

OPTIMALISASI DESAIN JEMBATAN LENGKUNG (*ARCH BRIDGE*) TERHADAP BERAT DAN LENDUTAN

Sugeng P. Budio¹, Retno Anggraini¹, Christin Remayanti¹, I Made Bayu Arditya Widia²

¹Dosen / Jurusan Teknik Sipil / Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono No. 167 Malang, 65145, Jawa Timur

²Mahasiswa / Jurusan Teknik Sipil / Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono No. 167 Malang, 65145, Jawa Timur

ABSTRAK

Jembatan lengkung (*arch bridge*) adalah jembatan bentang panjang yang merupakan salah satu infrastruktur yang diperlukan dalam membantu masyarakat untuk melintasi pulau, sungai dan hambatan lainnya. Dalam merencanakan jembatan lengkung perlu diperhatikan beberapa hal sebagai contoh yaitu lokasi jembatan, biaya pembangunan jembatan, material jembatan serta tipe sambungan pada titik buhul jembatan. Untuk menghasilkan desain jembatan lengkung yang aman dan efisien maka peneliti melakukan penelitian mengenai optimasi desain jembatan lengkung terhadap rasio beban dan lendutan. Penelitian akan dilakukan dengan dua cara yaitu analisis dengan menggunakan bantuan *software* dan melakukan pengujian pada model jembatan. Model jembatan akan dibuat dari bambu dengan variasi tipe sambungan sehingga dari model jembatan tersebut maka dapat diketahui tipe sambungan yang dapat memberikan kinerja yang baik pada titik buhul jembatan.

Kata Kunci: arch bridge, efisien, jembatan, lendutan, optimasi desain.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang terdiri dari 17.500 pulau dan 5.590 sungai. Untuk mempermudah transportasi antar pulau atau antar sungai maka diperlukan adanya sebuah infrastruktur yang kuat, nyaman dan aman untuk digunakan, diantaranya adalah jembatan. Oleh karena itu, perancangan jembatan memiliki peranan yang sangat penting di dalam dunia teknik sipil di Indonesia.

Jembatan pelengkung (*arch bridge*) adalah struktur setengah lingkaran dengan abutmen di kedua sisinya. Desain pelengkung secara alami akan mengalihkan beban yang diterima lantai kendaraan jembatan menuju ke abutmen yang menjaga kedua sisi jembatan agar tidak bergerak ke samping. Ketika menahan beban akibat berat sendiri dan beban lalu lintas, setiap bagian pelengkung menerima gaya tekan, sehingga dalam mendesain

jembatan pelengkung harus terdiri dari material yang tahan terhadap gaya tekan.

Dalam perencanaan jembatan lengkung terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu konfigurasi jembatan lengkung, material penyusun jembatan serta tipe sambungan yang digunakan. Untuk memperoleh desain jembatan lengkung yang optimum maka dilakukan penelitian mengenai desain jembatan gantung dimana akan diperhatikan mengenai rasio berat jembatan terhadap lendutan yang terjadi.

Penelitian akan dilakukan dengan dua cara yaitu dengan cara analisis menggunakan bantuan *software* dan dengan pengujian pada model jembatan lengkung. Dalam pembuatan model jembatan lengkung terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu material dan tipe sambungan. Sambungan terdiri dari berbagai macam jenis sebagai contoh sambungan dengan paku dan sambungan pasak. Setiap tipe sambungan memiliki

kekurangan dan kelemahan tergantung pada material model yang digunakan. Untuk meneliti hal tersebut maka pada penelitian ini model jembatan lengkung akan terbuat dari bambu dengan menggunakan beberapa variasi tipe sambungan. Diharapkan dengan adanya penelitian ini maka dapat diketahui desain optimum jembatan lengkung serta tipe sambungan yang memberikan kinerja yang baik pada titik join pada jembatan lengkung.

2. TINJAUAN PUSTAKA

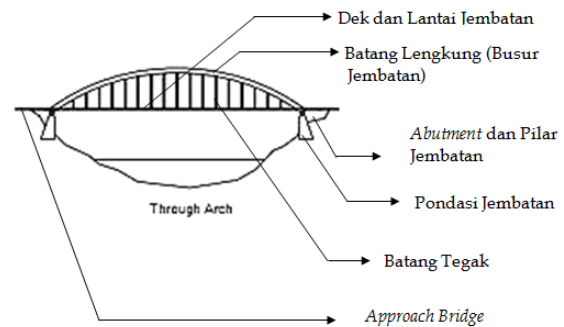
Jembatan busur adalah jembatan yang konstruksinya berbentuk setengah lingkaran atau parabola dengan abutmen di kedua sisinya. Pemakaian desain berupa busur ini secara alami akan mengalihkan beban yang diterima lantai kendaraan jembatan menuju ke abutmen yang menjaga kedua sisi jembatan agar tidak bergerak kesamping (Supriyadi, 2007).

