



TUGAS AKHIR (RC18-4803)

**STUDI KOMPARASI DESAIN BETON PRATEKAN
BERDASARKAN SNI 2847:2013 DAN EUROCODE 1992-1-
1:2004 DENGAN TINJAUAN GEMPA**

CHRIST BILLY PRAKOSWA
NRP. 03111540000072

Dosen Pembimbing I
Prof. Tavio, S.T., M.T., Ph.D

Dosen Pembimbing II
Prof. Dr. Ir. I Gusti Putu Raka, DEA

Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT (RC18-4803)

**COMPARATIVE STUDY OF PRESTRESSED CONCRETE
DESIGN BASED ON SNI 2847:2013 AND EUROCODE 1992-
1-1:2004 WITH EARTHQUAKE**

CHRIST BILLY PRAKOSWA
NRP. 03111540000072

Academic Supervisor I
Prof. Tavo, S.T., M.T., Ph.D

Academic Supervisor II
Prof. Dr. Ir. I Gusti Putu Raka, DEA

Civil Engineering Departement
Faculty of Civil Environmental and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan

**STUDI KOMPARASI DESAIN BETON PRATEKAN
BERDASARKAN SNI 2847:2013 DAN
EUROCODE EN 1992-1-1:2004 DENGAN TINJAUAN GEMPA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program studi S-1 Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

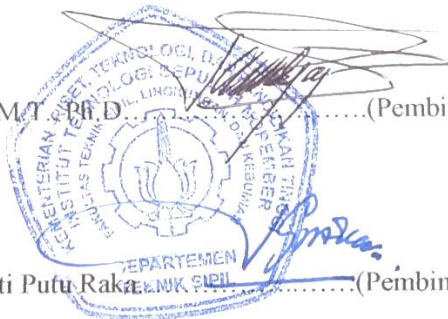
CHRIST BILLY PRAKOSWA

NRP. 03111540000072

Disetujui oleh pembimbing Tugas Akhir:

1. Prof. Tawio, S.T., M.T., Ph.D.(Pembimbing I)

2. Prof. Dr. Ir. I Gusti Putu Raka(Pembimbing II)



**SURABAYA
JANUARI, 2019**

STUDI KOMPARASI DESAIN BETON PRATEKAN BERDASARKAN SNI 2847:2013 DAN EUROCODE EN 1992-1-1:2004 DENGAN TINJAUAN GEMPA

Nama Mahasiswa : Christ Billy Prakoswa
NRP : 03111540000072
Departemen : Teknik Sipil FTSLK-ITS

Abstrak

Di Indonesia, standar peraturan untuk mengatur perencanaan struktur beton pratekan adalah Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847:2013. Pada negara-negara lain, standar peraturan yang berlaku juga beragam. Salah satunya adalah Eurocodes, yang merupakan set yang terdiri dari 10 standar, untuk perencanaan beton pratekan kode yang dipakai adalah EN 1992-1-1 tahun 2004.

Studi dilakukan dengan melakukan permodelan Gedung yang difungsikan sebagai perkantoran 12 lantai di wilayah Aceh. Studi juga memenuhi peraturan mengenai bangunan tahan gempa, yaitu SNI 1726:2002, Eurocode EN 1998-1-1:2004, PPIUG 1983, serta aturan mengenai beton prategang yang sesuai dengan konsep bangunan tahan gempa. Studi ini juga memenuhi peraturan mengenai bangunan tahan gempa, yaitu SNI 1726:2002, Eurocode EN 1998-1-1:2004, PPIUG 1983, serta aturan mengenai beton prategang yang sesuai dengan konsep bangunan tahan gempa.

Hasil dari studi menunjukkan bahwa beton pratekan yang didesain berdasarkan EN1991-1-1:2004 membutuhkan gaya tekan awal F_o yang lebih kecil dibanding SNI hingga 12%. Hal tersebut diakibatkan karena kehilangan gaya prategang yang lebih kecil serta ukuran lebar efektif yang lebih besar. Tendon yang dipilih juga membutuhkan luas permukaan yang lebih kecil karena persyaratan momen crack dari SNI. Disamping itu, beton pratekan yang didesain berdasarkan Eurocode lebih kuat menahan gempa karena beban gempa hasil EN1998-1-1:2004 lebih besar daripada SNI 1726:2012.

**Kata Kunci : SNI 2847:2013, Eurocode, EN 1992-1-1:2004,
Studi komparasi, Beton pratekan, Bangunan tahan gempa.**

COMPARATIVE STUDY OF PRESTRESSED CONCRETE DESIGN BASED ON SNI 2847:2013 AND EUROCODE 1992-1-1:2004 WITH EARTHQUAKE

Student Name : Christ Billy Prakoswa
Student ID. : 03111540000072
Departement : Teknik Sipil FTSLK-ITS

Abstract

Prestressed concretes are ideal combination between 2 of high strength materials. The combination are given actively, through stressing the steel and hold it at the concrete. This active combination cause concrete to have a high internal stress and distribute the stress through its section., so it can be an equilibrium between internal stress and external load stress.

In Indonesia, code for prestressed concrete is Standart Nasional Indonesia (SNI) 2847:2013. In other countries, the codes are various. For example at states in European Union (EU), the code is Eurocode, which arranged by Européen de Normalisation (CEN). Eurocode is a set of 10 codes. For prestressed concrete, the code is EN 1992-1-1:2004.

In this undergraduate theses, we will discuss about comparative study of prestressed concrete design which taken in 12 storey building. This study compares SNI requirement and Eurocode requirement.

Study started with 12 storey office building (± 48 m) modelling at Aceh, which use normal reinforced concrete for entire building and a special room located at the top of building which designed with prestressed concrete. This study also satisfy the requirement of earthquake building codes, inside SNI 1726:2018 and EN 1998-1-1:2004, PPIUG 1983, and other prestressed concrete codes which fit into earthquake-resistant building concept.

The result shows that prestressee concrete designed based on EN1992-1-1:2004 require less initial stress than SNI up to 12%

because EN has less loss of prestress force than SNI, also the beam's effective width is increase. Tendons require less steel section area because of SNI's moment of crack requirement. Prestressed concretes designed with EN1992-1-1:2004 are more stronger to withstand earthquake load because the load result from EN1998-1-1:2004 has higher value than SNI 1726:2012.

Keywords: SNI 2847:2013, Eurocode, EN1992-1-1:2004, Comparative study, prestressed concrete, earthquake-resistant building.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Studi Komparasi Desain Beton Pratekan Berdasarkan SNI 2847:2013 dan Eurocode 1992-1-1:204 Dengan Tinjauan Gempa”. Dalam kesempatan ini penulis bermaksud mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang mendukung dan membantu atas terselesaikannya Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Semua anggota keluarga yang telah memberikan semangat selama menjalani perkuliahan di ITS
2. Prof. Tavio, S.T., M.T., Ph.D selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingannya dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini
3. Prof. Dr. Ir. I Gusti Putu Raka, DEA. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingannya dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini
4. Seluruh dosen pengajar di Departemen Teknik Sipil yang telah mengajar dan membimbing selama masa perkuliahan
5. Teman-teman Departemen Teknik Sipil yang selalu memberi motivasi dan bantuan selama proses penyusunan Tugas Akhir ini

Dalam pembuatan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa Tugas Akhir yang penulis buat masih sangat jauh dari kesempurnaan. Jadi dengan rasa hormat penulis mohon petunjuk, saran, dan kritik terhadap Tugas Akhir ini. Sehingga kedepannya, diharapkan ada perbaikan terhadap Tugas Akhir ini serta dapat menambah pengetahuan bagi penulis,

Surabaya, Januari 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

Abstrak	v
KATA PENGANTAR.....	ix
BAB I.....	21
1.1 Latar Belakang Masalah	21
1.2 Rumusan Masalah.....	22
1.3 Batasan Masalah	22
1.4 Tujuan Tugas Akhir.....	22
1.5 Manfaat Tugas Akhir.....	23
BAB II.....	25
2.1 Umum	25
2.2 Standar Perencanaan.....	25
BAB III	53
3.1 Umum	53
3.2 Bagan Alir Penyelesaian Tugas Akhir.....	53
3.3 Kriteria Permodelan.....	55
3.4 Pembebanan.....	55
3.5 Run Permodelan Struktur	55
3.6 Analisis Struktur Utama Prategang	56
3.7 Kontrol Struktur.....	57
3.8 Pengangkurian	57
3.9 Kontrol Dengan Tinjauan Gempa.....	57
3.10 Hasil Perbandingan dan Pembahasan	58
3.11 Kesimpulan dan Saran	58

BAB IV	59
4.1 Permodelan Gedung.....	59
4.2 Pembebanan.....	59
4.3 Dimensi Pelat.....	60
4.4 Dimensi Balok	60
4.5 Dimensi Kolom.....	61
BAB V	63
5.1 Umum	63
5.2 Permodelan Struktur	63
5.3 Pembebanan Gempa	64
5.4 Kontrol Model.....	66
BAB VI	73
6.1 Umum	73
6.2 Kelas U	73
6.3 Kelas T	127
6.4 Kelas C.....	181
6.5 Perencanaan Kolom	235
6.6 Hubungan Balok Kolom	244
BAB VII	249
7.1 Umum	249
7.2 Permodelan Struktur	249
7.3 Pembebanan Gempa	250
7.4 Kontrol Model.....	252
BAB VIII.....	259

BAB IX	311
9.1 Kesimpulan.....	311
9.2 Saran	327

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan pratarik dan paska-tarik	28
Tabel 2. 2 Perbandingan SNI 2847:2013 dan EN 1992-1-1:2004	30
Tabel 4. 1 Beban yang diterima kolom	61
Tabel 5. 1 Total beban yang dihitung	66
Tabel 5. 2 Partisipasi massa pada modelling	67
Tabel 5. 3 Gempa dinamik pada modelling	68
Tabel 5. 4 Nilai Ct dan x pada struktur (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2012)	69
Tabel 5. 5 Nilai Cu pada lokasi bangunan (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2012)	69
Tabel 5. 6 Hasil simpangan antar lantai dari ETABS v16.2.0	71
Tabel 5. 7 Hasil drift dari ETABS v.16.2.0	72
Tabel 6. 1 Perbandingan kuat tekan beton pada berbagai umur 74	
Tabel 6. 2 Rekapitulasi kombinasi pembebanan hasil ETABS ...	77
Tabel 6. 3 Koefisien <i>Wobble effect</i> dan Koefisien Kurvatur (Sumber: T. Y. & Burns, n.d.)	88
Tabel 6. 4 Nilai Kre dan J (T. Y. & Burns, n.d.)	94
Tabel 6. 5 Nilai C (T. Y. & Burns, n.d.)	94
Tabel 6. 6 Rekapitulasi perhitungan Mpr	109
Tabel 6. 7 Rekapitulasi Perhitungan Daerah Limit Kabel Prategang Kelas U	121
Tabel 6. 8 Perbandingan kuat tekan beton pada berbagai umur	127
Tabel 6. 9 Rekapitulasi kombinasi pembebanan hasil ETABS	130
Tabel 6. 10 Koefisien <i>Wobble effect</i> dan Koefisien Kurvatur (Sumber: T. Y. & Burns, n.d.)	141
Tabel 6. 11 Nilai Kre dan J (T. Y. & Burns, n.d.)	147
Tabel 6. 12 Nilai C (T. Y. & Burns, n.d.)	148
Tabel 6. 13 Rekapitulasi perhitungan Mpr	163

Tabel 6. 14 Rekapitulasi Perhitungan Daerah Limit Kabel Prategang Kelas T	175
Tabel 6. 15 Perbandingan kuat tekan beton pada berbagai umur	181
Tabel 6. 16 Rekapitulasi kombinasi pembebanan hasil ETABS	184
Tabel 6. 17 Koefisien <i>Wobble effect</i> dan Koefisien Kurvatur (Sumber: T. Y. & Burns, n.d.).....	195
Tabel 6. 18 Nilai Kre dan J (T. Y. & Burns, n.d.).....	201
Tabel 6. 19 Nilai C (T. Y. & Burns, n.d.).....	202
Tabel 6. 20 Rekapitulasi perhitungan Mpr	217
Tabel 6. 21 Rekapitulasi perhitungan daerah limit kabel Prategang kelas C	229
Tabel 6. 22 Gaya dalam yang diterima kolom	235
Tabel 7. 1 Nilai q untuk perilaku bangunan (Eurocode, 2004b) 251	
Tabel 7. 3 Partisipasi massa pada modelling.....	253
Tabel 7. 4 Gempa dinamik pada modelling.....	255
Tabel 7. 5 Hasil simpangan antar lantai dari ETABS v16.2.0...	256
Tabel 7. 6 Hasil drift dari ETABS v.16.2.0.....	256
Tabel 8. 1 Rekapitulasi pembebanan dari ETABS	263
Tabel 8. 2 nilai dari $\varepsilon_{cd}(0)$ untuk beton dengan semen kelas normal (Sumber: Eurocode, 2004)	279
Tabel 8. 3 Nilai dari Kh (Sumber: Eurocode, 2004)	279
Tabel 8. 4 Nilai γ dari material beton prategang (Sumber: Eurocode, 2004)	285
Tabel 8. 5 Rekapitulasi Daerah Limit Kabel EN1992-1-1:2004	301
Tabel 8. 6 Rekapitulasi hasil perancangan berdasarkan SNI 2847:2013 dan EN1992-1-1:2004	307
Tabel 9. 1 Perbandingan hasil desain dan pembahasan dari perbedaan SNI 2847:2013 dan Eurocode EN1992-1-1:2004	313

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 4. 1 Modelling bangunan pada ETABS v16.2.0	62
Gambar 5. 1 Penentuan grafik respon spektrum (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2012) 65	
Gambar 5. 2 Grafik respon spektrum dari lokasi bangunan	65
Gambar 5. 3 Faktor reduksi (R) dan Cd pada struktur pemikul momen (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2012)	70
Gambar 5. 4 Simpangan antar lantai izin (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2012)	71
Gambar 6. 1 Parameter penentuan lebar efektif	79
Gambar 6. 2 Penampang balok tengah bentang	81
Gambar 6. 3 Diagram tegangan saat jacking	85
Gambar 6. 4 Diagram tegangan saat beban layan	96
Gambar 6. 5 Diagram tegangan setelah kehilangan prategang ...	97
Gambar 6. 6 Diagram tegangan pada tumpuan saat terjadi gempa	98
Gambar 6. 7 Ilustrasi penulangan global daerah angkur	117
Gambar 6. 8 Isobar dari tegangan beton pada daerah angkur (Sumber: Gilbert, Mickleborough, & Ranzi, 2017)	118
Gambar 6. 9 Daerah Limit Kabel SNI Kelas U	126
Gambar 6. 10 Parameter penentuan lebar efektif	132
Gambar 6. 11 Penampang balok tengah bentang	135
Gambar 6. 12 Diagram tegangan saat jacking	139
Gambar 6. 13 Diagram tegangan saat beban layan	150
Gambar 6. 14 Diagram tegangan setelah kehilangan prategang	151
Gambar 6. 15 Diagram tegangan pada tumpuan saat terjadi gempa	152
Gambar 6. 16 Ilustrasi penulangan global daerah angkur	171
Gambar 6. 17 Isobar dari tegangan beton pada daerah angkur (Sumber: Gilbert, Mickleborough, & Ranzi, 2017)	173
Gambar 6. 18 Daerah Limit Kabel SNI Kelas T	180

Gambar 6. 19 Parameter penentuan lebar efektif	186
Gambar 6. 20 Penampang balok tengah bentang.....	189
Gambar 6. 21 Diagram tegangan saat jacking	193
Gambar 6. 22 Diagram tegangan saat beban layan.....	204
Gambar 6. 23 Diagram tegangan setelah kehilangan prategang	205
Gambar 6. 24 Diagram tegangan pada tumpuan saat terjadi gempa	206
Gambar 6. 25 Ilustrasi penulangan global daerah angkur	225
Gambar 6. 26 Isobar dari tegangan beton pada daerah angkur (Sumber: Gilbert, Mickleborough, & Ranzi, 2017).....	227
Gambar 6. 27 Daerah Limit Kabel SNI Kelas C	234
Gambar 6. 28 Penentuan gaya geser pada kolom	240
Gambar 6. 29 Diagram Interaksi P-M Kolom Desain $f_s=1.25f_y$	241
Gambar 6. 30 Ilustrasi luas joint efektif	245
Gambar 6. 31 Isobar dari tegangan beton pada daerah angkur (Sumber: Gilbert, Mickleborough, & Ranzi, 2017).....	298
Gambar 7. 1 Tipikal Response Spectrum dari Eurocode (Sumber: Eurocode, 2004)	250
Gambar 7. 2 Response Spectrum EN1992-1-1:2004 Lokasi Aceh	251
Gambar 8. 1 Definisi l_0 untuk penentuan lebar efektif (Sumber: Eurocode, 2004)	265
Gambar 8. 2 Parameter penentuan lebar efektif (Sumber: Eurocode, 2004)	265
Gambar 8. 3 Penampang beton pratekan EN1992-1-1:2004	268
Gambar 8. 4 Diagram tegangan tengah bentang pada saat jacking	271
Gambar 8. 5 Alur kehilangan pratekan pada EN 1992-1-1:2004	272
Gambar 8. 6 Diagram tegangan tengah bentang saat service load	282

Gambar 8. 7 Kurva tegangan regangan dari beton pratekan yang disederhanakan (Gilbert et al., 2017)	284
Gambar 8. 8 Ilustrasi kekuatan lentur dari Eurocode (sumber: Eurocode, 2004)	286
Gambar 8. 9 Ilustrasi distribusi area untuk menentukan kekuatan batas.....	295
Gambar 8. 10 Daerah Limit Kabel EN1992-1-1:2004	306
Gambar 9. 1 Grafik komparasi lebar efektif	322
Gambar 9. 2 Grafik komparasi tegangan tarik izin	323
Gambar 9. 3 Grafik komparasi kehilangan gaya prategang	324
Gambar 9. 4 Grafik komparasi kapasitas momen	325
Gambar 9. 5 Grafik komparasi kapasitas geser dan torsi	326

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Beton Pratekan merupakan kombinasi ideal dari 2 bahan berkekuatan tinggi. Pada beton Pratekan, kombinasi antara beton dan baja dilakukan secara aktif, yaitu dengan cara menarik baja tersebut dan menahannya ke beton, sehingga membuat beton dalam keadaan tertekan. Kombinasi aktif ini menyebabkan beton mengalami tegangan internal dengan besar dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi tegangan yang terjadi akibat beban eksternal. Beton adalah bahan yang getas apabila terkena tarikan, dan kemampuannya menahan tarikan diperbaiki dengan memberikan tekanan, sementara kemampuannya menahan tekanan tidak dikurangi. Sehingga, jika dibandingkan dengan beton bertulang konvensional, luas penampang melintang beton pratekan lebih kecil dalam menahan beban dan bentang struktur yang sama.

Di Indonesia, standar untuk perencanaan struktur beton pratekan pada gedung adalah Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847:2013 yang ini mengacu pada ACI 318M-11. Sedangkan pada negara-negara lain, standar yang berlaku juga beragam. Salah satunya adalah standar yang digunakan pada negara-negara bagian di Europa Union (EU) yaitu Eurocodes yang disusun oleh Comité Européen de Normalisation (CEN). Eurocodes adalah set yang terdiri dari 10 standar. Eurocode adalah salah satu kode yang dipakai banyak negara di Dunia.

Standar untuk perancangan struktur di Indonesia idealnya merujuk kepada ilmu yang termutakhir dan menghasilkan perancangan yang efisien dan aman. ACI 318M-11 telah mengalami pengembangan menjadi ACI 318M-14, sehingga perlu dilakukan penelitian untuk pengembangan SNI 2847:2013 yang masih merujuk kepada ACI 318M-11.

Dalam studi ini akan dibahas perbandingan Standar perencanaan beton pratekan menurut SNI 2847:2013 dan EN 1992-1-1:2004. Studi dilakukan pada gedung bertingkat 12 lantai dengan

konstruksi beton bertulang konvensional pada keseluruhan struktur dan beton pratekan pada ruang pertemuan dengan bentang 25 meter pada lantai atap.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

Bagaimana hasil perancangan struktur beton pratekan dengan menggunakan SNI 2847:2013?

