

ANALISIS FAKTOR DISTRIBUSI BEBAN HIDUP MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA PADA JEMBATAN SKEW

Kenny Colin Tengsejing¹ dan FX Supartono²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: kenco4848@gmail.com

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: fxsupartono@gmail.com

ABSTRAK

Skew adalah keadaan di mana abutmen jembatan terpasang tidak tepat tegak lurus terhadap arah lalu lintas sehingga gelagar disusun tidak dalam satu baris yang rata, melainkan ujung arah memanjang setiap gelagar disusun dengan jarak tertentu dari ujung gelagar lainnya dalam arah memanjang dan menyebabkan semua gelagar terpasang dengan bentuk susunan jajar genjang dan bukan susunan persegi. Keadaan demikian dapat terjadi karena faktor geografi di mana jembatan tersebut akan dibangun. Sifat dari jembatan yang tersusun dengan *skew* akan memiliki distribusi beban hidup kendaraan yang berbeda bila dibandingkan dengan jembatan tanpa *skew*, dan AASHTO LRFD 2014 telah memberikan fungsi terhadap nilai koreksi faktor distribusi beban hidup tersebut. Akan tetapi, nilai faktor distribusi beban hidup yang dihasilkan oleh persamaan dari AASHTO LRFD 2014 belum bisa menghasilkan nilai dari faktor distribusi beban hidup yang cukup akurat, sehingga digunakan metode elemen hingga untuk memperoleh nilai dari faktor distribusi beban hidup sesungguhnya untuk jembatan dengan spesifikasi ini dengan beban lajur untuk dibandingkan dengan nilai dari faktor distribusi beban hidup AASHTO LRFD 2014. Didapat dari hasil analisa metode elemen hingga untuk jembatan dengan *I-girder*, bahwa faktor distribusi beban hidup untuk momen dan geser dari AASHTO LRFD 2014 lebih kecil dari metode elemen hingga untuk gelagar eksterior dan momen dan geser dari AASHTO LRFD 2014 lebih besar dari gelagar interior.

Kata kunci: *skew*, AASHTO LRFD 2014, metode elemen hingga, *I-girder*

1. PENDAHULUAN

Jumlah penduduk Indonesia ±267 juta jiwa dengan tingkat pertumbuhan 1.49 %/ tahun. Tingkat pertumbuhan pesat mendorong penduduk membangun jalan untuk mengakses lokasi tempat tinggal. Jembatan merupakan salah satu sarana yang dapat digunakan, di mana fungsi jembatan untuk menyeberangi suatu rintangan. Rintangan dapat berupa lembah, sungai, maupun jalan lain. Dapat ditemukan beberapa situasi desain jembatan di mana jembatan tidak dapat disambung dengan abutmennya terpasang secara tegak lurus dari arah bentang jembatan yang didesain. *Skew* memungkinkan dibangunnya jembatan untuk kendaraan berkecepatan tinggi, sementara kelurusan jalur pada jalan masih terjaga. Gambar 1 memberikan gambaran mengenai sambungan dengan *skew*.

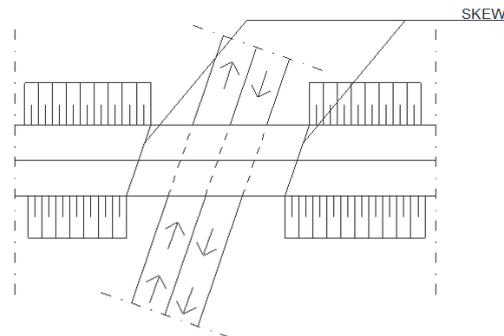
AASHTO LRFD 2002 tidak membahas dampak *skew* dalam desain jembatan. Selama beberapa dekade jembatan *skew* dianalisis seperti jembatan tanpa *skew*. Tetapi, muncul literatur menyatakan perilaku jembatan dengan *skew* berbeda dengan jembatan tanpa *skew*, yang menandakan AASHTO LRFD 2002 gagal memprediksi model jembatan *skew* (Bang Jo Chun, 2010). Tetapi AASHTO LRFD 2014 memperhatikan pengaruh *skew* pada pasal 4.4.2.2.3 dan 4.4.2.3.3 dan dinyatakan bahwa tidak semua jenis jembatan dianalisis dan memiliki faktor yang sesuai.

Penggunaan faktor distribusi tidak tepat mengakibatkan jembatan *over-designed* yang mengakibatkan harga jembatan menjadi mahal atau *under-designed* yang mengakibatkan jembatan memiliki resiko lebih tinggi terhadap kegagalan. Oleh karena itu dalam penelitian ini dilakukan analisis faktor distribusi momen dan geser akibat beban hidup oleh SNI 1725:2016 terhadap hasil metode elemen hingga untuk jembatan *single span I-girder* beton.

Hasil akhir gaya dalam dari metode elemen hingga digunakan untuk memperoleh faktor distribusi dan dibandingkan dengan nilai faktor distribusi dari persamaan AASHTO LRFD 2014. Selain dari segi faktor distribusi, dilakukan analisis tambahan terhadap faktor koreksi yang digunakan untuk memperoleh faktor distribusi gaya dalam pada jembatan *skew*. Perbandingan faktor koreksi dilakukan untuk mengetahui besarnya peningkatan maupun penurunan terhadap faktor distribusi yang didapat tanpa memperhatikan hasil akhir faktor distribusi itu sendiri.

Skew

Jembatan *skew* adalah jembatan yang abutemennya tidak dapat dibuat tegak lurus terhadap arah lalu lintas, maka gelagar tersusun menyerong juga. Hal ini dikarenakan kondisi topografi daerah tersebut mengakibatkan struktur primer jembatan tidak dapat di desain secara tepat tegak lurus terhadap arah laju kendaraan.



Gambar 1. Tumpuan Jembatan dengan *Skew*

Jembatan dengan sudut kemiringan *skew* dibawah 20° dapat di anggap jembatan lurus dan umumnya di desain sedemikian rupa tanpa ada modifikasi. Kemiringan sudut hingga 20° tidak menghasilkan perubahan signifikan terhadap gaya lintang, momen dan momen torsi. Akan tetapi, bila sudut kemiringan *skew* ditingkatkan menjadi lebih dari 20° maka akan terjadi perubahan signifikan terhadap gaya lintang, momen, dan momen torsi (Ajay, et al, 2016).