Secara struktural, jembatan busur merupakan jenis jembatan yang mengandalkan batang lengkung (busur) dan kabel penggantung antara busur jembatan dengan dek jembatan untuk memikul beban yang terjadi.

Lengkungan dapat digunakan untuk mengurangi momen tekuk pada struktur-struktur bentang panjang. Pada dasarnya, lengkungan bekerja sebagai kebalikan dari kabel, sehingga lengkungan menerima bebannya berupa tekan, karena ketegarannya lengkungan harus juga menahan beberapa bengkakan dan gaya geser yang bergantung pada bagaimana lengkungan dibebani dan dibentuk. Khususnya, jika lengkungan memiliki bentuk parabolik dan dibebani oleh beban vertikal yang terdistribusi merata secara horizontal, maka dari analisis kabel hanya mengikuti gaya-gaya mampatan yang akan ditahan oleh lengkungan (Hibbeler, 2002).

Jembatan busur terduru dari beberapa bagian, yaitu deck, abutment, batang tegak, batang lengkung (busur), pondasi jembatan,

dan approach bridge yang dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Bagian-bagian jembatan lengkung

Pada jembatan lengkung terdapat dua macam gaya, yaitu gaya tarik dan gaya tekan. Dalam proses pemilihan desain jembatan, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan, diantaranya adalah:

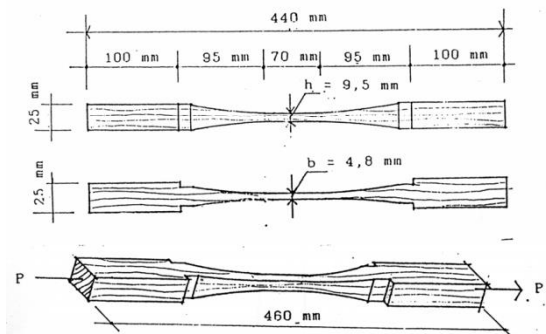
- a. Pelengkung pada jembatan
Pelengkung pada jembatan busur merupakan struktur utama yang menahan sebagian besar beban yang di terima oleh jembatan. Lengkung umumnya pada perletakan jepit, dengan ketebalan awal lengkung sebesar 1,65 sampai 2 kali ($L/20$) dari puncak lengkung ($L/40$) ketebalan rata rata adalah $L/30$ dan tinggi fokus $L/5$ (ACI 1996).
- b. Jumlah segmen
Jumlah segmen berpengaruh pada penyaluran gaya pada jembatan, Semakin sedikit jumlah segmen semakin besar gaya yang yang di pikul oleh kolom penyangga.
- c. Pengaku batas
Pengaku berfungsi memaksimalkan penyaluran gaya, dan sebagai penguat struktur pada jembatan .

3. METODE PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui desain jembatan bentang panjang tipe busur yang optimum sehingga menghasilkan rasio berat jembatan dan lendutan yang paling minimum. Untuk mencapai tujuan tersebut, maka akan dilakukan melalui pengujian material,

pengujian model fisik dan analisis pemodelan. Pengujian material digunakan untuk mengetahui mutu dan kualitas material serta parameter yang diperlukan. Pengujian yang dilakukan meliputi material rotan, kayu dan model fisik jembatan busur.

Pengujian kayu dilakukan dengan uji kuat lentur pada balok kayu berukuran $50 \times 50 \times 760 \text{ mm}^3$, sedangkan uji kuat tarik balok kayu dengan ukuran seperti terlihat pada **Gambar 2**.

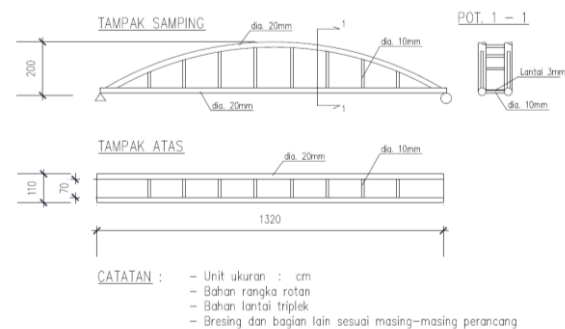


Gambar 2. Balok kayu untuk pengujian kuat tarik

Setelah diperoleh hasil dari pengujian-pengujian tersebut, maka dapat dimodelkan jembatan busur secara numerical melalui software STAAD PRO dengan bentang jembatan adalah 132 meter dan lebar lantai kendaraan adalah sebesar 7 meter. Untuk mengetahui lendutan minimum yang terjadi, maka dilakukan variasi konfigurasi bracing yang terletak pada bagian lengkung busur. Berdasarkan hasil konfigurasi bracing optimum dari numerical ini, maka dirancang pemodelan fisik untuk mengetahui pengaruh variasi dari sambungan terhadap lendutan yang terjadi.