Bagaimana hasil perancangan struktur beton pratekan dengan menggunakan Eurocode EN 1992-1-1:2004?

Bagaimana perbandingan desain beton pratekan dengan menggunakan SNI 2847:2013 dan Eurocode EN 1992-1-1:2004?

Apa yang menyebabkan perbedaan hasil desain dari 2 alternatif standar tersebut?

1.3 Batasan Masalah

- a. Menjelaskan permasalahan dari sudut pandang ilmu Teknik Sipil, yaitu pada bidang perencanaan struktur.
- b. Struktur yang dirancang adalah struktur gedung.
- c. Struktur yang dirancang adalah balok pratekan dan struktur pendukungnya.
- d. Tidak menghitung analisis biaya dan waktu serta tidak membahas metode pelaksanaan konstruksi.

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan yang dicapai adalah :

- a. Mendapatkan dimensi struktur beton pratekan dengan menggunakan SNI 2847:2013
- b. Mendapatkan dimensi struktur beton pratekan dengan menggunakan EN 1992-1-1:2004
- c. Komparasi hasil desain beton pratekan dengan menggunakan SNI 2847:2013 dan Eurocode EN 1992-1-1:2004
- d. Mendapatkan penyebab terjadinya perbedaan hasil desain.

1.5 Manfaat Tugas Akhir

- a.** Memahami penggunaan beton prategang pada pembangunan Gedung bertingkat.
- b.** Mampu merencanakan gedung bertingkat yang menggunakan beton prategang dengan SNI 2847:2013 dan Eurocode EN 1992-1-1:2004
- c.** Dapat menambah referensi tentang pengetahuan di dalam bidang beton prategang bagi mahasiswa Departemen Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember agar ke depannya digunakan sebagai pertimbangan dalam dunia pekerjaan khususnya di bidang perencanaan bangunan beton prategang.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Dalam tinjauan pustaka ini dibahas jurnal ilmiah dan dasar teori yang berkaitan dengan studi perbandingan persyaratan beton prategang menggunakan SNI 2847:2013 dan Eurocode EN 1992-1-1:2004. Di dalam bab ini dibahas mengenai prinsip dasar beton prategang dan perbedaan Standar beton prategang di SNI 2847:2013 dan Eurocode EN 1992-1-1:2004.

2.2 Standar Perencanaan

2.2.1 Pendahuluan

Beton adalah material yang tahan terhadap tekan, namun tidak tahan terhadap tarik. Sedangkan baja adalah material yang tahan terhadap tarik. Dengan mengkombinasikan antara beton dan baja dimana gaya tekan ditahan oleh beton dan gaya tarik ditahan oleh baja dikenal sebagai beton bertulang. Sehingga pada beton bertulang, penampang beton tidak dapat efektif 100% digunakan, karena bagian yang tertarik tidak diperhitungkan sebagai pemikul tegangan

Kelemahan konstruksi beton bertulang adalah berat sendiri yang besar, yaitu 2400 kg/m³. Sehingga besar berat penampang yang tidak diperhitungkan untuk tegangan tarik. Untuk itu, beton diberi tegangan awal sebelum beban bekerja, sehingga seluruh penampang beton dalam keadaan tertekan seluruhnya. Inilah metode yang dikenal sebagai beton prategang.

2.2.2 Material Beton Prategang

2.2.2.1 Beton

Beton adalah material yang terdiri dari campuran semen, air, agregat, dan bahan tambah bila diperlukan. Beton yang digunakan untuk beton prategang adalah mempunyai kekuatan tekan normal mengarah ke tinggi, dengan nilai 35 – 60 MPa. Kuat tekan ini diperlukan untuk menahan tegangan tekan pada serat beton yang

tertekan oleh gaya prategang. Nilai modulus elastisitas beton E_c dapat diambil sebesar $4700 \sqrt{f_c}$

2.2.2.2 Tendon

- a. Kawat tunggal (*wires*), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan sistem pra-tarik.
- b. Untaian kawat (*strand*), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan sistem pasca-tarik. Tipe ini harus diberi selongsong (*ducts*)
- c. Kawat batangan (*bars*), biasanya digunakan untuk baja prategang sistem pra-tarik.
- d. Tulangan biasa, sering digunakan untuk tulangan pelengkap beton prategang, seperti tulangan memanjang, sengkang, dan lain-lain

2.2.3 Prinsip Dasar Beton Prategang

Menurut Lin.T.Y (1953), ada 3 prinsip dasar beton prategang. Yang pertama adalah gaya prategang untuk mentransformasi beton menjadi material elastis. Prinsip Analisis tegangan elastis adalah penjumlahan tegangan akibat beban luar, yaitu beban momen dan beban aksial. Untuk mengadakan gaya tekan, struktur harus diberi gaya aksial (F). Gaya F ini jika memiliki eksentrisitas pada garis berat beton, akan menjadi beban momen, dan bisa mengurangi beban momen luar yang terjadi.

Prinsip kedua adalah antara beton bertulang dan beton prategang sama-sama terjadi karena adanya keseimbangan gaya tekan beton (C) dan gaya tarik baja (T).

Dan prinsip ketiga adalah beton prategang adalah menyeimbangkan beban luar dengan tegangan yang ada pada tendon.

2.2.4 Metode Pemberian Gaya Prategang

- a. **Pratarik (Pre-Tension Method)**
Baja prategang diberi gaya sebelum beton dicor.

Tahap 1: Tendon prategang ditarik atau diberi gaya prategang kemudian diangker pada suatu abutment tetap.

Tahap 2: Beton dicor pada cetakan (*formwork*) dan landasan yang sudah disediakan sedemikian sehingga melingkupi tendon yang sudah diberi gaya prategang dan dibiarkan mengering.

Tahap 3: Setelah beton mengering dan cukup umur kuat untuk menerima gaya prategang, tendon dipotong dan dilepas sehingga gaya prategang ditransfer ke beton. Setelah gaya prategang ditransfer ke beton, balok beton tersebut akan melengkung ke atas sebelum menerima beban kerja (*camber*). Setelah beban bekerja, lendutan akibat beban kerja terjadi sehingga *camber* akan menghilangkan lendutan yang terjadi.

Pascatarik (Post-Tension Method)

Beton dicor terlebih dahulu, dimana telah disiapkan saluran tendon yang disebut *ducts*.

Tahap 1: Dengan cetakan (*formwork*), yang telah disediakan lengkap dengan selongsong prategang yang dipasang sesuai dengan eksentrisitas yang sudah direncanakan, beton dicor.

Tahap 2: Setelah beton cukup umur dan kuat memikul gaya prategang, tendon dimasukkan kedalam selongsong kemudian ditarik untuk mendapatkan gaya prategang. Metode pemberiannya, salah satu ujung kabel diangker, kemudian ujung lainnya ditarik (dari satu sisi). Adapula yang ditarik dari dua sisi secara bersamaan kemudian diangker. Setelah diangker, saluran di *grouting* melalui lubang yang disediakan.

Tahap 3: Setelah diangker, balok beton menjadi tertekan, dan gaya prategang ditransfer ke beton. Karena tendon dipasang

dengan eksentrisitas, hal ini akan menimbulkan momen pada beton yang dapat melawan beban kerja.

Tabel 2. 1 Perbandingan pratarik dan pasca-tarik

	Kelebihan	Kekurangan
Pratarik	Tidak memerlukan angkur Tendon dilindungi oleh beton tanpa membutuhkan grouting atau perlindungan lainnya Distribusi prategang di daerah transmisi lebih baik Produksi pabrik precast	Diperlukan alas penegangan yang kuat Lebih susah untuk membentuk tendon yang terdefleksi
Pasca-tarik	Tidak perlu alas penegangan Lebih fleksibel dalam menentukan layout dan penampang tendon Dapat mengatur eksentrisitas tendon dengan gampang Cor di tempat	Tendon membutuhkan sistem perlindungan Gaya yang terkonsentrasi di bagian ujung sangat besar

2.2.5 SNI 2847:2013

Standar mengenai tata cara perencanaan struktur beton bertulang di Indonesia telah mengalami pembaharuan seiring dengan berkembangnya zaman. SNI 03-2847:2002 diperbaharui dengan diresmikannya SNI 2847:2013 yang mengacu pada ACI 318M-11. Beberapa komponen struktur mengalami perubahan dalam proses

perencanaannya, salah satunya adalah komponen lentur (balok). Dalam SNI 2847:2013 penampang struktur lentur dikategorikan menjadi tiga macam, yaitu penampang terkendali tarik, penampang terkendali tekan, serta penampang yang berada dalam zona transisi antara tarik dan tekan. Penentuan kriteria penampang tersebut didasarkan pada regangan tarik netto, ϵ_t , yang terjadi pada tulangan baja terluar. Rasio tulangan maksimum ditentukan berdasarkan regangan tarik minimum yang boleh terjadi, sesuai dengan yang ditentukan dalam Standar. Tidak hanya itu, nilai faktor reduksi ϕ diperbolehkan diambil sebesar 0,90 jika ϵ_t mencapai 0,005 atau lebih dan direduksi secara linear hingga ϵ_t mencapai batas minimum yang diizinkan sebesar 0,004.

SNI 2847:2013 juga mereduksi kebutuhan terhadap luas tulangan tarik hingga 15% dibanding dengan syarat SNI 2002, serta kapasitas lentur penampang yang dihasilkan akan lebih kecil sekitar 1.7%. (Setiawan, 2015)

2.2.6 EN 1992-1-1:2004

Eurocode adalah Standar perencanaan struktur yang berlaku pada Europa Union (EU) dan dibuat rumuskan oleh CEN. Rangkaian kode Eurocodes terdiri dari 8 set, dan untuk perencanaan struktur beton bertulang diatur dalam EN 1992-1-1:2004 sedangkan desain struktur tahan gempa diatur dalam EN 1998-1-1:2004. EN 1992-1-1:2004 menggantikan Standar yang berlaku sebelumnya, yaitu British Standar BS 8110. Secara umum, Eurocode menyediakan informasi dasar yang diperlukan. Prinsip pada Eurocode tidak memperbolehkan alternative perencanaan dan seluruh perencanaan harus mengikuti Standar Eurocode. Eurocode mengharapkan perencana untuk mendapat koefisien serta informasi yang detail dari textbook dan manual. (Shafii dkk., 2001).

2.2.7 Perbandingan antara 2 Standar

Tabel 2. 2 Perbandingan SNI 2847:2013 dan EN 1992-1-1:2004

Aspek Pembeda	SNI 2847:2013	Eurocode EN 1992-1-1:2004
Asumsi desain	Ps.10.2.3 1. - Maksimum regangan beton pada serat tekan ekstrim adalah 0.003.	Ps. 6.1(2) - Maksimum regangan beton pada serat tekan ekstrim adalah 0.0035 untuk $f_c' < 50\text{MPa}$ - regangan awal pada baja prategang diperhitungkan saat memperhitungkan tegangan baja yang terjadi
Lendutan izin struktur prategang	1. Untuk komponen struktur lentur Kelas U, lendutan seketika harus dihitung dengan momen inersia penampang beton bruto, I_g 2. Untuk komponen struktur lentur Kelas C dan Kelas T Perhitungannya pada hubungan momen-lendutan bilinear, atau momen inersia efektif, I_e	1. Struktur dengan rasio $l/d \leq \text{basic } l/d$ secara konservatif dianggap memenuhi control lendutan sehingga tidak perlu dihitung secara manual. Tabel 7.4N 2. Perhitungan defleksi: $\alpha = \xi \alpha_{II} + (1 - \xi) \alpha_I$ Dimana: α = parameter deformasi α_{II} & α_I = parameter tidak retak dan retak penuh

	3. Lendutan jangka panjang tambahan dihitung dengan memperhatikan pengaruh tegangan dalam beton dan baja akibat beban tetap dan termasuk pengaruh rangkai dan susut beton dan relaksasi baja.	$\xi = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2$ Catatan: $\xi = 0$ bila penampang tidak retak. 3. Perhitungan defleksi akibat pengaruh rangkai: $E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}$ Dimana: $\varphi(\infty, t_0)$ = koefisien rangkai 4. Curvature shrinkage: $\frac{1}{r_{cs}} = \epsilon_{cs} \cdot \alpha_e \cdot \frac{S}{I}$
Tegangan izin baja prategang	Tidak boleh melebihi : 1. Akibat gaya penarikan (jacking) baja prategang $0,94f_{py}$ tetapi tidak lebih besar dari yang lebih kecil dari $0,80f_{pu}$ dan nilai maksimum yang direkomendasikan oleh pembuat baja prategang atau perangkat angkur. 2. Tendon pasca tarik, pada perangkat angkur dan kopler (couplers), sesaat setelah transfer gaya $0,70f_{pu}$	Perhitungan gaya maksimum: $P_{max} = A_p \cdot \sigma_{pmax}$ Dimana: A_p = luas penampang tendon σ_{pmax} = tegangan izin maksimum dari tendon. $\sigma_{pmax} = \min \{ k_1 \cdot f_{pk}; k_2 \cdot f_{p0,1k} \}$ k_1 dan k_2 adalah parameter yang bervariasi dari tiap negara. Rekomendasi $k_1=0.8$ dan $k_2=0.9$
Tegangan izin pada beton	(a) Tegangan serat terjauh dalam kondisi tekan kecuali seperti	Untuk struktur pasca tarik: $\sigma_c = 0.6 f_{ck}(t)$

	diizinkan dalam (b) tidak boleh melebihi $0,60f_c'i$ (b) Tegangan serat terjauh dalam kondisi tekan pada ujung-ujung komponen tumpuan sederhana tidak boleh melebihi $0,70f_{ci}'$ (c) Bila kekuatan tarik beton yang dihitung, f_t, melebihi $0,5 \sqrt{f_{ci}'}$ (d) pada ujung-ujung komponen struktur terdukung sederhana, atau $0,25 \sqrt{f_{ci}'}$ pada lokasi lainnya, tulangan dengan lekatan tambahan harus disediakan dalam daerah tarik untuk menahan gaya tarik total dalam beton yang dihitung dengan asumsi penampang tak retak. Untuk komponen struktur lentur prategang Kelas U dan Kelas T: (a) Tegangan serat terjauh dalam kondisi tekan akibat	Untuk struktur pra-tarik: $\sigma_c = k_6 \cdot f_{ck}(t)$ Dimana: K6 adalah parameter yang bervariasi dari tiap negara. Rekomendasi $k_6 = 0.7$.
--	--	---

	prategang ditambah beban tetap $0,45fc'$ (b) Tegangan serat terjauh dalam kondisi tekan akibat prategang ditambah beban total $0,60fc'$ 1. Spasi tendon dengan lekatan tidak boleh melebihi $2/3$ dari spasi maksimum yang diizinkan. 2. Bila kedua tulangan dan tendon dengan lekatan digunakan untuk memenuhi persyaratan spasi, spasi tidak boleh melebihi $5/6$ dari yang diizinkan. 3. Δf_{ps} harus disubstitusi untuk f_s, Diizinkan untuk mengambil f_{dc} sama dengan tegangan efektif pada baja prategang f_{se}. 4. Pada tendon prategang, besaran Δf_{ps} tidak boleh melebihi 250 MPa. Bila Δf_{ps} kurang dari atau sama dengan 140	
--	--	--

	MPa, persyaratan spasi tidak berlaku. 5. Bila h balok melebihi 900 mm, luas tulangan kulit longitudinal yang terdiri dari tulangan atau tendon dengan lekatan harus disediakan.	
Pengaruh kehilangan gaya prategang	(a) Dudukan baja prategang saat penyaluran; (b) Perpendekan elastis beton; (c) Rangkak beton; (d) Susut beton; (e) Relaksasi tegangan baja prategang; (f) Kehilangan friksi akibat kurvatur sengaja atau tak sengaja pada tendon pasca-tarik.	(a) Perpendekan elastis beton (b) Relaksasi tegangan baja prategang (c) Kehilangan friksi (d) Dudukan baja prategang saat penyaluran (e) Pada Eurocode tidak dijelaskan kehilangan gaya prategang akibat <i>creep</i> (rangkak).
Kehilangan gaya prategang langsung pada pra-tarik	-	Pertimbangan: (a) Pada saat proses <i>stressing</i> (b) Sebelum transfer gaya prategang pada beton (c) Pada saat transfer gaya prategang ke beton
Kehilangan gaya	1. Gaya prategang efektif yang	Pasal 5.10.5.1 Akibat deformasi beton

prategang langsung pada pasca-tarik	disyaratkan harus dicantumkan dalam dokumen kontrak. 2. Kehilangan friksi yang dihitung harus didasarkan pada koefisien friksi wobble dan kurvatur yang ditentukan secara eksperimental. 3. Gaya prategang dan kehilangan friksi harus dibuktikan selama operasi penegangan.	$\Delta P_{el} = Ap. Ep. \sum [\frac{j. \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)}]$ Dimana: $\Delta \sigma_c(t)$ = variasi tegangan pada pusat massa. $J = (n-1)/2n$ n = Jumlah tendon identic. Pasal 5.10.5.2 Akibat gesekan $\Delta P_{\mu}(x) = P_{max} (1 - e^{-\mu(\theta + kx)})$ Dimana: θ = Perpindahan angular μ = koefisien friksi Pasal 5.10.5.3 Kehilangan di angkur Dihitung sesuai dengan panduan <i>European Technical Approval</i>.
Kehilangan gaya prategang akibat waktu	-	Dihitung dengan persamaan 5.46
Efek gaya prategang pada Ultimate Limit State (ULS)	-	Untuk struktur prategang dengan tendon terikat permanen, harus meninjau deformasi semua member saat

		menghitung pertambahan tegangan. Nilai $\Delta\sigma_{P,ULS}$ parameter yang bervariasi dari tiap negara. Rekomendasi $\Delta\sigma_{P,ULS} = 100 \text{ MPa}$.
Efek gaya prategang pada Ultimate Limit State (SLS)	-	Dua nilai karakteristik gaya prategang pada SLS diestimasi dari: $P_{k,sup} = r_{sup} P_{m,t}(x)$ $P_{k,inf} = r_{inf} P_{m,t}(x)$ Dimana: $P_{k,sup}$ = batas atas nilai karakteristik $P_{k,inf}$ = batas bawah nilai karakteristik,
Struktur statis tak tentu	1. Kinerja pada saat kondisi beban layan harus ditentukan dengan analisis elastis, yang meninjau reaksi, momen, geser, dan gaya aksial yang ditimbulkan oleh prategang, rangkai, susut, perubahan suhu, deformasi aksial, kekangan elemen struktur yang dihubungkan, dan penurunan fondasi. 2. Momen-momen yang digunakan untuk menghitung kekuatan	-

	perlu harus merupakan jumlah momen akibat reaksi yang ditimbulkan oleh prategang (dengan suatu faktor beban sebesar 1,0) dan momen-momen akibat beban terfaktor. 3. Bila tulangan dengan lekatan disediakan pada tumpuan, diizinkan untuk mengurangi momen negatif atau positif yang dihitung dengan teori elastis. 4. Momen yang tereduksi harus digunakan untuk menghitung momen teredistribusi pada semua penampang lainnya dalam bentang. Kesetimbangan statis harus dipertahankan setelah redistribusi momen untuk setiap penempatan pembebanan.	
Komponen struktur tekan –	1. Komponen struktur dengan tegangan tekan rata-rata dalam beton,	-

