

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
INTISARI.....	xvi
ABSTRACT	xvii
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Keaslian Penelitian	5
Bab II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Jembatan Bentang Panjang.....	6
2.2 Jembatan Beruji Kabel.....	8
2.3 Komponen Jembatan Beruji Kabel.....	11
2.3.1 Sistem Kabel	11
2.3.2 Dek / Gelagar	14
2.3.3 Pilon / Tower.....	16
2.4 Perkembangan Jembatan Beruji kabel Modern dan Sistem Extradosed	17
BAB III LANDASAN TEORI	21
3.1 Kekakuan Struktur Jembatan Beruji Kabel.....	21
3.2 Pendekatan Analisis Struktural.....	22
3.2.1 Kekakuan gelagar dalam struktur.....	22
3.2.2 Kemiringan kabel	24
3.2.3 Tinggi pilon dan panjang panel.....	31
3.2.4 Jumlah dan jarak antar kabel.....	33
3.3 Efek Non-Linear Pada Jembatan Beruji Kabel	35
3.3.1 Efek non-linear pada kabel	35
3.3.2 Efek non-linear pada gelagar dan pilon	39
3.3.3 Efek non-linear akibat deformasi pada struktur	40
3.4 Perilaku Gelagar Kaku	40
3.4.1 Aksi dari gelagar kaku	42
3.4.2 Kondisi tumpuan	49
3.5 Metode Perhitungan Gaya Kabel.....	51

3.5.1	Metode berdasarkan defleksi.....	51
3.5.2	Metode berdasarkan Gaya.....	53
3.6	Implementasi Pra-Tegang Pada Gelagar.....	55
3.6.1	Persyaratan mutu beton untuk beton prategang	58
3.6.2	Persyaratan mutu baja prategang	58
3.6.3	Jenis baja prategang	59
3.7	Idealisasi Struktur	63
3.7.1	<i>Plane frame model</i>	64
3.7.2	<i>Space frame model</i>	65
3.8	Analisis Dinamis.....	66
3.8.1	Analisis frekuensi alami dan mode getar	66
3.8.2	Analisis beban angin.....	68
3.8.3	Analisis gempa dinamis	78
3.9	Pembebanan Struktur Atas Jembatan Jalan Raya	
	Menurut RSNI T 02-2005	81
3.9.1	Beban tetap.....	82
3.9.2	Beban lalu lintas	85
3.9.3	Aksi lingkungan	91
3.9.4	Aksi-aksi lain.....	91
3.9.5	Kombinasi pembebanan.....	91
3.10	Pemilihan Dimensi Awal Gelagar Boks Beton	96
3.11	Perencanaan Struktur Beton Prategang.....	99
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN		103
4.1	Pendahuluan	103
4.2	Prosedur Perencanaan	103
4.3	Penentuan Gaya Kabel Melalui Iterasi	105
4.4	Alat Bantu Penelitian	105
4.5	Aplikasi Perencanaan Struktur Atas Jembatan Beruji Kabel Dengan	
	Gelagar Kaku Menggunakan Peraturan Pembebanan SNI T-02 2005 .	107
4.5.1	Data awal perencanaan jembatan	107
4.5.2	Konsep desain	107
4.5.3	Karakteristik material	112
4.5.4	Analisis struktur	114
4.5.5	Perhitungan dimensi awal kabel dan gaya kabel.....	132
4.6	Resume Respon Struktur Akibat Pembebanan.....	144
4.7	Perancangan Gelagar Boks.....	145
4.7.1	Perhitungan properti penampang.....	107
4.7.2	Data perencanaan.....	107
4.7.3	Penetapan tegangan ijin	112
4.7.4	Gaya prategang.....	114

BAB V HASIL PERANCANGAN DAN PEMBAHASAN.....	159
5.1 Hasil Perancangan	159
5.2 Kabel Penggantung.....	159
5.3 Respon Struktur Akibat Pengaruh Penarikan Kabel.....	161
5.4 Gelagar Prategang.....	163
5.5 Kontrol Tegangan Pada Gelagar.....	164