Pada model fisik, dirancang jembatan busur yang merupakan replika dari jembatan busur sesungguhnya dengan skala 1:100 yang terbuat dari kayu, rotan dan tripleks seperti terlihat pada **Gambar 3**. Prototipe jembatan busur ini dirancang dengan panjang 132 cm, yaitu jarak as ke as tumpuan/perletakan pada kepala jembatan, tinggi busur puncak 22 cm (dari tepi atas puncak busur ke tepi bawah balok

pengikat dengan jarak antar balok pengikat sebesar 12 cm dan lebar lantai jembatan 7 cm, yaitu dihitung dari tepi dalam ke tepi dalam busur. Ditengah bentang terdapat gelagar melintang (cross girder) sebagai tempat pengujian lendutan. Lantai kendaraan terbuat dari triplek dengan tebal 3 mm dan dibuat secara menerus yang terpisah dari balok pengikat namun menyatu dengan balok melintang. Diameter dari struktur pelengkung dan juga balok pengikat adalah 2 cm, diameter dari balok melintang adalah 1 cm, diameter bresing adalah 1cm yang terbuat dari rotan dan ditempatkan di daerah busur dengan jumlah dan letak yang bergantung dari hasil perhitungan numerical.



Gambar 3. Model fisik jembatan busur

Beban pengujian menggunakan beban statis vertical seberat 10 kg yang diletakkan ditengah bentang secara bertahap setiap 2 kg dengan 2 alat pembaca LVDT/transducer yang diletakkan ditengah bentang masing-masing batang pengikat.

Kemudian dilakukan pengujian beban terhadap 2 model fisik yang memiliki variasi pada sambungan, yaitu sambungan pasak yang menggunakan ikatan rotan dan sambungan pasak takikan.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi bracing yang terletak pada bagian lengkung busur dan variasi sambungan. Sedangkan variabel tak bebas meliputi: kuat tekan, beban maksimum, kekakuan, kekuatan dan deformasi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Bahan Penyusun Jembatan Model

Jembatan yang digunakan sebagai benda uji saat pengujian menggunakan bahan berupa rotan. Untuk mengetahui karakteristik dari rotan tersebut dilakukan analisis dari tiga pengujian yang dilakukan di Laboratorium Struktur Universitas Brawijaya, meliputi:

a. Analisis hasil penimbangan

Sampel rotan berdiameter 2 cm dan panjang 7 cm. Dari hasil pengujian, diketahui data sebagai berikut:

- Massa jenis sebesar $0,797 \text{ gr/cm}^3$
- Modulus elastisitas sebesar $12256,297 \text{ MPa}$

b. Analisis hasil pengujian kuat tekan rotanTohiti

Digunakan dua sampel rotan dengan diameter 2 cm dan panjang 4 cm. Untuk nilai poisson ratio rotan didapatkan sebesar 0,153.

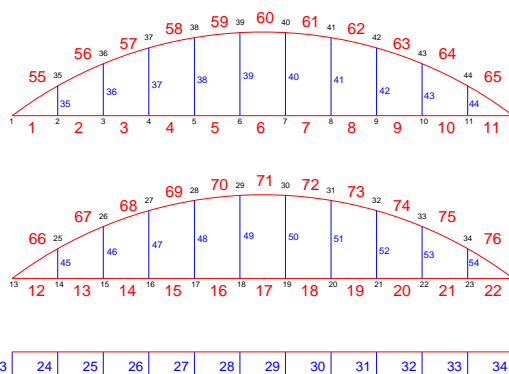
c. Analisis hasil pengujian kadar air rotanTohiti

Pengujian kadar air dilakukan dengan 2 metode, yaitu menggunakan alat *moisture meter* dan menggunakan oven. Dari hasil pengujian, diperoleh persentase kadar air sampel rotan rata-rata sebesar 17,18%.

4.2. Analisis Kekuatan Model Secara Teoritis

Analisa jembatan model secara teoritis seperti analisa lendutan pada setiap buhul dan gaya batang dilakukan dengan menggunakan program komputer SAP2000. Terdapat beberapa kelemahan dalam penggunaan SAP2000 dalam penelitian ini, seperti diabaikannya penggunaan triplek 3 mm sebagai lantai jembatan, kehilangan luas pada setiap buhul, dan penggunaan tali rotan.

Material yang digunakan dalam analisa struktur adalah rotan yang sama dengan benda uji yaitu rotan Tohiti. Karena tidak terdapat pilihan material rotan tohiti dalam SAP2000, maka sifat-sifat mekanik material rotan Tohiti yang telah diuji, meliputi modulus elastisitas, massa jenis dan Poisson ratio. Penomoran jembatan model dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Penomoran jembatan model

4.2.1. Analisis Lendutan Jembatan Model

Analisis program SAP2000 terhadap lendutan jembatan menunjukkan lendutan terbesar yaitu sebesar 0,393mm. Hasil tersebut merupakan rata-rata dari lendutan dari tengah-tengah batang 6 dan 17. Hasil analisis juga menunjukkan tidak terdapat perbedaan lendutan pada batang 6 dan 17 pada setiap pembebanan.

