

CATATAN TEKNIS TERHADAP STANDAR KRITERIA PEKERJAAN BETON *POST-TENSION* BERDASARKAN *STRESSING RECORD* DI JEMBATAN PULAU BALANG DAN JEMBATAN TELUK KENDARI

Armen Adekristi
Kepala Satuan Kerja Jembatan
Pulau Balang
Direktorat Jenderal Bina Marga
Kementerian PUPR
armenadekristi@yahoo.com

Arif Abdur Rohim
Stressing Engineer Jembatan
Pulau Balang
Direktorat Jenderal Bina Marga
Kementerian PUPR
arifchim33@gmail.com

Muhammad Rizaldi Perkasa
Stressing Engineer Jembatan
Pulau Balang
Direktorat Jenderal Bina Marga
Kementerian PUPR
mrizaldi.p@gmail.com

Abstract

Prestressed concrete technology has been growing, both in terms of materials and in terms of equipment technology. From an implementation perspective, it is very important to know the actual stress acting on the tendon, and elongation is generally used to verify the actual stress. However, the calculation of elongation using several assumptions causes differences between theoretical elongation and actual elongation measured in the field. This paper presents the elongation behavior for several types of tendons obtained from the construction of the Pulau Balang Bridge and the Teluk Kendari Bridge. This study shows that for tendons with measured elongations exceed the permitted elongation value, the actual force is verified by lift-off using a mono-jack.

Keywords: prestressed concrete; theoretical elongation; measured elongations; bridge; tendon.

Abstrak

Teknologi beton prategang telah semakin berkembang, baik dari sisi material maupun dari sisi teknologi alat. Dari sisi pelaksanaan, sangat penting untuk diketahui tegangan aktual yang bekerja pada tendon, dan elongasi umumnya digunakan untuk memverifikasi tegangan aktual tersebut. Tetapi perhitungan elongasi yang menggunakan beberapa asumsi menyebabkan sering terjadi perbedaan antara elongasi teoritis dan elongasi hasil pengukuran di lapangan. Makalah ini menyajikan perilaku elongasi untuk beberapa jenis tendon yang didapat dari pembangunan Jembatan Pulau Balang dan Jembatan Teluk Kendari. Studi ini menunjukkan bahwa untuk tendon dengan elongasi aktual yang diukur di lapangan melebihi nilai yang disyaratkan, gaya yang bekerja diverifikasi melalui *lift-off* dengan menggunakan *mono-jack*.

Kata-kata kunci: beton prategang; elongasi teoritis; elongasi hasil pengukuran; jembatan; tendon.

PENDAHULUAN

Konsep dasar beton *prestressed* adalah menambahkan gaya tekan yang cukup sedemikian rupa sehingga pada tahap layan suatu struktur memiliki tegangan tarik yang minimal dengan kontrol pada retak yang diizinkan, apabila direncanakan sebagai penampang retak. Penggunaan *prestressed* pada beton mengalami kemajuan yang signifikan pada tahun 1940, ketika seorang insinyur berkebangsaan Prancis, Eugene Freyssinet, mengembangkan sistem *prestressed* menggunakan kabel mutu tinggi dengan sistem angkur. Saat ini teknologi beton *prestressed* terus mengalami kemajuan, baik pemahaman terhadap perilaku material maupun dari sisi teknologi alat. Kehilangan tegangan (*loss of prestressed*) pada *strand* beton

prestressed merupakan fungsi perilaku material maupun peralatan yang digunakan. Karena itu, penting untuk diketahui tegangan yang terjadi pada *strand* akibat kehilangan tegangan tersebut.

Pada banyak kasus, perpanjangan atau elongasi *strand* pascapenarikan menjadi parameter kunci dalam menentukan tegangan aktual yang bekerja. Tegangan pada *strand* secara proporsional berhubungan langsung dengan elongasi yang terjadi. Elongasi dihitung dengan menggunakan persamaan yang telah disepakati dan kemudian dibandingkan dengan elongasi aktual hasil pengukuran di lapangan. Idealnya, diharapkan deviasi atau *error* yang terjadi antara perhitungan dan pengukuran di lapangan sangat kecil.

Terdapat beberapa peraturan desain yang mengatur perancangan maupun pelaksanaan beton *prestressed*. ACI (2014) mengatur toleransi elongasi untuk beton *post-tension* sebesar 7%, sedangkan BSI (2009) mengatur toleransi elongasi sebesar 15% untuk tendon tunggal dan 5% untuk grup tendon. BSN (2004) mensyaratkan bahwa elongasi yang melebihi 7% pada tendon *post-tension* harus diteliti dan dikoreksi lebih lanjut, sedangkan Bondy (2012) menyatakan bahwa untuk tendon pendek, elongasi dibatasi sebesar 6 mm.

