akibat beban uji.

Tabel 4.11 Hasil Pembacaan LVDT Lendutan Total di Tengah Bentang

No	Posisi Bacaan	Lendutan Total diukur terhadap kondisi awal pengencangan 2,0 kgfm pertama (mm)			Lendutan Total rata-rata (mm)
		Titik A	Titik B	Titik C	
1	Setelah pembebaan 500 kg 2,0 kgfm (T-R)	3,54	8,57	6,06	6,057
2	Setelah pembebaan 500 kg 1,2 kgfm (T-R)	4,09	11,19	7,24	7,507
3	Setelah pembebaan 500 kg 0,2 kgfm	6,67	25,69	18,52	16,960
4	Setelah pembebaan 500 kg 1,2 kgfm (R-T)	10,3	25,57	18,42	18,097
5	Setelah pembebaan 500 kg 2,0 kgfm (R-T)	9,84	25,59	18,4	17,943

Dari hasil tabel 4.11, dapat dilihat bahwa pada tahap pengencangan dari tinggi ke rendah, maka nilai lendutan total rata-rata yang dihasilkan semakin besar dari pengencangan 2,0 kgfm (T-R) ke pengencangan 0,2 kgfm. Sementara dari pengencangan rendah ke tinggi, lendutan total yang timbul mengalami kenaikan pada pengencangan 0,2 kgfm ke 1,2 kgfm (R-T) dan kembali mengalami penurunan pada pengencangan 1,2 kgfm (R-T) ke pengencangan 2,0 kgfm (R-T).

- Pada kondisi setelah *unloading*, pengaruh pengencangan baut adalah kemampuan jembatan yang telah mengalami lendutan akibat dibebani untuk kembali ke posisi semula saat sebelum dibebani. Berikut atabel selisih perpindahan LVDT pada kondisi sebelum dibebani dengan setelah *unloading* :

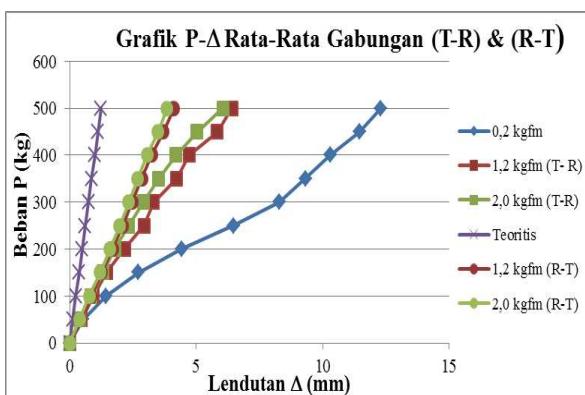
Tabel 4.12 Selisih Perpindahan LVDT Sebelum Pembebanan dan Setelah *unloading*

No	Kondisi	Selisih Perpindahan (mm)		
		Titik A	Titik B	Titik C
1	Selisih perpindahan LVDT sebelum pengujian beban dan sesudah <i>unloading</i> 2,0 kgfm (T-R)	0,52	0,73	0,66
2	Selisih perpindahan LVDT sebelum pengujian beban dan sesudah <i>unloading</i> 1,2 kgfm (T-R)	0,67	0,74	1,09
3	Selisih perpindahan LVDT sebelum pengujian beban dan sesudah <i>unloading</i> 0,2 kgfm	2,57	17,65	10,52
4	Selisih perpindahan LVDT sebelum pengujian beban dan sesudah <i>unloading</i> 1,2 kgfm (R-T)	0,32	0,15	0,22
5	Selisih perpindahan LVDT sebelum pengujian beban dan sesudah <i>unloading</i> 2,0 kgfm (R-T)	0,21	0,08	0,15

Dari hasil tabel 4.12 dapat dilihat bahwa perbedaan cukup jauh terletak pada pengencangan 0,2 kgfm antara kondisi sebelum dibebani dengan setelah *unloading*. Kemudian dapat dilihat bahwa dengan kuat kencang yang sama, terdapat hasil yang berbeda pada selisih perpindahan sebelum pengujian beban dan sesudah unloading. Pada kuat kencang 1,2 kgfm (R-T) relatif memiliki selisih perpindahan yang lebih kecil dibandingkan dengan kuat kencang 1,2 kgfm (T-R). Hal serupa terjadi pada kuat kencang 2,0 kgfm (R-T) relatif memiliki selisih perpindahan yang lebih kecil dibandingkan dengan kuat kencang 2,0 kgfm (T-R).