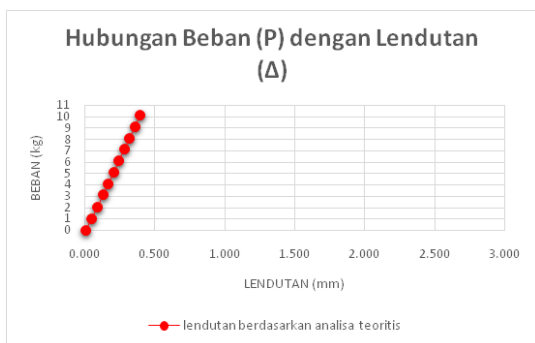
Untuk kenaikan lendutan, pada setiap penambahan beban kenaikan lendutan yang terjadi hampir selalu bersifat konstan. Perbedaan penambahan lendutan terdapat pada pembebanan pertama sampai ketiga. Hal ini karena pada tahap pembebanan tersebut beban yang digunakan berbeda dibandingkan dengan tahap pembebanan lainnya yaitu sebesar 1,05kg. Kenaikan lendutan diperoleh dengan mencari selisih antara suatu nilai lendutan dengan nilai lendutan sebelumnya. Hasil lengkap lendutan dan kenaikan lendutan dapat ditampilkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Kenaikan lendutan jembatan model secara teoritis

Beban (kg)	Lendutan rata-rata (mm)	Kenaikan lendutan (mm)
0	0,000	0,000
1,05	0,047	0,047
2,10	0,087	0,040
3,15	0,127	0,040
4,15	0,165	0,038
5,15	0,203	0,038
6,15	0,241	0,038
7,15	0,279	0,038
8,15	0,317	0,038
9,15	0,355	0,038
10,15	0,393	0,038

Sumber: hasil penelitian

Kenaikan lendutan yang hampir selalu bersifat konstan menghasilkan grafik beban terhadap lendutan yang bersifat linear. Grafik linear menunjukkan tidak adanya penurunan kemampuan jembatan akibat penambahan beban. Hal ini karena pada analisa menggunakan SAP2000 jembatan diasumsikan sempurna atau tanpa kekurangan seperti kehilangan luasan pada setiap join akibat sambungan atau kemungkinan sisi kiri dan kanan jembatan yang tidak simetris. Grafik hubungan beban terhadap lendutan dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Grafik hubungan antara beban (P) terhadap lendutan (Δ) secara teoritis

Sumber: hasil penelitian

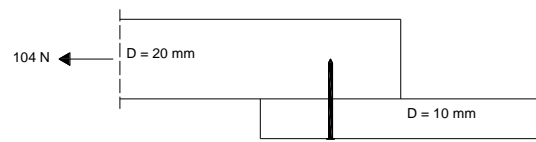
4.2.2. Gaya Batang Jembatan Model secara Teoritis

Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengetahui kebutuhan sambungan dalam perencanaan sambungan secara teoritis. Gaya batang terbesar terjadi pada kombinasi pembebanan 1,2D + 1,6L. Gaya tekan terbesar terjadi pada batang 59 sebesar 104 N Sedangkan untuk gaya Tarik yang terbesar terjadi pada batang 6 yaitu sebesar 103 N. Nilai gaya batang yang digunakan untuk perencanaan sambungan disini merupakan gaya batang akibat pembebanan 10 kg.

4.3. Analisis Sambungan Jembatan Model berdasarkan Teoritis

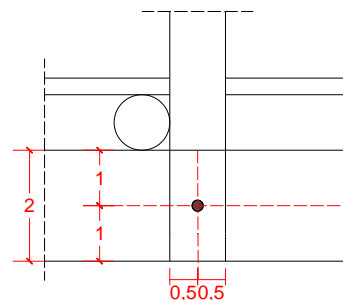
4.3.1. Analisis Sambungan Paku

Analisa terhadap dimensi dan jumlah sambungan paku bertujuan untuk mengetahui kesesuaian antara sambungan paku secara teoritis dengan saat pengujian. Model sambungan pakunya digambarkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Sambungan paku pada rotan Tohiti

Berdasarkan analisis yang sudah dilakukan, diperlukan 1 buah paku dengan panjang 20 mm dan diameter 1,23 mm pada setiap buhul jembatan model. Sedangkan penempatan alat sambung paku berdasarkan perhitungan teoritis dapat dilihat pada **Gambar 7** berikut.

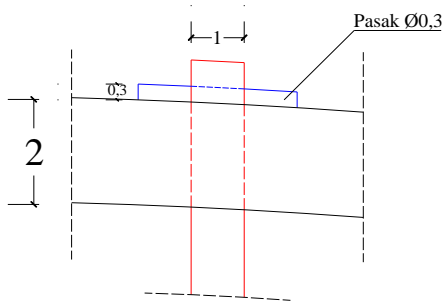


Ket: Satuan gambar dalam cm

Gambar 7. Penempatan alat sambung paku

4.3.2. Analisis Sambungan Pasak

Analisa terhadap kebutuhan sambungan pasak bertujuan untuk mengetahui kesesuaian antara sambungan pasak berdasarkan teoritis dengan saat pengujian. Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, digunakan 1 buah sambungan pasak dengan penampang O berdiameter 3 mm untuk setiap buhul jembatan.