Perhitungan elongasi tendon merupakan fungsi faktor friksi (μ_p, k), angkur set, dan properti *strand* (luas penampang dan modulus elastisitas). Parameter tersebut merupakan faktor dengan unsur ketidakpastian yang diambil dari beberapa data uji. Modulus elastisitas *strand* biasa diasumsikan sebesar 195.000 MPa, sedangkan luas *strand* dapat mengacu pada ASTM A416 dan BS 5896 (Tabel 1) serta rentang faktor friksi dapat mengacu pada ACI 423.10R-16 (Tabel 2). Adapun set angkur dapat bervariasi antara 3 mm hingga 13 mm sesuai dengan produk yang digunakan, namun pada umumnya diasumsikan sebesar 6 mm.

Tabel 1 Rentang Faktor Friksi berdasarkan ACI 423.10R-16

<i>Post-Tension 7 Wire Strand</i>	Friksi Angular (μ_p) per Radian	Friksi Wobble (k) per m
<i>Grouted dengan ducting Bergelombang</i>	0,15–0,25	0,0002–0,001
<i>Unbonded (greased)</i>	0,01–0,18	0,0002–0,001

Tabel 2 Referensi Luas Penampang *Strand*

Tipe <i>Strand</i> , mm (in.)	ASTM A416, mm ² (in. ²)	BS 5896, mm ² (in. ²)
15,7 (0,62)		150 (0,232)
15,2 (0,6)	140 (0,215)	139 (0,215)
12,9 (0,5)		100 (0,155)
12,7 (0,5)	98,7 (0,153)	98,7 (0,153)

Perlu diperhatikan bahwa penggunaan asumsi-asumsi tersebut akan berpengaruh terhadap perhitungan elongasi dan menyebabkan timbulnya perbedaan nilai kekeliruan (*error*) yang signifikan antara hasil elongasi perhitungan dan hasil pengukuran. Pada studi ini dikaji trend elongasi yang terjadi pada pekerjaan pembangunan Jembatan Pulau Balang dan Jembatan Teluk Kendari.

PENGUMPULAN DATA

Data *post-tension* berupa *jacking force*, panjang tendon, dan elongasi didapat dari data penarikan (*stressing record*) yang dilakukan di Jembatan Pulau Balang dan di Jembatan Teluk Kendari. Lebih dari 4300 data penarikan disajikan baik yang menggunakan *mono-jack* maupun yang menggunakan *multi-jack*, dengan jumlah *strand* bervariasi, yaitu 12, 19, 20, dan 22 *strand*.

Untuk keperluan analisis, *layout* tendon dibagi menjadi 4 macam, yaitu tendon melingkar (*loop*), tendon melengkung (*curve*), tendon lurus (*straight*), dan tendon lurus dengan lengkung tajam pada ujung (*excessive curve at end*). Populasi data yang dikumpulkan dari 2 jembatan tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.

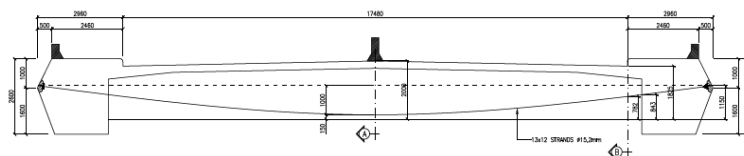
Tabel 3 Populasi Data Berdasarkan *Layout* Tendon

No.	Jenis Tendon	Panjang Tendon (m)	Jumlah Data
1	<i>Loop</i>	9–12	3301
2	<i>Curve</i>	23	390
3	<i>Straight</i>	9–53	607
4	<i>Straight w/ Excessive Curve at End</i>	> 40	93

Jembatan Pulau Balang

Jembatan Pulau Balang merupakan suatu jembatan dengan panjang total 971 m dan mempunyai 4 lajur lalu lintas. Jembatan ini terdiri atas jembatan utama tipe *stay cable* dengan panjang 804 m dan jembatan pendekat dengan struktur PCI girder bentang 40 m sebanyak 4 bentang.

Balok utama pada jembatan utama diperkuat dengan tendon lurus *strand* 0,6 in-19 *strand* dengan tipikal panjang 18 m, sedangkan tendon transversal *main deck* merupakan tendon melengkung 0,6 in-12 *strand* dengan panjang 23,1 m (lihat Gambar 1). *Pylon* jembatan diperkuat dengan *loop* tendon 0,6 in-7 *strand* dan 0,6 in-12 *strand* dengan panjang tipikal 11,8 m (lihat Gambar 3). Pada bagian *back-stayed* dan *closure* digunakan tendon 0,6 in-19 *strand* dengan *layout* melengkung tajam pada sisi ujung/*blister* (lihat Gambar 2).