5.5.1 Keadaan awal	165
5.5.2 Keadaan kehilangan prategang.....	167
5.6 Tegangan Pada Penampang Gelagar Akibat Pembebanan.....	168
5.6.1 Beban permanen (DL+SDL+CP)	169
5.6.2 Beban prategang	170
5.6.3 Beban lajur D (TD).....	171
5.6.4 Beban rem	173
5.6.5 Beban Trotoar (pejalan kaki)	174
5.6.6 Beban angin.....	175
5.6.7 Beban gempa	177
5.7 Resume Tegangan Akibat Pembebanan.....	179
5.8 Kontrol Tegangan Terhadap Kombinasi Pembebanan	180
5.9 Kontrol Lendutan.....	181
5.9.1 Defleksi akibat masing-masing beban	181
5.9.2 Defleksi akibat kombinasi beban	185
5.10 Kapasitas Momen Gelagar.....	187
5.10.1 Kapasitas momen positif ultimit.....	187
5.10.2 Kapasitas momen negatif ultimit.....	190
5.11 Kontrol Kapasitas Momen Terhadap Pembebanan Ultimit.....	192
5.12 Stabilitas Aerodinamis	194
5.12.1 Pendahuluan	194
5.12.2 Frekuensi alami struktur	195
5.12.3 Vortex shedding	198
5.12.4 Efek flutter	201
5.12.5 Pemeriksaan stabilitas aerodinamis di lapangan	198
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	202
6.1 Kesimpulan.....	202
6.2 Saran	204
DAFTAR PUSTAKA	205
LAMPIRAN	207

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Russky Bridge di Rusia	6
Gambar 2. 2	Hubungan antara biaya konstruksi per m^2 dengan panjang bentang utama m	7
Gambar 2. 3	Perbandingan momen pada gelagar	9
Gambar 2. 4	Jembatan pelengkung, <i>self-anchored suspension bridge</i> , jembatan beruji kabel	10
Gambar 2. 5	Kecepatan angin kritis untuk jembatan gantung dan jembatan beruji kabel	10
Gambar 2. 6	Sistem kabel pada jembatan beruji kabel: tipe <i>fan</i> , tipe <i>semi-fan</i> , tipe <i>harp</i>	12
Gambar 2. 7	Jembatan beruji kabel dengan dua bentang simetris dan asimetris	13
Gambar 2. 8	Sistem <i>semi-fan</i> dengan tiga bentang	14
Gambar 2. 9	Jembatan beruji kabel dengan multi bentang	14
Gambar 2. 10	Bentuk dasar penampang melintang dek jembatan	15
Gambar 2. 11	Pilon untuk dua bidang kabel	16
Gambar 2. 12	Pilon untuk satu bidang kabel	17
Gambar 2. 13	Perbandingan antara jembatan dengan gelagar <i>balanced-cantilever</i> , <i>extradosed bridge</i> , dan jembatan beruji kabel	19
Gambar 2. 14	(a) Peran dukungan kabel pada jembatan beruji kabel, dan (b) jembatan <i>Extradosed</i>	19
Gambar 3. 1	Pendekatan kekakuan jembatan dengan (a) kekakuan gelagar, (b) kekakuan pilon, (c) kekakuan kabel	21
Gambar 3. 2	Variasi momen lentur akibat beban tetap terhadap gelagar sebagai fungsi <i>EI</i>	23
Gambar 3. 3	Analisis jembatan beruji kabel sederhana	25
Gambar 3. 4	Titik n , join antara kabel dan gelagar	26
Gambar 3. 5	Defleksi pada titik n akibat perpanjangan kabel	27
Gambar 3. 6	<i>Displacement</i> pada ujung pilon (titik T)	27
Gambar 3. 7	Defleksi vertikal pada titik n akibat dari perpanjangan kabel dan <i>displacement</i> dari ujung pilon (titik T)	27
Gambar 3. 8	Hubungan antara sudut kemiringan kabel dengan defleksi join pada gelagar	29