Grafik P- Δ

Grafik P- Δ pada penelitian ini adalah grafik yang menggambarkan pertambahan lendutan yang timbul pada model jembatan setiap penambahan nilai beban uji yang diberikan pada jembatan secara statik bertahap sebanyak 10 kali ($=10 \times 50 \text{ kg}$). Untuk grafik P- Δ yang akan disajikan yaitu merupakan lendutan rata-rata titik A dan titik B yang merupakan titik buhul di tengah bentang dari struktur rangka utama. Kemudian hasil lendutan rata-rata aktual pada masing-masing kuat pengencangan akan dibandingkan terhadap hasil teoritis seperti yang tersaji pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik P- Δ Teoritis, 2,0 kgfm (T-R), 1,2 kgfm (T-R), 0,2 kgfm, 1,2 kgfm (R-T), 2,0 kgfm (R-T) Hasil Rata-Rata Titik A dan Titik B

Berdasarkan gambar 4.2, dapat dilihat bahwa grafik P- Δ pengencangan 0,2 kgfm menunjukkan kemiringan grafik yang paling landai dibandingkan dengan pengencangan lainnya. Sedangkan hasil analisis teoritis menunjukkan kemiringan grafik yang paling curam dibandingkan dengan grafik pengencangan lainnya. Kemudian dari pengencangan 2,0 kgfm dan pengencangan 1,2 kgfm memiliki kemiringan grafik yang hampir tidak jauh berbeda. Yang membedakan yaitu kemiringan grafik 2,0 kgfm (R-T) dan 1,2 kgfm (T-R) lebih curam dibandingkan dengan kemiringan grafik 2,0 kgfm (T-R) dan 1,2 kgfm (R-T).

Kemudian dapat juga dilihat pada gambar 4.2 bahwa selain hasil teoritis, grafik P- Δ menunjukkan bentuk kemiringan grafik yang tidak benar-benar linier. Kemiringan grafik P- Δ yang tidak linier dikarenakan kenaikan lendutan aktual yang tidak bersifat konsisten seiring dengan kenaikan beban. Dimana hal tersebut menunjukkan kinerja sambungan baut pada model jembatan rangka sesungguhnya tidak konsisten selama menahan beban uji 500 kg yang diberikan secara statis bertahap sebanyak 10 kali di tengah bentang.

Kekakuan Struktur Model Jembatan

Nilai kekakuan struktur model jembatan dapat diperoleh dari perbandingan antara nilai beban (P) dan lendutan (Δ). Pada penelitian ini, kekakuan struktur jembatan ditentukan berdasarkan hasil lendutan rata-rata di titik A dan titik B. Hal ini disebabkan karena kedua titik tersebut merupakan titik buhul yang terletak pada struktur rangka utama jembatan yang dibebani beban vertikal secara bertahap. Dimana struktur rangka utama berfungsi sebagai penahan beban vertikal yang bekerja pada jembatan. Berikut adalah perbandingan hasil kekakuan aktual pada masing-masing kuat kencang baut dengan kekakuan teoritis jembatan dalam menahan beban 500 kg di tengah bentang :