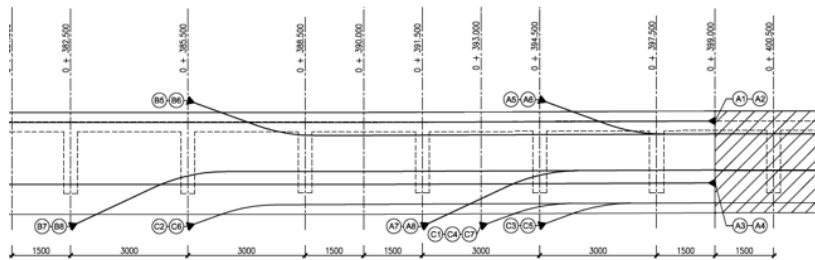


Gambar 1 *Layout* Tendon pada *Cross Beam Main Deck* Jembatan Pulau Balang

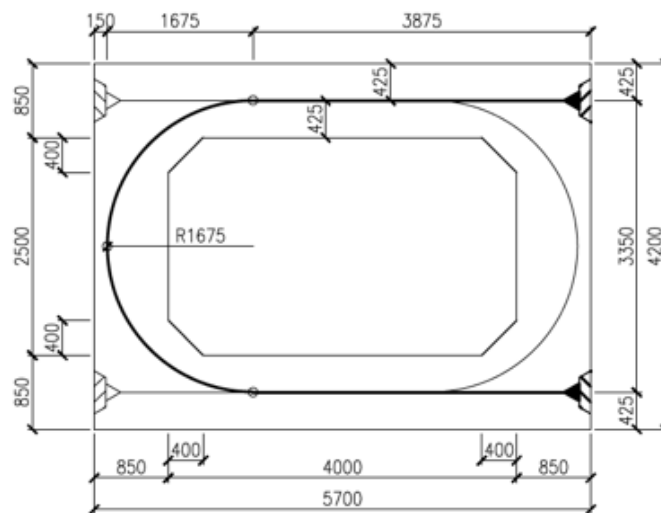
Jembatan Teluk Kendari

Konstruksi utama Jembatan Teluk Kendari adalah jembatan *cable stayed cablestay* dengan konfigurasi bentang 43+94+200+94+43 m dengan 2 *pylon* kembar serta sistem lantai

jembatan berupa balok samping (*edge beam*) yang dihubungkan oleh balok-balok melintang (*transverse beam*), dengan jarak antarbalok melintang 3 m. Jembatan pendekat menggunakan balok pratekan bentang 30 m pada sisi Kota Lama dan bentang 40 m pada sisi Poasia.

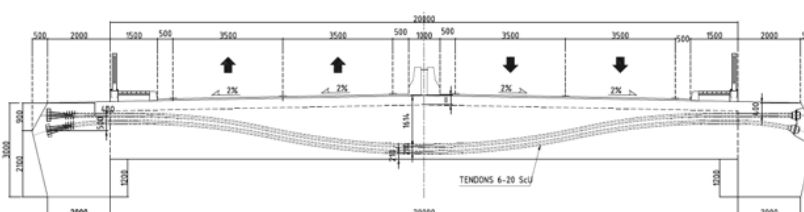


Gambar 2 Layout Longitudinal Tendon pada *Backstayed* Jembatan Pulau Balang dengan *Excessive Curve* pada Ujung

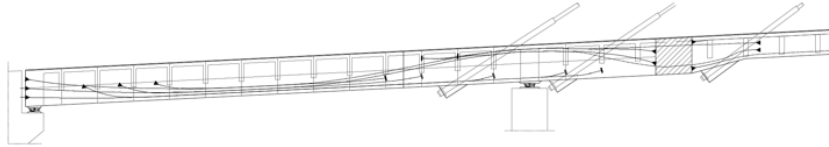


Gambar 3 Layout Tendon pada *Pylon* Jembatan Pulau Balang

Balok utama pada *main deck* jembatan *stayed cable* diperkuat dengan tendon lurus *strand* 0,6 in-22 dengan tipikal panjang 9 m, sedangkan tendon transversal *main deck* merupakan tendon melengkung 0,6 in-20 *strand* dengan panjang 23,79 m, seperti yang terdapat pada Gambar 4. *Pylon* jembatan diperkuat dengan *loop* tendon 0,6 in-12 *strand* dengan panjang tipikal 7,6 m dan 9,8 m. Pada bagian *back-stayed* dan *closure* digunakan tendon 0,6 in-22 *strand* dengan *layout* melengkung, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4 Layout Tendon pada *Cross Beam* Jembatan Pulau Teluk Kendari

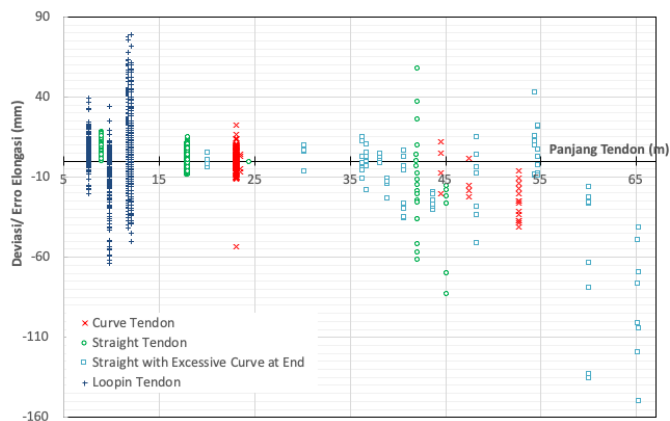


Gambar 5 Layout Longitudinal Tendon pada *Backstayed* Jembatan Pulau Teluk Kendari