Gambar 3. 9	Efek kemiringan kabel terhadap komponen gaya pada kabel, a) akibat gaya konstan, dan b) akibat gaya vertikal konstan	30
Gambar 3. 10	Jumlah kebutuhan kabel baja sebagai fungsi relatif tinggi pilon	32
Gambar 3. 11	Beberapa rekomendasi rasio bentang terhadap tinggi pilon, dan bentang terhadap ketinggian gelagar	33
Gambar 3. 12	Prilaku kabel terpasang miring pada tumpuan sederhana	35
Gambar 3. 13	Modulus ekivalen tangensial dengan tegangan awal σ_1	36
Gambar 3. 14	Modulus ekivalen sekan dengan dibatasi tegangan minimum σ_1 dan tegangan maksimum σ_2	37
Gambar 3. 15	Hubungan antara E_{eff} dengan panjang horisontal kabel dan tegangan kabel	38
Gambar 3. 16	Perbandingan antara <i>dead load</i> momen pada jembatan gelagar menerus dengan jembatan beruji kabel dengan gelagar kaku	41

Gambar 3. 17	Sistem kabel pada jembatan beruji kabel (dukungan kabel + gaya normal yang diteruskan pada gelagar dan pilon).....	41
Gambar 3. 18	Tiga kemungkinan kesetimbangan gaya pada arah horisontal untuk gelagar kaku	42
Gambar 3. 19	Sistem kabel murni pada jembatan beruji kabel	43
Gambar 3. 20	Kondisi sistem struktural untuk jembatan beruji kabel.....	44
Gambar 3. 21	Penyebaran gaya akibat dari beban qdx yang bekerja sepanjang dx pada gelagar kaku.....	45
Gambar 3. 22	Gaya normal akibat beban merata q pada ketiga sistem gelagar kaku (diidealisasikan memiliki gelagar menerus).....	45
Gambar 3. 23	Distribusi beban terpusat pada gelagar kaku	47
Gambar 3. 24	Komponen gaya vertikal dan horisontal (lateral) pada kabel yang terbebani beban angin u_c dan berat sendiri w_c	48
Gambar 3. 25	Pengaruh pengangkuran kabel pada gelagar dalam mendukung torsi.....	49
Gambar 3. 26	Jembatan beruji kabel dengan gelagar menerus sepanjang bentang	50
Gambar 3. 27	Struktur dengan pilon terpasang kaku pada gelagar, dan menerus sampai pilar di bawahnya.....	50
Gambar 3. 28	Gaya kabel akibat distribusi momen oleh beban mati	54
Gambar 3. 29	Aplikasi prategang pada balok bentang sederhana	56
Gambar 3. 30	Konfigurasi kabel wire dan strand	60
Gambar 3. 31	Contoh analisis sistem bidang pada Jembatan <i>Diepoldsau</i>	64
Gambar 3. 32	Contoh analisis jembatan sistem bidang pada Jembatan <i>Pasco-Kennewick</i>	65
Gambar 3. 33	Jembatan <i>Dusseldorf-Fiehe</i> : contoh pemodelan sistem ruang	65
Gambar 3. 34	Jembatan <i>Diepoldsau</i> : contoh pemodelan sistem ruang dengan elemen <i>shell</i> sebagai dek jembatan	66
Gambar 3. 35	Aksi beban angin terhadap dek jembatan	70
Gambar 3. 36	Koefisien bentuk C_T , C_N , dan C_M sebagai fungsi sudut singgung terhadap dek jembatan (α)	71
Gambar 3. 37	Beberapa bentuk penampang yang di uji pada terowongan angin.	74
Gambar 3. 38	Hasil pengujian perilaku <i>vortex shedding</i> berbagai bentuk penampang	74
Gambar 3. 39	Aliran angin pada penampang dengan deflektor dan tanpa deflektor	75