Faktor Distribusi Beban Hidup (*Live Load Distribution Factor*)

Adalah besarnya gaya dalam momen dan geser yang diterima oleh semua gelagar dalam melakukan desain, di mana faktor distribusi beban hidup diaplikasikan ke nilai gaya dalam momen dan geser yang diperoleh dari hasil analisis dua dimensi. Faktor distribusi beban hidup yang diperoleh untuk momen dan geser memiliki nilai yang berbeda untuk setiap gelagar interior dan gelagar eksterior. Gelagar eksterior adalah gelagar yang berada paling tepi dari jembatan, dan gelagar interior adalah semua gelagar yang berada diantara gelagar eksterior.

Untuk tipe jembatan dengan gelagar I dari beton maka tabel 4.6.2.2.1-1 dari AASHTO LRFD 2014 mengklasifikasikan sebagai jembatan "k". Persamaan yang digunakan untuk memperoleh nilai faktor distribusi beban hidup untuk momen interior dan eksterior, serta geser interior dan eksterior untuk jembatan tanpa *skew* dapat dilihat di AASHTO LRFD 2014 pada tabel 4.6.2.2.2b-1, tabel 4.6.2.2.2d-1, tabel 4.6.2.2.3a-1, dan tabel 4.6.2.2.3b-1, di mana persamaan yang digunakan dijabarkan secara berurutan dalam persamaan 1 hingga 4 berikut:

$$g_{momen\ interior} = 0.075 + \left(\frac{S}{9.5}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{12.0 \cdot L \cdot t_s^3}\right)^{0.1} \quad (1)$$

$$g_{momen\ eksterior} = \left(0.77 + \frac{d_e}{9.1}\right) \cdot g_{momen\ interior} \quad (2)$$

$$g_{geser\ interior} = 0.2 + \left(\frac{S}{12}\right) - \left(\frac{S}{35}\right)^{2.0} \quad (3)$$

$$g_{geser\ eksterior} = \left(0.6 + \frac{d_e}{10}\right) \cdot g_{geser\ interior} \quad (4)$$

Setelah didapat nilai faktor distribusi beban hidup pada kondisi jembatan tanpa *skew*, maka faktor koreksi yang sesuai untuk setiap tipe gaya dalam diperoleh dari AASHTO LRFD 2014 pada tabel 4.6.2.2.2e-1 untuk momen dan tabel 4.6.2.2.3c-1 untuk geser. Faktor koreksi diaplikasikan ke faktor distribusi yang diperoleh pada kondisi jembatan tanpa *skew* apabila jembatan yang sesungguhnya di desain mengalami *skew*. Hasil faktor distribusi beban hidup yang telah diaplikasikan faktor koreksi merupakan nilai yang akan digunakan dalam desain jembatan dengan *skew*. Persamaan 5 dan 6 menjabarkan faktor koreksi untuk masing – masing gaya dalam momen dan geser:

$$1.0 - \left(0.25 \left(\frac{K_g}{12.0 \cdot L \cdot t_s^3}\right)^{0.25} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.5}\right) (\tan\theta)^{1.5} \quad (5)$$

$$1.0 + \left(0.20 \left(\frac{12.0 \cdot L \cdot t_s^3}{K_g}\right)^{0.3}\right) \tan\theta \quad (6)$$

K_g merupakan parameter kekakuan arah memanjang jembatan dan dijabarkan dalam persamaan 7 berikut:

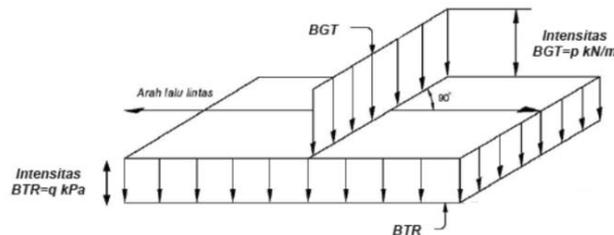
$$K_g = \left(\frac{E_B}{E_D}\right) \cdot (1 + A \cdot e^2_g) \quad (7)$$

Pembebanan

Beban adalah segala objek atau material dengan berat jenis yang berada diatas struktur dan berat dari struktur itu sendiri yang memberikan kontribusi terhadap berat struktur secara keseluruhan. Analisis metode elemen hingga menggunakan beban lajur “D” dari SNI 1725:2016 pada gambar 2 tanpa Beban Garis Terpusat (BGT). Intensitas q Beban Terbagi Rata (BTR) bergantung dari panjang total terbebani dari jembatan yang didesain sebagai berikut:

$$\text{Jika } L \leq 30 \text{ m: } q = 9.0 \text{ kPa} \tag{8}$$

$$\text{Jika } L > 30 \text{ m: } q = 9.0 \cdot \left(0.5 + \frac{15}{L}\right) \text{ kPa} \tag{9}$$



Gambar 2. Beban Lajur “D” (Sumber: SNI 1725:2016)

Metode Elemen Hingga

Adalah metode dengan pemodelan struktur menggunakan bagian – bagian kecil saling berhubungan disebut elemen. Setiap elemen saling berhubungan secara langsung maupun tak langsung dengan elemen lainnya melalui bagian yang saling berhubungan, termasuk nodal atau garis pembatas dan atau permukaan. Dengan properti tegangan dari material struktur, maka dapat ditentukan perilaku dari nodal yang bekerja pada elemen untuk seluruh struktur.