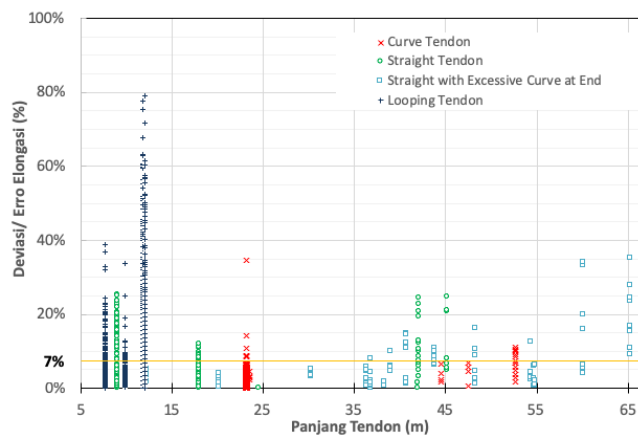
ANALISIS DATA

Perpanjangan *Strand*

Bagian ini membahas hasil bacaan elongasi aktual untuk mendapatkan pemahaman mengenai *trend* elongasi untuk keempat klasifikasi tendon. Gambar 6 menunjukkan sebaran data *error* atau deviasi elongasi actual hasil bacaan lapangan terhadap elongasi teoritis, sedangkan Gambar 7 menunjukkan persentase *error* atau deviasi elongasi terhadap elongasi teoritis. Perhitungan elongasi teoritis menggunakan asumsi nilai faktor friksi angular dan *wobble* (μ_p , k) masing-masing sebesar 0,2 dan 0,0015.



Gambar 6 Deviasi Elongasi Aktual terhadap Elongasi Teoritis (mm)



Gambar 7 Deviasi Elongasi Aktual terhadap Elongasi Teoritis (%)

Tabel 4 Rekapitulasi *Stressing Record* Tendon Berdasarkan Panjang

Tipe	No.	Panjang Tendon (m)	Elongasi Desain (mm)	Elongasi Aktual (mm)	Error atau Deviasi Elongasi			
					Mean		Deviasi Standar	
					(mm)	(%)	(mm)	(%)
<i>Looping Tendon</i>	1	7,61	54,50	58,96	4,46	9,34	5,49	9,00
	2	9,81	73,70	71,69	-2,01	8,74	13,97	9,68
	3	11,80	80,60	83,59	2,99	14,92	15,89	13,40
	4	12,04	82,00	85,12	3,12	14,56	15,38	12,41
<i>Short Tendon</i>	5	9,07	70,70	77,15	6,45	9,22	4,78	4,78
	6	12,20	79,69	82,68	2,99	3,80	1,22	1,57
<i>Medium Tendon</i>	7	18,00	127,70	131,82	4,12	4,36	4,46	1,98
	8	20,10	127,70	126,73	-0,97	2,21	6,28	1,28
	9	23,11	158,90	159,57	0,67	2,85	6,12	2,67
	10	23,47	145,90	144,93	-0,97	-0,97	5,42	0,97
	11	30,20	166,10	169,64	3,54	3,86	7,06	0,96
	12	36,57	232,00	232,79	0,79	2,82	8,96	2,30
	13	38,59	239,00	233,94	-5,06	3,77	9,98	3,36
<i>Long Tendon</i>	14	47,00	328,00	314,46	-13,54	4,38	10,57	2,71
	15	42,10	284,00	271,13	-11,87	9,48	30,52	7,44
	16	40,75	246,00	229,81	-16,19	7,44	17,70	6,10
	17	43,78	287,20	263,17	-24,03	8,09	4,41	1,69
	18	44	303	300,3957	-2,6025	3,67	14,2	2,22
	19	45,9635	338,00	296,28	-41,72	12,34	27,76	8,21
	20	48,3	321,00	305,49	-15,51	6,43	23,26	5,62
	21	52,00	367,00	341,10	-25,90	7,09	11,07	2,98
	22	54,5	356,40	364,05	7,65	3,56	14,23	2,89
	23	60,1	400,30	376,27	-24,03	8,09	4,41	1,69
24	65,2	427,40	338,32	-89,08	20,35	36,52	8,87	

