

KEKUATAN GESER *SHEAR KEY* PADA JEMBATAN SEGMENTAL *BOX GIRDER* BENTANG PANJANG

Claudia Chandra¹ dan F.X. Supartono²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: claudiachandra2309@gmail.com

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

ABSTRAK

Shear key adalah komponen dari struktur jembatan segmental *box girder* yang berperan menyalurkan gaya geser dari satu segmen ke segmen lainnya. Ada beberapa jenis *shear key* yang dapat digunakan untuk sambungan antara segmen *box girder* yaitu *flat key*, *single shear key* dan *multiple shear key*. Sambungan ini bisa berupa sambungan basah (*wet joint*) atau sambungan kering (*dry joint*). Sambungan basah berupa zat perekat yang berfungsi untuk merekatkan antara segmen. Beberapa jenis perekat yang biasa digunakan di sambungan ini yaitu *non-shrink grout*, *epoxy*, *magnesium ammonium nitrate mortar* dan beton polimer. Apabila menggunakan perekat maka perekat yang dioleskan pada sambungan masih dalam kondisi plastik dan hanya berfungsi sebagai pelumas yang mengurangi koefisien gesekan antara segmen. Pada jurnal ini jenis *shear key* yang akan dibahas adalah *single shear key* dan *multiple shear key* pada *web box girder*. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kapasitas geser nominal antara *single shear key* dan *multiple shear key* serta pengaruh ukuran dan sudut *shear key* terhadap kapasitas geser. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kapasitas geser pada *web box girder* setelah penggunaan *shear key*. *Multiple shear key* memiliki kapasitas geser nominal yang lebih besar daripada *single shear key* dan penggunaan *epoxy* menyebabkan penurunan kapasitas geser nominal pada *web box girder*. Kapasitas geser nominal dari *shear key* juga dipengaruhi oleh besarnya sudut dan tinggi *shear key*.

Kata kunci: kapasitas geser, sudut *shear key*, tinggi *shear key*, *epoxy*

1. PENDAHULUAN

Indonesia menduduki urutan keempat negara dengan jumlah penduduk terbesar di dunia. Setiap tahun jumlah penduduk ini semakin bertambah dan disertai dengan meningkatnya daya beli masyarakat terhadap kendaraan bermotor. Pertumbuhan kepemilikan kendaraan yang terus bertambah sementara infrastruktur jalan yang belum memadai menimbulkan kemacetan. Pada pemerintahan dibawah kepemimpinan Presiden Joko Widodo, pembangunan infrastruktur menjadi prioritas pembangunan nasional. Salah satu proyek prioritas untuk memperlancar arus lalu lintas di Indonesia yaitu pembangunan jembatan. Pembangunan jembatan memberikan konektivitas antara wilayah yang dihubungkan. Beberapa tahun ini, perencanaan struktur jalan layang di Indonesia telah banyak menggunakan *box girder* dengan prinsip beton prategang. Kemampuan dan ketahanan sebuah jembatan dipengaruhi oleh jenis dan kekuatan girder.

Perencanaan sambungan antara segmen *box girder* merupakan hal yang perlu diperhatikan. Sambungan kunci geser (*shear key*) merupakan komponen sekunder dari struktur jembatan karena memiliki dimensi yang kecil dan biasanya diabaikan pengaruhnya terhadap jembatan. Sambungan ini berperan menyalurkan gaya geser dari satu segmen ke segmen lainnya dan menahan perpindahan lateral dari segmen *box girder*. Peranan penting dari *shear key* dalam menjaga ketahanan struktur jembatan tidak boleh diabaikan.

Dikarenakan kerusakan pada *shear key* dapat mengakibatkan kegagalan struktur jembatan, kontrol geser pada *shear key* harus dilakukan secara teliti agar mencegah terjadinya *crack* selama masa pelayanan. Besarnya beban yang dapat diterima bergantung pada jenis dan ukuran dari *shear key*. Dimensi daripada *shear key* akan berpengaruh terhadap kapasitas geser nominal yang bekerja. Pada penelitian ini digunakan jenis *single shear key* dan *multiple shear key* untuk dibandingkan besarnya gaya geser nominal pada sambungan segmental *box girder*. Beban vertikal yang bekerja pada sambungan akan ditransfer ke masing-masing elemen *shear key* untuk dilakukan pengecekan.

Rumusan masalah yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah perbandingan kapasitas geser nominal *single shear key* dan *multiple shear key* serta pengaruh ukuran dan sudut *shear key* terhadap kapasitas geser nominal

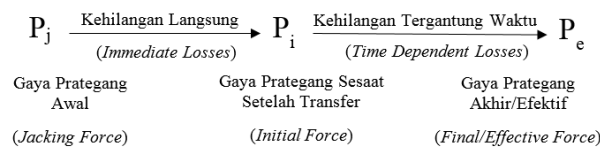
dengan menggunakan metode AASHTO, ATEP, hasil penelitian Prof. Dr. Ing. G. Rombach dan hasil penelitian Turmo.