Langkah – langkah yang diambil dalam pemodelan metode elemen hingga menurut Daryl L. Logan antara lain:

- | | |
|---|--|
| 1. Pembagian dan memilih tipe elemen | 6. Mendapatkan penyelesaian terhadap derajat kebebasan (<i>degrees of freedom</i>) yang belum diketahui, |
| 2. Memilih fungsi <i>displacement</i> , | 7. Mendapatkan penyelesaian tegangan dan regangan elemen, |
| 3. Menjabarkan hubungan regangan/ perpindahan dan tegangan/ regangan, | 8. Menafsirkan hasil. |
| 4. Menjabarkan matrix kekakuan elemen, | |
| 5. Menyusun persamaan elemen untuk mendapatkan persamaan global/ total dan, | |

Desainer memutuskan elemen digunakan (langkah 1), di mana langkah 2 hingga 7 otomatis dilakukan program.

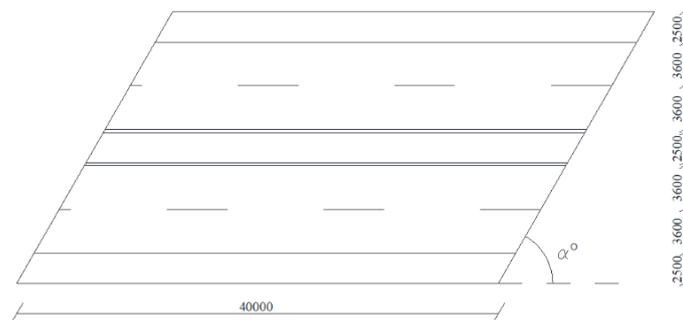
2. METODOLOGI PENELITIAN

Konsep perencanaan jembatan

Jembatan *single span* sepanjang 40 m sebagai jalan arteri 4/2D dengan median. Lebar jalur desain sebagai berikut:

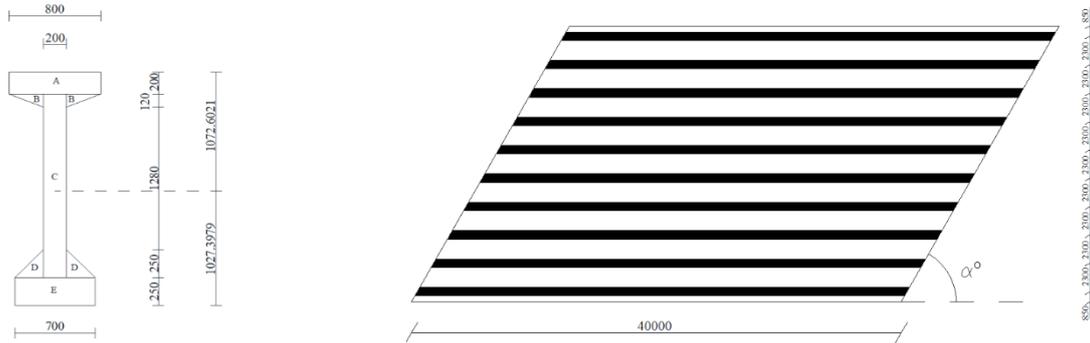
- | | |
|----------------------------|---------------------------------------|
| • Lebar 1 lajur = 3.6 m | • Lebar median = 2.5 m |
| • Lebar bahu jalan = 2.5 m | • Lebar jalur tepian minimum = 0.25 m |

Jembatan dengan lebar total 22.4 m dengan kemiringan *skew* dianalisis dimulai dari 0° hingga 60° dengan interval 30° diukur tegak lurus terhadap arah lalu lintas diatas jembatan. Mutu beton untuk dek 25 MPa dan mutu beton gelagar 50 MPa Tampak atas jalur pada jembatan didesain dengan kemiringan *skew* α° dapat dilihat pada gambar 3.



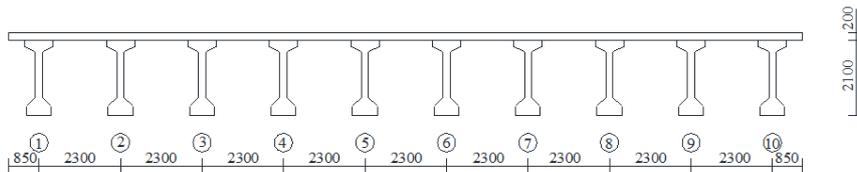
Gambar 3. Jembatan *Single Span* 40 m dengan *Skew* α°

Digunakan gelagar I dengan tinggi 210 cm dengan dimensi dan pembagian I-girder penampang seperti pada gambar 4. Posisi penempatan gelagar pada jembatan dengan *skew* α° dapat dilihat gambar 5 dengan potongan melintang jembatan pada gambar 6. Untuk panjang bentang jembatan 40 m dan kedalaman gelagar 210 cm, maka jarak antar gelagar yang di spesifikasikan oleh Wika Beton adalah 230 cm.



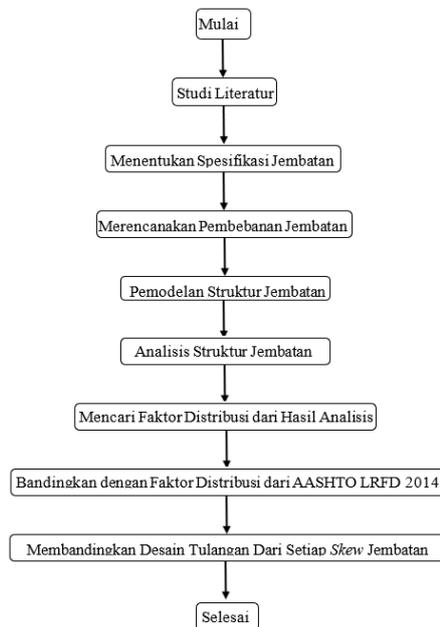
Gambar 4. Dimensi Penampang I-Girder

Gambar 5. Tampak Atas Penempatan Girder pada Jembatan *Skew* α°



Gambar 6. Potongan Melintang Pada Jembatan

Kerangka kerja



Gambar 7. Diagram Alir

3. HASIL ANALISIS

Kekakuan Penampang Arah Memanjang (K_g)

Untuk mendapatkan nilai faktor distribusi beban hidup gaya dalam momen, kekakuan penampang arah memanjang (K_g) harus diperoleh dahulu dengan persamaan 7. Bilamana digunakan dimensi gelagar yang berbeda disepanjang bentang, maka nilai faktor distribusi yang terpengaruh hanya faktor distribusi momen karena parameter kekakuan arah memanjang hanya diterapkan dalam persamaan faktor distribusi momen. Tabel 1 memperlihatkan titik berat dan inersia penampang dengan pembagian penampang terlihat pada gambar 4.