Tabel 5 Rekapitulasi *Stressing Record* Tendon Berdasarkan *Layout*

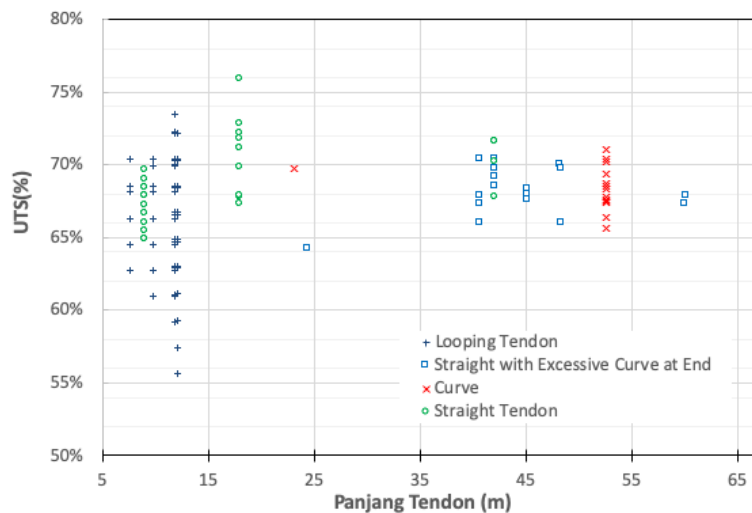
Tipe	No.	Panjang Tendon (m)	Elongasi Desain (mm)	Elongasi Aktual (mm)	Error atau Deviasi Elongasi			
					Mean		Deviasi Standar	
					(mm)	(%)	(mm)	(%)
<i>Looping Tendon</i>	1	7,61	54,50	58,96	4,46	9,34	5,49	9,00
	2	9,81	73,70	71,69	-2,01	8,74	13,97	9,68
	3	11,80	80,60	83,59	2,99	14,92	15,89	13,40
	4	12,04	82,00	85,12	3,12	14,56	15,38	12,41
<i>Curve Tendon</i>	5	23,11	158,90	159,57	0,67	2,85	6,12	2,67
	6	23,47	145,90	144,93	-0,97	3,17	5,42	0,97
	7	44,00	303,00	300,40	-2,60	3,67	14,22	2,22
	8	52,00	367,00	341,10	-25,90	7,09	11,07	2,98
	9	47,00	328,00	314,46	-13,54	4,38	10,57	2,71
<i>Straight Tendon</i>	10	9,07	70,70	77,15	6,45	9,22	4,78	4,78
	11	18,00	127,70	131,82	4,12	4,48	4,46	1,98
	12	42,10	284,00	272,13	-11,87	9,48	30,52	7,44
<i>Straight with Excessive Curve at End</i>	13	45,96	338,00	296,28	-41,72	12,34	27,76	8,21
	14	12,20	79,69	82,68	2,99	3,80	1,22	1,57
	15	20,10	127,70	126,73	-0,97	2,21	6,28	1,28
	16	30,20	166,10	169,64	3,54	3,86	7,06	0,96
	17	36,57	232,00	232,79	0,79	2,82	8,96	2,30
	18	38,59	239,00	233,94	-5,06	3,77	9,98	3,36
	19	40,75	246,00	229,81	-16,19	7,44	17,70	6,10
	20	43,78	287,20	263,17	-24,03	8,09	4,41	1,69
	21	48,3	321,00	305,49	-15,51	6,43	23,26	5,62
	22	54,5	356,40	364,05	7,65	3,56	14,23	2,89
	23	60,1	400,30	376,27	-24,03	8,09	4,41	1,69
	24	65,2	427,40	338,32	-89,08	20,35	36,52	8,87

Data tersebut menunjukkan kecenderungan perilaku tendon sebagai berikut:

- 1) *Loop* tendon memiliki deviasi elongasi yang sangat besar, dengan nilai rata-rata 13,05% dan deviasi standar 12,21%. Hal ini dapat disebabkan, antara lain, oleh ketidaksempurnaan posisi *wedges* atau permukaan beton yang tidak merata, pengukuran tegangan dan pengukuran elongasi dilakukan secara manual sehingga memiliki akurasi yang rendah, dan besarnya nilai friksi pada bagian melengkung akibat *strand* bergesekan dengan *ducting*.
- 2) *Curve* tendon memiliki nilai rata-rata deviasi elongasi yang cukup kecil, yaitu 2,85% tetapi dengan deviasi standar moderate sebesar 2,66%.
- 3) Tendon lurus memiliki nilai rata-rata deviasi yang memenuhi persyaratan atau sebesar 5,99% dengan deviasi standar 4,87%.
- 4) Tendon lurus dengan ujung melengkung memiliki deviasi elongasi sebesar 6,81% dengan deviasi standar yang cukup tinggi, yaitu 7,52%.

Sedangkan berdasarkan panjang tendon, didapat hasil sebagai berikut:

- 1) Tendon pendek memiliki rata-rata nilai deviasi elongasi dan deviasi standar masing-masing sebesar 5,99% dan 4,87%. Pada tendon pendek, deviasi elongasi cenderung positif, yang menandakan elongasi yang terjadi lebih elongasi teoritis.
- 2) Tendon menengah memiliki rata-rata deviasi sebesar 2,70% dan deviasi standar sebesar 0,91%. Pada tendon jenis ini, elongasi cenderung dapat memenuhi persyaratan, yaitu 7%.
- 3) Deviasi pada tendon panjang sebesar 8,27% dengan deviasi standar sebesar 2,73%. Pada tendon panjang, deviasi elongasi cenderung negatif, yang menandakan elongasi yang terjadi lebih kecil daripada elongasi teoritis.