Beton prategang

Beton prategang terdiri dari beberapa material yaitu beton, baja prategang, *grouting* dan selongsong. Pada beton ini, baja prategang digunakan untuk memberikan tegangan tekan pada beton. Material beton prategang terdiri dari beton, baja prategang, *grouting*, dan selongsong (*duct*). Menurut Nawy (2001) menyatakan bahwa pada balok prategang, balok diasumsikan bersifat homogen dan elastis. Ketidakmampuan beton untuk menahan tegangan tarik, digantikan oleh tegangan tekan yang diakibatkan oleh tendon prategang.

Kehilangan prategang

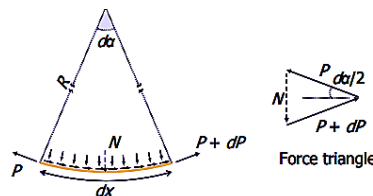
Kehilangan prategang adalah berkurangnya gaya yang bekerja pada tendon dalam tahap-tahap pembebanan baik akibat penarikan baja prategang maupun akibat pengaruh waktu. Kehilangan prategang pada struktur beton prategang diilustrasikan pada gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Ilustrasi Kehilangan Gaya Prategang (Sumber: Rizkia, 2017)

Berdasarkan SNI 2847:2013, sumber-sumber kehilangan prategang dalam menentukan tegangan efektif dalam baja prategang meliputi kedudukan baja prategang saat penyaluran, perpendekan elastis beton, rangkai beton, susut beton, relaksasi tegangan baja prategang dan kehilangan friksi akibat kurvatur sengaja atau tidak sengaja pada tendon pasca-tarik.

Saat penarikan tendon pada struktur pasca-tarik terjadi gesekan antara beton dan tendon prategang yang mengakibatkan kehilangan gaya prategang sepanjang bentang. Gesekan ini dipengaruhi oleh kelengkungan tendon dan komponen vertikal dari gaya prategang seperti pada gambar 2 dibawah ini.



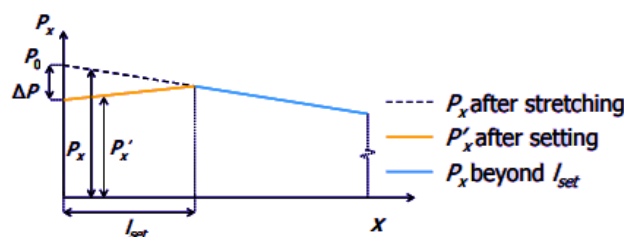
Gambar 2. Gaya Prategang Bekerja pada Tendon Lengkung (Sumber: *Prestressed Concrete Structures*)

Kehilangan gaya prategang akibat gesekan tendon dapat dihitung menggunakan rumus 1 sebagai berikut:

$$F_{pF} = F_0 \cdot e^{-(\mu\alpha+kx)} \tag{1}$$

dengan F_{pF} = gaya prategang setelah kehilangan akibat gesekan tendon, F_0 = gaya prategang awal, μ = koefisien gesek kelengkungan, α = sudut kelengkungan tendon, dan k = koefisien *wobble*.

Pada struktur pasca-tarik, saat penarikan tendon akan mengalami slip ankur saat tendon dilepaskan dari mesin penarik dan ditahan baji pada ankur. Blok ankur juga akan mengalami pergerakan sebelum menyatu dengan beton. Hal ini menyebabkan perpendekan tendon yang mengakibatkan adanya kehilangan gaya prategang seperti pada gambar 3 dibawah ini.



Gambar 3. Diagram Gaya Prategang di Sekitar Ankur Hidup (Sumber: *Prestressed Concrete Structures*)

Besarnya slip angkur bergantung pada jenis atau sistem angkur yang digunakan. Data besarnya slip angkur yang digunakan pada tugas akhir diperoleh dari spesifikasi angkur VSL yaitu sebesar 7 mm. Penentuan kehilangan prategang akibat slip angkur dihitung dengan menggunakan rumus 2 sampai 4 sebagai berikut:

$$F_{0\eta} = \frac{\Delta F}{L} \quad (2)$$

$$L_{set} = \sqrt{\frac{\Delta s \times A_p \times E_p}{F_{0\eta}}} \quad (3)$$

$$\Delta F_{pA} = 2 \times F_{0\eta} \times L_{set} \quad (4)$$

dengan $F_{0\eta}$ = kehilangan gaya prategang akibat friksi per satuan panjang, ΔF_{pA} = kehilangan gaya prategang akibat friksi, L = panjang bentang, dan L_{set} = panjang bentang yang dipengaruhi oleh slip angkur.

