

KAJIAN DASAR PERENCANAAN DAN PELAKSANAAN JEMBATAN PELENGKUNG BETON (DESIGN AND CONSTRUCTION EVALUATION OF CONCRETE ARCH BRIDGE TECHNOLOGY)

Lanneke Tristanto¹⁾, Redrik Irawan²⁾

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan^{1,2)}
Jl. A.H. Nasution 264 Bandung 40294
E-mail: lanneketristanto@gmail.com¹⁾, redsward@gmail.com²⁾
Diterima : 06 Mei 2010; Disetujui : 10 Agustus 2010

ABSTRAK

Lengkung pada struktur jembatan pelengkung terutama merupakan unsur tekan dengan bentuk kurvalinier parabolis. Sebagian besar dari beban terbagi rata dan muatan bergerak dipikul melalui gaya tekan yang dilimpahkan dalam reaksi tekan horizontal yang besar (thrust) di pangkal lengkung. Gaya tekan mencegah dan mengurangi tegangan tarik dalam lengkung beton selama dilewati beban kendaraan. Jembatan pelengkung beton lama masih bertahan walaupun pembebanan telah meningkat karena unsur tekan memiliki kapasitas cadangan. Jembatan pelengkung menghemat 15% volume beton dibanding jembatan gelagar lurus sehingga ekonomis dalam dimensi dan penulangan. Jembatan pelengkung menurut pelimpahan reaksi tekan horizontal dibagi dalam dua tipe, tipe lengkung kaku yang langsung melimpahkan reaksi tekan pada tanah fondasi sangat baik, dan tipe lengkung diperkaku dengan batang tarik struktural untuk memikul reaksi tekan dan demikian sesuai pada tanah fondasi kurang baik. Sistem monolitik antara bangunan atas dan bawah dengan jumlah sendi plastis mendukung ketahanan terhadap gempa. Pelaksanaan jembatan pelengkung selalu memerlukan perancah yang dibongkar setelah lengkung selesai tersambung dan terbentuk garis tekan. Lengkung yang tidak tersambung sempurna akan runtuh pada saat perancah dibuka. Bentang maksimum jembatan pelengkung beton bertulang 90m efisien terhadap bentang maksimum gelagar beton prategang 45m. Jembatan pelengkung beton bertulang komposit dengan rangka/profil baja sebagai perancah maupun tulangan mencapai bentang (90-245)m.

Kata kunci : jembatan pelengkung, lengkung kaku, lengkung diperkaku, reaksi tekan horizontal, garis tekan

ABSTRACT

The arch of an arch bridge structure is mainly a compression member with curved linier parabolic shape. A great part of the uniform and moving loads is carried by compression forces that are transmitted to the arch abutment as a large thrust force. Compression forces prevent and reduce concrete tensioning due to traffic passage on the bridge. Existing old arch bridges still resist the increasing vehicle loads due to reserve capacity of the compression member. Arch bridges reduce 15% concrete volume compared to straight girder bridges, so they are economical in dimension and reinforcement. Arch bridges are classified into two types according to the thrust force transmission. The rigid arch type is optimal for very good soil conditions as the thrust force is directly transmitted to very good foundation soil. The stiffened arch type is suitable for deep foundation condition as the thrust force is carried by the structural tie beam. The monolithic system between super and sub structures with the number of plastic hinges improve the earthquake resistance. The construction of

arch bridges always involves the need for formwork that is removed after the arch is connected and the compression line has been formed. An improperly connected arch will fail at the time of formwork removal. The maximum reinforced concrete arch span 90m is efficient compared to the maximum prestressed concrete girder span 45m. Composite reinforced concrete arch bridges with steel truss/profile for scaffolding as well reinforcement reach (90-245)m span.

Key words : *arch bridge, rigid arch, stiffened arch, thrust, compression line*

PENDAHULUAN

Jembatan pelengkung menurut pelimpahan reaksi tekan horizontal (*thrust*) dibagi dalam dua tipe (ACI, 1996). Untuk mencapai penghematan biaya optimal, reaksi tekan horizontal di pangkal lengkung harus langsung dipikul oleh tanah fondasi sangat baik seperti batuan/batu pasir. Tipe ini merupakan lengkung murni atau lengkung kaku dan paling ekonomis (Gambar 1a).

Pada tanah fondasi kurang baik, digunakan jembatan gelagar lengkung diperkaku dengan batang tarik untuk memikul reaksi tekan horizontal. Tipe ini dikenal sebagai jembatan gelagar *Langer* dan merupakan struktur statis tertentu keluar (Gambar 1b).

Lengkung berbentuk kurvalinier parabolis atau terbagi dalam beberapa segmen lurus yang masing-masing berujung pada fungsi parabola, yang merupakan bentuk terbaik untuk memikul sebagian besar dari beban mati dan hidup melalui garis tekan. Makalah ini membahas dasar perencanaan dan pelaksanaan serta aspek ekonomis dengan fokus pada tipe lengkung murni.