Ket: Satuan gambar dalam cm

Gambar 8. Penempatan alat sambung pasak pada buhul jembatan

4.4. Kekuatan Jembatan Model Sambungan Pasak Berdasarkan Pengujian

Analisa kekuatan jembatan model berdasarkan pengujian bertujuan untuk mengetahui kemampuan sesungguhnya jembatan dalam menahan beban yang bekerja. Perbedaan analisa berdasarkan pengujian dengan teoritis terletak pada kondisi benda uji pada pengujian yang tidak sempurna berdasarkan teoritis, seperti dalam hal simetrisitas. Jembatan model menggunakan sambungan pasak dengan diameter 3 mm dan panjang 3 cm pada setiap joint kecuali pada sambungan antara pelengkung jembatan dengan balok pengikat. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban sebanyak 10 kali pembebanan dengan penambahan beban sebesar 1,05 kg pada pembebanan pertama sampai ketiga dan sebesar 1,00 kg pada pembebanan keempat sampai terakhir.

Analisis kekuatan yang dilakukan adalah dengan melakukan pengujian untuk lendutan maupun kenaikan lendutan serta menghitung kekakuan strukturnya.

4.4.1. Lendutan Jembatan Model Sambungan Pasak

Ketika jembatan model menerima beban, beban akan disalurkan dari balok pengikat sampai ke pelengkung jembatan yang dihubungkan oleh sambungan. Besarnya lendutan berbanding lurus dengan kualitas sambungan yang dalam hal ini menggunakan pasak. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, lendutan terbesar yang terjadi sebesar 1,898 mm. Hasil ini merupakan lendutan rata-rata sisi kiri dan kanan jembatan. Hasil lengkap lendutan jembatan busur akibat pembebanan ditampilkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Lendutan rata-rata jembatan busur sambungan pasak

Beban (kg)	Lendutan (mm)		Rata-rata (mm)
	DIAL 1	DIAL 2	
0,00	0,000	0,000	0,000
1,05	0,230	0,200	0,215
2,10	0,440	0,450	0,445
3,15	0,610	0,610	0,610
4,15	0,820	0,805	0,813
5,15	0,975	0,970	0,973
6,15	1,155	1,150	1,153
7,15	1,330	1,330	1,330
8,15	1,520	1,520	1,520
9,15	1,690	1,700	1,695
10,15	1,885	1,910	1,898

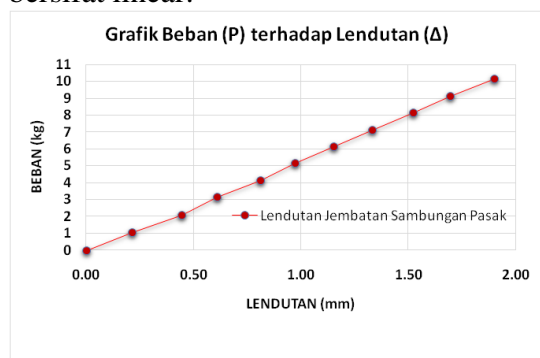
Hasil pengujian menunjukkan lendutan pada sisi kiri dan kanan tidak sama. Hal ini karena kondisi jembatan pada kedua sisi tidak sama persis dari segi kualitas sambungan terutama sambungan pada pelengkung jembatan. Pada dial 1 atau sisi kiri jembatan, terdapat 5 buah sambungan pada pelengkung jembatan yang tidak sempurna sedangkan pada dial 2 atau sisi kanan jembatan terdapat 9 buah.

Selain sambungan, tidak simetrisnya sisi kiri dan kanan jembatan mengakibatkan beban tidak terdistribusi secara merata sehingga menghasilkan lendutan yang berbeda pada tiap sisinya. Sedangkan hasil lengkap lendutan dan kenaikan lendutan dapat ditampilkan pada **Tabel 3** berikut.

Tabel 3. Kenaikan lendutan jembatan busur sambungan pasak

Beban (kg)	Lendutan Rata-Rata (mm)	Kenaikan Lendutan (mm)
0,00	0,000	0,000
1,05	0,215	0,215
2,10	0,445	0,230
3,15	0,610	0,165
4,15	0,813	0,203
5,15	0,973	0,160
6,15	1,153	0,180
7,15	1,330	0,178
8,15	1,520	0,190
9,15	1,695	0,175
10,15	1,898	0,203

Kenaikan lendutan yang tidak bersifat konstan menunjukkan kinerja sambungan pasak yang tidak konsisten dalam menahan beban, seperti adanya penurunan atau peningkatan kinerja sambungan paku dalam menahan beban. Penurunan kenaikan lendutan dapat diartikan sebagai peningkatan kinerja sambungan pasak sedangkan peningkatan kenaikan lendutan dapat diartikan sebagai penurunan kinerja sambungan pasak. Dari **Gambar 9** dapat dilihat bahwa grafik beban terhadap lendutan hasil pengujian jembatan model sambungan pasak tidak benar-benar bersifat linear.