Kombinasi beban lentur dan aksial	akibat gaya prategang efektif saja, sama dengan atau lebih besar dari 1,6 MPa, harus mempunyai semua tendon yang dilingkupi oleh spiral atau pengikat transversal sesuai dengan (a) sampai (d): (a) Spiral harus memenuhi 7.10.4; (b) Pengikat transversal harus paling sedikit berukuran $\Phi 10$ atau tulangan kawat las dengan luas ekuivalen, dan harus dispasikan secara vertikal tidak melebihi 48 diameter batang tulangan atau kawat pengikat, atau dimensi yang terkecil komponen struktur tekan; (c) Pengikat harus diletakkan secara vertikal tidak lebih dari setengah spasi pengikat di atas fondasi tapak (footing) atau slab pada sebarang tingkat, dan tidak lebih dari setengah spasi	
--	---	--

	pengikat di bawah tulangan horizontal terbawah pada komponen struktur yang ditumpu di atasnya; (d) Bila rangka balok atau brakit (brackets) ke dalam semua sisi kolom, pengikat harus dihentikan tidak lebih dari 75 mm di bawah tulangan terbawah pada balok atau brakit tersebut. 2. Untuk dinding dengan tegangan tekan rata-rata dalam beton akibat gaya prategang efektif saja sama dengan atau lebih besar dari 1,6 MPa, tulangan minimum tidak berlaku bila analisis struktur menunjukkan kekuatan dan stabilitas yang cukup	
Sistem Slab	1. Untuk beban terdistribusi merata, spasi tendon atau kelompok tendon dalam paling sedikit satu arah tidak boleh melebihi 8 kali tebal	-

	slab dan 1,5 m. Spasi tendon juga harus memberikan prategang efektif rata-rata minimum sebesar 0,9 MPa pada tributari penampang slab pada tendon atau kelompok tendon. Untuk slab dengan penampang yang bervariasi sepanjang bentang slab, baik sejajar atau tegak lurus terhadap tendon atau kelompok tendon, prategang efektif rata-rata minimum sebesar 0,9 MPa disyaratkan pada setiap tributari penampang pada tendon atau kelompok tendon sepanjang bentang. Beban terpusat dan bukaan pada slab harus ditinjau bilamana menentukan spasi tendon. 2. Pada slab dengan tendon tanpa lekatan, minimum sebanyak dua strand pasca tarik tujuh kawat, diameter 12.7 mm atau lebih	
--	--	--

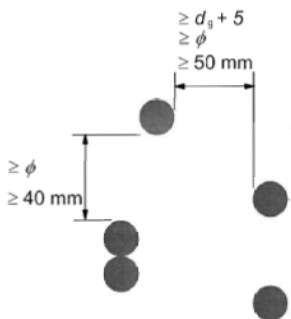
	besar, harus disediakan dalam setiap arah di kolom, baik melewati atau diangkur dalam daerah yang dibatasi oleh tulangan longitudinal kolom. Kolom luar dan muka penutup geser (shear cap), dua tendon integritas struktur ini harus melewati di bawah sebarang tendon ortogonal dalam bentang yang bersebelahan. Bila dua tendon integritas struktur diangkur dalam daerah yang dibatasi oleh tulangan longitudinal kolom, ankur dapat diletakkan melewati pusat kolom dan menjauh dari bentang yang diangkur.	
Daerah Pengangkur pada elemen pasca-tarik	Tersusun dari dua daerah: (a) Daerah lokal adalah prisma persegi (atau prisma persegi ekuivalen untuk ankur oval) dari beton yang langsung mengelilingi alat ankur dan	(a) Saat mempertimbangkan efek dari prategang sebagai gaya terpusat pada zona ankur, nilai prategang pada tendon dan batas karakteristik bawah

	sebarang tulangan pengekan (b) Daerah umum adalah daerah pengankuran seperti didefinisikan dalam 2.2 dan mencakup daerah lokal	gaya tarik harus diperhitungkan (b) <i>Bearing stress</i> dibelakang pelat ankur harus dicek berdasarkan <i>European Technical Approval</i> (c) Gaya tarik terpusat harus ditinjau oleh model <i>strut and tie</i>. Jika tegangan baja dibatasi hingga 300MPa, tidak perlu mengecek lebar retak (d) Penjelasan area ankur dijelaskan pada Figure 8.18 Eurocode.
Desain daerah pengankuran untuk tendon strand tunggal atau batang tunggal diameter 16mm	Desain daerah lokal harus memenuhi persyaratan dari ACI 423.7 Desain daerah umum: (a) Dua batang tulangan horizontal paling sedikit berukuran D-13 harus dipasang paralel terhadap tepi slab. Tulangan-tulangan tersebut diizinkan untuk berkontak dengan muka depan perangkat ankur	-

	dan harus berada dalam jarak $1/2h$ di depan masing-masing perangkat angkur. Tulangan tersebut harus menerus paling sedikit 150 mm baik sisi tepi luar setiap perangkat. (b) Jika spasi pusat ke pusat perangkat angkur adalah 300 mm atau kurang, perangkat angkur tersebut harus dianggap sebagai sebuah kelompok. Untuk setiap kelompok dari enam atau lebih perangkat angkur, batang tulangan jepit rambut (hairpin) atau sengkang tertutup $n + 1$ paling sedikit berukuran $\Phi -10$ harus disediakan, dimana n adalah jumlah perangkat angkur. Sebuah batang tulangan jepit rambut (hairpin) atau sengkang harus	
--	--	--

	ditempatkan antara setiap perangkat angkur dan sebuah pada setiap sisi kelompok. Batang tulangan jepit rambut (hairpin) atau sengkang harus ditempatkan dengan kaki- kakinya menerus ke dalam slab tegak lurus terhadap bidang slab dari $3h/8$ sampai $h/2$ di depan perangkat angkur.	
Desain daerah pengangkur untuk tendon strand majemuk	Desain daerah lokal harus memenuhi persyaratan dari AASHTO “Standard Specification for Highway Bridges,” Division I, Artikel 9.21.7.2.2 sampai 9.21.7.2.4	-
Perlindungan untuk baja prategang	1. Baja prategang tanpa lekatan harus dibungkus dengan pelapis. Baja prategang harus sepenuhnya dilapisi dan pelapis yang mengelilingi baja prategang yang diisi dengan bahan yang	-

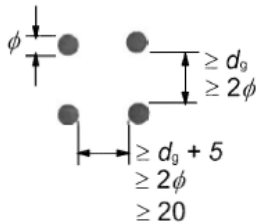
	sesuai untuk mencegah korosi. 2. Pelapis harus kedap air dan menerus sepanjang panjang keseluruhan yang tidak dilekatan. 3. Untuk penerapan pada lingkungan korosif, pelapis harus dihubungkan dengan semua angkur penegangan, antara, dan tetap dalam sifat kedap air. 4. Tendon strand tunggal tanpa lekatan harus dilindungi terhadap korosi sesuai dengan ACI 423.7. 5. Pelaksanaan pembakaran atau pengelasan di sekitar baja prategang harus dilakukan agar baja prategang tidak dikenai suhu yang berlebihan, percikan las, atau arus listrik tanah.	
Selongsong (ducts) pasca tarik	1. Selongsong (ducts) untuk tendon yang di-grout harus kedap mortar dan tidak reaktif dengan beton, baja prategang, grout, dan pencegah korosi.	Selongsong untuk struktur pasca tarik harus diatur sedemikian rupa sehingga: - Beton bisa ditempatkan secara

	2. Selongsong (ducts) untuk tendon kawat tunggal, strand tunggal, atau batang tulangan tunggal yang di-grouting harus mempunyai diameter dalam paling sedikit 6 mm lebih besar dari diameter baja prategang. 3. Selongsong (ducts) untuk tendon kawat majemuk, strand majemuk, atau batang tulangan majemuk harus mempunyai luas penampang dalam paling sedikit dua kali luas penampang baja prategang. 4. Bebas dari air genangan	aman dengan tidak merusak selongsong - Beton bisa menahan gaya dari selongsong di bagian lengkung sesaat dan setelah pemberian gaya pratekan - Tidak ada <i>grout</i> yang bocor Jarak minim selongsong:  Dimana: Φ = Diameter selongsong d_g = ukuran maksimum agregat.
Grouting untuk tendon dengan lekatan	1. Grouting harus terdiri dari semen portland dan air; atau semen portland, pasir, dan air yang sesuai dengan persyaratan bahan. 2. Proporsi bahan untuk grouting harus	-

	didasarkan pada hasil pengujian grouting segar atau pengalaman terdokumentasi. 3. rasio air-semen tidak boleh melebihi 0,45 berdasarkan berat. 4. Tidak boleh menambahkan air 5. Suhu komponen struktur pada saat pelaksanaan grouting harus di atas 2 °C dan harus dijaga di atas 2 °C hingga kubus grouting 50 mm yang dirawat di lapangan mencapai kekuatan tekan minimum sebesar 5,5 MPa. 6. Suhu grouting tidak boleh di atas 32 °C selama pencampuran dan pemompaan.	
Penetapan dan pengukuran gaya prategang	Gaya prategang harus ditentukan dengan kedua (a) dan (b): (a) Pengukuran perpanjangan baja. Perpanjangan perlu harus ditentukan dari kurva beban-perpanjangan rata-rata untuk baja	Nilai gaya prategang awal $P_{m0}(x)$ (pada waktu $t=0$): $P_{m0}(x) = A_p \cdot \sigma_{pm0}(x)$ Dimana: $P_{m0}(x)$ =tegangan pada tendon sesaat setelah transfer $P_{m0}(x) = \min \{k_7 \cdot f_{pk} ; k_8 \cdot f_{p0,1k}\}$

	prategang yang digunakan; (b) Pengamatan gaya jeking (jacking) pada pengukur atau sel beban yang terkalibrasi atau dengan menggunakan dinamometer yang terkalibrasi.	
Angkur dan kopler pasca tarik	Angkur dan kopler untuk tendon dengan lekatan dan tanpa lekatan harus mengembangkan paling sedikit 95 persen dari f_{pu} bila diuji dalam kondisi tak terlekat, tanpa melampaui kemiringan yang diantisipasi. Untuk tendon dengan lekatan, ankur dan kopler harus ditempatkan sedemikian hingga 100 persen dari f_{pu} harus dikembangkan pada penampang kritis setelah baja prategang dilekatkan pada komponen struktur.	(a) Perhitungan untuk efek local pada beton harus dilakukan. (b) Secara umum, couplers diletakkan pada lokasi jauh dari perletakan sedang (c) Penempatan couplers pada 50% atau lebih tendon pada satu potongan melintang harus dihindari.
Pasca tarik luar	1. Dianggap sebagai tendon tanpa lekatan kecuali jika ketentuan dibuat untuk lekatan secara efektif tendon luar pada penampang	(a) Tendon luar pada struktur statis tak tentu dapat menimbulkan momen order kedua

	beton sepanjang panjang keseluruhannya. 2. Harus dihubungkan dengan komponen struktur beton dengan cara demikian hingga menjaga eksentrisitas yang diinginkan antara tendon dan pusat beton melalui rentang penuh lendutan komponen struktur yang diantisipasi. 3. Tendon luar dan daerah pengangkuran tendon harus dilindungi terhadap korosi, dan detail metoda perlindungan harus ditunjukkan dalam dokumen kontrak.	(b) Untuk analisis linier efek dari prategang harus diaplikasikan sebelum distribusi ulang gaya. (c) Sambungan kaku antara baja dan beton diasumsikan setelah grouting pada struktur tendon pasca tarik. (d) Tendon eksternal diasumsikan tegak diantara deviators.
Pengaturan tendon dan angkur pada struktur pra-tarik	-	Penempatan dilakukan dengan pertimbangan: - Tekanan beton pada angkur - Spalling dari beton - Angkur pada tendon pra-tarik - Penempatan beton diantara tendon. Syarat penempatan:

		 Dimana: Φ = Diameter selongsong d_g = ukuran maksimum agregat.
Transfer gaya prategang	-	1. Pada tendon yang dilepas, gaya prategang diasumsikan ditransfer kepada beton oleh sebuah tegangan ikatan konstan f_{bpt} (dihitung dengan persamaan 8.15) 2. Panjang penyaluran l_{pt} $l_{pt} = \frac{a_1 a_2 \phi \sigma_{pm0}}{f_{bpt}}$ Dimana: $a_1 = 1$ untuk pelepasan berkala $= 1.25$ untuk pelepasan langsung $a_2 = 0.25$ untuk tendon dengan penampang lingkaran $= 0.19$ untuk 3 dan 7-wire strand

		$\emptyset$ = Diameter nominal tendon σ_{pm0} = Tegangan tendon setelah dilepaskan 3. Panjang penyaluran minimum: $l_{pt1} = 0.8 l_{pt}$ $l_{pt2} = 1.2 l_{pt}$ 4. Tegangan beton diasumsikan memiliki distribusi liner.
Angkur tendon pada ultimate limit state (ULS)	-	1. Kekuatan ikatan pada ankur pada ULS dihitung dengan persamaan 8.20 2. Karena peningkatan tingkat getas akibat beton mutu tinggi, harus dibatasi nilainya untuk C60/75. 3. Panjang ankur dihitung dengan persamaan 8.21

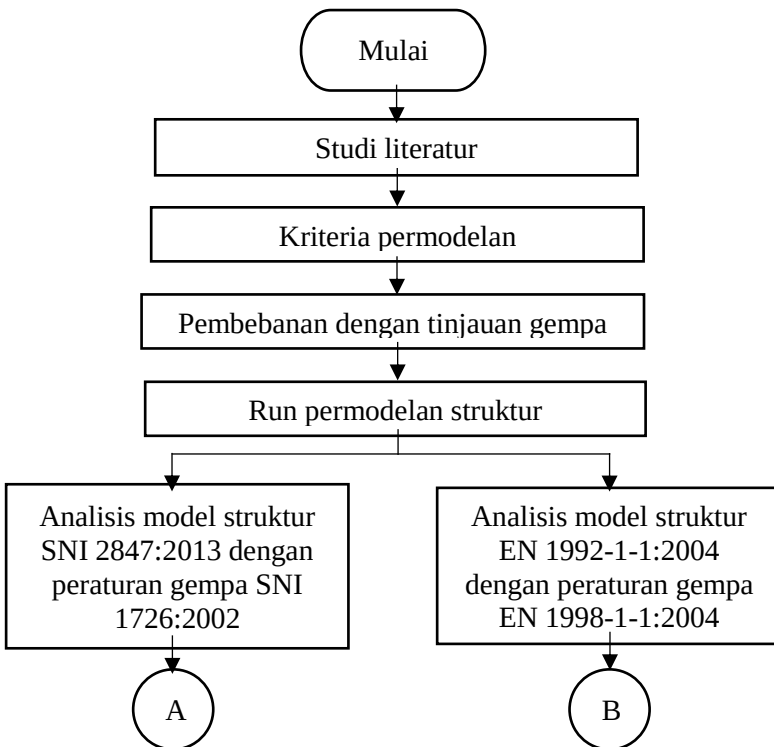
Halaman ini sengaja dikosongkan

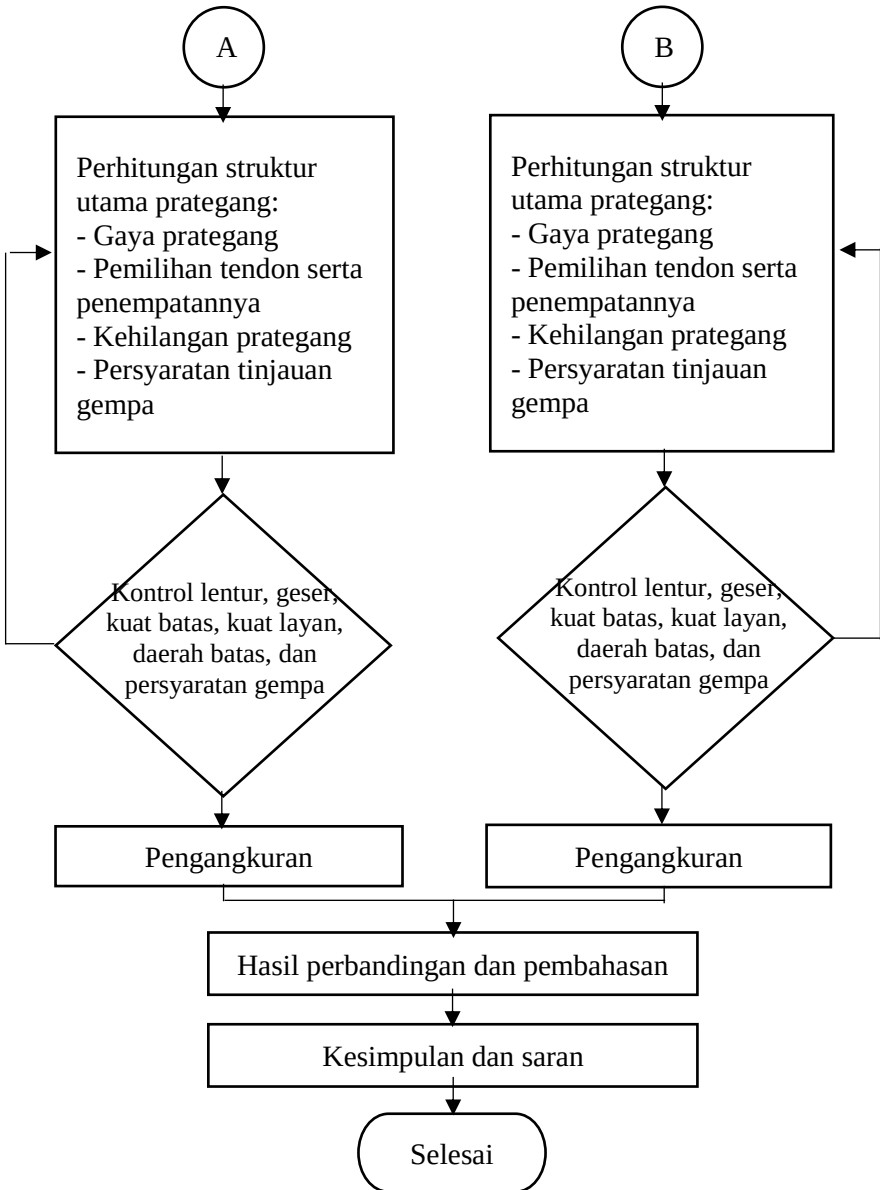
BAB III METODOLOGI

3.1 Umum

Langkah-langkah pengerjaan sesuai dengan uraian kegiatan yang akan dilakukan perlu disusun sebelum pengerjaan Tugas Akhir. Urutan pengerjaan dimulai dari pengumpulan literatur dan pedoman desain, hingga perbandingan hasil analisis kedua kode.

3.2 Bagan Alir Penyelesaian Tugas Akhir





3.3 Kriteria Permodelan

Data perencanaan ang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir yaitu:

Variabel desain	: Beton prategang pasca tarik
Fungsi bangunan	: Hotel dan Perkantoran
Lokasi	: Surabaya, Jawa Timur
Zona gempa	: 3
Material	: Beton
Mutu beton (f'_c)	: 40 MPa
Mutu baja (f_y)	: 390 MPa
Jumlah lantai	: 12
Tinggi tiap lantai	: 4 m
Tinggi Gedung	: 48 m
Jumlah baris	: 4
Lebar antar baris	: 6 m
Luas Gedung	: 24 m x 24 m
Jenis tanah	: Tanah lunak

3.4 Pembebanan

Pembebanan dilakukan dengan mengikuti Standar yang ada di PPIUG 1983 dan kombinasi pembebanan menggunakan Standar pada SNI 2847:2013 antara lain:

- a. Beban mati
Terdiri dari berat struktur sendiri, dinding, pelat, serta finishing dari arsitektur.
- b. Beban hidup
Beban hidup untuk perkantoran adalah 250kg/m^2 dan 100kg/m^2 untuk beban atap.
- c. Beban gempa
Dihitung menurut SNI 1726:2002 dan Eurocode EN 1998-1-1:2004 sesuai dengan kriteria permodelan.

3.5 Run Permodelan Struktur

Analisis stuktur utama menggunakan *software* SAP2000 untuk mendapatkan reaksi dan gaya dalam yang terdapat pada rangka utama.

3.6 Analisis Struktur Utama Prategang

3.6.1 Gaya Prategang

Penentuan gaya prategang awal berpengaruh pada momen total, yang kemudian gaya tersebut akan disalurkan ke penampang.

3.6.2 Pemilihan Tendon Baja Prategang

Pemilihan jenis tendon dipengaruhi oleh gaya prategang dan ketersediaan material yang ada. Setelah menentukan tendon yang digunakan, langkah selanjutnya adalah menentukan tata letak kabel. Tata letak kabel dipengaruhi oleh kern serta tegangan izin yang diperbolehkan.