KAJIAN PUSTAKA

Tipe gelagar lengkung kaku

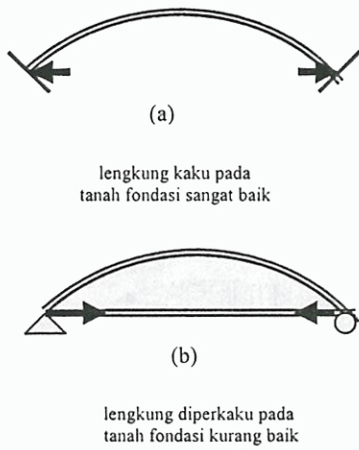
- **Tipe lengkung rantai urug**

Lengkung pasangan batu/bata dengan ikatan gigi dan mortar mempunyai kuat geser dan kuat tekan tetapi tidak dapat menahan tarik. Lengkung pasangan batu diisi dengan tanah urug/brangkal. Makin berat beban mati makin besar gaya tekan, yang mencegah

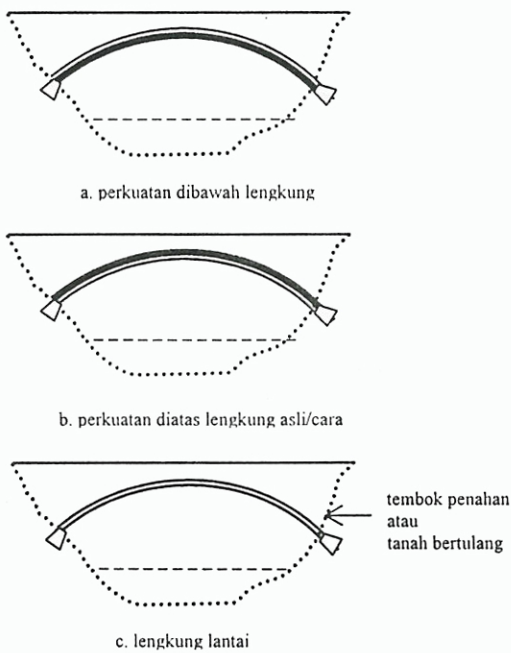
terjadinya tegangan tarik dalam lengkung selama dilewati beban kendaraan. Mengingat struktur yang berat memerlukan fondasi yang besar, maka lengkung pasangan batu lebih sesuai untuk bentang pendek. Lengkung pasangan batu yang pernah dibangun dengan ketrampilan dan tenaga sangat intensif ternyata bertahan lebih dari 100 tahun. Banyak jembatan pelengkung pasangan batu berada dalam kondisi kritis dan perkuatan dilakukan dengan menambah lengkung beton bertulang di bawah (Gambar 2a) lengkung asli/lama (Ou and Chen, 2007) atau diatas (Gambar 2b) lengkung asli/ lama setelah urugan dibongkar yang disebut cara pelana/*saddle/novel method* (Brooks, 1999). Untuk menghemat waktu dan biaya dalam pembangunan jembatan baru, akan lebih ekonomis dan efisien untuk membangun lengkung beton bertulang.

Tipe lengkung rantai urug hanya digunakan untuk bentang pendek 15m-30m (ACI, 1996). Pada bentang lebih besar (maksimum 60m), berat tanah urug meningkat dan menyebabkan tegangan terlalu besar. Drainase perlu dijaga agar berat tanah tidak bertambah dengan berat air, yang menjadi beban mati tambahan diluar rencana. Tipe ini hanya digunakan pada lembah landai, dengan demikian tinggi tanah urug juga kecil.

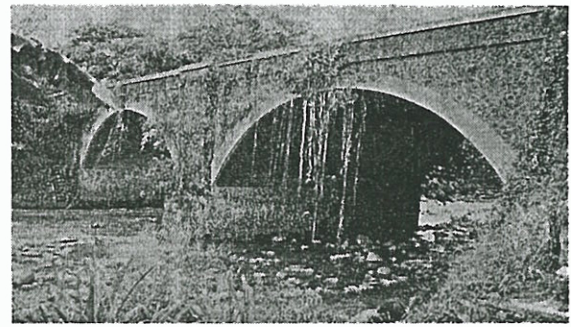
Gelagar merupakan pelat penuh dengan dinding penahan sebelah kiri dan kanan, yang sering dibuat dari sistem tanah bertulang agar lebih estetik selain mengijinkan drainase melalui sela antara panel penutup (Gambar 2 c). Perletakan umumnya berupa jepit.



Gambar 1. Tipe lengkung berdasarkan pelimpahan reaksi tekan horizontal



Jembatan tipe pelengkung dari pasangan batu

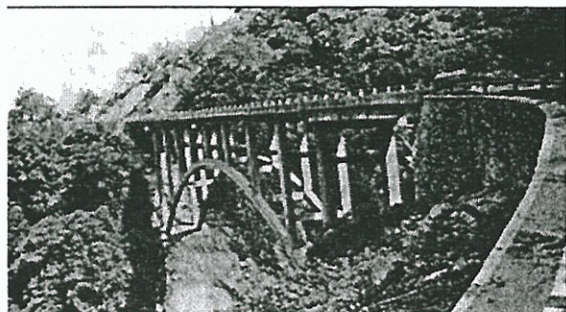
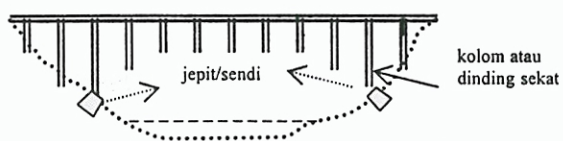


Gambar 2. Tipe lengkung lantai urug (jembatan pelengkung lama)