Tabel 4.13 Perbandingan Kekakuan Struktur Aktual dengan Teoritis

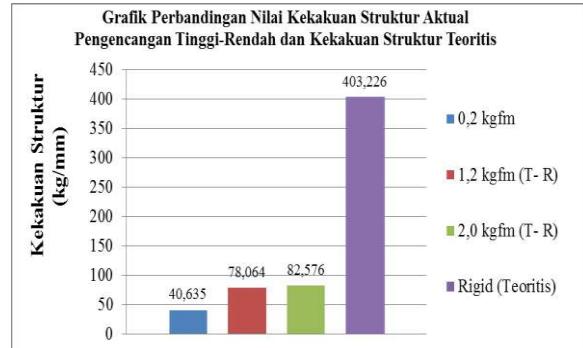
Kuat Pengencangan	Kekakuan Struktur dalam menahan beban maksimum 500 kg di tengah bentang (kg/mm)
2,0 kgfm (T-R)	82,576
1,2 kgfm (T-R)	78,064
0,2 kgfm	40,635
1,2 kgfm (R-T)	121,359
2,0 kgfm (R-T)	129,870
Rigid (Teoritis)	403,226

Terdapat berbagai macam faktor yang menyebabkan perbedaan hasil kekakuan struktur perhitungan dengan teoritis dan hasil eksperimen. Berikut adalah beberapa perbedaan asumsi antara hasil teoritis STAAD.Pro V8i dengan hasil aktual :

- Pada analisis teoritis, sambungan pada setiap titik buhl dianggap sebagai sambungan sangat kaku (*Rigid*) dan tidak adanya pengaturan kuat kencang baut. Model jembatan diasumsi memiliki kondisi sangat ideal, dimana model jembatan diasumsi masih baru dalam kondisi pertama kali dibebani. Selain itu, titik berat antar elemen rangka diasumsi dapat bertemu pada satu titik buhl. dan dipastikan tidak ada eksenstrisitas pada masing-masing titik buhl.
- Sementara pada kondisi sesungguhnya, sambungan baut dapat diatur dengan variasi nilai kuat pengencangan tertentu. Model jembatan telah dibebani beberapa kali dengan berbagai macam variasi pengencangan baut dan kondisi sambungan juga mengalami perubahan kuat kencang berkali-kali. Selain itu, titik berat antar elemen rangka sangat sulit untuk dapat bertemu pada satu titik buhl dan sangat mungkin adanya eksenstrisitas pada masing-masing titik buhl.

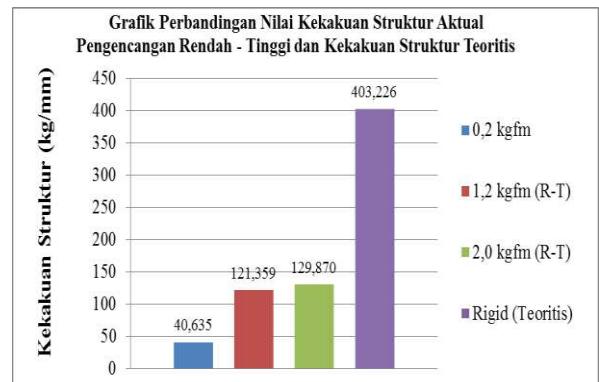
Selain itu, dapat juga dilihat pada tabel 4.13 bahwa dengan nilai pengencangan yang sama terdapat perbedaan hasil kekakuan aktual antara pengencangan tinggi ke rendah dengan pengencangan rendah ke tinggi. Dimana dihasilkan kekakuan struktur yang lebih besar pada pengencangan rendah ke tinggi daripada pengencangan tinggi ke

rendah. Hasil kekakuan yang tidak sama tersebut dikarenakan adanya perbedaan pada perubahan perilaku sambungan antara pengencangan tahap pertama (pengencangan tinggi ke rendah) dengan tahap kedua (pengencangan rendah ke tinggi).



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Nilai Kekakuan Struktur Pengencangan Tinggi - Rendah dan Kekakuan Struktur Teoritis

Hasil gambar 4.3 menunjukkan pada tahap pengencangan tinggi ke rendah, pengurangan dari kuat kencang 2,0 kgfm ke 1,2 kgfm akan mengurangi kekakuan struktur dari 82,576 kg/mm menjadi 78,064 kg/mm. Kemudian pengurangan dari kuat kencang 1,2 kgfm ke 0,2 kgfm akan mengurangi kekakuan struktur dari 78,064 kg/mm menjadi 40,635 kg/mm. Dan kekakuan struktur dengan kuat kencang 2,0 kgfm masih jauh dibawah hasil teoritis yang mengasumsikan sambungan kaku (*Rigid*).



Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Nilai Kekakuan Struktur Pengencangan Rendah - Tinggi dan Kekakuan Struktur Teoritis

Hasil gambar 4.4 menunjukkan pada tahap pengencangan rendah ke tinggi , pengencangan dari kuat kencang 0,2 kgfm

ke 1,2 kgfm akan menambah kekakuan struktur dari 40,635 kg/mm menjadi 121,359 kg/mm. Kemudian pengencangan dari kuat kencang 1,2 kgfm ke 2,0 kgfm akan menambah kekakuan struktur dari 121,359 kg/mm menjadi 129,87 kg/mm. Dan kekakuan struktur dengan kuat kencang 2,0 kgfm masih jauh dibawah hasil teoritis yang mengasumsikan sambungan kaku (*Rigid*).

V. PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian lendutan dapat ditarik beberapa kesimpulan :

1. Perubahan kuat kencang sambungan baut mempengaruhi lendutan yang terjadi pada model jembatan rangka. Hasil pengujian beban 500 kg di tengah bentang menunjukkan :
 - a. Pada pengencangan baut dari tinggi ke rendah, diperoleh hasil lendutan rata-rata di tengah bentang mengalami pertambahan seiring dengan pengurangan kuat kencang baut. Lendutan rata-rata yang dihasilkan yaitu sebesar 6,06 mm untuk pengencangan 2,0 kgfm; 6,41 mm untuk pengencangan 1,2 kgfm; 12,30 mm untuk pengencangan 0,2 kgfm.
 - b. Pada pengencangan baut dari rendah ke tinggi, diperoleh hasil lendutan rata-rata di tengah bentang mengalami pengurangan seiring dengan penambahan kuat kencang baut. Lendutan rata-rata yang dihasilkan yaitu sebesar 12,30 mm untuk pengencangan 0,2 kgfm; 4,12 mm untuk pengencangan 1,2 kgfm; 3,85 mm untuk pengencangan 2,0 kgfm.
2. Variasi pengencangan sambungan baut berpengaruh terhadap kekakuan struktur model jembatan rangka. Hasil analisis nilai kekakuan struktur berdasarkan lendutan aktual menunjukkan :
 - a. Pada pengencangan baut dari tinggi ke rendah, diperoleh hasil kekakuan struktur jembatan mengalami penurunan seiring dengan pengurangan kuat kencang baut. Kekakuan struktur yang dihasilkan yaitu sebesar 82,576 kg/mm untuk pengencangan 2,0 kgfm; 78,064 kg/mm untuk pengencangan 1,2 kgfm; 40,635 kg/mm untuk pengencangan 0,2 kgfm.
 - b. Pada pengencangan baut dari rendah ke tinggi, diperoleh hasil kekakuan struktur jembatan mengalami peningkatan seiring dengan penambahan kuat kencang baut. Kekakuan struktur yang dihasilkan yaitu sebesar 40,635 kg/mm untuk pengencangan 0,2 kgfm; 121,359 kg/mm untuk pengencangan 1,2 kgfm; 129,870 kg/mm untuk pengencangan 2,0 kgfm.
3. Pengencangan sambungan baut memberikan pengaruh terhadap lendutan model jembatan, yaitu :
 - a. Pada pengujian beban elastis semakin besar kuat kencang baut maka semakin kecil nilai lendutan yang dihasilkan jembatan. Hal tersebut juga berpengaruh terhadap kekakuan struktur, dimana semakin besar kuat kencang baut maka semakin besar nilai kekakuan struktur yang dimiliki jembatan. Sehingga terdapat hubungan berbanding terbalik antara lendutan dengan kekakuan struktur.
 - b. Terdapat hasil lendutan yang berbeda antara metode urutan pengencangan baut tinggi ke rendah dengan rendah ke tinggi. Dimana dengan kuat kencang yang sama, dihasilkan lendutan rata-rata yang lebih kecil pada pengencangan rendah ke tinggi daripada pengencangan tinggi ke rendah. Hal tersebut juga berpengaruh terhadap kekakuan struktur, dimana dengan kuat kencang yang sama, dihasilkan kekakuan struktur yang lebih besar pada pengencangan rendah ke tinggi daripada pengencangan tinggi ke rendah.