3.6.3 Kehilangan Prategang

Berkurangnya gaya prategang dalam tendon saat tertentu dibanding pada saat pemberian gaya prategang awal. Dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu:

3.6.3.1 Kehilangan segera

- Kehilangan akibat pengangkuran (SNI 2847:2013 pasal 18.6.1.1 sedangkan pada EN 1992-1-1:2004 pasal 5.10.5.3)
- Kehilangan akibat perpendekan elastis (SNI 2847:2013 pasal 18.6.1.2 sedangkan pada EN 1992-1-1:2004 pada pasal 5.10.5.1)
- Kehilangan akibat gesekan *wobble effect* (SNI 2847:2013 pasal 18.6.2.1 sedangkan pada EN 1992-1-1:2004 pasal 5.10.5.2)
- Kehilangan akibat kekangan kolom

3.6.3.2 Kehilangan yang tergantung oleh waktu

- Kehilangan akibat rangkai (SNI 2847:2013 pasal 18.6.1.3 sedangkan pada EN 1992-1-1:2004 tidak mengatur mengenai rangkai)
- Kehilangan akibat susut (SNI 2847:2013 pasal 18.6.1.4 sedangkan pada EN 1992-1-1:2004 pasal 5.10.6)
- Kehilangan akibat relaksasi baja (SNI 2847:2013 pasal 18.6.1.5 sedangkan pada EN 1992-1-1:2004 pasal 5.10.6)

3.7 Kontrol Struktur

3.7.1 Kontrol Lentur

Kontrol terhadap tegangan yang terjadi di balok pada tiap tahap kritis, baik saat jacking maupun tahap beban layan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui apakah dimensi dari perencanaan mampu memikul tegangan yang diberikan. Diatur pada SNI 2847:2013 Pasal 18.5 dan Eurocode Pasal 5.10

3.7.2 Kontrol Geser

Kontrol geser serta perhitungan tulangan geser diatur di SNI 2847:2013 pada pasal 11.3 dimana dapat digunakan 2 perumusan, yaitu rumus umum dan rumus rinci. Sedangkan pada EN 1992-1-1:2004 terdapat pada pasal 6.2. Perhitungan harus dilakukan agar struktur mampu memikul gaya geser yang diterima.

3.7.3 Kontrol Lendutan

Syarat lendutan sebagai kuat layan harus dihitung demi kenyamanan dan efek psikologis pengguna struktur. Lendutan dihitung akibat beban sendiri dan pengaruh beban luar agar tidak melebihi batas yang telah ditetapkan.

3.8 Pengangkuran

Pada balok prategang pasca tarik, kegagalan dapat disebabkan karena hancurnya bantalan beton pada daerah tepat dibelakang angkur tendon akibat tekanan yang sangat besar. Kegagalan ini dihitung pada kondisi ekstrim saat transfer, yaitu saat gaya prategang maksimum dan kekuatan beton minimum. Persyaratan daerah pengangkuran diatur oleh SNI 2847:2013 pada pasal 18.13 dan pasal 18.21. Sedangkan Eurocode 1992-1-1:2004 diatur pada pasal 3.4.1 dan pasal 8.10.4.

3.9 Kontrol Dengan Tinjauan Gempa

Kontrol tinjauan gempa pada SNI 2847:2013 terdapat pada pasal 21.5.2.5 sebagaimana:

- a. Prategang rata-rata, f_{pc} , yang dihitung untuk luas yang sama dengan dimensi penampang komponen struktur terkecil yang dikalikan dengan dimensi penampang tegak lurus tidak boleh melebihi yang lebih kecil dari $3,5 \text{ MPa}$ dan $f_c' 10 \text{ MPa}$.
- b. Baja prategang harus tanpa lekatan pada daerah sendi plastis potensial, dan regangan yang dihitung pada baja prategang akibat perpindahan desain harus kurang dari 1 persen.
- c. Baja prategang tidak boleh menyumbang lebih dari seperempat kekuatan lentur positif atau negatif di penampang kritis pada daerah sendi plastis dan harus diangkur pada atau melewati muka eksterior joint.
- d. Pengankuran tendon pasca tarik yang menahan gaya yang ditimbulkan gempa harus mampu untuk membolehkan tendon untuk menahan 50 siklus pembebanan, yang dibatasi oleh 40 dan 85 persen dari kekuatan tarik yang ditetapkan dari baja prategang.

Sedangkan pada EN 1998-1-1:2004 diatur pada pasal 5.3

3.10 Hasil Perbandingan dan Pembahasan

Hasil Analisis dan keypoint dengan Standar SNI 2647:2013 dan Eurocode EN 1992-1-1:2004 dan ditabelkan

3.11 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan berupa perbandingan hasil Analisis struktur dari standar SNI 2647:2013 dan Eurocode EN 1992-1-1:2004, serta saran untuk penelitian kedepannya.

BAB IV PRELIMINARY DESIGN

4.1 Permodelan Gedung

Variabel desain	= Prategang pascatarik
Fungsi bangunan	= Hotel dan perkantoran
Kategori Resiko	= II
Lokasi	= Aceh
Jenis tanah	= Tanah lunak
Zona gempa	= 3
Jumlah lantai	= 12.00 m
Tinggi tiap lantai	= 4.00 m
Tinggi Gedung	= 48.00 m
Jumlah baris	= 4.00
Lebar antar kolom	= 6.00 m
Mutu beton	= 40.00 MPa
Mutu baja	= 390.00 MPa

4.2 Pembebanan

Beban Gravitasi	
Beban Mati	
Berat beton	= 23.54 KN/m ³
Pelat 12cm	= 0.03 KN/m ²
Finishing	= 0.21 KN/m ²
Tegel	= 0.24 KN/m ²
Dinding	= 2.45 KN/m ²
Plafond dan penggantung	= 0.18 KN/m ²
Plumbing dan ducting	= 0.25 KN/m ²
Beban Hidup	
Lantai atap	= 0.98 KN/m ²
Hujan	= 0.20 KN/m ²
Lantai	= 2.45 KN/m ²
Pelat tangga	= 2.94 KN/m ²
Beban Angin	
Dekat Pantai	= 0.39 Kg/m ²

Beban Gempa

Perencanaan dan perhitungan dilakukan menurut SNI 03-1726-2012 dan Eurocode EN 1998

4.3 Dimensi Pelat

Pelat direncanakan memiliki ketebalan 12 cm.

4.4 Dimensi Balok

Tinggi minimum balok non prategang satu arah diatur dalam SNI 2847:2013 Pasal 9.5.2.1

$$h_{min} = \frac{L}{16}$$

Direncanakan:

$$b = \frac{1}{2}h$$

Panjang balok (L) = 6.00 m

Tinggi balok min (h) = 0.38 m

Lebar balok min (b) = 0.19 m

Direncanakan:

Tinggi balok (h) = 0.80 m

Lebar balok (b) = 0.40 m

Untuk balok prategang,

$$h_{min} = \frac{L}{20}$$

Panjang balok (L) = 24.00 m

Tinggi balok min (h) = 1.00 m

Lebar balok min (b) = 0.50 m

Direncanakan:

Tinggi balok (h) = 1.20 m

Lebar balok (b) = 0.60 m

4.5 Dimensi Kolom

Kolom harus direncanakan untuk mampu memikul beban aksial terfaktor yang bekerja pada semua lantai atap dan momen aksimum dari beban terfaktor pada satu bentang terdekat dari lantai atau atap yang ditinjau.

Beban-beban yang diterima 1 kolom berdasarkan PPIUG 1983 yang diberikan di tabel:

Tabel 4. 1 Beban yang diterima kolom

Beban Mati

Beban	Perhitungan									KN
Pelat	6.0	x	6.0	x	0.1	x	23.5	x	12.0	1220.1
Plafond dan penggantung	6.0	x	6.0	x	1.0	x	0.2	x	12.0	76.3
Balok induk	12.0	x	0.4	x	0.2	x	23.5	x	12.0	271.1
Dinding	12.0	x	4.0	x	1.0	x	2.5	x	12.0	1412.2
Kolom	0.9	x	0.9	x	4.0	x	23.5	x	12.0	915.1
Tegel 2 cm	6.0	x	6.0	x	0.0	x	23.5	x	12.0	203.4
Spesi 2 cm	6.0	x	6.0	x	0.0	x	23.5	x	12.0	203.4
Plumbing dan ducting	6.0	x	6.0	x	1.0	x	0.2	x	12.0	105.9
										4407.3

Beban Hidup

Beban	Perhitungan									KN
Atap	6.0	x	6.0	x	1.0	x	1.0	x	1.0	35.3
Lantai	6.0	x	6.0	x	1.0	x	2.5	x	11.0	970.9
										1006.2

Berat total yang diterima kolom

$$W = DL + LL$$

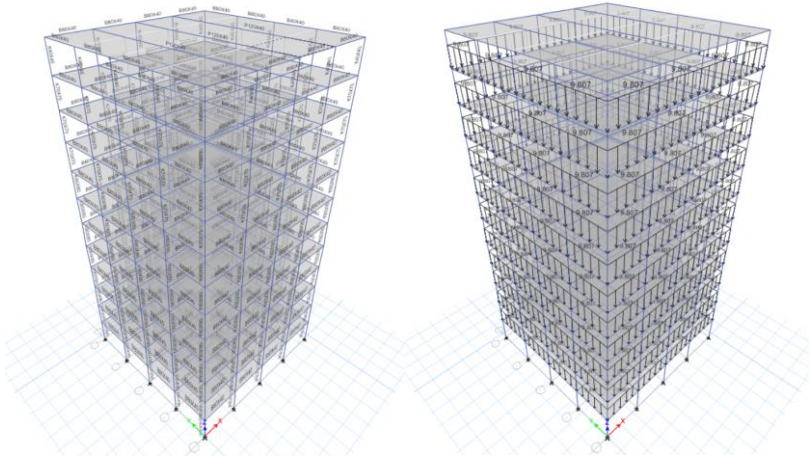
$$\text{Berat total (W)} = 4407.34 + 1006.15 = 5413.51 \text{ kN}$$

$$\text{Luas penampang kolom (A)} = W / ((1/3)fc) = 0.41 \text{ m}^2$$

$b = h$ $= 0.64 \text{ m}$

Direncanakan $= 0.9 \text{ m}$

Maka kolom dengan ukuran penampang 90x90 dapat digunakan sebagai desain preliminary kolom



Gambar 4. 1 Modelling bangunan pada ETABS v16.2.0

BAB V

PEMBEBANAN DAN ANALISIS STRUKTUR MENURUT SNI 2847:2013

5.1 Umum

Pembebanan yang terjadi terdiri atas pembebanan gravitasi dari SNI 2857:2013 dan beban gempa dari SNI 1726:2012. Struktur kemudian dimodelkan dengan bantuan program ETABS v16, kemudian dikontrol terhadap beberapa faktor sehingga permodelan bisa mendekati kondisi asli dari bangunan.

5.2 Permodelan Struktur

e. Variabel gedung yang diinput pada program ETABS v16:

Mutu beton f_c'	= 40.00 MPa
Jumlah lantai	= 12.00
Tinggi tiap lantai	= 4.00 m
Tinggi gedung	= 48.00 m
Lebar antar kolom	= 6.00 m
Jumlah baris	= 4.00
Tinggi balok induk (h)	= 0.80 m
Lebar balok induk (b)	= 0.40 m
Panjang dan lebar kolom	= 0.90 m

Pembebanan Gravitasi

Beban Mati	
Berat beton	= 23.54 KN/m ³
Finishing	= 0.21 KN/m ²
Tegel	= 0.24 KN/m ²
Dinding	= 2.45 KN/m ²
Plafond dan penggantung	= 0.18 KN/m ²
Plumbing dan ducting	= 0.25 KN/m ²
Beban Hidup	
Lantai atap	= 0.98 KN/m ²
Lantai	= 2.45 KN/m ²

5.3 Pembebanan Gempa

SNI 1726:2012 Bab 6.4

Lokasi = Aceh

Kelas situs tanah lunak = SE

Parameter:

PGA = 0.62 g

S_s = 1.35 g

S₁ = 0.64 g

S_{MS} = 1.21 g

S_{M1} = 1.54 g

S_{DS} = 0.81 g

S_{D1} = 1.03 g

5.3.1 Kategori Desain Seismik

Kategori desain seismic dibagi berdasarkan tabel pada SNI 1726:2012 Tabel 6. Untuk S_{DS} sebesar 0.81 dan S_{D1} sebesar 1.03 dan kategori resiko IV kategori desain seismic tergolong kategori D. Untuk kategori D tipe struktur menggunakan Sistem Ganda yaitu Dinding Geser Beton Bertulang Khusus dan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SPRMK).

5.3.2 Respon Spektrum Desain

Untuk perioda yang lebih kecil dari T₀, respons percepatan desain, S_a, harus diambil dari persamaan:

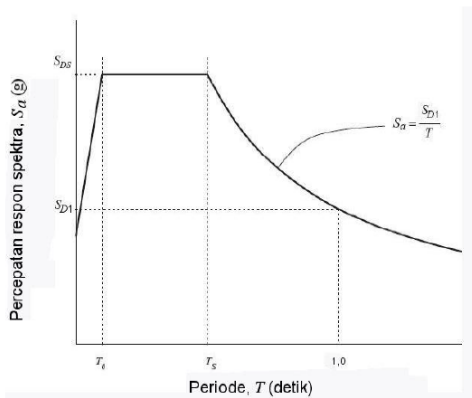
$$S_a = S_{DS} \cdot \left(0,4 + 0,6 \cdot \frac{T}{T_0} \right)$$

Untuk perioda lebih besar dari atau sama dengan T₀ dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s, spectrum respons percepatan desain

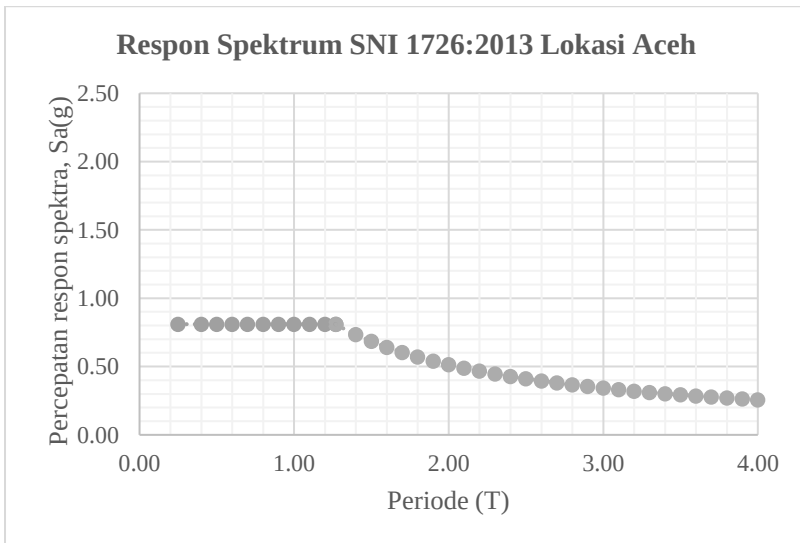
$$S_a = S_{DS}$$

Untuk perioda lebih besar dari T_s, respons percepatan desain, S_a, harus diambil dari persamaan :

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T}$$



Gambar 5. 1 Penentuan grafik respon spektrum (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2012)



Gambar 5. 2 Grafik respon spektrum dari lokasi bangunan

5.4 Kontrol Model

Agar mendekati kondisi real, model struktur utama yang sudah di input pada program ETABS v16 dikontrol terhadap:

1. Base Reaction
2. Partisipasi Massa
3. Base Shear
4. Waktu Getar Alami Fundamental
5. Drift

5.4.1 Kontrol Base Reaction

Tabel 5. 1 Total beban yang dihitung

Beban Mati	Jumlah	Panjang	Lebar	Tinggi	q m3	Berat	
Balok Induk	456	0.80	0.40	6.00	23.54	20606.20	KN
Balok Anak	11	0.20	0.40	36.00	23.54	745.62	KN
Balok Pratekan	3	24.00	0.40	1.06	23.54	718.51	KN
Kolom 90X90	100	0.90	0.90	4.00	23.54	7625.65	KN
Kolom 80X80	100	0.80	0.80	4.00	23.54	6025.21	KN
Kolom 70X70	75	0.70	0.70	4.00	23.54	3459.79	KN
Kolom 40X40	16	0.40	0.40	4.00	23.54	241.01	KN
Pelat Atap	1	24.00	24.00	0.14	23.54	1897.94	KN
Pelat Lantai	11	24.00	21.58	0.14	23.54	18767.86	KN

Dinding	4	1.00	24.00	44.00	2.45	10355.82	KN
Tegel dan finishing	11	24.00	24.00	1.00	0.44	2796.07	KN
Beban Hidup							
Lantai	11.00	24.00	24.00	1.00	2.45	15533.73	KN
Atap	1.00	24.00	24.00	1.00	0.98	564.86	KN

Total DL+LL menurut perhitungan manual:

DL = 73239.67 kN

LL = 14529.04 kN

Total 1DL+1LL = 87768.71 kN

Hasil ETABS 1DL+1LL = 85333.34 kN

Selisih = 2435.37 kN

Persentase selisih = 2.77%

Syarat selisih maksimal = 5.00% OK

dari hasil perhitungan di atas diperoleh kesimpulan bahwa permodelan telah mendekati keadaan sesungguhnya.

5.4.2 Kontrol Partisipasi Massa

Tabel 5. 2 Partisipasi massa pada modelling

Mode	Period	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ
1	1.15	0.85	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00
2	1.15	0.00	0.85	0.00	0.85	0.85	0.00
3	1.03	0.00	0.00	0.00	0.85	0.85	0.00
4	0.42	0.08	0.00	0.00	0.94	0.85	0.00
5	0.41	0.00	0.09	0.00	0.94	0.94	0.00
6	0.36	0.00	0.00	0.00	0.94	0.94	0.00
7	0.28	0.03	0.00	0.00	0.96	0.94	0.00
8	0.27	0.00	0.02	0.00	0.96	0.96	0.00

9	0.23	0.00	0.00	0.00	0.96	0.96	0.00
10	0.19	0.02	0.00	0.00	0.98	0.96	0.00
11	0.19	0.00	0.02	0.00	0.98	0.98	0.00
12	0.17	0.00	0.00	0.00	0.98	0.98	0.00

Syarat minimum partisipasi massa adalah 90%

UX 94% OK

UY 94% OK

5.4.3 Kontrol Base Shear

Jika kombinasi respons untuk gaya geser dasar ragam dinamik (V_t) lebih kecil 85% dari gaya geser dasar statik (V) menggunakan prosedur gaya lateral ekuivalen, maka gaya gempa harus dikalikan dengan $0,85V/V_t$ (SNI 1726:2012 Ps. 7.9.4.1)

SDS = 0.81 g

R = 8.00

Faktor kepentingan (I) = 1.00

Cs = 0.10

Nilai tidak boleh lebih dari:

SD1 = 1.03 g

T = 2.13 s

R = 8.00

Faktor kepentingan (I) = 1.00

Csmax = 0.06

Cs terkecil = 0.06

Berat struktur (w) = 84789.53 KN

$V = C_s \cdot W$

Vstatik = 5309.88 KN

Tabel 5. 3 Gempa dinamik pada modelling

Load Case/Combo	FX KN	FY KN
QuakeX Max	5019.71	1507.95
QuakeY Max	1505.91	5026.50

Gempa Arah X

Vdinamik ≥ 0.85 Vstatik

Vdinamik = 5019.71

Vstatik = 4513.39 **OK**

Gempa Arah Y

Vdinamik ≥ 0.85 Vstatik

Vdinamik = 5026.50

Vstatik = 4513.39 **OK**

5.4.4 Kontrol Waktu Getar Alami Fundamental (T)

Untuk rangka beton pemikul momen:

Tabel 5. 4 Nilai C_t dan x pada struktur (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2012)

Tipe struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100 persen gaya gempa yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya gempa:		
Rangka baja pemikul momen	0,0724 ^a	0,8
Rangka beton pemikul momen	0,0466 ^a	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731 ^a	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731 ^a	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488 ^a	0,75

Tabel 5. 5 Nilai C_u pada lokasi bangunan (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2012)

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

$$\begin{aligned}
 C_t &= 0.05 \\
 x &= 0.90 \\
 H_n &= 48.00 \text{ m} \\
 T_a &= 1.52 \text{ s} \\
 S_{D1} &= 1.03 \\
 C_u &= 1.40 \\
 T = T_a \times C_u &= 2.13 \text{ s} \\
 \text{Syarat } T_{ETABS} < T_{\text{manual}} &= 1.18 \text{ OK}
 \end{aligned}$$

5.4.5 Kontrol Drift

Batas layan struktur gedung ditentukan oleh simpangan antar tingkat akibat pengaruh gempa. Nilai dari simpangan antar lantai ini diatur pada SNI 1726:2013 Ps. 7.8.6

C.Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10 ^{a,1}	TI ^b	TI ^c
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI ^b	TI ^b	TI ^c
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	TI	TI
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
12. Rangka baja canal dingin pemikul momen khusus dengan pembautan	3½	3°	3½	10	10	10	10	10

Gambar 5. 3 Faktor reduksi (R) dan Cd pada struktur pemikul momen (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2012)

$$\delta x = \frac{C_d \cdot \delta x_e}{I_e}$$

Dimana:

Cd = faktor amplifikasi defleksi dalam Tabel 9 SNI 1726:2013

δxe = Defleksi pada lokasi yang disyaratkan

Ie = Faktor keutamaan gempa

Struktur	Kategori risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar lantai tingkat.	$0,025 h_{sx}^c$	$0,020 h_{sx}$	$0,015 h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata ^a	$0,010 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0,007 h_{sx}$	$0,007 h_{sx}$	$0,007 h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0,020 h_{sx}$	$0,015 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$

^a h_{sx} adalah tinggi tingkat di bawah tingkat x .