Setelah gaya prategang ditransfer ke beton, beton akan mengalami perpindahan elastis yang akan mengakibatkan memendeknya baja prategang, hal ini akan menyebabkan berkurangnya gaya prategang. Pada metode pasca-tarik kehilangan gaya prategang sangat bergantung pada tahapan penarikan. Penentuan kehilangan prategang akibat perpindahan elastis dihitung dengan menggunakan rumus 5 sebagai berikut:

$$\Delta F_{pES} = m \times ES \times A_p \quad (5)$$

dengan ΔF_{pES} = kehilangan gaya prategang akibat perpindahan elastis, m = perbandingan nilai modulus elastisitas baja prategang dengan modulus elastisitas beton, dan A_p = luas tendon.

Rangkak pada beton terjadi karena peningkatan deformasi terhadap waktu pada kondisi beban yang konstan. Rangkak akan mengakibatkan berkurangnya tegangan pada penampang. Besarnya kehilangan prategang akibat rangkak pada beton dapat dihitung menggunakan rumus 6 dibawah ini:

$$\Delta F_{pCR} = m \times K_{cr} \times (f_{cs} - f_{cds}) \quad (6)$$

dengan ΔF_{pCR} = kehilangan gaya prategang akibat rangkak beton, $K_{cr} = 1.60$ untuk komponen struktur pasca-tarik, f_{cs} = tegangan beton pada titik berat tendon akibat berat sendiri *box*, dan f_{cds} = tegangan beton pada titik berat tendon akibat beban mati tambahan.

Susut merupakan perubahan volume pada beton yang dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor yang mengakibatkan susut beton meliputi proporsi campuran, tipe agregat, tipe semen, waktu perawatan, waktu antara akhir perawatan eksternal dan pemberian gaya prategang, ukuran komponen struktur dan kondisi lingkungan. Ada beberapa ketentuan untuk memperhitungkan kehilangan gaya prategang akibat susut, berikut ini adalah salah satu cara yang dapat digunakan seperti pada rumus 7 dan 8 dibawah ini:

$$\varepsilon_{sh} = \frac{0.0002}{\log(t+2)} \quad (7)$$

$$\Delta f_{pSH} = E_p \times \varepsilon_{sh} \quad (8)$$

dengan ε_{sh} = regangan susut dalam beton, t = umur pembebanan, Δf_{pSH} = kehilangan gaya prategang akibat susut, dan E_p = modulus elastisitas tendon.

Kehilangan gaya prategang akibat relaksasi baja terjadi karena adanya perpanjangan konstan dari baja prategang terhadap waktu. Besarnya penurunan gaya prategang tersebut tidak hanya bergantung pada durasi gaya prategang tersebut, tetapi juga dipengaruhi oleh rasio antara tegangan awal baja prategang dan kuat leleh baja prategang $\left(\frac{f_{pi}}{f_{py}}\right)$.

Berdasarkan SNI 2847:2013 membatasi tegangan tarik untuk tendon pasca-tarik, pada daerah angkur dan sambungan sesaat setelah transfer gaya sebesar $0.70f_{pu}$ dan nilai f_{py} dapat dihitung dari:

- Batang prategang, $f_{py} = 0.80f_{pu}$
- Tendon *stress relieved*, $f_{py} = 0.85f_{pu}$
- Tendon relaksasi rendah, $f_{py} = 0.90f_{pu}$

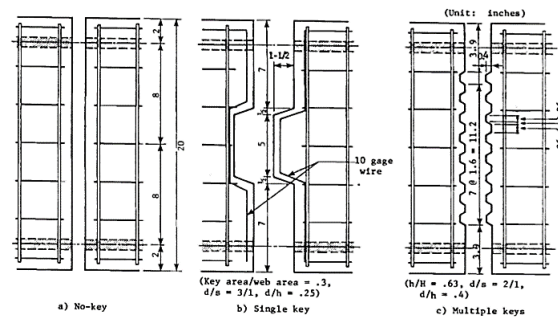
Kehilangan gaya prategang akibat relaksasi dapat dihitung dengan menggunakan rumus 9 sebagai berikut:

$$\Delta f_{pR} = f'_{pi} \times \left(\frac{\log t}{10}\right) \times \left(\frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0.55\right) \quad (9)$$

dengan Δf_{pR} = kehilangan gaya prategang akibat relaksasi baja, f'_{pi} = tegangan tarik tendon sesaat setelah transfer gaya, dan f_{py} = kuat leleh baja prategang.

Shear key

Pelaksanaan jembatan segmental *box girder* di lapangan dilakukan secara bertahap. Setiap segmen diangkat kemudian ditempatkan sesuai dengan posisi yang telah ditentukan. *Shear key* biasa terletak pada bagian *web* girder jembatan. *Shear key* memiliki dua fungsi yaitu untuk menyesuaikan antara segmen selama ereksi dan mentransfer kekuatan geser selama periode tersebut. Ada beberapa jenis sambungan geser yang dapat digunakan untuk menjadi sambungan antara segmen *box girder*. Sambungan ini bisa berupa sambungan basah (*wet joint*) dan sambungan kering (*dry joint*). Pada sambungan basah, sambungan diberikan zat perekat yang berfungsi untuk merekatkan antara satu bagian dengan bagian lainnya. Bentuk-bentuk sambungan geser dapat dibagi menjadi 3, yaitu sambungan datar (*no key*), *single key*, dan *multiple keys* (Koseki: 1983,4). Bentuk sambungan geser menurut Koseki seperti pada gambar 4 dibawah ini.