Gambar 3. 40	Representasi sederhana dari efek <i>flutter</i> pada dek jembatan	76
Gambar 3. 41	Kecepatan kritis untuk <i>flutter</i>	77
Gambar 3. 42	Nilai koefisien koreksi $\eta = V_{criti.actual} / V_{criti.teoritical}$	78
Gambar 3. 43	Gambaran osilasi sederhana	80
Gambar 3. 44	Kombinasi respon spektrum, dikalibrasi pada 20% g untuk periode nol	81
Gambar 3. 45	Beban lajur D	87
Gambar 3. 46	Penyebaran pembebanan lajur D arah melintang.....	88
Gambar 3. 47	Faktor beban dinamis untuk BGT untuk pembebanan lajur D	89
Gambar 3. 48	Gaya rem per lajur 2,75 m (KBU)	90

Gambar 3. 49	Pembebanan untuk pejalan kaki.....	91
Gambar 3. 50	Prilaku beton prategang terhadap momen	101
Gambar 4. 1	Bagan alir analisis jembatan beruji kabel	104
Gambar 4. 2	Bagan alir menentukan gaya kabel melalui iterasi.....	106
Gambar 4. 3	Layout separuh simetris jembatan.....	108
Gambar 4. 4	Penomoran kabel.....	109
Gambar 4. 5	Detail rencana boks girder	110
Gambar 4. 6	Potongan memanjang dan melintang pilon dan pilar	111
Gambar 4. 7	Bagian-bagian trotoar dan detail dimensinya	114
Gambar 4. 8	Detail dimensi rencana boks girder.....	116
Gambar 4. 9	Penyebaran Q_{TD} pada lebar jalur.....	117
Gambar 4. 10	Penyebaran P_{TD} pada lebar jalur	118
Gambar 4. 11	Posisi beban D pada gelagar	119
Gambar 4. 12	Gaya rem per lajur 2,75 m (KBU)	119
Gambar 4. 13	Pembebanan untuk pejalan kaki.....	120
Gambar 4. 14	Komponen gaya yang terjadi pada gelagar akibat beban angin...	121
Gambar 4. 15	Konfigurasi beban angin tambahan yang mungkin terjadi pada kedua jalur jembatan	123
Gambar 4. 16	Transfer beban angin pada gelagar	123
Gambar 4. 17	Prosedur perencanaan tahan gempa untuk struktur jembatan.....	126
Gambar 4. 18	Respon spektrum desain	127
Gambar 4. 19	Respon spektrum pada lokasi jembatan	130
Gambar 4. 20	Konfigurasi beban hidup	132
Gambar 4. 21	Pembebanan yang terjadi untuk memperoleh gaya kabel maksimum	132
Gambar 4. 22	Layout setengah jembatan simetris	133
Gambar 4. 23	Sketsa bagian gelagar yang membebani kabel SS 8	135
Gambar 4. 24	Pembagian luasan pada penampang gelagar boks	145
Gambar 4. 25	Perhitungan I_o untuk elemen nomor 10	148
Gambar 4. 26	Layout dan total tegangan yang terjadi pada gelagar	151
Gambar 4. 27	Lintasan tendon	156
Gambar 4. 28	Penempatan tendon pada tumpuan ujung	157
Gambar 4. 29	Penempatan tendon pada tengah bentang	157
Gambar 4. 30	Penempatan tendon pada tumpuan tengah	157
Gambar 4. 31	Area yang terpengaruh tendon untuk area momen negatif.....	158
Gambar 5. 1	Respon momen struktur akibat beban mati (DL).....	161
Gambar 5. 2	Respon momen struktur akibat penarikan kabel (CP).....	162
Gambar 5. 3	Respon momen akibat DL + CP	162
Gambar 5. 4	Respon momen akibat beban permanen (DL+CP+SDL)	163
Gambar 5. 5	Tegangan yang terjadi pada area momen maksimum	165
Gambar 5. 6	Tegangan yang terjadi pada area momen minimum	166
Gambar 5. 7	Tegangan yang terjadi pada area momen maksimum	167