Tabel 1. Titik Berat dan Momen Inersia Penampang

Sections	Dimension		Area (mm ²)	Center of Gravity of Sections (mm)	Moment of Inertia (mm ⁴)
	Width (mm)	Height (mm)			
A	800	200	160000	2000.0000	151886093567.6680
B	300	120	36000	1860.0000	24970542369.0317
C	200	1280	330000	1075.0000	75616515265.5676
D	250	250	62500	333.3333	30216362531.7337
E	700	250	175000	125.0000	143417818245.0070
Total			763500 mm ²		426107331979.0080 mm ⁴
Center of Gravity			1027.3979 mm		
K _g			5014665.0536 in. ⁴		

Terdapat persyaratan yang harus dipenuhi agar persamaan untuk jembatan tipe “k” dalam persamaan 1 hingga 6 dapat dipakai: jarak antar gelagar $1066.8 \text{ mm} \leq S \leq 4876.8 \text{ mm}$; ketebalan dek $114.3 \text{ mm} \leq t_s \text{ mm} \leq 304.8 \text{ mm}$; panjang bentang $6096 \text{ mm} \leq L \leq 73152 \text{ mm}$; jumlah gelagar 4 buah $\leq N_b$; kekakuan penampang arah memanjang $4162314256 \text{ mm}^4 \leq K_g \leq 2.9137 \times 10^{12} \text{ mm}^4$; sudut kemiringan $30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$; jarak dari gelagar eksterior ke muka tepi pembatas jalan $-304.8 \text{ mm} \leq d_c \leq 1676.4 \text{ mm}$. Semua persyaratan yang disebutkan telah dipenuhi.

Faktor Distribusi Beban Hidup Momen Interior AASHTO LRFD 2014

Tabel 2 memperlihatkan hasil perhitungan faktor distribusi beban hidup untuk momen interior dan eksterior serta geser interior dan eksterior:

Tabel 2. Faktor Distribusi Beban Hidup Momen dan Geser AASHTO LRFD 2014

Skew	Momen		Geser	
	Eksterior	Interior	Eksterior	Interior
0°	0.7195	0.6684	0.6876	0.7823
30°	0.6893	0.6403	0.7328	0.8338
60°	0.5624	0.5225	0.8233	0.9367

Simple Beam Analysis dengan Program GRASP

Pemodelan dengan perletakan sederhana berupa sendi dan rol dilakukan. Dalam permodelan dengan GRASP, sendi dan rol diletakan sejauh 0.5 m dari kedua ujung dari gelagar jembatan, sehingga gelagar memiliki bentang bersih sepanjang 39 m. hasil gaya dalam berupa momen akan difokuskan pada tengah bentang di mana momen menjadi maksimum, dan untuk gaya dalam berupa lintang akan difokuskan pada perletakan di mana reaksi geser maksimum.

Pembebanan yang digunakan adalah Beban Terbagi Rata (BTR). Untuk panjang total yang dibebani lebih dari 30 m (panjang total terbebani pada struktur primer 40 m) didapat dari persamaan 9 intensitas q adalah 7.875 KPa. Untuk menjadikan BTR menjadi beban merata, maka intensitas q harus dikalikan dengan lebar efektif dari gelagar. Artikel 4.6.2.6.1 dari AASHTO LRFD 2014 menjelaskan lebar efektif dari dek beton untuk diambil sebagai berikut:

1. Lebar efektif gelagar interior diambil sebagai total jumlah dari setengah jarak antar gelagar yang bersebelahan.
2. Lebar efektif gelagar eksterior diambil sebagai jumlah dari setengah jarak ke gelagar disebelahnya dengan lebar total dek yang menggantung

Lebar efektif dek interior adalah 2.3 m dengan intensitas q sebesar 18.1125 kN/m, dan lebar efektif dek eksterior adalah 2 m dengan intensitas q sebesar 7.875 kN/m. Tabel 3 memperlihatkan gaya dalam dari *simple beam analysis*.

Tabel 3. Gaya Dalam Gelagar Interior dan Eksterior

Span (m)	Q 18.1125 KN/m		Q 7.875 KN/m	
	Moment (KNm)	Shear (KN)	Moment (KNm)	Shear (KNm)
0.50	-2.2641	353.1938	-0.9844	153.5625
20.00	3441.3750	0	1496.2500	0
39.50	-2.2641	-353.1938	-0.9844	-153.5625

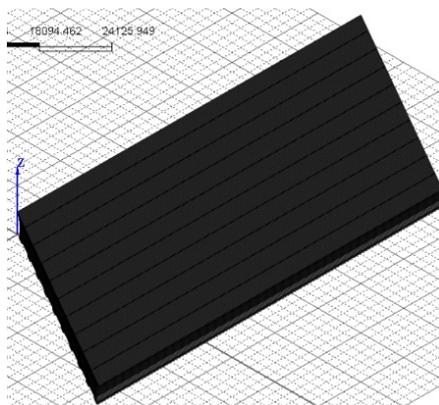
Pemodelan Jembatan Menggunakan Program Metode Elemen Hingga MIDAS FEA

Pemodelan dibuat dengan diafragma interior akhir (*interior end diaphragm*) saja tanpa diafragma interior tengah. Hal ini dilakukan agar hasil lebih disesuaikan dengan asumsi pemodelan oleh AASHTO LRFD 2014 dalam menghasilkan persamaan faktor distribusi beban hidup, sesuai dengan yang dinyatakan oleh pedoman *Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridge Superstructures* tahun 2015 pada halaman 4.23.