Gambar 5. 4 Simpangan antar lantai izin (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2012)

Simpangan antar lantai izin (Δa) = $0.02 \times h_{sx}$

$h_{sx} = 4.00 \text{ m}$

= 80.00 mm (untuk semua lantai)

Tabel 5. 6 Hasil simpangan antar lantai dari ETABS v16.2.0

Story	Elevation	X-Dir	Y-Dir	X-Dir Min	Y-Dir Min
Story12	48	0.05	0.05	-0.05	-0.05
Story11	44	0.04	0.04	-0.04	-0.04
Story10	40	0.04	0.04	-0.04	-0.04
Story9	36	0.04	0.04	-0.04	-0.04
Story8	32	0.04	0.04	-0.04	-0.04
Story7	28	0.03	0.03	-0.03	-0.03
Story6	24	0.03	0.03	-0.03	-0.03
Story5	20	0.03	0.03	-0.03	-0.03
Story4	16	0.02	0.02	-0.02	-0.02
Story3	12	0.02	0.02	-0.02	-0.02

Story2	8	0.01	0.01	-0.01	-0.01
Story1	4	0.01	0.01	-0.01	-0.01
Base	0	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabel 5. 7 Hasil drift dari ETABS v.16.2.0

Story	DRIFT					
	X-Dir	Y-Dir	X-Dir Min	Y-Dir Min	XY-dir	XY-dir min
Story12	24.34	20.49	-24.10	-20.65	31.82	31.74
Story11	9.24	9.53	-9.09	-8.80	13.27	12.65
Story10	12.51	12.58	-12.49	-12.46	17.74	17.64
Story9	16.05	16.04	-16.06	-16.05	22.69	22.71
Story8	17.04	17.04	-17.02	-17.02	24.10	24.07
Story7	19.57	19.57	-19.56	-19.56	27.68	27.66
Story6	21.96	21.97	-21.97	-21.97	31.06	31.07
Story5	24.11	24.12	-24.12	-24.13	34.10	34.12
Story4	24.07	24.10	-24.05	-24.07	34.06	34.03
Story3	26.19	26.21	-26.22	-26.25	37.06	37.10
Story2	30.77	30.81	-30.92	-30.95	43.55	43.75
Story1	45.09	45.14	-44.88	-44.94	63.80	63.51
Base	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

BAB VI

DESAIN BETON PRATEKAN MENGGUNAKAN SNI 2847:2013

6.1 Umum

Menurut SNI 2847:2013 Ps.21.5.2.5, tendon pratekan diperbolehkan menerima 25% momen positif atau negatif pada daerah sendi plastis. Perencanaan beton pratekan direncanakan dengan metode pasca tarik (*post tension*) dan penulangan sendi pada kepala kolom. Beton akan direncanakan menjadi 3 kelas, yaitu kelas U (*Uncracked*), kelas T (*Transition*), dan kelas C (*Cracked*) sesuai pada Ps.18.3.3.

Perencanaan beton pratekan pada lantai 10 pada balok atas, karena ruangan akan dijadikan ruang pertemuan, sehingga dibutuhkan ruangan yang bebas hambatan kolom di tengahnya. Jumlah balok pratekan yang didesain adalah 1 buah, dengan panjang bentang bersihnya adalah 24 meter.

Sebelum dilakukan perhitungan perencanaan balok pratekan, maka akan ditentukan terlebih dahulu spesifikasi mutu bahan, tahap pembebanan, jenis tendon yang digunakan, tegangan izin komponen struktur, kehilangan prategang, serta kontrol struktur yang meliputi kontrol batas layan (*serviceability*), dan penggambaran output.

6.2 Kelas U

6.2.1 Data Perancangan

Panjang bentang (L)	= 24.00 m
Tinggi balok pratekan (H)	= 1.06 m
Lebar balok pratekan (B)	= 0.40 m
Dimensi balok pratekan	= 40/100 cm
f_c' balok pratekan	= 40.00 MPa
f_c' pelat atap	= 40.00 MPa
f_{yu} tulangan pratekan	= 1770.00 MPa

f_y tulangan lunak	= 390.00 MPa
Jarak antar balok pratekan	= 6.00 m
Cover	= 40.00 mm
Tebal pelat (t_f)	= 14.00 cm

Untuk tebal pelat yang digunakan, perencanaan pada tiap lantai atap dengan balok pratekan ketebalan yang digunakan yaitu 14 cm.

D duct	= 77.00 mm
--------	------------

6.2.2 Kuat Tekan Beton saat *jacking*

Tabel 6. 1 Perbandingan kuat tekan beton pada berbagai umur
(Departemen Pekerjaan Umum, 1971)

Umur beton (hari)	3	7	14	21	28	90	365
Semen portland biasa	0.40	0.65	0.88	0.95	1.00	1.20	1.35
Semen portland dengan kekuatan awal yang tinggi	0.55	0.75	0.90	0.95	1.00	1.15	1.20

Semen yang digunakan adalah semen Portland biasa tipe I, dan direncanakan di-*jacking* pada umur 14 hari, Faktor koreksi untuk suhu, U dihitung dengan persamaan dari PBI 1971 Ps. 10.9.3. Direncanakan suhu = 30°C

$$U = \frac{\sum \Delta h (S + 10^\circ\text{C})}{30^\circ\text{C}}$$

Dimana

S = Suhu dalam °C

h = hari.

U = waktu jacking setelah koreksi (hari)

$$U = \frac{14(30 + 10)}{30} = 18.67 \text{ hari}$$

Umur jacking akibat koreksi suhu adalah 18.67 hari sehingga interpolasi hasil dari tabel 6.1, koefisien adalah = 0.93.

$$f_{ci} = 0.93 \times f_c'$$

$$f_{ci} = 0.93 \times 40 = 37.07$$

Sehingga akibat koreksi U, maka kuat tekan inisial beton pada umur 14 hari, $f_{ci}' = 37.07$ MPa.

6.2.3 Penentuan Tegangan Izin Tendon dan Beton

SNI 2847:2013 Ps. 18.4.1 dan Ps. 18.5.1

Tegangan baja tidak boleh melampaui nilai-nilai berikut:

1. Tegangan izin akibat gaya pengangkuran tendon $0.94 f_{py}$, tetapi tidak lebih besar dari nilai terkecil dari $0.8 f_{pu}$ dan nilai maksimum yang direkomendasikan oleh pabrik pembuat tendon pratekan atau perangkat angkur.
2. Tendon pasca tarik pada daerah angkur dan sambungan sesaat setelah penyaluran gaya pratekan $0.70 f_{pu}$

Namun berdasarkan T.Y Lin dan Burns perumusan diatas juga berlaku untuk tendon pratarik segera setelah peralihan gaya pratekan.

Tegangan izin pada beton tidak boleh melebihi nilai-nilai berikut:

a. Segera setelah peralihan gaya pratekan(sebelum kehilangan), tegangan serat-serat terluar memiliki nilai sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Tegangan tekan pada tumpuan} &= \sigma_{tk} = 0.70 f_{ci}' \\ &= -25.95 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\text{Tegangan tarik pada tumpuan} = \sigma_{tr} = 0.50 \sqrt{f_{ci}'}$$

$$\begin{aligned}
 &= 3.04 \text{ MPa} \\
 \text{Tegangan tekan pada lapangan} &= \sigma_{tk} = 0.60f_{ci}' \\
 &= -22.24 \text{ MPa} \\
 \text{Tegangan tarik pada lapangan} &= \sigma_{tr} = 0.62\sqrt{f_{ci}'} \\
 &= 3.77 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

b. Pada beban kerja setelah terjadi kehilangan gaya pratekan.

$$\begin{aligned}
 \text{Tegangan tekan pada tumpuan} &= \sigma_{tk} = 0.45f_{c'} \\
 &= 18.00 \text{ MPa} \\
 \text{Tegangan tarik pada tumpuan} &= \sigma_{tr} = 0.62\sqrt{f_{c'}} \\
 &= 3.92 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Tegangan tekan pada lapangan} &= \sigma_{tk} = 0.45f_{c'} \\
 &= -18.00 \text{ MPa} \\
 \text{Tegangan tarik pada lapangan} &= \sigma_{tr} = 0.62\sqrt{f_{c'}} \\
 &= 3.92 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned}
 f_{pu} &= \text{kuat tarik tendon pratekan yang diisyaratkan, MPa} \\
 f_{py} &= \text{kuat leleh tendon pratekan yang diisyaratkan, MPa} \\
 f_c' &= \text{kuat tekan beton saat pemberian pratekan awal, MPa} \\
 f_{ci}' &= \text{kuat tekan beton yang diisyaratkan, MPa}
 \end{aligned}$$

Besar gaya prategang yang dibutuhkan diambil berdasarkan beberapa persamaan, yaitu persamaan pada serat atas dan bawah tengah bentang saat transfer dan saat beban layan.

Pada perencanaan ini beton pratekan diizinkan tarik berdasarkan kelas U dengan tegangan izin tarik sebesar $0.62\sqrt{f_{c'}} = 3.92 \text{ MPa}$.

6.2.4 Rekapitulasi Pembebanan yang Terjadi

Tabel 6. 2 Rekapitulasi kombinasi pembebanan hasil ETABS

Kombinasi Pembebanan Ultimate		
1.4D		
Momen tumpuan kiri	-644.43	kNm
Momen lapangan	1991.37	kNm
Momen tumpuan kanan	-644.43	kNm
1.2D+1.6L		
Momen tumpuan kiri	-697.44	kNm
Momen lapangan	2156.78	kNm
Momen tumpuan kanan	-697.44	kNm
1.2D+1L+1EX Max		
Momen tumpuan kiri	-705.41	kNm
Momen lapangan	1988.08	kNm
Momen tumpuan kanan	-705.41	kNm
1.2D+1L+1EX Min		
Momen tumpuan kiri	-580.07	kNm
Momen lapangan	1988.08	kNm
Momen tumpuan kanan	-580.07	kNm
Vu	433.58	kN
Tu	158.95	kNm
Kombinasi Pembebanan Layan		
1D saat jacking		
Momen tumpuan kiri	-478.31	kNm
Momen lapangan	1359.49	kNm
Momen tumpuan kanan	-478.31	kNm
1D+1L		
Momen tumpuan kiri	-550.98	kNm
Momen lapangan	1703.59	kNm

Momen tumpuan kanan	-550.98	kNm
1D+1L+1EX Max		
Momen tumpuan kiri	-469.9	kNm
Momen lapangan	1703.63	kNm
Momen tumpuan kanan	-469.9	kNm
1D+1L+1EX Min		
Momen tumpuan kiri	-632.06	kNm
Momen lapangan	1703.63	kNm
Momen tumpuan kanan	-632.06	kNm

Untuk perhitungan struktur pratekan, SNI 2847:2013 Ps. 18.10 3 memberikan standar momen-momen yang digunakan untuk menghitung kekuatan perlu harus merupakan jumlah momen akibat reaksi yang ditimbulkan oleh prategang (dengan suatu faktor beban sebesar 1.00) dan momen akibat beban terfaktor.

Sehingga, untuk perhitungan kekuatan layan (*serviceability*) dan perhitungan gaya prategang, pembebanan yang dipakai adalah beban dengan faktor 1.00 sedangkan untuk menghitung kuat struktur tetap menggunakan kombinasi beban *ultimate*.

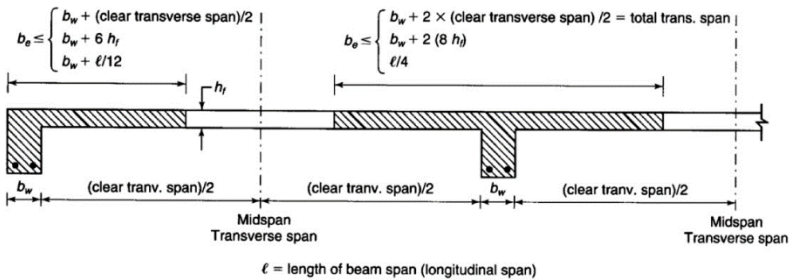
6.2.5 Analisis Penampang

6.2.5.1 Mencari lebar efektif:

SNI 2847:2013 Ps. 8.12.2

Dalam mencari lebar efektif (b_e), maka didasarkan pada perumusan yang terdapat pada SNI, dimana lebar efektif sayap balok T tidak boleh melebihi seperempat bentang balok, dan lebar efektif sayap dari masing-masing sisi badan balok tidak boleh melebihi:

- delapan kali tebal pelat
- setengah jarak bersih antara balok-balok yang bersebelahan



Gambar 6. 1 Parameter penentuan lebar efektif

$$B_e = \frac{L}{4} = \frac{24}{4} = 6.00 \text{ m}$$

$$B_e = bw + 2(8tf) = 0.40 + 2(8 \times 0.14) = 2.64 \text{ m}$$

$$B_e = bw + 2(\text{clear span}/2) = 0.4 + 2\left(\frac{6.00 - 0.40}{2}\right) = 6.00 \text{ m}$$

Sehingga nilai b_{eff} yang terkecil adalah 2.64 m. Sesuai dengan persyaratan pertama dimana lebar efektif sayap balok T tidak boleh melebihi seperempat bentang balok atau 6.00 m. Penggunaan lebar efektif di dalam perhitungan beton pratekan hanya digunakan pada saat analisis tegangan yang terjadi pada beton pratekan sendiri, sementara untuk perhitungan beban yang ada lebar yang digunakan ialah sebesar 6.00 m, sesuai dengan jarak antar balok pratekan yang sesungguhnya.

Luas penampang balok pratekan didapat sebagai berikut:

$$A_{pelat} = \frac{b_e \times t_f}{n} = \frac{2.64 \times 0.14}{1} = 0.37 \text{ m}^2$$

$$A_{balok} = b \times (h - t_f) = 0.40 \times (1.20 - 0.14) = 0.42 \text{ m}^2$$

Nilai statis momen garis netral penampang balok sebagai berikut:

$$c = \frac{h}{2} + tf = \frac{1.06}{2} + 0.14 = 0.67 \text{ m}$$

$$y_t = \frac{\left(A_{pelat} \times \frac{tf}{2}\right) + (A_{balok} \times c)}{A_{total}} \text{ mm}^3$$

$$y_t = \frac{(0.37 \times \frac{0.14}{2}) + (0.42 \times 0.67)}{0.79} = 0.39 \text{ m}$$

$$y_b = c_{gc} = 1.2 - 0.39 = 0.81 \text{ m}$$

$$d_t = y_t - \frac{t_f}{2} = 0.39 - \frac{0.14}{2} = 0.32 \text{ m}$$

$$d_b = y_b - \frac{h - t_f}{2} = 0.81 - \frac{1.20 - 0.14}{2} = 0.28 \text{ m}$$

Setelah didapat data-data diatas diperlukan nilai batasan letak kabel tendon hendak dipasang yang disebut daerah limit kabel. Tendon dipasang pada daerah yang menyebabkan beton menjadi tertekan dimana daerah tersebut dibatasi oleh nilai dan wilayah kern pada penampang balok.

Dimana:

$$K_t = \frac{W_b}{A_{total}} \text{ dan } K_b = \frac{W_t}{A_{total}}$$

$$W_t = \frac{I_{komposit}}{y_t} \text{ dan } W_b = \frac{I_{komposit}}{y_t}$$

Keterangan:

K_t = kern atas (m)

K_b = kern bawah (m)

I = momen inersia (m⁴)

Nilai $I_{komposit}$ didapat sebagai berikut:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 + (A_{\text{balok}} \times db^2) + \frac{1}{12} \frac{be}{n} tf^3 + (A_{\text{pelat}} \times dt^2)$$

$$I = \frac{1}{12} \times 0.4 \times 1.06^3 + (0.42 \times 0.28^2) + \frac{1}{12} \frac{2.64}{1} 0.14^3$$

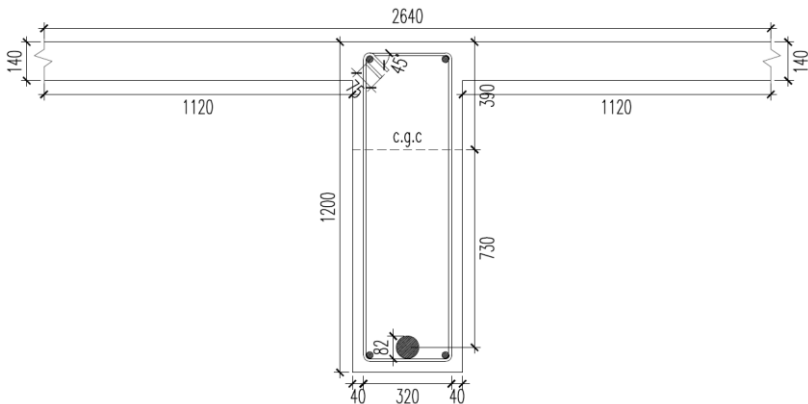
$$+ (0.37 \times 0.32^2) = 0.11 \text{ m}^4$$

$$W_t = \frac{I_{\text{komposit}}}{y_t} = \frac{0.11 \text{ m}^4}{0.39 \text{ m}} = 0.29 \text{ m}^3$$

$$W_b = \frac{I_{\text{komposit}}}{y_b} = \frac{0.11 \text{ m}^4}{0.81 \text{ m}} = 0.14 \text{ m}^3$$

$$K_t = \frac{W_b}{A_{\text{total}}} = \frac{0.14 \text{ m}^3}{0.79 \text{ m}^2} = 0.17 \text{ m}$$

$$K_b = \frac{W_t}{A_{\text{total}}} = \frac{0.29 \text{ m}^3}{0.79 \text{ m}^2} = 0.36 \text{ m}$$



Gambar 6. 2 Penampang balok tengah bentang

6.2.6 Penentuan Gaya Prategang Awal (Fo)

Digunakan decking (selimut beton) = 40 mm

Digunakan diameter tulangan lentur = 25 mm = D25

- Eksentrisitas pada tumpuan (e) = -200 = 200 mm (di atas cgc)
- Eksentrisitas tengah bentang (e) = $y_b - d' - 0.5 D_{tul} = 0.81 - 0.04 - 0.5 (0.025) = 0.73 \text{ m} = 730 \text{ mm}$

Besar gaya prategang yang dibutuhkan diambil berdasarkan beberapa persamaan, yaitu persamaan pada serat atas dan bawah tengah bentang saat transfer dan beban layan.