Gambar 9. Grafik hubungan beban (P) terhadap lendutan (Δ) jembatan busur sambungan pasak

4.4.2. Analisis Kekakuan Jembatan Model Sambungan Pasak

Analisa terhadap kekakuan jembatan dilakukan untuk mengetahui besarnya gaya

atau beban (kg) yang diperlukan untuk merubah bentuk atau menggeser sebesar satuan tertentu (mm). Dalam penelitian ini kekakuan yang dibahas terbatas pada kekakuan balok pengikat karena lendutan yang digunakan dalam penelitian ini hanya lendutan pada balok pengikat jembatan. Nilai kekakuan selalu berbanding terbalik dengan lendutan.

Contoh pada pembebanan kesepuluh lendutan yang terjadi sebesar 1,898 mm. Dari beban dan lendutan tersebut diperoleh kekakuan sebesar 5,349 kg/mm. 5,349 kg/mm berarti diperlukan gaya sebesar 5,349 kg untuk menggeser balok pengikat jembatan sepanjang 1mm. Kekakuan terkecil terdapat pada pembebanan kedua yaitu sebesar 4,719 kg/mm. Sedangkan kekakuan terbesar terdapat pada pembebanan kesembilan yaitu sebesar 5,398 kg/mm. Hasil lengkap kekakuan jembatan busur sambungan pasak dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Kekakuan jembatan busur sambungan pasak

Beban (kg)	Lendutan Rata-Rata (mm)	Kekakuan Jembatan (kg/mm)
0,00	0,000	-
1,05	0,215	4,884
2,10	0,445	4,719
3,15	0,610	5,164
4,15	0,813	5,108
5,15	0,973	5,296
6,15	1,153	5,336
7,15	1,330	5,376
8,15	1,520	5,362
9,15	1,695	5,398
10,15	1,898	5,349

4.5. Kekuatan Jembatan Model Sambungan Paku Berdasarkan Pengujian

Jembatan model menggunakan sambungan paku dengan diameter 1,23 mm dan panjang 2 cm pada setiap joint kecuali pada sambungan antara pelengkung jembatan dengan balok pengikat.

4.5.1. Lendutan Jembatan Model Sambungan Paku

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, lendutan terbesar yang terjadi yaitu 2,550 mm. Lendutan ini merupakan lendutan rata-rata sisi kiri dan kanan jembatan. Hasil lengkap lendutan jembatan busur akibat pembebanan ditampilkan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Lendutan rata-rata jembatan busur sambungan paku

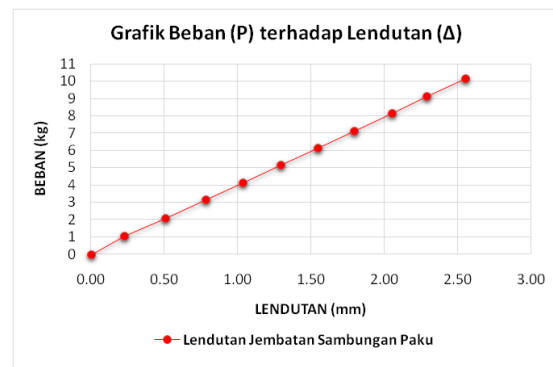
Beban (kg)	Lendutan (mm)		Rata-rata (mm)
	DIAL 1	DIAL 2	
0,00	0,000	0,000	0,000
1,05	0,292	0,165	0,229
2,10	0,650	0,370	0,510
3,15	0,940	0,620	0,780
4,15	1,195	0,880	1,038
5,15	1,445	1,140	1,293
6,15	1,690	1,400	1,545
7,15	1,940	1,650	1,795
8,15	2,160	1,940	2,050
9,15	2,360	2,210	2,285
10,15	2,610	2,490	2,550

Berdasarkan tabel tersebut, pada dial 1 atau sisi kiri jembatan busur lendutan yang dihasilkan pada setiap tahap pembebanan selalu lebih besar dibandingkan dial 2 atau sisi kanan jembatan. Meskipun kecil kemungkinan, tetapi ini diakibatkan oleh pemasangan sambungan pada sisi kiri jembatan tidak sebaik sisi kanan jembatan.

Sedangkan untuk kenaikan lendutan ditampilkan pada **Tabel 6**. Kenaikan lendutan yang tidak bersifat konstan menunjukkan kinerja sambungan paku yang tidak konsisten dalam menahan beban, seperti adanya penurunan atau peningkatan kinerja sambungan paku dalam menahan beban.