Gambar 4. Bentuk-Bentuk *Shear Key* (Sumber: Koseki, 1983)

Kapasitas geser pada *shear key*

Desain *shear key* pada umumnya mengacu pada rumus yang dikeluarkan oleh *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). AASHTO menentukan kapasitas geser dari *shear key* dengan persamaan 10 sebagai berikut:

$$V_n = A_k \sqrt{f_{ck}} (0.2048\sigma_n + 0.9961) + 0.6A_{sm}\sigma_n \quad (10)$$

dengan V_n = gaya geser nominal pada *shear key*, A_k = luas permukaan semua *shear key*, A_{sm} = luas permukaan yang bukan *shear key*, f_{ck} = kuat tekan karakteristik beton, dan σ_n = tegangan tekan sambungan .

Selain itu, juga terdapat rumus yang direkomendasikan berdasarkan ATEP, dalam *Spanish Design Code*. Rumus 11 ini bergantung pada total luas dari permukaan sambungan:

$$V_u = A_j (1.14\sigma_n + 0.0564\sqrt{f_{cd}}) \quad (11)$$

dengan V_u = gaya geser ultimit, A_j = luas permukaan semua *shear key*, dan f_{cd} = nilai kuat tekan beton.

Tahun 2006, Turmo membandingkan data hasil penelitiannya dengan kapasitas geser nominal berdasarkan metode AASHTO dan ATEP. Kemudian Turmo mengeluarkan formula baru berdasarkan rumus AASHTO yang menunjukkan hasil yang mendekati dengan eksperimennya. Rumus yang diusulkan oleh Turmo sebagai berikut:

$$V_n = A_k \frac{\sqrt[3]{f_{ck}^2}}{100} (7\sigma_n + 33) + 0.6A_{sm}\sigma_n \quad (12)$$

Pada tahun 2002, Rombach melakukan penelitian untuk menganalisa kekuatan geser dari *multiple shear key* pada kondisi *dry joint* menggunakan permodelan elemen hingga (*finite element model*) dan mengeluarkan formula lain dalam perhitungan kekuatan geser *shear key* yaitu dengan rumus 13 sebagai berikut:

$$V_n = \frac{1}{\gamma_F} (\mu \cdot \sigma_n \cdot A_{joint} + f \cdot f_{ck} \cdot A_{key}) \quad (13)$$

dengan γ_F = koefisien keamanan, μ = koefisien friksi A_{joint} = luas daerah tekan, f = faktor lekukan pada *shear key* dan A_{key} = luas permukaan semua *key* pada daerah yang gagal

Pada kapasitas geser dengan *epoxy* untuk *shear key*, hanya mengandalkan kuat friksinya sehingga persamaan kapasitas geser sebagai berikut:

$$V_n = \frac{1}{\gamma_F} \cdot \mu \cdot \sigma_n \cdot A_{joint} \quad (14)$$

2. METODOLOGI PENELITIAN

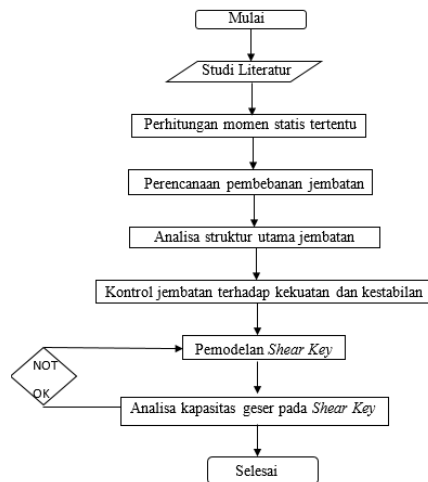
Konsep perencanaan jembatan

Perencanaan jembatan *precast segmental box girder single cell* ini sepanjang 300 m yang dibagi menjadi 5 bentang sama panjang. Dengan data perencanaan jembatan sebagai berikut:

- Panjang 1 bentang : 60 m
- Panjang 1 segmen : 3 m
- Bentang bersih jembatan : 57 m
- Lebar total jembatan : 10 m
- Lebar lantai kendaraan : 7 m
- Jumlah lajur : 2 lajur, 2 arah

Box girder ini direncanakan memiliki lebar 10 m dan tinggi 3.2 m dengan f'_c sebesar 50 MPa. Tendon direncanakan menggunakan *strand* jenis *Uncoated Seven Wire Super Strands* ASTM A-416-06 *Grade* 270 dan menggunakan angkur dari VSL yaitu *Anchorage Type GC-Spiral Reinforcement* dengan $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$.