Kondisi saat *jacking* di lapangan:

Output dari ETABS dengan kombinasi 1D

Momen tumpuan kiri = -478.31 kNm

Momen lapangan = 1359.49 kNm

Momen tumpuan kanan = -478.31 kNm

Serat atas:

$$\sigma_t \geq -\frac{F_o}{A} + \frac{F_o \times e}{I} - \frac{M_{lapangan}}{I}$$

$$3774.71 \geq -\frac{F_o}{0.79} + \frac{F_o \times 0.73}{0.29} - \frac{1359.49}{0.29}$$

$$F_o = 6556.53 \text{ kN}$$

Serat bawah:

$$\sigma_b \leq -\frac{F_o}{A} - \frac{F_o \times e}{I} + \frac{M_{lapangan}}{I}$$

$$-22240 \leq -\frac{F_o}{0.79} - \frac{F_o \times 0.73}{0.14} + \frac{1359.49}{0.14}$$

$$F_o = 4887.63 \text{ kN}$$

Kondisi saat *jacking* di tumpuan:

Serat atas:

$$\sigma_t \leq -\frac{F_o}{A} + \frac{F_o \times e}{I} - \frac{M_{tumpuan}}{I}$$

$$-25946 \leq -\frac{F_o}{0.79} + \frac{F_o \times (-0.20)}{0.29} - \frac{(-478.31)}{0.29}$$

$$F_o = 14084.25 \text{ kN}$$

Serat bawah:

$$\sigma_b \geq -\frac{F_o}{A} - \frac{F_o \times e}{Wb} + \frac{M_{lapangan}}{Wb}$$

$$3044.12 \geq -\frac{F_o}{0.79} - \frac{F_o \times (-0.20)}{0.14} + \frac{(-478.31)}{0.14}$$

$$F_o = 33742.45 \text{ kN}$$

Kondisi saat beban layan di lapangan:

Output dari ETABS dengan kombinasi 1D+1L

Momen tumpuan kiri = -550.98 kNm

Momen lapangan = 1703.59 kNm

Momen tumpuan kanan = -550.98 kNm

Serat atas:

$$\sigma_t \leq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{M_{lapangan}}{Wt}$$

$$-18000 \leq -\frac{Fe}{0.79} + \frac{Fe \times 0.73}{0.29} - \frac{1703.59}{0.29}$$

$$Fe = -9232.10 \text{ kN (asumsi kehilangan prategang 20%)}$$

$$F_o = -11540.12 \text{ kN}$$

Serat bawah:

$$\sigma_b \geq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{M_{lapangan}}{Wb}$$

$$3921.22 \geq -\frac{Fe}{0.79} - \frac{Fe \times 0.73}{0.14} + \frac{1703.59}{0.14}$$

$$Fe = 1287.08 \text{ kN (asumsi kehilangan prategang 20%)}$$

$$F_o = 1608.84 \text{ kN}$$

Kondisi saat beban layan di tumpuan

Serat atas:

$$\sigma_t \geq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{M_{lapangan}}{Wt}$$

$$-18000 \geq -\frac{Fe}{0.79} + \frac{Fe \times (-0.2)}{0.29} - \frac{(-550.98)}{0.29}$$

$$Fe = 10162.46 \text{ kN (asumsi kehilangan prategang 20%)}$$

$$F_o = 12703.08 \text{ kN}$$

Serat bawah:

$$\sigma_b \leq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{Mlapangan}{Wb}$$

$$3921.22 \leq -\frac{Fe}{0.79} - \frac{Fe \times (-0.2)}{0.14} + \frac{(-550.98)}{0.14}$$

Fe = 41014.74 kN (asumsi kehilangan prategang 20%)

Fo = 51268.42 kN

Sehingga untuk tegangan awal, diberi:

Fo = 1642.53 kN

Asumsi kehilangan gaya prategang sebesar 20% maka,

Fe = 1314.02 kN

Kontrol tegangan sebelum kehilangan:

Output dari ETABS dengan kombinasi 1D

Momen tumpuan kiri = -367.69 kNm

Momen lapangan = 1525.43 kNm

Momen tumpuan kanan = -367.69 kNm

Serat atas:

$$\sigma_t \geq -\frac{Fo}{A} + \frac{Fo \times e}{Wt} - \frac{Mlapangan}{Wt}$$

$$3774.71 \geq -\frac{1642.53}{0.79} + \frac{1642.53 \times 0.73}{0.29} - \frac{1525.43}{0.29}$$

$$3774.71 \geq -2626.88 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}$$

Serat bawah:

$$\sigma_b \leq -\frac{Fo}{A} - \frac{Fo \times e}{Wb} + \frac{Mlapangan}{Wb}$$

$$-22240.00 \leq -\frac{1642.53}{0.79} - \frac{1642.53 \times 0.73}{0.14} + \frac{1525.43}{0.14}$$

$$-22240.00 \leq -915.02 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}$$

Kondisi saat *jacking* di tumpuan:

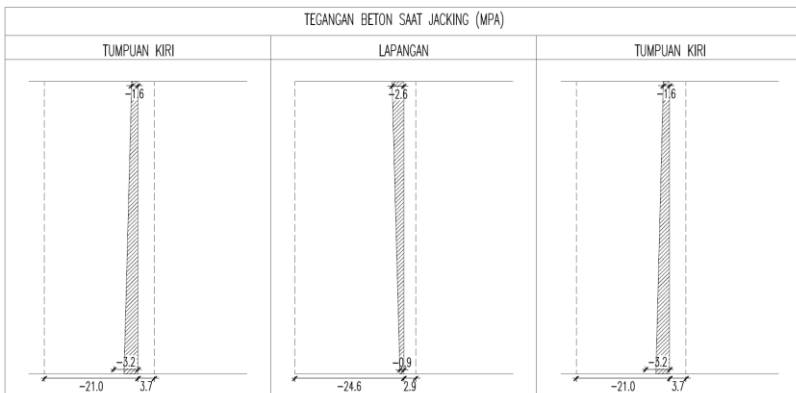
Serat atas:

$$\sigma_t \leq -\frac{Fo}{A} + \frac{Fo \times e}{Wt} - \frac{Mtumpuan}{Wt}$$

$$\begin{aligned}
 -1544.48 &\leq -\frac{1642.53}{0.79} + \frac{1642.53 \times (-0.20)}{0.29} - \frac{(-367.69)}{0.29} \\
 -1544.48 &\leq 3044.12 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &\geq -\frac{Fo}{A} - \frac{Fo \times e}{Wb} + \frac{Mtumpuan}{Wb} \\
 -3158.27 &\geq -\frac{1642.53}{0.79} - \frac{1642.53 \times (-0.20)}{0.14} + \frac{(-367.69)}{0.14} \\
 -3158.27 &\geq -25946.67 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$



Gambar 6. 3 Diagram tegangan saat jacking

6.2.7 Penentuan Tendon

Tendon baja yang akan dipakai dengan spek dari *multistrand post-tensioning* sebagai berikut :

$$f_{pu} = 1770.00 \text{ MPa (strand-stress-relieved)}$$

$$f_{pizin} 70\% = 1239.00 \text{ MPa (strand-stress-relieved)}$$

$$\text{Luas tendon} = F_o / f_{pizin} = 1325.69 \text{ mm}^2$$

$$f_{py} = 1526.00 \text{ MPa (strand-stress-relieved)}$$

Tendon baja yang akan dipakai dengan spek dari *multistrand post-tensioning* sebagai berikut :

$$\text{Tendon unit} = 6-12$$

jumlah strand	= 9.00
Min breaking load	= 2390.00 kN
D strand	= 15.70 mm
jumlah tendon	= 1.00
D duct	= 77.00 mm

Luas tendon yang digunakan

A pakai = 1743.04 mm²

A pakai > A perlu OK

Nilai tegangan pakai

f pakai = F_o/A pakai = 942.34 Mpa

6.2.8 Kehilangan Gaya Prategang

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1

Kehilangan pratekan adalah berkurangnya gaya pratekan dalam tendon saat tertentu disbanding pada saat stressing. Kehilangan pratekan dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori, yaitu:

6.2.8.1 Kehilangan Segera (kehilangan langsung)

Kehilangan langsung adalah kehilangan gaya awal pratekan sesaat setelah pemberian gaya pratekan pada pada komponen balok pratekan. Kehilangan secara langsung terdiri dari :

a. Kehilangan akibat slip angker

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1a

Kehilangan akibat pengangkuran/slip angkur terjadi saat tendon baja dilepas setelah mengalami penarikan dan gaya pratekan dialihkan ke angkur. Rumus perhitungan kehilangan pratekan akibat pengangkuran.

Cek apakah kehilangan pratekan akibat pengangkuran berpengaruh sampai ke tengah bentang :

$$x = \sqrt{\frac{Es \ x \ g}{f_{pakai} \ x \ (\mu \frac{\alpha}{L} + K)}}$$

Dimana:

- x = Panjang pengaruh slip angker (mm)
- Es = Modulus elastisitas baja prategang(MPa)
- f_{pakai} = Tegangan yang terjadi pada baja prategang(Mpa)
- μ = Koefisien friksi dari kurvatur baja prategang
- K = Koefisien *wobble effect*
- G = Besar selip dari angker, ambil nilai 2.5 (mm)
- f = fokus dari baja prategang, e_{lap}+e_{tumpuan} (mm)
- α = sudut kelengkungan tendon (8f/L)
- L = bentang struktur beton (m)

Direncanakan tendon prategang berjenis multri (7-wires *strand*) dengan duct metal, sehingga sesuai dari Tabel 6.3, diambil nilai

- K = 0.0016 /meter
- μ = 0.19 /radial

$$x = \sqrt{\frac{200000 \times 2.5}{942.34 \times (0.19 \frac{0.31}{24} + 0.0016)}} = 575.042 \text{ mm}$$

Sehingga diperoleh nilai dari x = 575.42 mm = 0.58 m. Dengan hasil perhitungan pengaruh pengangkuran sampai ke tumpuan kantilever x < 12 m, maka kehilangan akibat pengangkuran tidak mempengaruhi.

Tabel 6. 3 Koefisien *Wobble effect* dan Koefisien Kurvatur
(Sumber: T. Y. & Burns, n.d.)

Type Tendon	Wobble effect Coefficient		Curvature Coefficient
	K/foot	K/meter	μ/radial
Tendon in flexible metal sheating: - Wire tendon - 7-wires strand - Hight-strength bars	0.0010-0.0015 0.0005-0.0020 0.0001-0.0006	0.0033-0.0049 0.0016-0.0066 0.0003-0.0020	0.15-0.25 0.15-0.25 0.08-0.30
Tendon in Rigid Metal Duct 7-wires strand	0.0002	0.00066	0.15-0.25
Pregreased tendons Wire tendons and 7-wire strand	0.0003-0.0020	0.0010-0.0066	0.05-0.15
Mastic-Coated Tendons Wire tendons and 7-wire strand	0.0010-0.0020	0.0033-0.0066	0.05-0.15

b. Kehilangan akibat perpendekan elastis

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1b

Dikarenakan jumlah tendon yang digunakan hanya berjumlah 1 buah, maka kehilangan gaya pratekan akibat perpendekan elastis tidak mempengaruhi.

c. Kehilangan akibat gesekan (Wobble Effect)

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.2

Perhitungan kehilangan pratekan diakibatkan oleh gesekan antara material beton dan baja pratekan saat proses pemberian gaya pratekan. Kehilangan pratekan akibat gesekan (*wobble effect*) dihitung dengan perumusan sebagai berikut :

$$F_{pf} = F_o \times e^{-(\mu\alpha + KL)}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} F_{pf} &= \text{Kehilangan akibat gesekan (MPa)} \\ e &= \text{bilangan natural } 2.73 \\ \mu &= \text{Koefisien friksi dari kurvatur baja prategang} \\ K &= \text{Koefisien } wobble \text{ effect} \\ \alpha &= \text{sudut kelengkungan tendon } (8f/L) \\ F_o &= \text{Gaya prategang awal yang diberikan (kN)} \end{aligned}$$

$$F_{pf} = 1642.53 \times e^{-(0.19 \times 0.31 + 0.0016 \times 24)} = 1490.15 \text{ kN}$$

$$\Delta F_{pf} = 1642.53 - 1490.15 = 152.38 \text{ kN}$$

$$\Delta f_{pf} = \frac{152.38}{A_p} = \frac{152.38}{1743.04} = 87.42 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat gesek adalah

$$\% \Delta f_{pf} = \frac{87.42}{942.34} = 9.28 \%$$

d. Kehilangan akibat kekangan kolom

Konstruksi beton pratekan dengan desain cor monolit perlu diperhitungkan kehilangan pratekan akibat kekangan kolom. Hal ini terjadi karena saat dilakukan jacking beton terkekang oleh kekakuan kolom. Gaya perlawanan yang diberikan oleh kolom menahan reaksi perpindahan beton akibat gaya jacking yang terjadi. Gaya perlawanan kolom ini menyebabkan berkurangnya gaya pratekan karena sebagian

gaya pratekan yang diberikan digunakan mengatasi perlawanan gaya kolom.

Semakin kaku komponen kolom yang mengekang balok pratekan maka semakin besar gaya pratekan yang hilang untuk melawan kolom agar mengikuti lenturan balok akibat gaya jacking. Hal ini juga menyebabkan semakin besarnya momen yang diterima kolom sebagai kontribusi dari jacking yang terjadi. Sebaliknya jika kolom didesain tidak kaku maka gaya pratekan yang hilang semakin kecil serta momen yang diterima kolom juga berkurang.

Untuk mengeliminasi kehilangan prategang akibat kekangan kolom dan menghindari momen kumulatif yang terjadi pada dasar kolom lantai dasar, maka pada saat jacking, dasar kolom tiap lantai didesain dengan sendi, dalam realisasinya dilapangan menggunakan penampang lingkaran dan menggunakan pengekang spiral. Perubahan penampang yang signifikan pada dasar kolom, memperkecil kemampuan kolom untuk menahan momen yang terjadi akibat jacking

Dapat di hitung kahilangan yang terjadi akibat desain sendi ini. Perumusan yang digunakan untuk kehilangan gaya pratekan akibat kekangan kolom ialah sebagai berikut :

$$\Delta F_k = \frac{M_B - M_A}{h}$$

Dari hasil perhitungan ETABS, diperoleh nilai maksimum nilai momen ialah sebagai berikut

$$M_B = -151.11 \text{ kNm}$$

$$M_A = -151.11 \text{ kNm}$$

$$\Delta F_k = \frac{(151.11 + 151.11)}{4} \times 10 = 75.56 \text{ kN}$$

$$\Delta f_k = \frac{75.56}{A_p} = \frac{75.56}{1743.04} = 43.35 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat kekangan kolom adalah

$$\% \Delta f_{fk} = \frac{43.35}{942.34} = 4.60 \%$$

6.2.8.2 Kehilangan yang tergantung oleh waktu (kehilangan tidak langsung)

Hilangnya gaya awal yang ada terjadi secara bertahap dan dalam waktu yang relatif lama (tidak secara langsung seketika saat pemberian gaya pratekan), adapun macam kehilangan tidak langsung adalah sebagai berikut:

a. Kehilangan akibat rangkak

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1c

$$CR = K_{cr} \times \left(\frac{E_s}{E_c} \right) \times (f_{cir} - f_{cds})$$

Dimana :

K_{cr} = 2 untuk metode pra-tarik

= 1,6 untuk metode pasca-tarik

f_{cds} = tegangan.beton didaerah c.g.s. akibat sluruh beban mati pada struktur setelah diberi gaya prategang

f_{cir} = tegangan beton didaerah c.g.s. akibat gaya awal pratekan

$$f_{cir} = \frac{Fo}{A} + \frac{Fo \times e \times e}{I}$$

$$f_{cir} = \frac{1642.53}{0.79} + \frac{1642.53 \times 0.73 \times 0.73}{0.11} = 9.95 MPa$$

$$f_{cds} = \frac{M \times e}{I}$$

$$f_{cds} = \frac{1359.49 \times 0.73}{0.11} = 8.92 MPa$$

$$E_s/E_c = \frac{200000}{29725.41} = 6.73 \text{ Mpa}$$

$$CR = 1.6 \times 6.73 \times (9.95 - 8.92) = 11.06 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat rangkai adalah

$$\% \Delta f_{CR} = \frac{11.06}{942.34} = 1.17 \%$$

b. Kehilangan akibat susut

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1d

Rumus perhitungan kehilangan prategang akibat susut :

$$SH = 8,2 \times 10^{-6} \cdot Ksh \cdot Es \cdot (1 - 0,0236(V/S)) \times (100 - RH)$$

Dimana:

SH = Kehilangan gaya prategang akibat susut beton (kN)

Ksh = 1 untuk Pra-tarik, 0.77 untuk pascatarik curing 7 hari

V/S = ratio volume dibagi luas permukaan

RH = kelembaban relative udara sekitar, Kota Aceh RH=84 (%)

$$\frac{V}{S} = \frac{\text{luas penampang beton}}{\text{keliling penampang beton}} = \frac{0.79 \times 1000}{7.68} = 10.33 \text{ cm}$$

$$SH = 8,2 \times 10^{-6} \times 0.77 \times 200000 \times (1 - 0.0236 \times 6.73) \times (100 - 84) \\ = 0.15 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat rangkai adalah

$$\% \Delta f_{SH} = \frac{0.15}{942.34} = 0.016 \%$$

c. Kehilangan akibat relaksasi baja

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1e

Relaksasi baja adalah berkurangnya tegangan dalam baja akibat berjalannya waktu pada panjang tetap.

Perumusan yang digunakan ini ialah perumusan yang digunakan oleh komisi PCI untuk menyelesaikan serangkaian permasalahan akibat relaksasi baja

Rumus perhitungan kehilangan pratekan akibat relaksasi baja:

$$RE = [Kre - J(SH + CR + ES)]C$$

Dimana:

RE = Kehilangan gaya prategang akibat relaksasi baja (kN)

Kre = Koefisien baja prategang (MPa) lihat Tabel 6.4

J = Koefisien baja prategang lihat Tabel 6.4

C = Koefisien akibat tegangan yang terjadi pada baja prategang lihat Tabel 6.3

Perencanaan digunakan tendon strand *stress relieved* dengan mutu 1770MPa, sehingga diambil nilai:

Kre = 128 MPa

J = 0.14

C = 0.49

$$RE = [128 - 0.14 (0.15 + 11.06 + 0.00)] \times 0.49 = 61.95 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat relaksasi baja adalah

$$\% \Delta f_{RE} = \frac{61.95}{942.34} = 6.57 \%$$

Total kehilangan prategang:

$$\% \Delta f = \% \Delta f_A + \% \Delta f_{ES} + \% \Delta f_{FK} + \% \Delta f_{CR} + \% \Delta f_{SH} + \% \Delta f_{RE}$$

$$\% \Delta f = 9.28\% + 4.60\% + 1.17\% + 0.016\% + 6.57\% = 21.64\%$$

Sehingga Fe = 1287.08 kN

Tabel 6. 4 Nilai Kre dan J (T. Y. & Burns, n.d.)