• **Tipe lengkung terbuka**

Tipe ini digunakan untuk bentang 30m-90m (ACI, 1996) dengan kolom yang memikul lantai kendaraan (Gambar 3). Lengkung umumnya berupa balok/rib (minimal dua rib) atau pelat dengan dimensi mengecil ke arah puncak. Gelagar lengkung maupun gelagar lantai diperkaku dengan diafragma dalam arah melintang jembatan, yang tidak diperlukan pada tipe pelat lengkung. Lebar pelat lengkung mengikuti lebar lantai kendaraan yang dikurangi dengan lebar kantilever trotoar. Dimensi kecil di puncak lengkung mengurangi pengaruh temperatur, momen dan gaya tekan akibat beban mati. Kolom sebagai penyalur beban lantai pada lengkung berupa penampang persegi atau bulat (minimal dua kolom) atau dinding sekat dalam arah melintang jembatan. Jembatan pelengkung beton bertulang dengan tipe lengkung terbuka telah dibangun secara intensif dengan bentang utama 30m sampai 60m di Sulawesi Selatan (Rasul, 2006), dan dengan bentang utama 90m dibangun pada jembatan Kelok 9, Sumatra Barat (Vaza, 2008).

Perletakan jepit sering digunakan. Perletakan dua sendi memerlukan pendetailan khusus agar sendi tidak terlepas dari dudukan. Pada sistem dua sendi digunakan dimensi balok lengkung yang konstan. Pelat lengkung pada perletakan dua sendi tidak lajim. Sistem lengkung tiga sendi jarang digunakan.

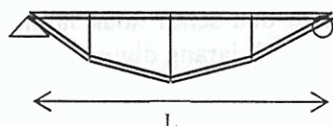


Gambar 3. Tipe lengkung terbuka (Jembatan Besok Koboan, bentang utama 80m, total 125m)

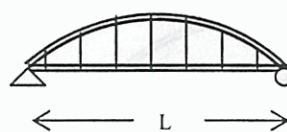
Tipe gelagar lengkung diperkaku

Tipe gelagar lengkung diperkaku yang dikenal sebagai gelagar *Langer* (ACI, 1996) digunakan bila letak batuan dasar dalam dan memerlukan pondasi tiang. Pada tipe ini bangunan atas dan bangunan bawah terpisah dengan perletakan. Gelagar lantai berupa gelagar kaku memanjang dan lengkung berada diatas gelagar lantai. Dengan demikian tipe ini bermanfaat bila ruang bebas dibawah jembatan kurang besar.

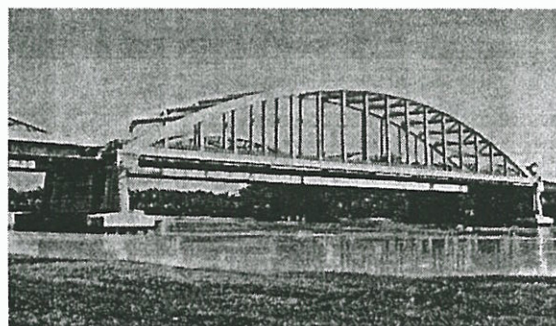
Jembatan lengkung diperkaku dapat dibuat dengan lengkung keatas (tipe lantai bawah/*through type* yang memerlukan jarak bebas vertikal minimum 5,5m untuk lalu lintas kendaraan) maupun dengan lengkung kebawah (tipe lantai atas/*deck type* yang memerlukan jarak bebas terhadap muka air banjir minimum 1m) dengan prinsip perhitungan serupa (Gambar 4). Tipe lengkung lantai atas/*deck type* sering dibuat seperti '*queen post*' karena keterbatasan jarak bebas dibawah jembatan .



a. tipe lantai atas / *decktype*



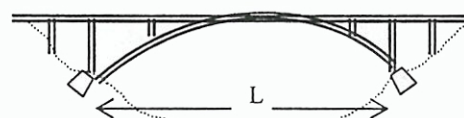
b. tipe lantai bawah/*through type*



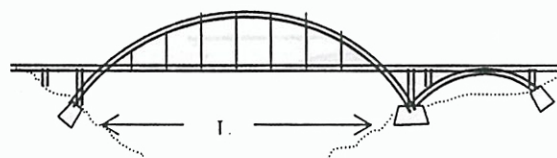
Gambar 4. Tipe lengkung diperkaku 'gelagar *Langer*' (Jembatan Serayu Cindaga baru, 90m)

Lengkung tipe lantai atas/bawah

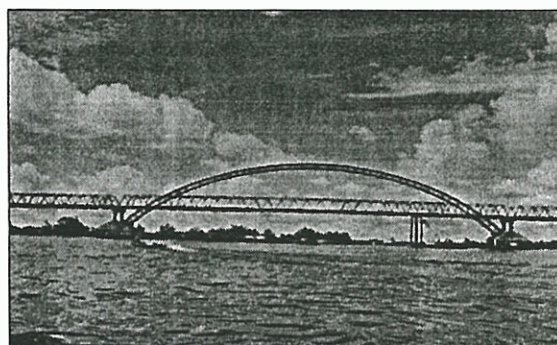
Sesuai ketinggian permukaan jalan, dibuat lengkung tipe lantai bawah/*through type* (Gambar 4b), tipe lantai atas/*deck type* (Gambar 4a dan 5a), atau tipe lantai bawah sebagian/*half-through* (Gambar 5b).



a. tipe lantai atas



b. tipe lantai bawah sebagian



Gambar 5. Lengkung tipe lantai atas dan lantai bawah sebagian (Jembatan Kahayan 150m)

HIPOTESIS

Jembatan pelengkung beton dapat mencapai bentang 90m dan bentang lebih panjang dicapai dengan beton bertulang komposit.