Kerangka kerja



Gambar 5. Diagram Alir

3. HASIL ANALISIS

Tegangan ijin bahan

Beton memiliki tegangan ijin yang berbeda pada kondisi transfer dan kondisi servis sesuai dengan peraturan yang diijinkan.

- Pada kondisi transfer
 - $\bar{\sigma}_{tekan} (f_{ct}) = 28 \text{ MPa}$
 - $\bar{\sigma}_{tarik} (f_{tt}) = 0 \text{ MPa}$
- Pada kondisi servis
 - $\bar{\sigma}_{tekan} (f_{cs}) = 22.5 \text{ MPa}$
 - $\bar{\sigma}_{tarik} (f_{tt}) = 0 \text{ MPa}$
- Modulus elastisitas beton
 $E = 33234.0187 \text{ MPa}$

Tendon prategang juga memiliki tegangan tarik yang diijinkan sesuai dengan peraturan yang berlaku.

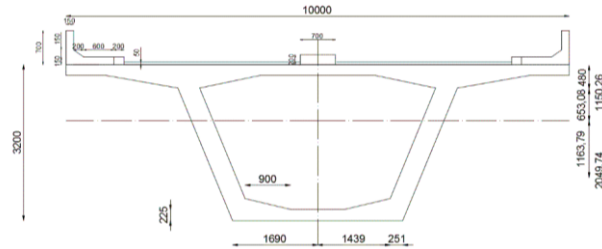
- Tegangan tarik ijin kabel (*jacking*) = 1748.4 MPa
- Tegangan tarik ijin kabel (setelah pengangkutan) = 1488 MPa

Analisa penampang *box girder*

Tabel 1. Analisa Penampang *Box Girder*

Luas Penampang (mm ²)	Titik berat		Inersia (mm ⁴)	Radius Girasi (r ²)	Kern	
	y ^t (mm)	y _b (mm)			k ^t (mm)	k ^b (mm)
6252110	1150.256	2049.744	8.36939x10 ¹²	1338651.149	653.082	1163.786

Pembebanan



Gambar 6. Penampang *box girder* dan Struktur Sekunder

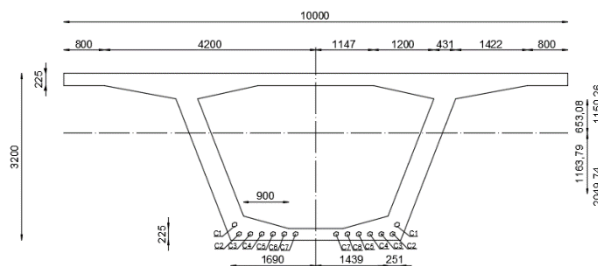
Tabel 2. Pembebanan pada *Box Girder*

Berat Sendiri (DL)	156.3028	kN/m
Beban Mati Tambahan (SDL)	Berat Aspal	7.7 kN/m
	Berat trotoar+kerb+railing	11.88 kN/m
	Berat median	3.08 kN/m
Beban Hidup (LL)	Beban terbagi rata (UDL)	48.0788 kN/m
	Beban garis (KEL)	343 kN

Kebutuhan tendon

Perhitungan jumlah tendon menggunakan metode C line dan pada saat jembatan dalam kondisi servis.

- $M_{maks} (M_z) = 97095.0593 \text{ kNm}$
- $e_c = 653.0820 \text{ mm}$
- $e \text{ tendon} = 1910.8195 \text{ mm}$
- $z = 2563.9015 \text{ mm}$
- $F_s = \frac{M_z}{z} = 37870.0427 \text{ kN}$
- $n \text{ strand} = 242.3838 \text{ strand}$
- 1 buah tendon terdiri dari 19 *strand*, sehingga total tendon yang dibutuhkan $n \text{ tendon} = \frac{242.3838}{19} = 12.7570 \sim 14 \text{ tendon}$