Terdapat beberapa asumsi dan batasan dalam pemodelan sebuah jembatan sebagai berikut:

1. Material dari dek (*slab*) bersifat homogen dan isotropik; dek dan gelagar berperilaku secara linear,
2. Terjadi aksi komposit antara dek dan girder eksentris,
3. Pengaruh kekakuan dari trotoar (*curb*) dan pembatas jalan (*parapets*) diabaikan,
4. Kecuali untuk diafragma kaku pada abutemen, diafragma lain tidak dimodelkan,
5. Gelagar tipe I saja yang dipertimbangkan.

Pengaruh kekakuan dari pembatas jalan dihiraukan, karena biasanya desainer menghiraukan efek pengaku pada pembatas jalan karena tidak dianggap sebagai bagian pemikul beban. Gambar 8 memperlihatkan pemodelan MIDAS FEA.



Gambar 8. Pemodelan Jembatan dengan *Skew* 30°

Dua model pembebanan digunakan dalam analisis program MIDAS FEA, yaitu semua lajur terbebani sesuai dengan kondisi pembebanan yang mungkin terjadi di Indonesia terutama saat kondisi jalan sedang macet dengan intensitas bahu jalan $\frac{1}{2} Q$, dan hanya dua lajur terbebani saja sesuai dengan kondisi pembebanan yang terjadi di Amerika. Pembebanan dengan dua lajur tersebut didukung Marx, et al, di mana kemungkinan semua lajur dibebani secara maksimum dengan truk bermuatan maksimum dan diposisikan sedemikian rupa agar menghasilkan kontribusi maksimum memiliki kemungkinan kecil meskipun pembebanan pada semua lajur menghasilkan nilai gaya dalam terbesar. Hal ini didukung AASHTO LRFD 2014 dengan faktor kepadatan lajur (*multiple presence factor*), untuk kondisi dua lajur terbebani maka digunakan faktor 1.0, untuk 3 lajur terbebani digunakan faktor 0.85 dan untuk lebih dari tiga lajur adalah 0.65, sehingga nilai gaya dalam pada kondisi semua lajur terbebani menghasilkan nilai gaya dalam untuk desain lebih kecil dari kondisi dua lajur terbebani saja. Sementara faktor kepadatan lajur menurut SNI 1725:2016 untuk kondisi lebih dari dua lajur terbebani tidak akan lebih kecil dari 1.0.

Dalam pemodelan dua lajur terbebani, beban terbagi rata diletakan pada jalur pertama dan kedua secara bersebelahan untuk memperoleh gaya dalam gelagar interior. Untuk gaya dalam gelagar eksterior, beban terbagi rata diletakan pada bahu jalan dan lajur pertama tepat disamping bahu jalan tanpa ada pengurangan intensitas beban Q

Perbandingan Faktor Distribusi AASHTO LRFD 2014 dan Metode Elemen Hingga

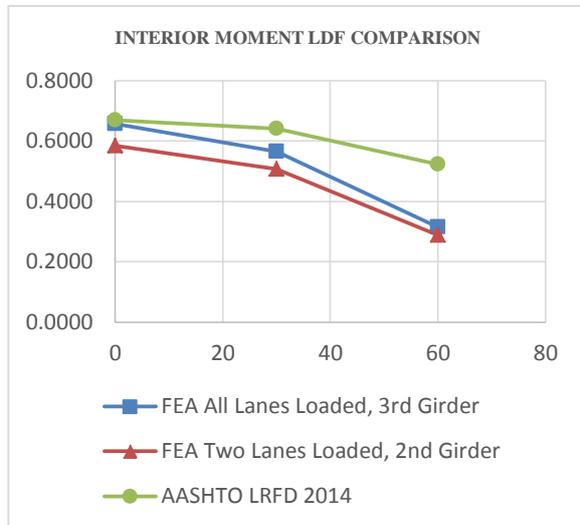
Untuk mendapatkan nilai faktor distribusi metode elemen hingga dengan kondisi semua lajur terbebani, digunakan model perletakan sederhana *simple beam analysis* menggunakan GRASP. Hasil faktor distribusi yang didapat diterapkan ke hasil dari *simple beam analysis* untuk menjadi gaya dalam dalam perencanaan beton prategang. Oleh karena itu untuk mendapatkan faktor distribusi metode elemen hingga, nilai gaya dalam hasil metode elemen hingga dibagi dengan hasil gaya dalam *simple beam analysis* ($F_{refined}/F_{simple\ beam\ analysis}$). Dalam pemodelan dengan program metode elemen hingga, tentunya setiap gelagar tidak menghasilkan gaya dalam yang sama. Oleh karena itu, gaya dalam momen dan geser diambil adalah yang terbesar untuk masing – masing gelagar interior maupun eksterior.

Faktor koreksi digunakan untuk mendapatkan faktor distribusi beban hidup jembatan dengan *skew* berdasarkan AASHTO LRFD 2014 dengan faktor yang paling mempengaruhi adalah sudut kemiringan dari *skew* itu sendiri. Selain dari segi faktor distribusi beban hidup, akan dibandingkan juga nilai dari faktor koreksi yang mempengaruhi hasil akhir dari faktor distribusi beban hidup itu sendiri. Untuk mendapatkan faktor koreksi dari metode elemen

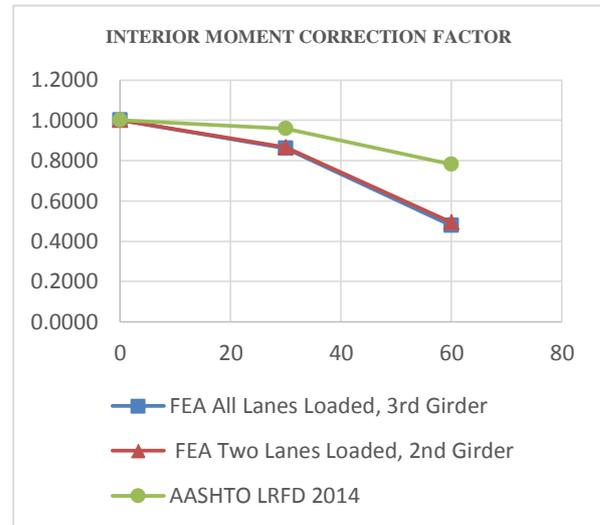
hingga dapat dilakukan dengan membagi nilai faktor distribusi beban hidup pada jembatan dengan *skew* dengan faktor distribusi beban hidup pada jembatan tanpa *skew* ($LLDF_{skew}/LLDF_{no-skew}$).