Gambar 8 Data *Lift-Off* untuk Tendon dengan Elongasi > 7%

Lift-Off

Terdapat 452 tendon dengan deviasi elongasi lebih besar dari 7%. Pada tendon tersebut dilakukan *lift-off* menggunakan *mono jack* untuk mendapatkan tegangan aktual yang

bekerja pada tendon tunggal. Gambar 8 menunjukkan hasil *lift-off* untuk tendon dengan deviasi elongasi lebih besar dari 7%. Analisis statistika terhadap parameter panjang dan *layout* tendon dilakukan terhadap hasil *lift-off*, seperti yang ditampilkan pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 6 Rekapitulasi Hasil *Lift-off* untuk Tendon dengan Elongasi Lebih Besar dari 7% Berdasarkan Panjang

No.	Jenis Tendon	Error atau Deviasi Elongasi (%)		<i>Lift-Off</i> (%UTS)	
		Mean	Standar Deviasi	Mean	Deviasi Standar
1	<i>Loop</i>	22,45	15,11	65,37	2,57
2	<i>Short</i>	21,98	2,09	67,25	1,55
3	<i>Medium</i>	11,51	6,86	70,45	2,36
4	<i>Long</i>	15,36	9,18	69,06	1,73

Tabel 7 Rekapitulasi Hasil *Lift-off* untuk Tendon dengan Elongasi Lebih Besar dari 7% Berdasarkan *Layout*

No.	Jenis Tendon	Error atau Deviasi Elongasi (%)		<i>Lift-Off</i> (%UTS)	
		Mean	Standar Deviasi	Mean	Deviasi Standar
1	<i>Loop</i>	22,45	15,11	65,37	2,57
2	<i>Curve</i>	17,44	3,59	68,89	2,74
3	<i>Straight</i>	11,50	6,83	68,75	1,65
4	<i>Straight with Excessive Curve at End</i>	13,14	5,48	68,62	1,77

Berdasarkan data pada Tabel 6 dan Tabel 7, terlihat bahwa *lift-off* untuk tendon *loop* dengan elevasi lebih besar dari 7% menunjukkan nilai rata-rata 65,37%. Sedangkan hasil *lift-off* untuk tendon dengan *layout* lainnya menunjukkan nilai berkisar 68,7% UTS. Hasil *lift-off* ini sesuai dengan toleransi *loss of prestress* akibat *anchorage slip*, *elastic shortening*, dan *friction*.

Dengan memperhitungkan hasil perhitungan pada elongasi dan *lift-off*, dapat dinyatakan hal-hal berikut:

- 1) Penggunaan elongasi sebagai parameter *quality assurance* pada *loop* tendon tidak akurat. Hal ini disebabkan banyaknya *loss of prestress*, terutama pada bagian melengkung yang tidak dapat secara akurat dianalisis menggunakan pendekatan teori.
- 2) Faktor panjang pada tendon melengkung tidak begitu sensitif terhadap bacaan elongasi. Untuk hal ini, elongasi dapat dijadikan parameter *quality assurance*. Persyaratan *error* atau deviasi elongasi sebesar 7%, sesuai peraturan, masih relevan terhadap data yang ada.
- 3) Pada tendon pendek dengan panjang kurang dari 15m, sangat sulit untuk dicapai batasan *error* atau deviasi elongasi sebesar 7%. Faktor *anchorage slip* menjadi penyumbang deviasi elongasi yang dominan. Data menunjukkan bahwa batasan elongasi lebih sesuai menggunakan satuan dibandingkan dengan menggunakan persentase. Batasan panjang 10 mm dapat digunakan sebagai acuan mengingat nilai ini masih dalam cakupan nilai rata-rata dan 1 deviasi standar elongasi.
- 4) Pada tendon panjang dengan *layout* selain tendon melengkung, data menunjukkan bahwa hasil pengukuran elongasi sangat bervariasi. Hal ini dapat terjadi karena pada tendon

panjang terdapat potensi adanya *curvature* tendon yang tidak diinginkan (*un-intended curvature*) akibat ketidakrapihan perancangan yang mengakibatkan friksi yang terjadi melebihi asumsi dalam perancangan.

Selanjutnya Tabel 8 menunjukkan laju elongasi (*rate of elongation*) untuk berbagai tendon dengan variasi panjang. Temuan awal menunjukkan bahwa semakin panjang tendon, semakin kecil laju elongasi. Hal ini dapat disebabkan oleh adanya *un-intended curvature*, seperti yang telah dibahas. Di sisi lain, perlu dipelajari variasi koefisien friksi angular dan *wobble* (μ , k), terhadap panjang tendon.

Tabel 8 Laju Elongasi

Tipe	No.	Panjang Tendon (m)	Elongasi Desain (mm)	Elongasi Aktual Rata-Rata (mm)	Laju Elongasi (mm/m)
<i>Looping Tendon</i>	1	7,61	54,50	58,96	7,75
	2	9,81	73,70	71,69	7,31
	3	11,80	80,60	83,59	7,08
	4	12,04	82,00	85,12	7,07
<i>Short Tendon</i>	5	9,07	70,70	77,15	8,51
	6	12,20	79,69	82,68	6,78
<i>Medium Tendon</i>	7	18,00	127,70	131,82	7,32
	8	20,10	127,70	126,73	6,31
	9	23,11	158,90	159,57	6,90
	10	23,47	145,90	144,93	6,17
	11	30,20	166,10	169,64	5,62
	12	36,57	232,00	232,79	6,37
	13	38,59	239,00	233,94	6,06
<i>Long Tendon</i>	14	47,00	328,00	314,46	6,69
		42,10	284,00	272,13	6,46
	15	40,75	246,00	229,81	5,64
	16	43,78	287,20	263,17	6,01
	17	44	303	300,3975	6,83
	18	45,9635	338,00	296,28	6,45
	19	48,3	321,00	305,49	6,32
	20	52,00	367,00	341,10	6,56
	21	54,5	356,40	364,05	6,68
	22	60,1	400,30	376,27	6,26
23	65,2	427,40	338,32	5,19	