Gambar 7. Segmen *Box Girder* di Tengah Bentang

Kehilangan gaya prategang

Tabel 3. Kehilangan Gaya Prategang Sepanjang Bentang

Jarak (m)	Gesekan	Slip Angkur	Perpendekan Elastis	Rangkak	Susut	Relaksasi Baja
0	77.92%	75.57%	74.79%	73.64%	71.07%	67.48%
3	77.74%	75.75%	74.99%	73.68%	71.11%	67.52%
6	77.56%	75.93%	75.21%	74.03%	71.47%	67.88%
9	77.38%	76.11%	75.37%	73.84%	71.28%	67.69%
12	77.20%	76.29%	75.47%	73.31%	70.74%	67.15%
15	77.01%	76.47%	75.49%	72.54%	69.98%	66.39%
18	76.83%	76.65%	75.46%	71.61%	69.04%	65.45%
21	76.65%	76.65%	75.18%	70.38%	67.81%	64.22%
24	76.47%	76.47%	74.71%	69.07%	66.50%	62.92%
27	76.29%	76.29%	74.26%	67.94%	65.38%	61.79%
28.5	76.20%	76.20%	73.56%	66.16%	63.59%	60.00%
30	76.29%	76.29%	74.26%	67.94%	65.38%	61.79%
33	76.47%	76.47%	74.71%	69.07%	66.50%	62.92%
36	76.65%	76.65%	75.18%	70.38%	67.81%	64.22%
39	76.83%	76.65%	75.46%	71.61%	69.04%	65.45%
42	77.01%	76.47%	75.49%	72.54%	69.98%	66.39%
45	77.20%	76.29%	75.47%	73.31%	70.74%	67.15%
48	77.38%	76.11%	75.37%	73.84%	71.28%	67.69%
51	77.56%	75.93%	75.21%	74.03%	71.47%	67.88%
54	77.74%	75.75%	74.99%	73.68%	71.11%	67.52%
57	77.92%	75.57%	74.79%	73.64%	71.07%	67.48%

Shear key box girder

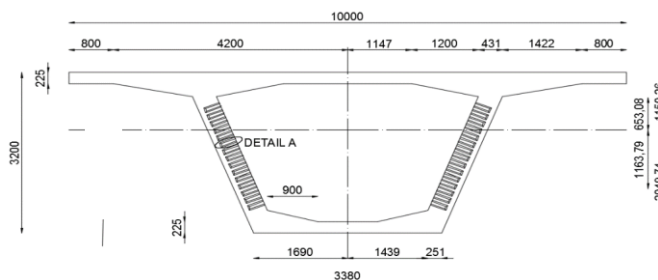
Perencanaan *shear key* dilakukan pada posisi sambungan geser antara segmen *box girder* pertama dan kedua karena gaya geser terbesar terjadi dekat dengan tumpuan. Untuk analisis *shear key*, dilakukan pada sambungan antara segmen 1 dan segmen 2 sejarak 3 m dari tepi jembatan.

$V_u = 8454.0478 \text{ kN}$

$V_p = 6484.3768 \text{ kN}$

Gaya geser akibat beban luar dan tendon = $V_u - \phi V_p$
= 3590.7652 kN

Shear key didesain pada bagian *web* dari *box girder* sehingga gaya geser yang bekerja pada titik berat penampang ditransfer ke masing-masing *web*. Gaya geser pada *web* selanjutnya dibagi ke masing-masing *shear key* yang menahan gaya geser. Posisi *shear key* pada *web box girder* seperti pada gambar 8 dibawah ini.

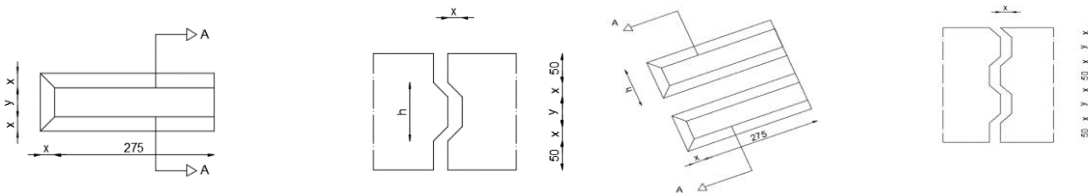


Gambar 8. Posisi *Shear Key* pada *Web Box Girder*

Jumlah shear key dalam 1 sisi web box girder sebanyak 16 buah. Pada segmen ini terdapat tendon yang terletak pada *shear key* sehingga jumlah *shear key* yang bekerja secara efektif sebanyak 10 buah. Gaya geser yang bekerja pada *web box girder* tersebut akan dibagi sama rata pada masing-masing *shear key*.

$$V_u \text{ 1 shear key} = \frac{1936.3825}{10} = 193.6383 \text{ kN}$$

Shear key direncanakan dalam 2 bentuk yang berbeda yaitu *single shear key* dan *multiple shear key* dengan bentuk seperti pada gambar 9 dibawah ini. Setiap bentuk juga direncanakan variasi ukuran dan sudut untuk diketahui kapasitas gesernya sesuai dengan tabel 4 di bawah.



Gambar 9. *Single Shear Key* dan *Multiple Shear Key*

Tabel 4. Variasi Dimensi *Shear Key*

Sudut	h (mm)	x (mm)	y (mm)	b _n (mm)
45	100	31.3	37.5	306.3
60	100	54.1	37.5	329.1
45	100	25.0	50	300.0
60	100	43.3	50	318.3
45	100	18.8	62.5	293.8
60	100	32.5	62.5	307.5

Kapasitas geser untuk *shear key* sambungan kering dihitung menggunakan metode AASHTO, ATEP, Turmo dan Rombach. Hasil perhitungan kapasitas geser nominal untuk *single shear key* dan *multiple shear key* ditampilkan pada tabel 5 dan 6 di bawah ini.