METODOLOGI

Dasar perencanaan, pelaksanaan dan perkembangan jembatan pelengkung tipe kaku dan diperkaku yang secara prinsip sama diuraikan secara umum dan terpisah. Analisis dan segi ekonomis tipe lengkung kaku/murni menjadi pokok pembahasan.

HASIL DAN ANALISIS

Dimensi lengkung kaku/murni

Lengkung umumnya pada perletakan jepit, dengan ketebalan awal lengkung sebesar 1,65 sampai 2 kali ($\sim L/20$) dari puncak lengkung ($\sim L/40$). Ketebalan rata-rata adalah $\sim L/30$ dan tinggi fokus $f \sim L/5$ (ACI, 1996). Penampang dibuat tetap untuk bentang pendek dan variabel untuk bentang sedang dan panjang.

Momen lengkung secara umum

Struktur lengkung terutama merupakan unsur tekan, sehingga momen lengkung (M) lebih kecil dari momen lentur gelagar sederhana (M_0).

$$M = M_0 - Hy \quad \dots\dots\dots \text{(Rumus 1)}$$

M : momen lengkung

M_0 : momen lentur pada asumsi gelagar

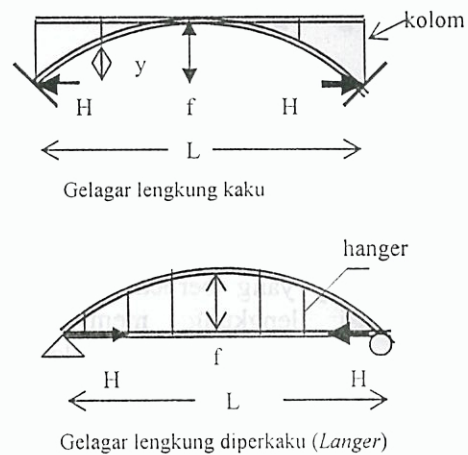
sedehana

H : reaksi tekan horizontal

Y : ordinat pada lengkung

Rasio fokus terhadap bentang lengkung (L) tergantung pada kondisi topografi dan persyaratan ruang bebas setempat. Makin tinggi fokus (f), makin kecil reaksi tekan horizontal (H) akibat beban mati dan momen akibat temperatur. Lantai kendaraan dipikul oleh kolom pada lengkung kaku dan hanger pada lengkung diperkaku (Gambar 6). Garis pengaruh untuk lengkung kaku/murni tipikal digambarkan dalam Tabel 1 (Tristanto, 1997).

Kapasitas cadangan unsur tekan diperoleh dari pengurangan momen oleh gaya tekan ($-Hy$) yang menghemat dimensi dan penulangan lengkung dibanding gelagar sederhana lurus.



Gambar 6. Tipe lengkung kaku dan diperkaku

Tabel 1. Contoh garis pengaruh H dan M di awal lengkung (0L), ¼ lengkung (1/4L), dan ½ lengkung (1/2L) untuk lengkung murni dengan bentang L 40m

x(m)	gp. H	gp. M(1/2L)	gp. M(1/4L)	gp. M(0L)
0	0	0	0	0
1.67	0.02606	-0.035	0.06414	-1.4065
3.34	0.09787	-0.12	0.24854	-2.321
5.01	0.2046	-0.232	0.56513	-2.8192
6.68	0.3359	-0.335	1.01386	-2.959
8.35	0.482	-0.4133	1.5946	-2.8053
10.02	0.633	-0.4355	2.3035	-2.4235
11.69	0.78	-0.378	1.4763	-1.8773
13.36	0.9138	-0.221	0.78106	-1.2339
15.03	1.0274	0.0638	0.20569	-0.5406
16.7	1.1145	0.4872	-0.2458	0.1472
18.37	1.1691	1.0653	-0.5815	0.778
20	1.1878	1.81	-0.813	1.312
21.67	1.1691	1.0653	-0.9455	1.722
23.34	1.1145	0.4872	-0.9938	1.9872
25.01	1.0274	0.0638	-0.9703	2.1074
26.68	0.9138	-0.221	-0.8949	2.0821
28.35	0.78	-0.378	-0.7837	1.9347
30.02	0.633	-0.4355	-0.6445	1.6805
31.69	0.482	-0.4133	-0.493	1.3587
33.36	0.3359	-0.335	-0.342	0.9924
35.03	0.2046	-0.232	-0.2108	0.6328
36.7	0.09787	-0.1202	-0.0995	0.3148
38.37	0.02606	-0.035	-0.0278	0.0856
40	0	0	0	0

x=(0-L)m gp H gp M1/2L gp M1/4L gp M0L

Bentangan lengkung murni dan fondasi

Bentang majemuk dari beberapa bentang lebih pendek akan ekonomis untuk sungai lebar dengan kondisi tanah sangat baik (Gambar 7a). Bentang lengkung tunggal digunakan untuk melintasi jurang yang dalam, dan dapat dibuat simetris atau antisimetris sesuai ketinggian tebing yang berbeda. Perbedaan tinggi fondasi lengkung mempengaruhi pembagian momen lentur dan lendutan lengkung, terutama akibat beban tidak simetris dan beban hidup. Perbedaan ketinggian perlu dibatasi sekitar 2m. Perletakan yang lebih rendah menerima kontribusi beban lebih besar (Gambar 7b).