Tabel 6. Kenaikan lendutan jembatan busur sambungan paku

Beban (kg)	Lendutan Rata-Rata (mm)	Kenaikan Lendutan (mm)
0,00	0,000	0,000
1,05	0,229	0,229
2,10	0,510	0,282
3,15	0,780	0,270
4,15	1,038	0,258
5,15	1,293	0,255
6,15	1,545	0,253
7,15	1,795	0,250
8,15	2,050	0,255
9,15	2,285	0,235
10,15	2,550	0,265



Gambar 10. Grafik hubungan beban (P) terhadap lendutan (Δ) jembatan busur sambungan paku

4.5.2. Analisis Kekakuan Jembatan Model Sambungan Paku

Tabel 7. Kekakuan jembatan busur sambungan paku

Beban (kg)	Lendutan Rata-Rata (mm)	Kekakuan Jembatan (kg/mm)
0,00	0,000	-
1,05	0,229	4,595
2,10	0,510	4,118
3,15	0,780	4,038
4,15	1,038	4,000
5,15	1,293	3,985
6,15	1,545	3,981
7,15	1,795	3,983
8,15	2,050	3,976
9,15	2,285	4,004
10,15	2,550	3,980

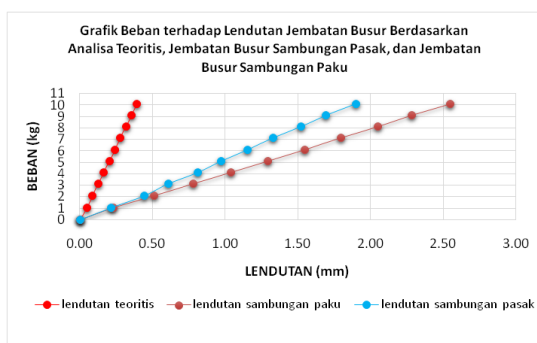
Hasil lengkap kekakuan jembatan busur sambungan paku dapat dilihat pada **Tabel 7** berikut.

4.6. Perbandingan Kekuatan Jembatan Secara Teoritis dengan Jembatan Busur Sambungan Pasak dan Jembatan Busur Sambungan Paku

Perbandingan kekuatan yang dimaksud dalam penelitian ini adalah perbandingan lendutan dan kekakuan. Perbandingan kekuatan antara jembatan busur secara teoritis dengan jembatan busur sambungan pasak dan jembatan busur sambungan paku bertujuan untuk mengetahui sambungan manakah diantara pasak dan paku yang lebih mendekati analisa teoritis. Perbandingan ini juga bertujuan untuk mengetahui sambungan manakah yang lebih baik dalam menahan beban.

4.6.1. Perbandingan Lendutan Jembatan

Perbandingan lendutan jembatan busur dibatasi pada lendutan pada tempat diletakkannya *dial gauge*, yaitu pada tengah-tengah balok pengikat jembatan. **Gambar 11** menunjukkan perbandingan lendutan jembatan busur secara teoritis, jembatan busur sambungan paku, dan sambungan pasak.



Gambar 11. Perbandingan grafik beban terhadap lendutan

Berdasarkan **Gambar 11**, dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan nilai lendutan yang besar antara jembatan busur secara teoritis dengan jembatan busur sambungan paku dan jembatan busur

sambungan pasak. Dimana pada pembebanan pertama, lendutan jembatan busur secara teoritis yang terjadi hanya sebesar 0,047 mm. Sedangkan lendutan jembatan busur sambungan pasak dan paku masing-masing sebesar 0,215 dan 0,229 mm atau hampir 4 kali lipat lendutan teoritis. Besarnya perbedaan lendutan tersebut diakibatkan oleh perbedaan asumsi jembatan busur secara teoritis yang diasumsikan sempurna dengan jembatan busur yang digunakan dalam pengujian yang tidak sempurna.

Sedangkan untuk jembatan busur sambungan pasak dan jembatan busur sambungan paku, perbedaan lendutan terlihat jelas ketika memasuki pembebanan keempat. Lendutan yang terjadi pada jembatan busur sambungan pasak pada pembebanan keempat yaitu sebesar 0,813 mm, sedangkan untuk jembatan busur sambungan paku sebesar 1,038 mm atau lebih besar 0,225 mm. Selain itu juga terlihat bahwa pada pembebanan selanjutnya, nilai lendutan jembatan busur sambungan paku selalu lebih besar dibandingkan sambungan pasak. Dari massa jembatan, diperoleh rasio massa terhadap lendutan jembatan busur sambungan pasak sebesar 0,685, sedangkan jembatan busur sambungan paku sebesar 0,431. Semakin besar rasio maka semakin baik pula jembatan busur.

4.6.2. Perbandingan Kekakuan Jembatan

Perbandingan kekakuan antara jembatan busur sambungan pasak dengan jembatan busur sambungan paku dilakukan untuk mengetahui jembatan yang memiliki kekakuan paling baik. Kekakuan yang dibandingkan terbatas hanya pada kekakuan pada balok pengikat jembatan. Hal ini karena lendutan yang digunakan untuk mencari nilai kekakuan merupakan lendutan pada balok pengikat jembatan.