One-Side Stressing

Idealnya, pada tendon panjang dilakukan penarikan dari 2 arah (*double live anchorage*) untuk mengkompensasi *loss of prestress* yang terjadi sepanjang tendon utamanya akibat friksi. Akan tetapi pada beberapa struktur, tidak dimungkinkan untuk dilakukan penarikan tendon dari 2 arah, karena adanya hambatan pada salah satu sisi, misalnya terhalang oleh badan abutment. Karena itu pada makalah ini hanya dibahas perilaku tendon panjang dengan penarikan dari 1 arah saja (*dead-live anchorage*).

Terdapat 44 data *stressing record* untuk tendon lurus dengan panjang bervariasi, dari 27 m hingga 65 m. Penarikan dilakukan dari 1 arah, kemudian *lift-off* dilakukan pada kedua arah. Pada Gambar 9 ditunjukkan data *lift-off* pada sisi non-stressing dan pada Tabel 9 ditunjukkan nilai *lift-off* dan elongasi pada kedua sisi tendon.

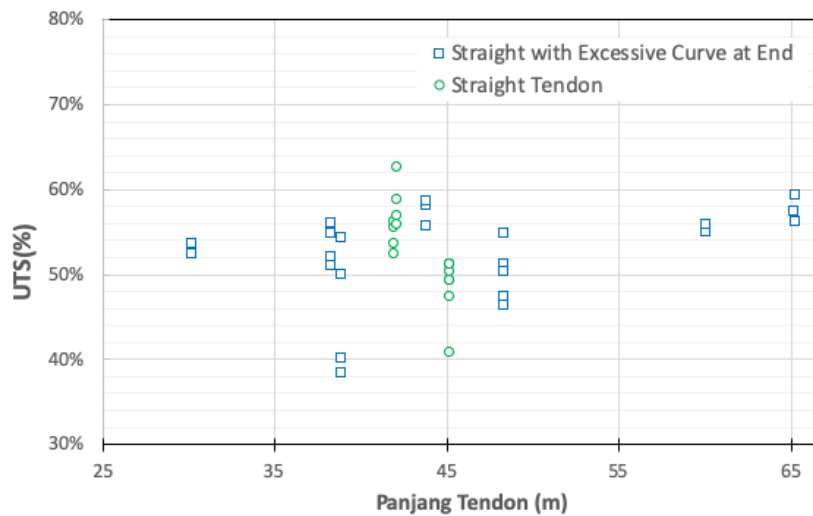
Tabel 9 Data Elongasi dan *Lift-Off* untuk Tendon dengan *Stressing* 1 Arah

No.	Panjang (m)	Sisi <i>Stressing</i>		Sisi Non- <i>Stressing</i>	
		Error Elongasi (%)	<i>Lift-Off</i> (%UTS)	Error Elongasi (%)	<i>Lift-Off</i> (%UTS)
1	30,2	5,23%	68,0%	-4,21%	53,60%
2	30,2	3,32%	67,5%	-3,05%	52,30%
3	38,25	0,48%	70,1%	-10,41%	52,00%
4	38,25	0,96%	68,4%	-10,95%	51,00%
5	38,25	-0,74%	69,2%	-7,88%	54,80%
6	38,25	1,79%	70,1%	-1,41%	56,04%
7	38,924	-4,66%	68,0%	-2,86%	38,30%
8	38,924	-5,96%	66,5%	-15,34%	49,88%
9	38,924	-5,65%	69,2%	-16,24%	54,20%
10	38,924	-9,94%	71,2%	-23,59%	40,00%
11	43,781	-6,48%	68,3%	-10,20%	58,00%
12	43,781	-6,39%	67,3%	-1,02%	58,64%
13	43,783	-8,77%	69,3%	-9,47%	55,56%
14	43,783	-6,45%	70,1%	-6,96%	55,60%
15	48,314	4,49%	71,4%	-18,61%	50,19%
16	48,314	-1,30%	72,1%	-1,30%	51,12%
17	48,314	-16,05%	70,0%	-30,15%	46,30%
18	48,32	1,09%	69,6%	-14,93%	50,19%
19	48,32	-2,58%	69,9%	-15,78%	47,35%
20	48,32	-8,91%	69,8%	-16,67%	54,82%
21	48,32	-10,57%	66,0%	-29,94%	38,89%
22	60,101	-3,97%	67,3%	-4,18%	54,90%
23	60,101	-6,36%	70,4%	-6,70%	55,80%
24	60,124	-5,39%	67,9%	-5,70%	55,80%
25	60,124	-6,16%	68,0%	-6,52%	55,80%
26	65,214	-16,77%	67,5%	-17,76%	57,41%
27	65,214	-10,90%	66,7%	-11,54%	57,41%
28	65,269	-9,14%	70,2%	-9,75%	59,26%
29	65,269	-15,26%	69,8%	-16,28%	56,17%
30	41,967	1,57%	68,50%	-2,40%	56,20%
31	41,967	1,57%	69,40%	-3,10%	52,34%
32	41,967	-1,41%	67,80%	-1,08%	53,58%
33	41,967	-0,01%	71,20%	-5,07%	56,80%
34	42,117	19,18%	69,75%	-1,74%	61,50%
35	42,117	3,14%	69,70%	-8,18%	58,70%
36	42,117	12,31%	69,14%	-4,81%	55,80%
37	42,117	8,59%	69,14%	-3,60%	47,40%
38	45,19	-4,75%	70,40%	-39,91%	50,19%
39	45,19	-5,44%	69,70%	-33,81%	51,10%
40	45,19	-6,53%	68,00%	-34,06%	49,20%
41	45,19	-7,90%	67,74%	-40,07%	51,14%
42	45,19	-7,90%	67,99%	-22,46%	40,72%
43	45,19	-20,77%	67,62%	-38,04%	51,10%
44	45,19	-20,86%	68,36%	-29,89%	49,20%