Pada perletakan jepit bekerja reaksi tekan horisontal, vertikal dan momen. Reaksi disalurkan ke dasar balok fondasi yang dibuat tegak lurus pada gaya resultanta (Gambar 7b). Tanah harus stabil dan mampu memikul reaksi tekan horisontal. Cara ini lebih efisien dari telapak horisontal yang perlu pengecekan faktor keamanan terhadap geser (Gambar 7c) atau gigi penahan geser (Gambar 7d). Fondasi langsung dan tebing sekitarnya harus dilindungi dengan lantai turap. Perhitungan fondasi dilakukan secara manual dengan hasil reaksi tumpuan dari perhitungan

manual/perangkat lunak. Perhitungan fondasi dilakukan dalam keadaan batas daya layan, dengan asumsi tegangan tanah linier berbentuk segitiga. Dalam perhitungan keadaan batas ultimit, tegangan tanah berupa blok tegangan. Perhitungan fondasi dalam keadaan batas daya layan/linier memberi hasil konservatif/lebih aman (lihat cara perhitungan fondasi langsung pada Lampiran).

Pengaruh gempa pada lengkung murni

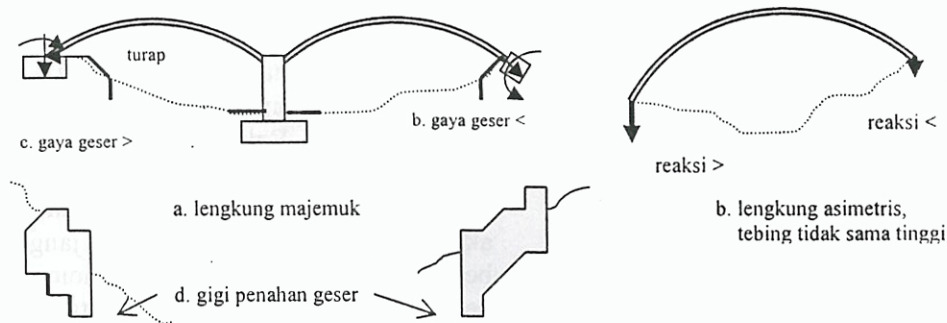
Program perangkat lunak diperlukan dalam analisis gempa karena memperhitungkan kerangka struktur sebagai kesatuan. Perhitungan kolom pinggir yang paling tinggi dalam arah melintang jembatan mengambil konsep *freebody*, dengan cara dua dimensi yang lebih konservatif dari tiga dimensi. Pengaruh gempa tidak menyebabkan peningkatan tegangan yang berarti pada lengkung dan gelagar lantai. Pengaruh gempa terutama terjadi pada kolom pendek untuk arah memanjang jembatan dan kolom panjang untuk arah melintang jembatan (Gambar 8). Sistem monolitik antara bangunan atas dan bawah, dan jumlah sendi plastis dalam kolom majemuk mendukung ketahanan gempa. Analisis gempa diasumsikan dengan gaya

gempa horizontal ekuivalen pada masing-masing titik berat segmen (SNI, 2005). Keruntuhan gempa umumnya terjadi karena kegagalan kolom sehingga ikatan antara kolom dan bangunan lengkung serta gelagar lantai harus menjadi kesatuan dengan meneruskan penulangan utama dan sengkang kolom kedalam lengkung dan gelagar. Perhitungan gempa statis ekuivalen merupakan analisis konservatif dibanding perhitungan dinamis.

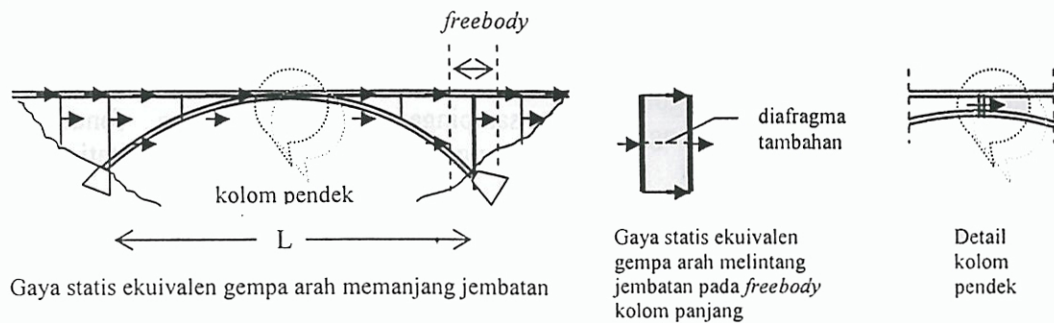
Perhitungan dua dimensi juga konservatif, karena kesatuan antara kekakuan memanjang dan melintang dalam analisis tiga dimensi memberikan momen perlawanan puntir sehingga struktur tertahan dalam gerakan dan nilai lendutan struktural menjadi kecil.

Pengaruh tipe perletakan sendi-jepit pada lengkung murni

Perbandingan antara gaya normal, geser dan momen untuk lengkung terjepit, dua sendi dan tiga sendi dibuat untuk beban hidup dan mati total, perbedaan penurunan fondasi 25mm, dan gempa statis ekuivalen dengan koefisien respon $k_h = 0,3$ untuk bentang lengkung 40m dirangkum dalam Tabel 2. (Tristanto, 1997). Penggunaan perletakan jepit atau sendi berpengaruh pada momen dalam lengkung dan gelagar lantai. Lengkung bersendi kurang peka terhadap penurunan fondasi dibanding lengkung terjepit. Pengaruh gempa pada kolom pendek tengah bentang hampir sama untuk lengkung terjepit atau bersendi.