Perbandingan dilakukan dengan membandingkan nilai kekakuan masing-masing jembatan yang telah dibahas sebelumnya dalam bentuk tabel. Berikut

ditampilkan kekakuan masing-masing jembatan pada setiap tahap pembebanan dalam **Tabel 8**.

Tabel 8. Perbandingan Kekakuan Jembatan Busur Sambungan Pasak dan Sambungan Paku

Beban (kg)	Kekakuan Jembatan (kg/mm)	
	Sambungan Pasak	Sambungan Paku
0,00	-	-
1,05	4,884	4,595
2,10	4,719	4,118
3,15	5,164	4,038
4,15	5,108	4,000
5,15	5,296	3,985
6,15	5,336	3,981
7,15	5,376	3,983
8,15	5,362	-
9,15	5,398	4,595
10,15	5,349	4,118

Berdasarkan tabel tersebut, pada setiap tahap pembebanan, jembatan busur sambungan pasak selalu menunjukkan kekakuan yang lebih besar dibandingkan jembatan busur sambungan paku. Hal ini karena nilai kekakuan batang berbanding terbalik dengan lendutan jembatan dan menunjukkan bahwa lendutan jembatan busur sambungan pasak lebih kecil dibandingkan jembatan busur sambungan paku pada setiap tahap pembebanan. Pada pembebanan kesepuluh, kekakuan jembatan busur sambungan pasak sebesar $5,349 \text{ kg/mm}^2$ atau 34,39 % lebih besar dibandingkan kekakuan jembatan busur sambungan paku yang hanya sebesar $3,980 \text{ kg/mm}^2$. Nilai kekakuan yang lebih besar menunjukkan bahwa dibutuhkan beban yang lebih besar untuk menggeser balok pengikat jembatan busur sambungan pasak sejauh 1 mm dibandingkan jembatan busur sambungan paku.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian berupa pembahasan data dan analisis yang telah dilakukan untuk mengetahui variasi

sambungan struktur jembatan busur terhadap lendutan dapat ditarik kesimpulan:

- Lendutan yang dihasilkan kedua benda uji jembatan busur berbeda, dimana lendutan akhir jembatan busur sambungan pasak 25,57 % atau sekitar 0,652 mm lebih kecil pada balok pengikat jembatan dibandingkan jembatan busur sambungan paku.
- Kekakuan yang dihasilkan kedua benda uji jembatan busur adalah berbeda, dimana kekakuan jembatan busur sambungan pasak dengan nilai lendutan yang lebih kecil menghasilkan kekakuan yang lebih baik dibandingkan jembatan busur sambungan paku. Kekakuan jembatan busur sambungan pasak pada tahap pembebanan akhir sebesar $5,349 \text{ kg/mm}^2$ atau 34,39 % lebih besar dibandingkan kekakuan jembatan busur sambungan paku yang hanya sebesar $3,980 \text{ kg/mm}^2$.
- Sambungan yang digunakan pada benda uji jembatan busur sesuai dengan perencanaan sambungan secara teoritis. Perencanaan sambungan pasak dengan diameter 3 mm memenuhi persyaratan PKKI 1961. Sedangkan perencanaan sambungan paku dengan panjang 20 mm dan diameter 1,23 mm memenuhi persyaratan SNI 7973-2013.

Beberapa saran yang direkomendasikan oleh peneliti untuk penelitian serupa yang akan datang:

- Jumlah benda uji yang digunakan untuk setiap jenis sambungan disarankan lebih banyak untuk mendapatkan data yang lebih akurat.
- Dusahakan kualitas benda uji yang digunakan sebaik mungkin baik dari segi simetrisitas kedua sisi jembatan dan kualitas sambungan agar data yang diperoleh lebih akurat dan tidak jauh berbeda dari hasil analisa teoritis.
- Beban yang digunakan pada saat pengujian akan lebih baik jika intervalnya dari tahap awal

- pembebanan sampai akhir tetap sama untuk memudahkan Analisa lendutan.
- d. Disarankan menggunakan material lain terutama material yang bukan merupakan bahan alam seperti rotan. Hal ini karena material seperti rotan akan lebih cepat menurun kualitasnya seiring berjalannya waktu dan kecil kemungkinan untuk menemukan diameter rotan yang benar-benar sesuai dengan rancangan benda uji.

DAFTAR PUSTAKA

- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2011.
Pemeliharaan Jembatan Pelengkung Baja. Jakarta: Pekerjaan Umum.
- Hibbeler, R. C. 2002. *Structural Analysis*. In R. C. Hibbeler, *Structural Analysis*.
- RSNI-T-03. 2005. *Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Supriyadi, B., & Muntohar, A. S. 2007. *Jembatan*. Yogyakarta: Beta Offset.