Catatan: - No. 1 hingga No. 29 merupakan tendon lurus dengan lengkungan tajam di ujung.
- No. 30 hingga No. 44 merupakan tendon lurus.

Pada Tabel 9 dapat terlihat bahwa nilai *lift-off* tendon pada sisi non-*stressing* cukup rendah. Namun gaya aktual tersebut sesuai dengan analisis berdasarkan pengurangan gaya (*loss of prestress*) akibat friksi yang terjadi, yaitu (38%-62%) UTS. Hal ini dipengaruhi oleh panjang tendon, dengan semakin panjang tendon, semakin besar *loss of prestress*. Pada

tendon panjang, apabila pengurangan gaya ini tidak diperhitungkan, sebaiknya dilakukan penarikan dari 2 sisi.



Gambar 9 Data *Lift-Off* untuk Tendon dengan Elongasi lebih besar dari 7% *Stressing* Satu Arah pada Sisi *Non-Stressing*

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari *stressing record* pada Pembangunan Jembatan Pulau Balang dan Jembatan Teluk Kendari adalah sebagai berikut:

- 1) Elongasi tidak dapat dijadikan parameter dalam *quality assurance* untuk *loop* tendon dan disarankan untuk dilakukan *lift-off* pada tendon dengan *layout* tersebut.
- 2) Pada tendon pendek, nilai deviasi elongasi cenderung melebihi batas 7% dengan hasil *lift-off* yang dapat diterima. Pada tendon pendek, lebih cocok digunakan batasan panjang, dan berdasarkan data diusulkan *error* atau deviasi elongasi sebesar 10 mm.
- 3) Batasan *error* atau deviasi elongasi sebesar 7% dapat dipenuhi pada tendon menengah.
- 4) Pada tendon panjang dengan *layout* selain tendon melengkung, data menunjukkan bahwa hasil deviasi elongasi sangat bervariasi dengan kecenderungan kurang dari 7%, yang disebabkan oleh potensi *un-intended curvature* pada saat pelaksanaan. Pada tendon panjang dengan elongasi besar, disarankan dilakukan *lift-off*.
- 5) Terdapat indikasi bahwa koefisien friksi angular dan *wobble* (μ_p, k) bervariasi terhadap panjang tendon.

Saran yang dapat disampaikan adalah sebagai berikut:

- 1) Digunakan batasan deviasi elongasi sebesar 10 mm sebagai *quality assurance* pada tendon pendek.
- 2) *Lift-off* dijadikan prosedur baku *quality assurance* pekerjaan *post-tensioning* dan perlu disepakati proporsi sampel yang diperlukan.

- 3) Diperlukan studi lebih lanjut untuk mempelajari variasi koefisien friksi angular dan *wobble* (μ_p , k), terhadap panjang tendon.

DAFTAR PUSTAKA

- American Concrete Institute (ACI). 2014. *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14)*. Farmington Hills, MI.
- American Concrete Institute (ACI). 2016. *Guide to Estimating Prestress Losses (ACI 423.10R-16)*. Farmington Hills, MI.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2018. *Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel Strand for Prestressed Concrete*. ASTM A416/A416M-18. West Conshohocken, PA.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2004. *Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan*. SNI-T12. Jakarta.
- Bondy, K.B. 2012. *Short Tendon Elongations*. PTI Technical Notes. Technical Note No. 16. Farmington Hills, MI: Post-Tensioning Institute.
- British Standards Institution (BSI). 2009. *Execution of Concrete Structures*. BS EN 13670: 2009. London.
- British Standards Institution (BSI). 2012. *High Tensile Steel Wire and Strand for the Prestressing of Concrete-Specification*. BS 5896: 2012. London.