Gambar 7. Tipe fondasi langsung, lengkung majemuk, lengkung asimetris



Gambar 8. Skema gaya gempa pada jembatan pelengkung

Tabel 2. Perbandingan gaya normal N(kN), geser S(kN), momen M(kNm), analisis arah memanjang

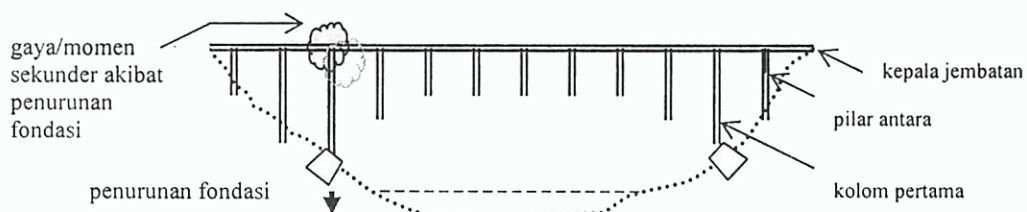
Bagian	Gaya normal Gaya geser Momen	Lengkung terjepit	Lengkung dua sendi	Lengkung tiga sendi
Gelagar lengkung	N S M	-2591 397 -1970 dan +565	-2664 214 -372 dan +753	-2647 212 -388 dan +758
Kolom tinggi pinggir	N S M	-505 222 185	-728 222 175	-731 238 205
Gelagar lantai	N S M	-294 345 -338 dan +406	-302 388 -635 dan +485	-297 389 -683 dan +433
Penurunan fondasi	M gelagar lantai	-978	-788	-796
Kolom pendek akibat gempa	N S M	-154 -221 130	-175 251 147	-135 130 149,5

Pengaruh penurunan fondasi pada kinerja lengkung murni

Struktur statis tak tentu seperti jembatan pelengkung peka terhadap penurunan fondasi. Penurunan fondasi diperhitungkan dan bila melebihi 25mm perlu diadakan perkuatan/penulangan tambahan untuk memikul gaya geser dan momen sekunder, yang terjadi tepat pada lokasi tumpuan yang menghubungkan lantai atas dengan kolom pertama di awal lengkung (Gambar 9). Tegangan terbesar terjadi dalam gelagar lantai dan bukan dalam gelagar lengkung. Bila terjadi penurunan secara bersamaan dari fondasi lengkung kiri dan kanan, maka momen sekunder terjadi secara simetris di bagian kiri dan kanan jembatan. Dalam praktek, momen sekunder yang bersifat sebagai momen negatif dapat ditanggulangi oleh tulangan pelat lantai kendaraan. Pengaruh sampingan dari penurunan fondasi juga menimbulkan gaya angkat pada kepala

jembatan yang terpukul oleh pilar antara bila lantai diperpanjang sampai menumpu diatas tebing dan kepala jembatan.

Penurunan fondasi langsung dalam tanah batu pasir pernah terjadi pada jembatan pelengkung beton bertulang terjepit Tukad Melangit di Bali (bentang 40m) dan menimbulkan goyangan/getaran sementara yang menghilang oleh penyebaran tegangan akibat rangkai-susut beton dalam jangka waktu beberapa bulan. Gaya geser/momen akibat penurunan fondasi dan beban total meningkat menjadi 468,9 kN/-376 kNm dalam gelagar lantai dan berangsur kembali ke normal 346kN/-319kNm akibat distribusi tegangan rangkai-susut (Tristanto, 1997). Proses rangkai-susut beton yang berlangsung sampai umur beton 9000 hari mereduksi efek sampingan dari penurunan fondasi yang menguntungkan kinerja struktur statis tak tentu.



Gambar 9. Pengaruh penurunan fondasi pada gelagar lantai

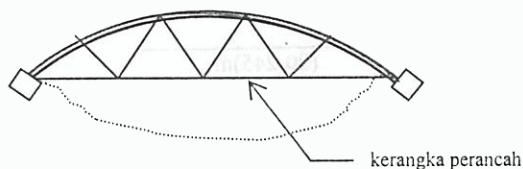
Pengaruh temperatur pada lengkung murni

Temperatur lingkungan rata-rata 25-30°Celsius dengan kelengasan udara 75-80%. Perbedaan temperatur/gradien sebesar 10 Celsius antara tepi atas dan tepi bawah lantai kendaraan lajim terjadi karena radiasi matahari. Peningkatan momen yang terjadi akibat kombinasi beban mati, beban hidup, susut dan rangkai serta gradien temperatur umumnya masih terpikul oleh struktur. Bila gradien temperatur terjadi pada lengkung, perubahan bentuk langsung dipikul oleh fondasi dan tidak terjadi tegangan lebih (ACI, 1996).