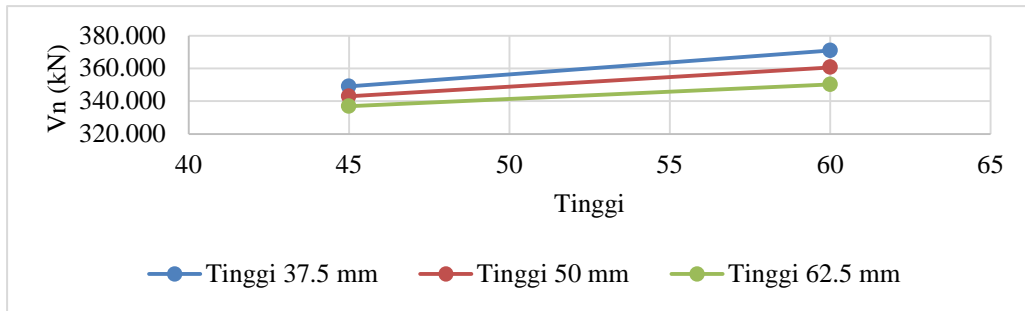
Tabel 5. Kapasitas Geser *Single Shear Key* Sambungan Kering

Sudut	y (mm)	V _n (kN)				V _n rata-rata (kN)	ØV _n (kN)
		AASHTO	ATEP	Turmo	Rombach		
45	37.5	522.378	338.170	338.351	197.080	348.995	261.746
60	37.5	558.097	359.965	361.459	204.186	370.927	278.195
45	50	512.550	332.143	331.993	195.142	342.957	257.218
60	50	541.244	349.703	350.557	200.822	360.581	270.436
45	62.5	502.693	326.085	325.614	193.205	336.899	252.674
60	62.5	524.302	339.349	339.596	197.461	350.177	262.633

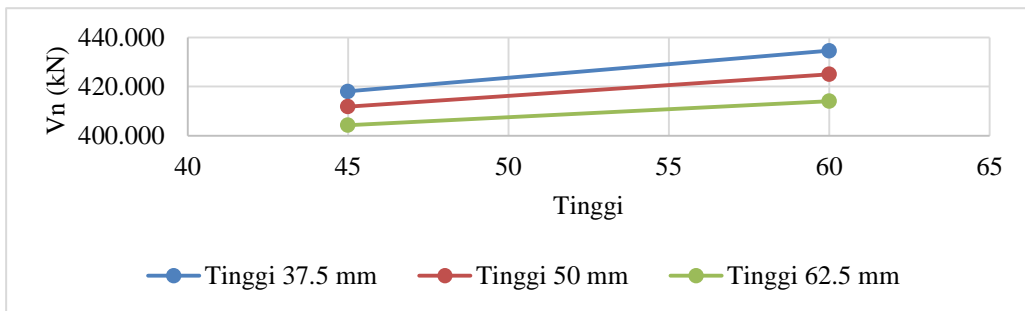
Tabel 6. Kapasitas Geser *Multiple Shear Key* Sambungan Kering

Sudut	y (mm)	V _n (kN)				V _n rata-rata (kN)	ØV _n
		AASHTO	ATEP	Turmo	Rombach		
45	37.5	639.296	338.170	455.269	239.342	418.020	313.515
60	37.5	664.447	359.965	467.809	246.025	434.562	325.921
45	50	632.393	332.143	451.835	230.959	411.833	308.874
60	50	652.568	349.703	461.881	235.897	425.012	318.759
45	62.5	625.476	326.085	448.398	217.228	404.297	303.222
60	62.5	640.649	339.349	455.943	220.362	414.076	310.557

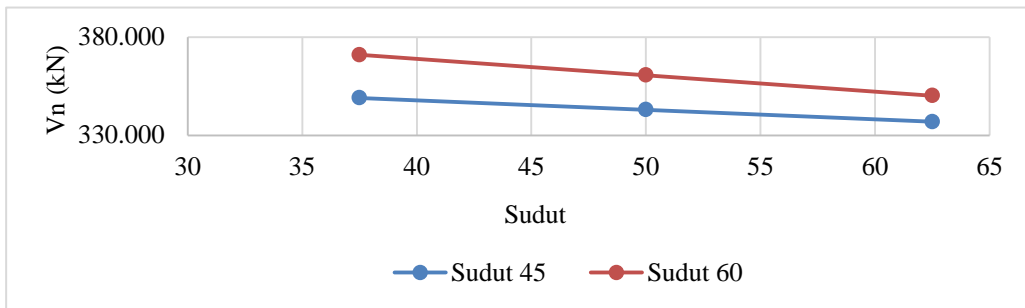
Hasil perhitungan kapasitas geser nominal dari *single shear key* dan *multiple shear key* ditampilkan dalam bentuk grafik pada gambar 10 sampai 13 di bawah ini.