1. Faktor distribusi beban hidup momen interior

Analisa faktor distribusi beban hidup momen interior dengan semua lajur terbebani menggunakan gelagar 3, dan untuk dua lajur terbebani menggunakan gelagar 2. Gambar 9 adalah perbandingan hasil faktor distribusi beban hidup momen interior dan gambar 10 adalah perbandingan faktor koreksi momen interior.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Faktor Distribusi Momen Interior



Gambar 10. Grafik Perbandingan Faktor Koreksi Momen Interior

Didapat bahwa hasil analisis faktor distribusi beban hidup metode elemen hingga dengan semua lajur terbebani pada *skew* 0° hampir menyerupai AASHTO LRFD 2014 dengan perbedaan 2%. Besar perbedaan akan terus meningkat pada *skew* 30° dengan perbedaan 12%. Sementara itu perbedaan terbesar terdapat saat *skew* 60° dan mencapai 40%.

Analisis metode elemen hingga dengan kondisi dua lajur terbebani menghasilkan faktor distribusi lebih kecil dari kondisi semua lajur terbebani. Tren dihasilkan menyerupai faktor distribusi hasil analisis metode elemen hingga semua lajur terbebani maupun dengan faktor distribusi AASHTO LRFD 2014. Pada *skew* 0° terdapat perbedaan 12%. Perbedaan akan meningkat pada *skew* 30° dengan perbedaan 21% dan pada *skew* 60° dengan perbedaan 45%.

Didapatkan hasil faktor koreksi beban hidup dengan kondisi semua lajur terbebani oleh AASHTO LRFD 2014 untuk momen interior cenderung mengalami perbedaan yang semakin besar seiring dengan meningkatnya sudut kemiringan *skew* dan bersifat konsisten terhadap hasil yang didapat dari hasil faktor distribusi beban hidup momen interior yang telah diperoleh.

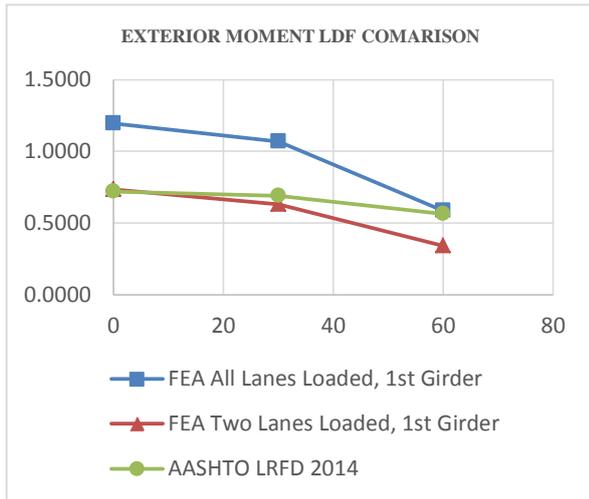
Faktor koreksi momen interior dengan kondisi dua lajur terbebani menyerupai faktor koreksi momen interior dengan kondisi semua lajur terbebani, Hal ini menyatakan kondisi pembebanan tidak memberikan pengaruh yang relevan terhadap nilai dari faktor koreksi untuk momen interior.

2. Faktor distribusi beban hidup momen eksterior

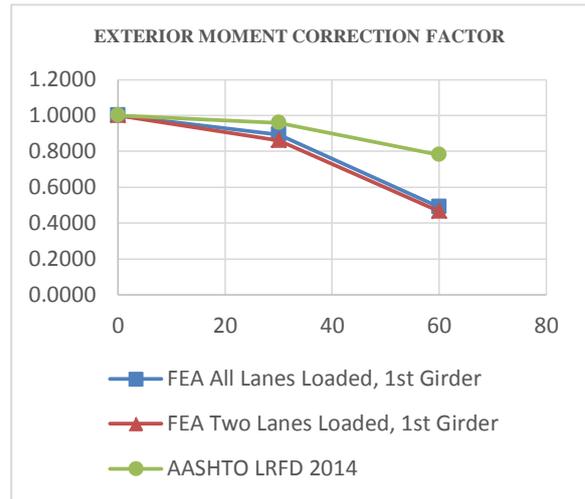
Analisa faktor distribusi beban hidup momen interior dengan semua lajur terbebani menggunakan gelagar 1, dan demikian juga untuk dua lajur terbebani dengan menggunakan gelagar 1. Gambar 11 adalah perbandingan hasil faktor distribusi beban hidup momen eksterior dan gambar 12 adalah perbandingan faktor koreksi momen eksterior.

Gaya dalam momen gelagar eksterior dengan semua lajur terbebani lebih kecil dari gaya dalam momen gelagar interior untuk kasus pembebanan yang sama, tetapi pada *skew* 0° didapat perbedaan 66%. Nilai gaya dalam momen gelagar eksterior semakin mengecil dengan seiring bertambahnya kemiringan *skew*. Perbedaan sebesar 55% pada *skew* 30° dan mengecil hingga 4% pada *skew* 60°.

Hasil analisis dua lajur terbebani menggunakan metode elemen hingga momen eksterior menyerupai hasil AASHTO LRFD 2014 daripada kondisi pembebanan semua lajur. Sehingga kondisi pemodelan yang digunakan oleh Marx, et al dapat digunakan untuk analisa faktor distribusi beban hidup dari AASHTO LRFD 2014. Perbedaan untuk faktor distribusi momen eksterior dengan kondisi dua lajur terbebani pada *skew* 0° sebesar 2%, dan pada sudut kemiringan 30° sebesar 8%. Perbedaan terbesar terdapat pada sudut kemiringan *skew* 60° sebesar 40%.