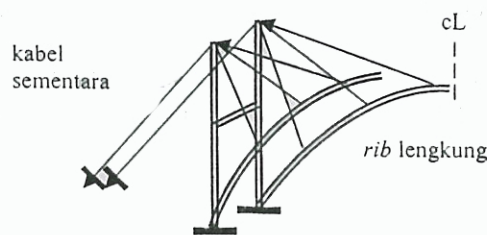
Dasar pelaksanaan jembatan pelengkung

Pelaksanaan jembatan pelengkung selalu memerlukan perancah yang dibongkar setelah lengkung selesai tersambung dan beton mencapai kuat tekan minimal 28 hari (sesuai peraturan Dept.PU, 2008). Lengkung harus membentuk garis tekan yang menahan berat sendiri dan beban berikutnya yaitu tembok penahan dan tanah urug (tipe lantai urug) dan kolom/sekat/gelagar lantai (tipe terbuka). Lengkung yang tidak tersambung sempurna akan runtuh pada saat perancah dibuka.

Jembatan pelengkung beton dilaksanakan dengan dua cara. Cara pertama dengan pengecoran di tempat diatas kerangka perancah (Gambar 10). Cara kedua dengan segmen pracetak dalam sistem kantilever terjepit yang menggunakan kabel eksternal sementara untuk menjaga stabilitas dan keseimbangan selama pelaksanaan (Gambar 11). Tendon prategang internal digunakan untuk memenuhi persyaratan tegangan tekan minimal 1 MPa yang menjaga keutuhan sambungan antara segmen pada setiap kemungkinan pembebanan (ACI, 1996).



Gambar 10. Cara pengecoran ditempat



Gambar 11. Cara kantilever seimbang

Dasar pelaksanaan jembatan pelengkung dengan tipe lengkung diperkaku

Tipe pelengkung beton diperkaku pada dua perletakan (rol-sendi) merupakan desain lama dengan inti gelagar dari profil baja yang digunakan sebagai perancah. Setelah rangka baja terpasang lengkap, maka profil baja dibungkus dengan beton dan lantai kendaraan dari beton bertulang menjadi struktur komposit. Sistem ini pernah mendapat hak paten di Amerika Serikat pada tahun 1912. Pada jembatan lama dengan tipe ini (jembatan Cindaga lama – Kali Serayu) terjadi kerusakan pada bagian beton pembungkus yang juga berasal dari kemunduran kapasitas profil baja yang tertanam. Tipe pelengkung beton diperkaku sesuai untuk bentang 30-90m maksimum di Jembatan Serayu Cindaga yang baru (Vaza, 2008).

PEMBAHASAN

Perbedaan perencanaan antara lengkung murni dan diperkaku

Perbedaan mendasar antara lengkung murni dan lengkung diperkaku terletak pada fungsi gelagar lantai. Pada lengkung murni gelagar lengkung menerima beban terbesar dan berada dalam gaya normal tekan besar, sedangkan dalam gelagar lantai terjadi gaya normal tarik kecil.

Pada lengkung diperkaku gelagar lantai menerima beban terbesar dan berada dalam gaya normal tarik besar, sedangkan dalam lengkung terjadi gaya normal tekan yang sebanding dengan gaya normal tarik gelagar lantai. Dengan demikian gelagar lantai harus

dibuat komposit dengan profil baja yang dibungkus dalam beton, karena beton tidak mampu memikul gaya normal tarik tanpa tulangan memadai. Sehingga akan lebih ekonomis bila lengkung diperkaku dibuat dari bahan baja secara keseluruhan, yang juga mencapai bentang lebih besar.

Pencapaian bentang dan aspek ekonomis jembatan pelengkung beton

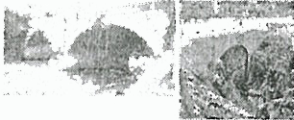
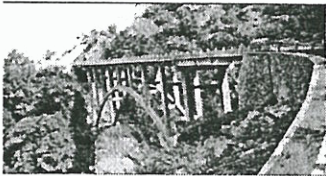
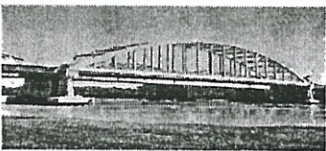

Ikhtisar pencapaian bentang untuk jembatan pelengkung beton bertulang dan komposit dirangkum dalam Tabel 3. Jembatan gelagar beton prategang standar tipe T (mutu beton f_c' 40 MPa, mutu tulangan prategang f_y' 1650 MPa) mencapai bentang maksimum (40-45)m sedangkan jembatan pelengkung beton bertulang (mutu beton f_c' 30 MPa, mutu tulangan f_y' 400 MPa) mencapai bentang maksimum 90m. Penghematan volume beton

antara lengkung murni beton bertulang dan gelagar beton prategang sebesar 15% (Tabel 4) untuk bentang tunggal 40m dan lebar jembatan sama.

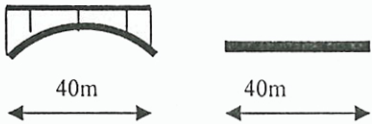
Perkembangan jembatan tipe lengkung murni dengan beton bertulang komposit

Lengkung beton sulit dibangun karena berat sendiri besar. Inovasi untuk mengurangi berat struktural dalam pencapaian bentang lebih panjang adalah dengan *rib* lengkung dari pipa(*tube*)/boks/rangka baja yang dipasang dengan bantuan kabel/keran. Lengkung tipe pipa (*tube*) yang diisi dengan beton adalah alternatif komposit yang berada antara lengkung beton bertulang dan lengkung baja. Lengkung berupa pipa tunggal, pipa ganda atau susunan rangka dari 3-6 pipa dan mencapai bentang utama 450m di China (Arch bridges, 2010).