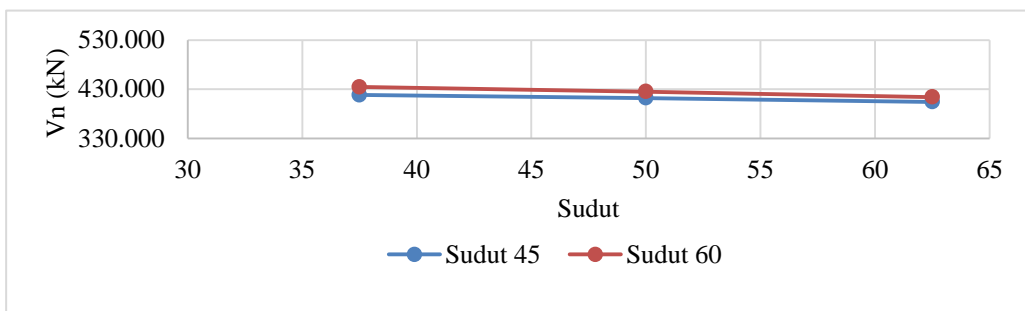
Gambar 10. Grafik Pengaruh Sudut Terhadap V_n Single Shear Key Sambungan Kering



Gambar 11. Grafik Pengaruh Sudut Terhadap V_n Multiple Shear Key Sambungan Kering



Gambar 12. Grafik Pengaruh Tinggi Terhadap V_n Single Shear Key Sambungan Kering



Gambar 13. Grafik Pengaruh Tinggi Terhadap V_n Multiple Shear Key Sambungan Kering

Kapasitas geser nominal pada saat *web box girder* tidak ada *shear key* serta tidak diberikan *epoxy* sebagai berikut.
 $\phi V_n = 1936.383 \text{ kN}$

Saat sambungan tanpa *shear key* diberikan *epoxy* terjadi pengurangan kapasitas geser pada *web box girder*.
 Kapasitas geser *flat key* dengan *epoxy* sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\phi V_n &= 0.75 \cdot \frac{1}{\gamma_F} \cdot \mu \cdot \sigma_n \cdot A_{joint} \\ &= 1832.1400 \text{ kN}\end{aligned}$$

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, maka dapat disimpulkan:

1. Kapasitas geser nominal dengan *shear key* lebih besar 20.9042% daripada kapasitas geser nominal tanpa menggunakan *shear key* meskipun telah diberikan *epoxy*.
2. Analisis numerik menggunakan metode AASHTO, Turmo dan Rombach menunjukkan peningkatan kapasitas geser nominal sebesar 17.9921%, 25.3021%, dan 14.5283% dari *single shear key* menjadi *multiple shear key*. Sedangkan untuk metode ATEP tidak diperoleh adanya perbedaan kapasitas geser nominal antara *single shear key* dan *multiple shear key* karena metode ini hanya memperhitungkan luas permukaan bidang *shear key*.
3. Untuk tinggi *shear key* yang sama, semakin besar sudut *shear key* semakin tinggi kapasitas geser nominal.
4. Untuk sudut *shear key* yang sama, semakin tinggi *shear key* semakin kecil kapasitas gesernya.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (1999). *Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.
- ASTM A 416. *Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete*.
- ATEP. (1996). *Proyecto y construcción de puentes y estructuras con pretensado exterior*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Madrid.
- Badan Standardisasi Nasional. (2004). *Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan*. RSNI T-12-2004. BSN, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung (SNI 2847:2013)*. Badan Litbang Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *Standar Pembebanan untuk Jembatan (SNI 1725:2016)*. Badan Litbang Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia, Jakarta.
- Koseki, K., dan Breen, J. E. (1983). *Exploratory Study of Shear Strength of Joint for Precast Segmental Bridges*. The Universitas Texas Austin, Texas..
- Nawy, E. G., Hardani, dan Hardani, H.W. (2001). *Beton Prategang Suatu Pendekatan Mendasar, Volume 1 Edisi ke 3*. Erlangga, Jakarta.
- Podolny JR, Walter dan Muller, Jean.M. (1982). *Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Rombach, G. (2002). "Precast Segmental Box Girder Bridges with External Prestressing Design and Construction". Technical University of Hamburg, Hamburg.
- Sullivan, S. R. (2003) "Behavior of Transverse Joint in Precast Deck Panel System, MSc. Thesis". College of Engineering and Technology of Ohio University, Ohio.
- Turmo, J., Ramos, G. dan Aparicio, A. C. (2006). "Shear Strength of Match Cast Dry Joints of Precast Concrete Segmental Bridges: Proposal for Eurocode 2". *Materiales de Construcción*.
- U.S. Department of Transportation. (2016). *Post-Tensioned Box Girder Design Manual*. Federal Highway Administration, Washington.