Saran

1. Setelah pengujian suatu nilai kuat kencang baut selesai, maka pada pengujian nilai kuat kencang berikutnya sebaiknya perlu diberi *camber* atau anti lendut sebelum dilakukannya perubahan kuat kencang. Hal ini bertujuan agar lendutan hasil pengujian kuat kencang sebelumnya tidak mempengaruhi hasil lendutan dari kuat kencang yang berikutnya.
2. Sebaiknya model jembatan rangka yang digunakan untuk pengujian lendutan memiliki konfigurasi struktur rangka yang simetris antara kanan dan kiri pada struktur rangka utama, struktur balok melintang, maupun struktur ikatan angin. Hal tersebut bertujuan agar lendutan yang dihasilkan pada struktur rangka kiri dan kanan tidak berbeda jauh.
3. Perlu adanya keseragaman urutan pengencangan baut pada titik buhul jembatan sepanjang penelitian. Sebagai contoh urutan pengencangan dimulai dari buhul tepi ke buhul tengah jembatan tentu akan menghasilkan perilaku lendutan awal yang berbeda dengan urutan pengencangan yang dimulai dari buhul tengah ke buhul tepi jembatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ari Wibowo, Devi Nuralinah, Wisnumurti. (2014). *Pengaruh Posisi Beban Terhadap Tegangan dan Rotasi Batang Tepi Bawah Jembatan Boomerang Bridge*. Jurnal Rekayasa Sipil, Vol 8, no 2, pp 142-145.
- Balagopal, R., Ramaswamy, A., Palani,G.S., Rao,P. N. (2013). *Experimental Studies on Bolted Joint Damage Assessment due to Wind Load*. Research Publishing,Singapore :The Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering APCWE-VIII.
- Departemen Pekerjaan Umum. (1998). *SNI 07- 0371-1998 Batang Uji Tarik untuk Bahan Logam*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Departemen Pekerjaan Umum. (2002). *SNI 03-1729-2002 Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Indrawahyuni, H., Dewi, S. M., Prastumi. (2010). *Mekanika Bahan*. Malang : Bargie Media.
- Indrawati, Amaliyah N. 2004. *Penelitian terhadap Kekuatan dan Perilaku Baut Fisher dan Baut yang Ada di Pasaran*. Malang : Perpustakaan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga. (2009). *Pemeriksaan Jembatan Rangka Baja*. Jakarta: Direktur Jenderal Bina Marga.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2015). *Pedoman Pemasangan Baut Jembatan*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Setiawan, Agus. (2008). *Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD*. Jakarta: Erlangga.
- Sugeng P. Budio, Ari Wibowo, Komang Antara. (2012). *Prosentase Penurunan Lendutan Model Jembatan Rangka Baja Akibat Penggunaan Kabel Prategang Internal Tipe Segitiga*. Jurnal Rekayasa Sipil, Vol 3, no 1, pp 37-49.
- Suhendro, B. (2005). *Analisis Struktur Metode Matrix*. Yogyakarta : Beta Offset.
- Suseno, H. (2010). *Bahan Bangunan*. Malang : Bargie Media.
- Thamrin. (2012). *Modul Kuliah Struktur Baja*. Medan : Departement Teknik Sipil FTSP ITM.
- Xanthakos. (1973). *Theory and Design Bridges*. New York : John Wiley and Sons. Inc
- Supriyadi, Bambang. (2007). *Jembatan*. Yogyakarta: Beta Offset.