Gambar 11. Grafik Perbandingan Faktor Distribusi Momen Eksterior



Gambar 12. Grafik Perbandingan Faktor Koreksi Momen Eksterior

Meskipun nilai faktor distribusi beban hidup untuk momen eksterior hasil analisis metode elemen hingga dengan semua lajur terbebani lebih besar dari hasil AASHTO LRFD 2014, didapat nilai faktor koreksi gelagar eksterior menyerupai gelagar interior dan nilai faktor koreksi analisis metode elemen hingga lebih kecil dari nilai faktor koreksi AASHTO LRFD 2014, sehingga perubahan distribusi gaya dalam momen gelagar eksterior menyerupai distribusi gaya dalam momen interior.

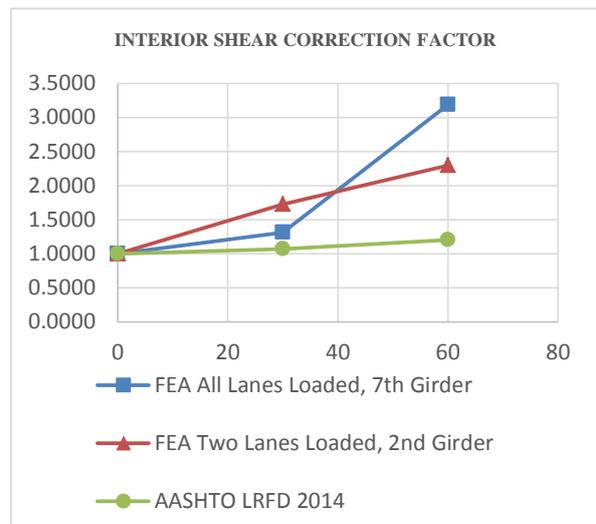
Didapat nilai faktor koreksi untuk gelagar eksterior dengan dua lajur terbebani masih menyerupai gelagar interior dan nilai faktor koreksi analisis metode elemen hingga lebih kecil dari nilai faktor koreksi AASHTO LRFD 2014. Hal ini menunjukkan konsistensi dalam besarnya penurunan nilai faktor distribusi gaya dalam momen dari kedua kondisi pembebanan.

3. Faktor distribusi beban hidup geser interior

Analisa faktor distribusi beban hidup momen interior dengan semua lajur terbebani menggunakan gelagar 7, dan untuk dua lajur terbebani menggunakan gelagar 2. Gambar 13 adalah perbandingan faktor distribusi beban hidup geser interior, gambar 14 memperlihatkan perbandingan faktor koreksi geser interior;



Gambar 13. Grafik Perbandingan Faktor Distribusi Geser Interior



Gambar 14. Grafik Perbandingan Faktor Distribusi Geser Interior

Perbedaan faktor distribusi beban hidup dengan kondisi semua lajur terbebani untuk geser interior terbesar tercapai saat jembatan tidak mengalami *skew* dan mencapai 75%. Perbedaan ini terus mengecil hingga pada sudut 60° dengan selisih perbedaan sebesar 32%.

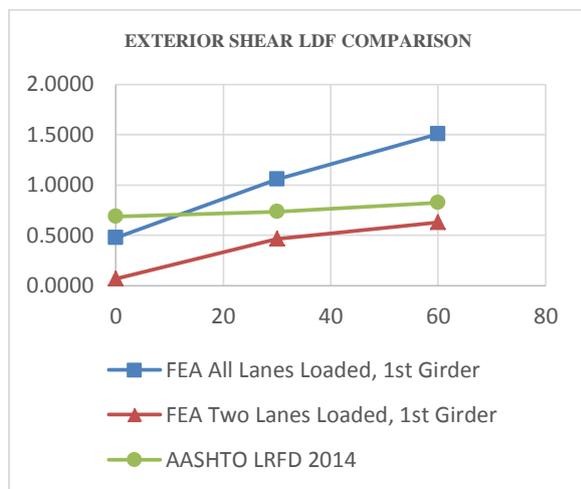
Didapat hasil analisis metode elemen hingga dengan dua lajur terbebani mendekati hasil AASHTO LRFD 2014 terutama peningkatan pada *skew* 30° yang menyebabkan perbedaan 45%, dan tidak terjadi perubahan signifikan terhadap perbedaan faktor distribusi geser pada *skew* 60° yang menjadi 35%. Meskipun persentase perbedaan faktor distribusi pada *skew* 0° menjadi menurun 66%, diakui masih adanya ketidaktepatan pemodelan yang masih terjadi.

Faktor koreksi geser interior dengan kondisi semua lajur terbebani menyerupai faktor koreksi AASHTO LRFD 2014, dengan perbedaan 23% saat *skew* 30°. Tetapi saat kemiringan mencapai 60°, maka perbedaan faktor koreksi kedua metode menjadi tiga kali lipat.

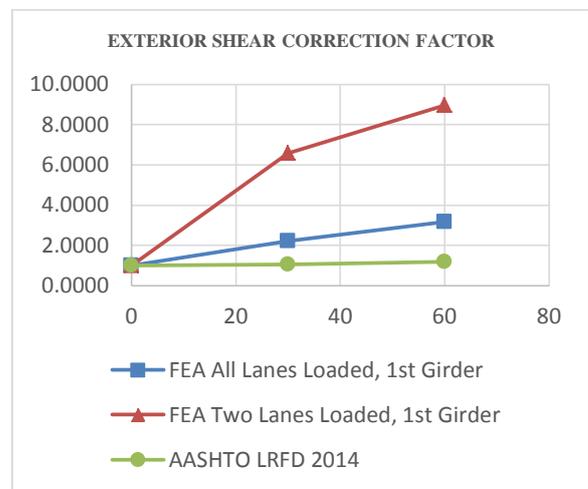
Faktor koreksi geser interior dengan dua lajur terbebani menghasilkan peningkatan faktor distribusi yang lebih kecil secara keseluruhan terutama pada sudut *skew* 60° dengan peningkatan sebesar dua kali, sehingga perubahan kondisi pembebanan akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap faktor koreksi geser.