Gambar 5. 8	Tegangan yang terjadi pada area momen maksimum	168
Gambar 5. 9	Tegangan akibat beban permanen di daerah momen maksimum	169
Gambar 5. 10	Tegangan akibat beban permanen di daerah momen minimum ..	170
Gambar 5. 11	Tegangan akibat beban prategang di daerah momen maksimum	171

Gambar 5. 12	Tegangan akibat beban prategang di daerah momen minimum ..	171
Gambar 5. 13	Tegangan akibat beban D di daerah momen maksimum	172
Gambar 5. 14	Tegangan akibat beban D di daerah momen minimum.....	172
Gambar 5. 15	Tegangan akibat beban rem di daerah momen maksimum	173
Gambar 5. 16	Tegangan akibat beban rem di daerah momen minimum	174
Gambar 5. 17	Tegangan akibat beban rem di daerah momen minimum	174
Gambar 5. 18	Tegangan akibat beban trotoar di daerah momen maksimum	175
Gambar 5. 19	Tegangan akibat beban trotoar di daerah momen minimum	175
Gambar 5. 20	Tegangan akibat beban angin di daerah momen maksimum.....	176
Gambar 5. 21	Tegangan akibat beban angin di daerah momen minimum.....	176
Gambar 5. 22	Respon struktur atas akibat beban gempa dengan percepatan longitudinal dan lateral.....	177
Gambar 5. 23	Tegangan yang terjadi akibat beban gempa di daerah tengah bentang	178
Gambar 5. 24	Tegangan yang terjadi akibat beban gempa di daerah pilon	178
Gambar 5. 25	Defleksi struktur atas jembatan akibat beban mati (DL).....	181
Gambar 5. 26	Defleksi struktur atas jembatan akibat beban penarikan kabel (CP)	182
Gambar 5. 27	Defleksi struktur atas jembatan akibat beban mati tambahan (SDL)	182
Gambar 5. 28	Defleksi struktur atas jembatan akibat beban prategang (PT)	183
Gambar 5. 29	Defleksi struktur atas jembatan akibat beban lajur D (TD).....	183
Gambar 5. 30	Defleksi struktur atas jembatan akibat beban rem (TB).....	183
Gambar 5. 31	Defleksi struktur atas jembatan akibat beban trotoar pejalan kaki (TP)	184
Gambar 5. 32	Defleksi struktur atas jembatan akibat beban angin (EW)	184
Gambar 5. 33	Defleksi struktur atas jembatan akibat beban gempa (EQ)	185
Gambar 5. 34	Diagram tegangan regangan boks untuk momen positif	187
Gambar 5. 35	Luas sisi plat atas	187
Gambar 5. 36	Diagram tegangan regangan boks untuk momen negatif	190
Gambar 5. 37	Pembagian luasan pada plat bawah	191
Gambar 5. 38	Konfigurasi untuk mencari lendutan statis maksimum	196
Gambar 5. 39	Grafik kecepatan angin kritis teoritikal untuk efek flutter	200
Gambar 5. 40	Koreksi kecepatan angin kritis akibat penampang	201

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Kuat tarik untuk jenis tulangan prategang.....	61
Tabel 3. 2	Kuat putus strand grade 250	61
Tabel 3. 3	Kuat putus strand grade 270	62
Tabel 3. 4	Kuat leleh strand grade 250	62
Tabel 3. 5	Kuat leleh strand grade 270	62
Tabel 3. 6	Jarak antara titik pusat tengah kabel dengan kabel luar untuk grade 250.....	63
Tabel 3. 7	Jarak antara titik pusat tengah kabel dengan kabel luar untuk grade 270.....	63