Type of tendon	Kre	J
Strand atau wire stress-relieved Derajat 1860 MPa	138	0.15
Strand atau wire stress-relieved Derajat 1720 MPa	128	0.14
Kawat stress-relieved derajat 1655 atau 1620 MPa	121	0.13
Strand low-relaxation derajat 1860 MPa	35	0.04
Kawat low-relaxation derajat 1720 MPa	32	0.037
Kawat low-relaxation derajat 1655 atau 1620 MPa	30	0.025
Batang stress-relieved derajat 1000 atau 1100 MPa	40	0.05

Tabel 6. 5 Nilai C (T. Y. & Burns, n.d.)

fpi/fpu	Stress relieved strand or wire	Stress-relieved bar or low relaxation strand or wire
0.80	-	1.28
0.79	-	1.22
0.78	-	1.16
0.77	-	1.10
0.76	-	1.05
0.75	1.45	1.00
0.74	1.36	0.95
0.73	1.27	0.90
0.72	1.18	0.85
0.71	1.09	0.80
0.70	1.00	0.75
0.69	0.94	0.70
0.68	0.89	0.66
0.67	0.83	0.61
0.66	0.78	0.57
0.65	0.73	0.53

0.64	0.68	0.49
0.63	0.63	0.45
0.62	0.58	0.41
0.61	0.53	0.37
0.60	0.49	0.33

6.2.9 Kontrol Gaya Setelah Kehilangan Prategang

6.2.9.1 Kontrol Akibat Beban Layan

Kondisi saat beban layan di lapangan:

Output dari ETABS dengan kombinasi 1D+1L

Momen tumpuan kiri = -550.98 kNm

Momen lapangan = 1703.59 kNm

Momen tumpuan kanan = -550.98 kNm

Serat atas:

$$\begin{aligned}\sigma_t &\leq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{W_t} - \frac{M_{lapangan}}{W_t} \\ -18000 &\leq -\frac{1270.57}{0.79} + \frac{1270.57 \times 0.73}{0.29} - \frac{1703.59}{0.29} \\ -18000 &\leq -4296.42 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}\sigma_b &\geq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{W_b} + \frac{M_{lapangan}}{W_b} \\ 3921.22 &\geq -\frac{1270.57}{0.79} - \frac{1270.57 \times 0.73}{0.14} + \frac{1703.59}{0.14} \\ 3921.22 &\geq 3921.22 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

Kondisi saat beban layan di tumpuan

Serat atas:

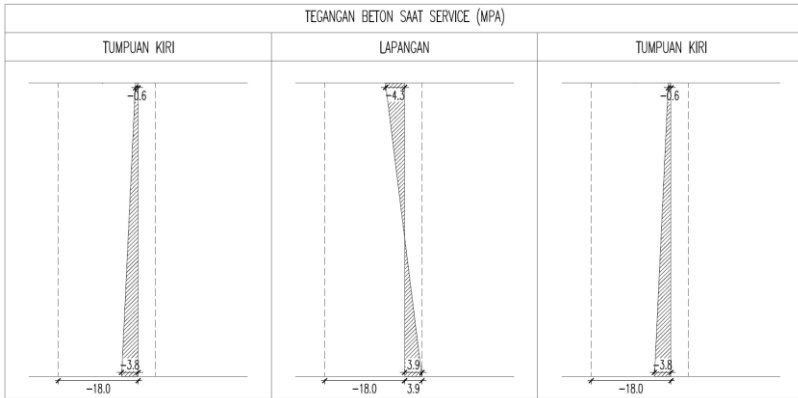
$$\begin{aligned}\sigma_t &\geq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{W_t} - \frac{M_{lapangan}}{W_t} \\ -18000 &\geq -\frac{1270.57}{0.79} + \frac{1270.57 \times (-0.2)}{0.29} - \frac{(-550.98)}{0.29} \\ -18000 &\geq -592.52 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\sigma_b \leq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{M_{lapangan}}{Wb}$$

$$3921.22 \leq -\frac{1270.57}{0.79} - \frac{1270.57 \times (-0.2)}{0.14} + \frac{(-550.98)}{0.14}$$

$$3921.22 \leq -3755.01 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}$$



Gambar 6. 4 Diagram tegangan saat beban layan

6.2.9.2 Kontrol Persyaratan SPRMK

SNI 2847:2013 Ps 21.5.2.5

Prategang rata-rata, f_{pc} , yang dihitung untuk luas yang sama dengan dimensi penampang komponen struktur terkecil yang dikalikan dengan dimensi penampang tegak lurus tidak boleh melebihi yang lebih kecil dari 3,5 MPa dan $f'_c/10$.

f_{pc} adalah tegangan tekan beton (setelah semua kehilangan gaya terjadi) di titik berat penampang yang menahan beban terapan luar, atau di permukaan badan dan sayap bila titik berat berada dalam sayap (MPa). Dalam komponen struktur komposit, f_{pc} adalah tegangan tekan resultan di pusat penampang komposit, atau di pertemuan badan dan sayap bila titik berat berada dalam sayap, akibat baik prategang maupun momen yang ditahan oleh komponen struktur pracetak yang bekerja sendirian.

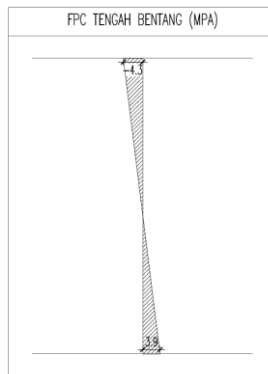
$f_c'/10 = 40/10 = 4 \text{ Mpa}$ dan 3.50 Mpa
 maka diambil nilai 3.50 Mpa

Tegangan di tengah bentang setelah kehilangan prategang:

Serat atas = -4.30 MPa

Serat bawah = 3.92 MPa

$f_{pc} = (y_b/y_{tot}) \times (-4.30 - 3.92) + 3.92 = -1.62 \text{ MPa}$
 $< 3.50 \text{ MPa OK}$



Gambar 6. 5 Diagram tegangan setelah kehilangan prategang

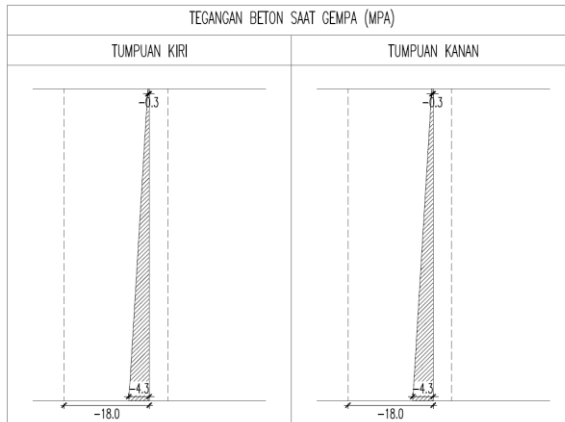
6.2.9.3 Kontrol Momen Gempa SPRMK

Menurut SNI 2847:2013, tendon pratekan diperbolehkan menerima 25% momen positif atau negatif.

Ketika terjadi gempa dan beban hidup maksimum output dari ETABS dengan kombinasi $1D+1L+ Ex$

Momen tumpuan (kiri) = -632.06 kNm

Momen tumpuan (kanan) = -632.06 kNm



Gambar 6. 6 Diagram tegangan pada tumpuan saat terjadi gempa

Momen tumpuan kiri

Kondisi saat beban layan di tumpuan

Serat atas:

$$\begin{aligned}\sigma_t &\leq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{Mtumpua}{Wt} \\ -18000 &\leq -\frac{1981.63}{0.79} + \frac{1981.63 \times (-0.2)}{0.20} - \frac{(-632.06)}{0.20} \\ -18000 &\leq -308.24 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}\sigma_b &\geq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{Mtumpuan}{Wb} \\ 3921.22 &\geq -\frac{1981.63}{0.79} - \frac{1981.63 \times (-0.2)}{0.14} + \frac{(-632.06)}{0.14} \\ 3921.22 &\geq -4344.18 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

Momen tumpuan kanan

Kondisi saat beban layan di tumpuan

Serat atas:

$$\sigma_t \leq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{Mtumpua}{Wt}$$

$$\begin{aligned}
 -18000 &\leq -\frac{1981.63}{0.79} + \frac{1981.63 \times (-0.2)}{0.20} - \frac{(-632.06)}{0.20} \\
 -18000 &\leq -308.24 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &\geq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{Mtumpuan}{Wb} \\
 3921.22 &\geq -\frac{1981.63}{0.79} - \frac{1981.63 \times (-0.2)}{0.14} + \frac{(-632.06)}{0.14} \\
 3921.22 &\geq -4344.18 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Kontrol lentur yang dilakukan terhadap beton pratekan sudah memenuhi syarat, baik saat sebelum atau sesudah kehilangan pratekan dengan F_o sebesar 1642.53 kN. Lihat gambar 6.6

6.2.9.4 Perhitungan Lendutan

Kemampuan layan struktur beton pratekan ditinjau dari perilaku defleksi komponen tersebut. Elemen beton pratekan memiliki dimensi yang lebih langsing dibanding beton bertulang biasa sehingga kontrol lendutan sangat diperlukan untuk memenuhi batas layan yang disyaratkan pada SNI 2847:2013 tabel 9.5.b.

$$f_{izin} = \frac{L}{480} = \frac{24000}{480} = 50.00 \text{ mm}$$

Lendutan saat *jacking*

1. Lendutan akibat tekanan tendon

Tekanan tendon menyebabkan balok tertekuk keatas sehingga lendutan yang terjadi berupa lendutan keatas (*chamber*).

$$\begin{aligned}
 p' &= 8 \times F_o \times f / L^2 \\
 &= 8 \times 1642530 \times 942.346 / (24000)^2 \\
 &= 21.24 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta p' &= 5/384 \times (p' \times l^4 / (E_c \times I)) \\
 &= 5/384 \times (21.24 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.11 \times 10^{12})) \\
 &= 27.71 \text{ mm } (\uparrow)
 \end{aligned}$$

2. Lendutan akibat momen yang terjadi pada portal

Dalam perhitungan lendutan pada portal akibat beban sendiri balok prategang, pelat, dan beban hidup, maka Analisis lendutan yang dilakukan adalah sebagai keutuhan portal, bukan lendutan balok diatas dua tumpuan. Perumusan yang digunakan dalam perhitungan lendutan balok prategang dalam portal adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \Delta g &= 5/48 \times (L^4 / (E_c \times I)) \times (M_b - 0.1(M_{a1} + M_{a2})) \\
 &= \frac{5}{48} \times \frac{(1359.49 - 0.1(-478.31 - 478.31)) \times 24000^4}{29725.41 \times 0.11 \times 10^{12}} \\
 &= 26.37 \text{ mm } (\downarrow)
 \end{aligned}$$

3. Lendutan akibat beban sendiri balok

$$q_o = W \times A = 2400 \times 0.79 = 19.05 \text{ N/mm}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta q_o &= 5/384 \times (q_o \times l^4 / (E_c \times I)) \\
 &= 5/384 \times (19.05 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.11 \times 10^{12})) \\
 &= 24.85 \text{ mm } (\downarrow)
 \end{aligned}$$

$$\Delta \text{ total} = -27.71 + 26.37 + 24.85 = -23.51 (\downarrow) < 50.00 \text{ mm (OK)}$$

Lendutan saat beban layan

1. Lendutan akibat tekanan tendon

$$\begin{aligned}
 p' &= 8 \times F_e \times f / L^2 \\
 &= 8 \times 1287080 \times 942.34 / (24000)^2 \\
 &= 16.64 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta p' &= 5/384 \times (p' \times L^4 / (E_c \times I)) \\
 &= 5/384 \times (16.64 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.11 \times 10^{12})) \\
 &= 21.71 \text{ mm } (\uparrow)
 \end{aligned}$$

2. Lendutan akibat momen yang terjadi pada portal

$$\begin{aligned}\Delta g &= 5/48 \times (L^4 / (Ec \times I)) \times (Mb - 0.1(Ma_1 + Ma_2)) \\ &= \frac{5}{48} \times \frac{(1703.59 - 0.1(-550.98 - 550.98)) 24000^4}{29725.41 \times 0.11 \times 10^{12}} \\ &= 32.87 \text{ mm } (\downarrow)\end{aligned}$$

3. Lendutan akibat beban sendiri balok

$$q_o = W \times A = 2400 \times 0.79 = 19.05 \text{ N/mm}$$

$$\begin{aligned}\Delta q_o &= 5/384 \times (q_o \times l^4 / (Ec \times I)) \\ &= 5/384 \times (19.05 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.11 \times 10^{12})) \\ &= 24.85 \text{ mm } (\downarrow)\end{aligned}$$

$$\Delta \text{ total} = -21.71 + 32.87 + 24.85 = 36.00 (\downarrow) < 50.00 \text{ mm (OK)}$$

6.2.10 Perhitungan Momen Nominal

Menurut SNI 2847:2013, pasal. 21.5.2.5, baja prategang tidak boleh menyumbang lebih dari seperempat kekuatan lentur positif atau negatif di penampang kritis pada daerah sendi plastis dan harus diangkur pada atau melewati muka eksterior joint.

a. Momen Nominal Tendon Prategang pada Tumpuan (SNI 2847:2013 Ps. 18.7)

Kuat lentur komponen struktur prategang dapat dihitung menggunakan asumsi yang seperti pada komponen struktur nonprategang Tendon prategang tidak mempunyai titik leleh yang pasti seperti halnya tulangan lunak

Ketika panampang prategang mencapai kuat lenturnya (didefinisikan dengan regangan beton tekan maksimum sebesar 0,003), tegangan di baja prategang pada kekuatan nominal fps, akan sangat bervariasi tergantung pada jumlah prategangnya

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \rho_p \frac{f_{pu}}{f_{c'}} \right]$$

f_{ps} = tegangan pada tendon disaat penampang mencapai kuat nominalnya, MPa

f_{pu} = kuat tarik tendon prategang yang disyaratkan MPa

γ_p = faktor yang memperhitungkan tipe tendon prategang

= 0.55 tulangan ulir ($f_{py}/f_{pu} \geq 0.80$)

= 0.40 kawat dan strand *stress-relieved* ($f_{py}/f_{pu} \geq 0.85$)

= 0.28 kawat dan strand relaksasi rendah ($f_{py}/f_{pu} \geq 0.90$)

d = jarak serat tekan terluar ke titik berat tulangan tekan, mm

d_p = jarak serat tekan terluar ke titik berat tendon, mm

Sehingga direncanakan:

$f_{c'}$ = 40.00 MPa

β_1 = 0.76

γ_p = 0.40

b_w = 400.00 mm

B_{eff} = 2640 mm

d_p = 749.44 mm

A_{ps} = 1743.04 mm²

ρ_p = 0.01

f_{pu} = 1770.0 MPa

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \rho_p \frac{f_{pu}}{f_{c'}} \right]$$

$$f_{ps} = 1770 \times \left[1 - \frac{0.40}{0.76} \times 0.01 \times \frac{1770}{40} \right] = 1531.66 \text{ MPa}$$

$$T = A_{ps} \times f_{ps} = 2669733.36 \text{ N}$$

$$C = T$$

$$\text{Luas daerah tekan} = C/f_{c'} = 78521.57 \text{ mm}^2$$

$$a = 78521.57 / 0.85 \times b_w = 196.30 \text{ mm}$$

$$Mn = T \times \left[d - \frac{a}{2} \right]$$

$$Mn = 2669733.36 \times \left[749.44 - \frac{196.30}{2} \right] = 1738753347.93 \text{ Nmm}$$

$$= 1738.75 \text{ kNm}$$

$$\phi Mn = 1564.88 > 705.41 \text{ kNm (OK)}$$

b. Momen Nominal Tendon Prategang pada Lapangan

Direncanakan:

$$f_c' = 40.00 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0.76$$

$$\gamma_p = 0.40$$

$$b_w = 400.00 \text{ mm}$$

$$B_{eff} = 2640 \text{ mm}$$

$$d_p = 1111.50 \text{ mm}$$

$$A_{ps} = 1743.04 \text{ mm}^2$$

$$\rho_p = 0.01$$

$$f_{pu} = 1770.0 \text{ MPa}$$

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \rho_p \frac{f_{pu}}{f_c'} \right]$$

$$f_{ps} = 1770 \times \left[1 - \frac{0.40}{0.76} \times 0.01 \times \frac{1770}{40} \right] = 1531.66 \text{ MPa}$$

$$T = A_{ps} \times f_{ps} = 2669733.36 \text{ N}$$

$$C = T$$

$$\text{Luas daerah tekan} = C / f_c' = 78521.57 \text{ mm}^2$$

$$a = 78521.57 / 0.85 \times \beta_{eff} = 29.74 \text{ mm}$$

$a < t_f$, maka dihitung seperti balok biasa

$$Mn = T \times \left[d - \frac{a}{2} \right]$$

$$M_n = 2669733.36 \times \left[1111.50 - \frac{29.74}{2} \right] = 2927.71 \text{ kNm}$$

$$\phi M_n = 2634.94 > 2156.78 \text{ kNm (OK)}$$

c. Perencanaan kebutuhan tulangan lunak sendi plastis:

Menurut SNI 2847:2013, pasal. 21.5.2.5, baja prategang tidak boleh menyumbang lebih dari seperempat kekuatan lentur positif atau negatif di penampang kritis pada daerah sendi plastis dan harus diangkur pada atau melewati muka eksterior joint.

Sehingga momen yang harus ditanggung tulangan lunak di daerah sendi plastis adalah $M_u - 25\% \phi M_n = 705.41 - 391.22 = 314.19 \text{ kNm}$. Jadi momen yang digunakan untuk perhitungan tulangan lunak adalah 314.19 kNm

Direncanakan:

$$\begin{aligned} f_c' &= 40.00 \text{ Mpa} \\ f_y &= 90.00 \text{ Mpa} \\ b_w &= 400.00 \text{ mm} \\ H &= 1200.00 \text{ mm} \\ L &= 24.00 \text{ m} \\ D_{\text{lentur}} &= 25.00 \text{ mm} \\ D_{\text{Sengkan}} &= 10.00 \text{ mm} \\ \text{cover} &= 40.00 \text{ mm} \\ d &= 1137.50 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\rho_{\min} = \frac{1.4}{f_y} = \frac{1.4}{390} = 0.0036$$

$$\rho_{\min} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4 \times f_y} = \frac{\sqrt{40}}{4 \times 390} = 0.00405$$

Jadi dipakai $\rho_{\min} = 0.0036$

Karena mutu beton berada di atas 28 MPa, maka nilai β_1 , digunakan perumusan sesuai dengan (SNI 2847:2013 ps 12.2.7.3)

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left(\frac{f_c - 28}{7} \right) = 0.76$$

$$\rho_{bal} = \frac{0,85\beta_1 f_c'}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) = \frac{0,85 \times 0.76 \times 40}{390} \left(\frac{600}{600 + 390} \right)$$

$$\rho_{bal} = 0.0404$$

Agar menjaga agar beton terkontrol tarik, maka $\rho_{max} = 0.75 \rho_{bal}$

$$\rho_{max} = 0.0303$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f_c'} = \frac{390}{0.85 \times 40} = 11.47$$

$$Rn = \frac{Mu}{\phi b d^2} = \frac{390}{0.9 \times 400 \times 1137.5^2} = 0.67 \text{ MPa}$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times m \times Rn}{f_y}} \right)$$

$$\rho = \frac{1}{11.47} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 11.47 \times 0.67}{390}} \right) = 0.00175$$

Syarat:

$$\rho_{min} < \rho_{pakai} < \rho_{max}$$

$$\text{Maka } \rho_{pakai} = \rho_{min} = 0.00405$$

Menentukan luas tulangan atas (A_s) dari ρ yang didapat:

$$A_s = \rho b d = 0.00405 \times 400 \times 1137.50 = 1844.66 \text{ mm}^2$$

Direncanakan dengan tulangan D25, maka

$$n = \frac{A_{s \text{ perlu}}}{0.25 \pi \phi^2} = \frac{1844.66}{0.25 \times \pi \times 25^2} = 4$$

Direncanakan tulangan lentur untuk menahan beban gempa pada daerah sendi plastis adalah 4D25 atas bawah, karena gempa yang terjadi 2 arah.

6.2.11 Kontrol Retak

Perhitungan kuat ultimate dari beton pratekan harus memenuhi persyaratan SNI 2847:2013 Ps.18.8.2 mengenai jumlah total baja tulangan non pratekan dan pratekan harus cukup untuk menghasilkan beban terfaktor paling sedikit 1.2 beban retak yang terjadi berdasarkan nilai modulus retak sebesar $0.62 \sqrt{f_c'}$ sehingga didapatkan $\phi M_n > 1.2 M_{cr}$, dengan nilai $\phi = 0.8$.

Momen Retak (M_{cr}) pada struktur beton pratekan, dihitung berdasar teori elastis. Retak terjadi apabila serat beton terjauh mencapai: *Modulus of rupture* ($f_r = 0.62 \sqrt{f_c'}$)

$$-\frac{F}{A} - \frac{F \cdot e}{Wb} + \frac{M_{cr}}{Wb} = f_r$$

$$M_{cr} = F \cdot e + \frac{F \cdot Wb}{A} + f_r \cdot Wb = F(e + kt) + f_r \cdot Wb$$

Dimana:

M_{cr} = Momen saat serat bawah beton mengalami retak (kNm)

F = Gaya Prategang (N)
 e = eksentrisitas tendon tengah bentang (m)
 f_r = Tegangan tarik dari beton (MPa)

$(F \times (e+kt))$ sering disebut sebagai momen dekompresi,
 sedangkan $(f_r \times W_b)$ adalah sumbangan dari tegangan tarik beton.