4. Faktor distribusi beban hidup geser eksterior

Analisa faktor distribusi beban hidup momen interior dengan semua lajur terbebani menggunakan gelagar 1, dan demikian juga untuk dua lajur terbebani dengan menggunakan gelagar 1. Gambar 15 adalah perbandingan hasil faktor distribusi beban hidup untuk geser eksterior dan gambar 16 memperlihatkan perbandingan faktor koreksi:



Gambar 15. Grafik Perbandingan Faktor Distribusi Geser Eksterior



Gambar 16. Grafik Perbandingan Faktor Distribusi Geser Eksterior

Jembatan tanpa *skew* dengan semua lajur terbebani memiliki perbedaan faktor distribusi geser 31% di mana nilai faktor distribusi AASHTO LRFD 2014 lebih besar dari metode elemen hingga. Tetapi, faktor distribusi AASHTO segera mengecil dari nilai faktor distribusi metode elemen hingga pada *skew* 30° dengan perbedaan 44% dan meningkat hingga 83% pada *skew* 60°.

Semua hasil analisis metode elemen hingga dengan dua lajur terbebani menghasilkan faktor distribusi geser eksterior lebih kecil daripada faktor distribusi AASHTO LRFD 2014, berbeda dengan hasil metode elemen hingga sebelumnya dengan semua lajur terbebani di mana nilai faktor distribusi metode elemen hingga pada 30° lebih besar daripada faktor distribusi AASHTO LRFD 2014. Perbedaan faktor distribusi pada *skew* 30° menjadi 37% dan pada *skew* 60° menjadi 24%. Tetapi, untuk jembatan tanpa *skew* persentase perbedaan yang besar diakibatkan oleh pemodelan jembatan yang masih belum tepat.

Faktor koreksi geser eksterior dengan semua lajur terbebani yang diperoleh dengan analisis metode elemen hingga memiliki perbedaan jauh antara kedua metode yang dimulai saat jembatan mulai mengalami *skew* kurang dari 30° dan perbedaan ini akan terus meningkat hingga jembatan mencapai kemiringan *skew* 60° di mana perbedaan mencapai tiga kali lipat.

Karena pemodelan pada jembatan tanpa *skew* belum tepat, faktor koreksi yang dihasilkan menjadi ekstrim, di mana dengan pemodelan dua lajur terbebani pada *skew* 30° didapat peningkatan sebesar 6.5 kali faktor distribusi awal. Akan tetapi, bila diperhatikan peningkatan faktor koreksi dari *skew* 30° ke 60°, maka peningkatan faktor koreksi gelagar eksterior menyerupai gelagar interior di mana keduanya meningkat sebesar 1.3 kali dari *skew* 30° ke 60°.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, maka dapat disimpulkan:

1. Pemodelan dengan menggunakan dua lajur terbebani memberikan hasil analisis yang lebih mendekati hasil dari AASHTO LRFD 2014, sementara pemodelan dengan semua lajur terbebani yang sesuai dengan kondisi di Indonesia memberikan hasil akhir berbeda terutama untuk faktor distribusi gaya dalam analisis metode elemen hingga pada gelagar eksterior yang lebih besar daripada faktor distribusi gaya dalam AASHTO LRFD 2014,
2. Secara keseluruhan, didapat bahwa nilai faktor distribusi gaya dalam untuk momen dan geser interior dari metode elemen hingga akan selalu lebih kecil dari AASHTO LRFD 2014,
3. Tetapi, nilai faktor distribusi gaya dalam momen dan geser eksterior dari metode elemen hingga bergantung dengan kondisi pembebanan yang digunakan. Kondisi pembebanan dengan semua lajur terbebani menghasilkan nilai faktor distribusi metode elemen hingga lebih besar dari AASHTO LRFD 2014, dan bila menggunakan dua lajur terbebani maka faktor distribusi metode elemen hingga akan lebih kecil dari AASHTO LRFD 2014,
4. Penurunan nilai faktor distribusi momen cenderung sama baik untuk interior maupun eksterior untuk semua tipe kondisi pembebanan, dan menghasilkan faktor koreksi yang lebih kecil daripada AASHTO LRFD 2014,
5. Sebaliknya, nilai faktor koreksi untuk geser akan meningkat dengan besarnya peningkatan bergantung pada tipe pembebanan yang diterapkan. Semakin berat pembebanan yang diterapkan, maka peningkatan terhadap faktor koreksi akan semakin drastis,
6. Diperlukannya metode lain untuk mendapatkan nilai faktor distribusi selain yang dihasilkan oleh persamaan dari AASHTO, misalnya dengan *lever rule* atau *special analysis method* dan mengambil nilai faktor distribusi terbesar (terburuk) dalam melakukan desain,
7. Penelitian ini adalah penelitian awal dan oleh karena keterbatasan waktu, diperlukan perbaikan lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2014). *LRFD Bridge Design Specifications 7th Edition*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington
- Badan Standardisasi Nasional. (2004). *Geometri Jalan Perkotaan*. RSNI T-14-2004. BSN, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2004). *Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan*. RSNI T-12-2004. BSN, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). *Standar Pembebanan untuk Jembatan (SNI 1725:2016)*. Badan Litbang Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, Jakarta.
- Chun, Bang-Jo. (2010). *Skewed Bridge Behavior: Experimental, Analytical, And Numerical Analysis*. Wayne State University, Detroit.
- Chun, Bang-Jo dan Gongkang Fu. (2013). *Skewed Highway Bridges*. Department of Civil and Environmental Engineering, Wayne State University, Detroit.
- Logan, Daryl, L. (2012). *A First Course In The Finite Element Method 5th Edition*. Cengage Learning, Stamford.
- Marx, Hendrik, J., et al. (1991). *Design Criteria for Right and Skew Slab-and-Girder Bridges*. Transportation Research Record 1319. Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Republik Afrika Selatan.
- Shahu, Ajay, D., et al. (2016). *Analysis and Behaviour of Skew Bridges With Different Skew Angle*. International Journal of Current Engineering and Scientific Research (IJCESR), Volume 3, Issue-10, p. 27 – 32. Shri Ramdeobaba College of Engineering and Management, Nagpur, India.
- U.S. Department of Transportation (2015). *Load And Resistance Factor Design (LRFD) For Highway Bridge Superstructure Reference Manual*. Federal Highway Administration, Washington.