Tabel 3. 8	Berat isi untuk beban mati [kN/m^3]	83
Tabel 3. 9	Faktor beban untuk beban sendiri	84
Tabel 3. 10	Faktor beban untuk beban mati tambahan.....	84
Tabel 3. 11	Faktor beban untuk pengaruh prategang	85
Tabel 3. 12	Jumlah lajur lalu lintas rencana	86
Tabel 3. 13	Faktor beban akibat beban lajur D	86
Tabel 3. 14	Faktor beban akibat gaya rem.....	90
Tabel 3. 15	Faktor beban akibat pembebanan untuk pejalan kaki	90
Tabel 3. 16	Kombinasi beban untuk keadaan batas layan	92
Tabel 3. 17	Ringkasan aksi-aksi rencana.....	94
Tabel 3. 18	Kombinasi beban umum untuk keadaan batas kelayanan dan ultimit	95
Tabel 4. 1	Posisi kabel pada arah memanjang dan pada pilon.....	108
Tabel 4. 2	Berat mati gelagar boks	116
Tabel 4. 3	Koefisien seret	125
Tabel 4. 4	Kategori kinerja seismik	126
Tabel 4. 5	Prosedur analisis berdasarkan kategori kinerja seismik (A-D)....	126
Tabel 4. 6	Koefisien situs, F_a	128
Tabel 4. 7	Koefisien situs, F_v	129
Tabel 4. 8	Hasil perhitungan beban-beban yang bekerja.....	131
Tabel 4. 9	Luas kabel awal untuk kabel pada bentang utama (<i>main span</i>) ..	135
Tabel 4. 10	Luas kabel awal untuk kabel pada bentang samping (<i>side span</i>)	136
Tabel 4. 11	Jumlah kabel perlu untuk kabel pada bentang utama (<i>main span</i>)	137
Tabel 4. 12	Jumlah kabel perlu untuk kabel pada bentang samping (<i>side span</i>)	137
Tabel 4. 13	Input awal dimensi kabel dan gaya aksial yang terjadi pada kabel untuk bentang utama.....	140
Tabel 4. 14	Input awal dimensi kabel dan gaya aksial yang terjadi pada kabel untuk bentang samping	141
Tabel 4. 15	Gaya kabel untuk <i>load case</i> “beban mati + penarikan”	142
Tabel 4. 16	Gaya kabel untuk <i>load case</i> “penarikan”	143
Tabel 4. 17	Resume momen dan gaya geser pada gelagar akibat pembebanan	144
Tabel 4. 18	Luas tiap elemen gelagar boks.....	146
Tabel 4. 19	Properti dasar masing-masing elemen gelagar boks	147

Tabel 4. 20	Properti penampang boks	148
Tabel 4. 21	Trace lintasan tendon	156
Tabel 5. 1	Gaya kabel untuk <i>load case</i> “penarikan”	160
Tabel 5. 2	Total kebutuhan tendon pada gelagar.....	164
Tabel 5. 3	Resume tegangan yang terjadi pada gelagar akibat pembebanan	179
Tabel 5. 4	Defleksi struktur atas akibat kombinasi batas layan untuk bentang utama	185
Tabel 5. 5	Defleksi struktur atas akibat kombinasi batas layan untuk bentang samping	186
Tabel 5. 6	Tingkat kerentanan jembatan terhadap angin dinamik	195

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1	Grafik Kecepatan Angin Kritis (Walther, 1999)	207
LAMPIRAN 2	Koefisien Koreksi Angin (Walther, 1999)	208
LAMPIRAN 3	Peta Zona Gempa (SNI 1726 2012).....	209
LAMPIRAN 4	Perhitungan Pemilihan Konfigurasi Beban D Yang Memberikan Momen Maksimum.....	215
LAMPIRAN 5	Hasil <i>Superstructure Response</i> Dari CSiBridge	217
LAMPIRAN 6	Langkah Modeling Melalui CSiBridge	227
LAMPIRAN 7	Spesifikasi ANSI/ASTM A 416 – 74	249