Tabel 3. Ikhtisar bentang jembatan pelengkung beton

Tipe lengkung	Gambar	Bahan lengkung	Bentang
Lantai urug (Gambar 2)	Jembatan tipe pelengkung dari pasangan batu 	Beton bertulang	(15-30)m
Terbuka kaku (Gambar 3)		Beton bertulang	(30-90)m
Terbuka diperkaku (Gambar 4)		Beton bertulang komposit	(30-90)m
Terbuka kaku (Gambar 12)	Jembatan balok pelengkung 	Beton bertulang komposit	(90-245)m

Tabel 4. Perbandingan volume beton untuk lengkung murni terhadap gelagar lurus

bentang lengkung beton bertulang = bentang gelagar beton prategang	Volume beton lengkung / gelagar	Penghematan beton lengkung dibanding gelagar
	226m^3 / 267m^3 mutu $f_c' 30\text{MPa}$ / $f_c' 40\text{MPa}$	$41\text{m}^3 = 15\%$ penghematan beton (mutu $f_c' 40\text{MPa}$)

Selama pemasangan lengkung baja dan pengisian pipa/rangka dengan beton, bentuk sumbu lengkung disesuaikan dengan perantara kabel yang ditarik pada dongkrak (Gambar 11).

Sistem beton bertulang komposit dengan rangka baja sebagai perancah dan penulangan lengkung boks berongga mencapai bentang utama 245m di Indonesia (Jembatan Bareleng, Gambar 12), dan merupakan hasil kerjasama dengan konsultan asing (Zinanovic, 2001). Struktur lantai dengan lebar 11m dari boks berongga beton prategang didukung pada kolom vertikal/pilar yang tertanam kedalam lengkung dan tebing pada jarak antara pusat pilar 35m. Bentang total jembatan sampai ke tebing adalah 385m.



Gambar 12. Jembatan Bareleng, pelengkung beton bertulang komposit, bentang utama 245m

Perkembangan jembatan tipe lengkung diperkaku dengan profil baja

Untuk mencapai bentang lebih besar (200m) digunakan gelagar baja sebagai perancah maupun sebagai profil utama dalam lengkung

diperkaku (Jembatan Martadipura, Gambar 13), sehingga jembatan pelengkung baja tidak memikul berat beton pembungkus. Lengkung dibuat dari profil pipa, gelagar dari profil I atau rangka dengan lantai beton bertulang.



Gambar 13. Jembatan Martadipura dengan bentang 200m (Kalimantan Timur)

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kesimpulan dirangkum sebagai berikut :

1. Tipe lengkung sebagai unsur tekan mempunyai cadangan kapasitas daya pikul dalam menahan beban lebih, sehingga jembatan pelengkung lama masih bertahan dengan peningkatan beban lalu lintas.
2. Tipe lengkung efisien karena gaya tekan mengurangi momen sehingga dimensi dan penulangan lengkung lebih hemat dibanding gelagar lurus.
3. Tipe jembatan pelengkung beton bertulang menghemat 15% volume beton dibanding

gelagar beton prategang pada bentang optimal 40m.

4. Jembatan pelengkung beton bertulang dengan pencapaian bentang 90m dan jembatan pelengkung beton bertulang komposit dengan pencapaian bentang 245m menghemat jumlah pilar tinggi dalam pelintasan jurang/lembah terjal.
5. Jembatan pelengkung tipe kaku/murni dan diperkaku merupakan struktur estetis dan ekonomis

Saran

Saran dirangkum sebagai berikut :

1. Jembatan pelengkung beton bertulang komposit perlu diaplikasikan lebih banyak karena dapat mencapai bentang panjang
2. Standar bentangan jembatan pelengkung beton bertulang (lengkung murni) untuk rentang (30-90)m perlu dipersiapkan sebagai pilihan alternatif terhadap gelagar beton prategang

DAFTAR PUSTAKA

- American Concrete Institute ACI. 1996. *Analysis and Design of Reinforced Concrete Structures*, Farmington : ACI Committee 343R- 95
- Arch bridges.2010.<http://civil.fzu.edu.cn/Bridge Course Attachment/2009...>
- Brooks, Carl L. and Tilly Graham P. 1999. *Novel Method of Strengthening Masonry Arch Bridges*, Paper

presented to 'Structural Faults and Repairs,

http://www.cintec.com/en/applications/archtec/documents/Chapter03_2.htm

Departemen Pekerjaan Umum. 2005, *Pembebanan untuk Jembatan – RSNI No. T-02-2005*. Jakarta : Departemen Pekerjaan Umum

Departemen Pekerjaan Umum. 2008. *Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan – Divisi 7, Struktur*, Bandung: Puslitbang Jalan dan Jembatan

Ou Z. and Chen B.2007. *Stone arch bridges in Fujian, China*, 5th International Conference on Arch Bridges, Madeira, Portugal

Rasul Bachtiar. 2006. *Kajian Komparatif Pembangunan Jembatan Pelengkung, Kasus di Propinsi Sulawesi Selatan* , KRTJ 9, Makasar

Tristanto, L. 1997. *Laporan penelitian pengembangan perangkat lunak untuk analisis struktur bangunan pelengkap jalan, jembatan pelengkung*, Bandung: Puslitbang jalan dan jembatan

Vaza Herry. 2008. *Jembatan di Indonesia, Saat Ini dan Rencana ke Depan*

Zinanovic I., Gauthier Y., Stubler J. 2001. *The Bareleng Bridge in Indonesia*, 3rd International Arch Bridges Conference, Paris, France.