$f_r = 0.62 \sqrt{f_c'} = 0.62 \sqrt{40} = 3.92 \text{ Mpa}$
 $I_g = 111392600430.11 \text{ mm}^4$
 $y_t = 390.56 \text{ mm}$

a. Tumpuan

$F = 1270.57 \text{ kN}$
 $e = 0.20 \text{ m}$
 $k_b = 0.36 \text{ m}$
 $W_t = 285209218.53 \text{ mm}^3$
 $M_1 = 1270.57 \times (0.20+0.36) = 719.97 \text{ kNm}$
 $M_2 = 3.92 \times 285209218.53 = 1118369317.88 \text{ Nmm}$
 $= 1118.37 \text{ kNm}$
 $M_{cr} = 1838.34 \text{ kNm}$

syarat $\phi M_n > 1.2 M_{cr}$
 $2329.73 > 2206.01 \text{ kNm (OK)}$

b. Lapangan

$F = 1270.57 \text{ kN}$
 $e = 0.73 \text{ m}$
 $k_t = 0.17 \text{ m}$
 $W_b = 137617639.27 \text{ mm}^3$
 $M_1 = 1270.57 \times (0.73+0.17) = 1163.96 \text{ kNm}$
 $M_2 = 3.92 \times 285209218.53 = 539629631.02 \text{ Nmm}$
 $= 539.630 \text{ kNm}$

$$M_{cr} = 1703.59 \text{ kNm}$$

$$\text{syarat } \phi M_n > 1.2 M_{cr}$$

$$2634.94 > 2044.31 \text{ kNm (OK)}$$

Sehingga dengan kontrol momen retak maka hasil perhitungan beton pratekan telah memenuhi persyaratan.

6.2.12 Perhitungan Tulangan Geser

Perhitungan Tulangan Geser yang dipengaruhi beban gempa dihitung dari kapasitas balok memikul momen probable.

Menurut SNI 2847:2013 Pasal 21.3, gaya geser rencana V_e harus ditentukan dari peninjauan gaya statik pada bagian tumpuan. Momen-momen dengan tanda berlawanan sehubungan dengan kuat lentur maximum M_{pr} , harus dianggap bekerja pada muka-muka tumpuan, dan komponen struktur tersebut dibebani penuh beban gravitasi terfaktor serta V_e harus dicari dari nilai terbesar akibat beban gempa arah ke kanan dan ke kiri.

M_{pr} merupakan kuat momen lentur mungkin dari suatu komponen struktur yang ditentukan menggunakan sifat-sifat komponen struktur pada muka join dengan menganggap kuat tarik pada tulangan longitudinal sebesar minimum $1,25 f_y$.

Besarnya momen probable dipengaruhi oleh disain kemampuan tulangan lenturnya. Harga momen probable dapat dicari dengan rumus berikut:

$$M_{pr} = \left[(A_s x f_s' - A_s' x f_s') x \left(d - \frac{a}{2} \right) \right] + [A_s' x f_s' x (d - d')]$$

$$a = \frac{A_s x f_s}{0.85 x f_c' x b}$$

Dimana:

$f_s = 1.25 f_y = 1.25 \times 390 = 487.5 \text{ MPa}$

f_s' = Tegangan dari tulangan tekan (MPa)

A_s' = Luas penampang tulangan tekan (mm^2)

D' = Jarak antara serat tarik ke tulangan tekan (mm)

Tabel 6. 6 Rekapitulasi perhitungan Mpr

Lokasi	n	D_{tul}	$A_s (\text{mm}^2)$	a (mm)	Mpr (kNm)
Gempa tumpuan kanan +	4.00	25	1964.29	10.67	1084.15
Gempa tumpuan kanan -	4.00	25	1964.29	70.41	1055.55
Gempa tumpuan kiri +	4.00	25	1964.29	10.67	1084.15
Gempa tumpuan kiri -	4.00	25	1964.29	70.41	1055.55

6.2.12.1 Menghitung kebutuhan Tulangan Geser didalam sendi plastis

Menghitung V_e :

$$V_e = \frac{M_{pr1} \pm M_{pr2}}{l_n} \pm V_u$$

Dimana:

V_e = Gaya geser efektif yang terjadi di sendi plastis (kN)

Mpr = Momen probable (kNm)

V_u = Geser gravitasi dari ETABS (kN)

l_n = bentang bersih (m)

Gaya geser akibat gravitasi, V_u at d

$$V_u = 433.58 \text{ kN}$$

$$M_{pr1} = 1084.15 \text{ kNm}$$

$$M_{pr2} = 1055.55 \text{ kNm}$$

$$l_n = 24.00 - 0.40 = 23.60 \text{ m}$$

$$V_e = \frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{l_n} + V_u$$

$$V_e = \frac{1085.15 + 1055.55}{23.6} + 433.58 = 524.25 \text{ kN}$$

$$V_e = \frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{l_n} - V_u$$

$$V_e = \frac{1085.15 + 1055.55}{23.6} - 433.58 = -342.91 \text{ kN}$$

$$V_e = \frac{M_{pr1} - M_{pr2}}{l_n} + V_u$$

$$V_e = \frac{1085.15 - 1055.55}{23.6} + 433.58 = 432.37 \text{ kN}$$

$$V_e = \frac{M_{pr1} - M_{pr2}}{l_n} - V_u$$

$$V_e = \frac{1085.15 - 1055.55}{23.6} - 433.58 = -434.79 \text{ kN}$$

Maka diambil V_e yang terbesar sebagai beban pada sendi plastis, yaitu 524.25 kN.

Tulangan transversal untuk memikul geser dengan menganggap $V_c=0$ bila memenuhi persyaratan:

1. Gaya geser akibat gempa (M_{pr}) $> 0,5 \times$ total geser akibat kombinasi gempa dan gravitasi ($1,2D + 1L$)

$$V_e = \frac{1085.15 + 1055.55}{23.6} = 90.67 \text{ kN}$$

$$0.5 \times 433.58 = 216.79 \text{ kN} > 90.67 \text{ kN (NOT OK)}$$

2. Gaya aksial tekan $< 0,2 \times A_g \times f'_c = 0.2 \times (400 \times 1200) \times 40 = 1587.20 \text{ KN}$

Gaya aksial P_u pada balok dari ETABS sebesar 166.05 kN $< 1587.20 \text{ kN}$ maka syarat ke-2 memenuhi (OK)

Tidak kedua syarat terpenuhi, maka $V_c \neq 0$. Perhitungan V_c dengan rumus sebagai berikut,

SNI 2847:2013 Ps. 11.3.2 memberikan perumusan besar tegangan geser yang dapat ditahan beton prategang:

$$V_c = \left(0.05 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} + 4.8 \frac{V_u \times dp}{M_u} \right) \times b_w \times d$$

Dimana:

V_c = Besar gaya geser yang dapat dipikul beton (kN)

λ = Beton normal, nilai = 1.00

dp = Jarak dari serat atas tekan ke titik berat tendon (mm)

M_u = Besar momen ultimate di tengah bentang (kNm)

V_u = Besar gaya geser ultimate sejauh d (kN)

$$V_c = \left(0.05 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} + 4.8 \frac{V_u \times dp}{M_u} \right) \times b_w \times d$$

$$V_c = \left(0.05 \times 1 \times \sqrt{40} + 4.8 \frac{433.58 \times 749.44}{2156.78} \right) \times 400 \times 1137.50$$

$$V_c = 472.92 \text{ kN}$$

$$V_{cmin} = \left(0.17 \times \lambda \times \sqrt{f'c'} \right) \times bw \times d$$

$$V_{cmin} = \left(0.17 \times 1 \times \sqrt{40} \right) \times 400 \times 1137.50 = 489.20 \text{ kN}$$

$$V_{cmax} = \left(0.42 \times \lambda \times \sqrt{f'c'} \right) \times bw \times d$$

$$V_{cmax} = \left(0.42 \times 1 \times \sqrt{40} \right) \times 400 \times 1137.50 = 1208.62 \text{ kN}$$

Maka digunakan $V_c = 489.20 \text{ kN}$

Menghitung gaya geser yang harus ditanggung tulangan (V_s):

$$V_s = V_e - V_c$$

$$V_s = 209.79 \text{ kN}$$

$$\text{Sehingga As perlu} = V_s / f_y = 537.92 \text{ mm}^2$$

$$\text{Direncanakan diameter} = 10.00 \text{ mm}$$

$$\text{Luas double stirup} = 157.14 \text{ mm}^2$$

Jarak maksimum antar sengkang yang tertutup pada sendi plastis tidak boleh melebihi SNI 2847:2013 Ps.21.5.3.2:

$$s_{\max 1} = d/4 = 187.36 \text{ mm}$$

$$s_{\max 2} = 6d = 150.00 \text{ mm}$$

$$s_{\max 3} = 150.00 \text{ mm}$$

$$\text{diambil } s = 150.00 \text{ mm}$$

Direncanakan = D10-150

Dipasang dari jarak maksimum 50.00 mm dari muka kolom, hingga jarak sendi plastis = $2h = 2400.00$ mm.

6.2.12.2 Menghitung kebutuhan Tulangan Geser diluar sendi plastis

Telah didapatkan:

$$V_u \text{ at } d = 433.58 \text{ kN}$$

$$\text{Kapasitas geser beton, } V_c = 489.20 \text{ kN}$$

$$\phi V_c = 0.75 \times 489.20 = 366.90 \text{ kN}$$

$V_u > \phi V_c$ sehingga perlu diberi tulangan tambahan dengan $V_s = V_u - \phi V_c = 66.68$ kN

Direncanakan tulangan sengkang minimum:

$$A_v \min = \frac{1}{16} \sqrt{f_c'} \frac{b_w \times s}{f_{yt}} \geq \frac{1}{3} \frac{b_w \times s}{f_{yt}}$$

$$A_v \min = \frac{1}{16} \sqrt{40} \frac{400 \times 1000}{390} = 405.42 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_v \min = \frac{1}{3} \times \frac{400 \times 1000}{390} = 341.88 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$\text{Maka digunakan } A_{vmin} = 405.52 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$\text{Direncanakan diameter} = 10.00 \text{ mm}$$

$$\text{Luas double stirup} = 157.14 \text{ mm}^2$$

$$\text{Jarak sengkang perlu} = 333.33 \text{ mm}$$

Jarak maksimum antar sengkang tertutup tidak boleh melebihi SNI 2847:2013, Ps. 21.5.3.3 dan 21.5.3.4:

- $d/2 = 1200/2 = 600 \text{ mm}$
- 600 mm

Dari jarak yang sudah di hitung, diambil jarak sengkang yang paling kecil, yaitu = 300 mm.

Sengkang dipasang D10-300.

6.2.13 Perhitungan Tulangan Torsi

(SNI 2847:2013 Pasal 11.5.3.7.)

Penulangan lentur akibat torsi dapat dihitung sebagai berikut:

$$T_u < \phi \times 0.083 \lambda \sqrt{f_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{f_{pc}}{0.33 \lambda \sqrt{f_c}}}$$

Dimana:

λ = beton normal ambil nilai 1.00

ϕ = Faktor reduksi beban torsi, ambil nilai 0.75

F_{cp} = tegangan sera tatas beton pada masa layan (MPa)

Kontrol kebutuhan torsi:

$$A_{cp} = b \times h = 400 \times 12000 = 480000.00 \text{ mm}^2$$

$$P_{cp} = 2 (b+h) = 2 \times (400 + 1200) = 3200.00 \text{ mm}$$

$$T_u \text{ (dari ETABS)} = 158.95 \text{ kN.m} = 158950 \text{ Nmm}$$

$$T_u < 0.75 \times 0.083 \times 1.00 \times \sqrt{40} \left(\frac{480000^2}{3200} \right) \sqrt{1 + \frac{4.30}{0.33 \cdot 1 \cdot \sqrt{40}}}$$

$$158.95 \text{ kN.m} < 198.90 \text{ kNm (OK)}$$

Persyaratan diatas terpenuhi, maka balok prategang **tidak memerlukan** tulangan torsi.

6.2.14 Perencanaan Angkur

Angkur adalah bagian dari system pratekan pasca tarik yang terletak pada kedua ujung struktur beton pratekan, fungsinya untuk menyalurkan gaya prategang dari tendon ke beton. Angkur terdiri dari angkur hidup dan angkur mati, perencanaan struktur ini menggunakan sistem prategang VSL.

Rekapitulasi Gaya pada Tendon

Tipe strand	= Y1770S7
d strand	= 15.70 mm
f _{pk}	= 1770 Mpa
f _{p0.1k}	= 1526 Mpa
F _{pk}	= 265 KN
Strand pakai	= 6-12
Jumlah strand	= 8.00 buah

6.2.14.1 Perencanaan Angkur Mati

Tipe angkur	= VSL - AF
ϕ_A	= 265 mm
Cover (F)	= 45 mm

Penulangan daerah lokal:

Diameter tulangan (ϕ_R)	= 20 mm
Jarak antar tulangan (P)	= 55 mm
Jumlah tulangan (r)	= 8 buah
Panjang area penulangan (I)	= 385 mm
Panjang sengkang (M)	= 390 mm
Diameter sengkang (ϕ_S)	= 16 mm

6.2.14.2 Perencanaan Angkur Hidup

Tipe angkur	= VSL - GC
ϕ_A	= 230 mm
Cover (F)	= 50 mm

Penulangan daerah lokal:

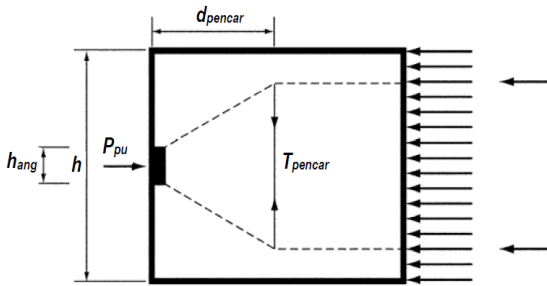
Diameter tulangan (ϕ_R)	= 20 mm
--------------------------------	---------

Jarak antar tulangan (P)	= 50 mm
Jumlah tulangan (r)	= 6 buah
Panjang area penulangan (I)	= 250 mm
Panjang sengkang (M)	= 275 mm
Diameter sengkang (ϕ S)	= 10 mm

6.2.15 Perencanaan Daerah Angkur

Balok pratekan pasca tarik, kegagalan bisa disebabkan oleh hancurnya bantalan beton pada daerah tepat dibelakang angkur tendon akibat tekanan yang sangat besar. Kegagalan ini diperhitungkan pada kondisi ekstrim saat transfer, yaitu saat gaya pratekan maksimum dan kekuatan beton minimum. Kuat tekan nominal beton pada daerah pengangkuran global di isyaratkan oleh SNI 2847:2013 pasal 18.13.4.2. Bila diperlukan, pada daerah pengangkuran dapat dipasang tulangan untuk memikul gaya pencar, pengelupasan dan gaya tarik tepi longitudinal yang timbul akibat pengankuran tendon sesuai pasal 18.13.3.2

Dalam studi ini digunakan angkur hidup. Hal ini dikarenakan metode pemberian gaya pratekan dengan sistem pasca tarik. Penulangan pengekangan di seluruh pengangkuran harus sedemikian rupa hingga mencegah pembelahan dan bursting yang merupakan hasil dari gaya tekan terpusat besar yang disalurkan melalui alat angkur. Metode perhitungan perencanaan daerah pengangkuran global sesuai dengan SNI 2847:2013 pasal 18.13.3.2.



(a) Penampang persegi

Gambar 6. 7 Ilustrasi penulangan global daerah angkur

$$T_{\text{PENCAR}} = 0,25\Sigma P_u \left(1 - \frac{a}{h}\right)$$

$$d_{\text{PENCAR}} = 0,5(h - 2e)$$

Dimana:

P_u = Jumlah gaya tendon terfaktor total untuk pengaturan penarikan tendon yang ditinjau = 1.2 F_o (kN)

a = Tinggi angkur atau kelompok angkur yang berdekatan pada arah yang ditinjau (mm)

h = Tinggi penampang pada arah yang ditinjau (mm)

e = Eksentrisitas angkur atau kelompok angkur yang berdekatan terhadap sumbu berat penampang (selalu diambil sebagai nilai positif)

a = 230 mm (angkur strand 6-12, VSL tabel)

e = -200 mm

h = 1200 mm

P = 1642.53 kN

P_u = 1.2 x 1642.53 = 1971.04 kN

$$T_{\text{pencar}} = 0.25 \times 1971.04 \left(1 - \frac{230}{1200}\right) = 398.31 \text{ kN}$$

$$d_{\text{pencar}} = 0.5 (1200 - 2 \times 200) = 0.40 \text{ m}$$

$$A_{vp} = \frac{T_{\text{pencar}}}{f_y} = 1163.92 \text{ mm}^2$$

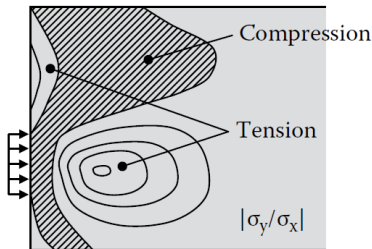
Digunakan tulangan D10 double leg ($A_s = 157.14 \text{ mm}^2$), maka kebutuhan tulangan ialah sebanyak 8 buah

Spasi antar sengkang dihitung dengan cara sebagai berikut

$$S = \frac{h}{n} = \frac{1200}{8} = 150 \text{ mm}$$

6.2.15.1 Perencanaan tulangan daerah terkelupas :

Pada daerah penyaluran gaya prategang, tegangan yang terjadi didalam tendon bukan hanya kompresi, namun juga tegangan tarik. Tegangan tarik yang terdapat pada permukaan ujung beton akan cenderung terkupas, untuk itu disediakan tulangan tambahan. Lihat area tarik kupas pada gambar 6.8



Gambar 6. 8 Isobar dari tegangan beton pada daerah angkur
(Sumber: Gilbert, Mickleborough, & Ranzi, 2017)

T.Y. Lin merekomendasikan $T = 0.03F_o$

$$F_o = 1642.53 \text{ kN}$$

$T = 49.28 \text{ kN}$
 $f_y = 390.00 \text{ MPa}$
 $A_s = T/f_y = 126.35 \text{ mm}^2$
 $A_s \text{ D10} = 78.57 \text{ mm}^2$
 $n = 2$
 $s = 150 \text{ mm}$
 Dipasang tulangan ujung **D10-150**

6.2.15.2 Perencanaan hidrolik jack

Sesuai dengan brosur VSL, untuk menarik tendon supaya menghasilkan gaya prategang digunakan alat jacking dengan spesifikasi:

Designation = ZPE-12/St2
Jack capacity = 1850.00 KN

6.2.15.3 Perencanaan Grouting

Sesuai dengan brosur VSL = $f_c \text{ cube } 100 \text{ MPa}$
 $f_c' \text{ grouting} = \sim 85 \text{ MPa}$

6.2.16 Daerah Limit Kabel

Agar tegangan terjadi tidak melebihi tegangan izin, maka penempatan tendon harus didalam area daerah limit kabel yang dihitung sebagai berikut:

$$a1 = \frac{M_{\text{service}}}{F_e} + \frac{f t' \times A \times K t}{F_e}$$

a1 berjarak dari kern atas penampang.

$$a2 = \frac{M_{\text{jacking}}}{F_o} + \frac{f t' \times A \times K b}{F_o}$$

a2 berjarak dari kern bawah penampang.

Perhitungan daerah limit kabel:

L	= 24000.00 mm
e lapangan	= 730.94mm
e tumpuan	= 200.00 mm
fokus	= 930.94 mm
D tendon	= 77.00 mm
$F_t' = f_b'$	= 3.92 MPa
F_o	= 1642529.37 N
F_e	= 1287075.86 N
A	= 793600.00 mm ²

Koordinat Tendon:

$$Y = 4fx(l-x)/l^2$$

Daerah Limit:

y_t	= 552.54 mm
y_b	= 767.46 mm
K_t	= 224.56 mm
K_b	= 311.90 mm
e_t	= 451.81 mm
e_b	= 396.90 mm

Tabel 6. 7 Rekapitulasi Perhitungan Daerah Limit Kabel Prategang Kelas U

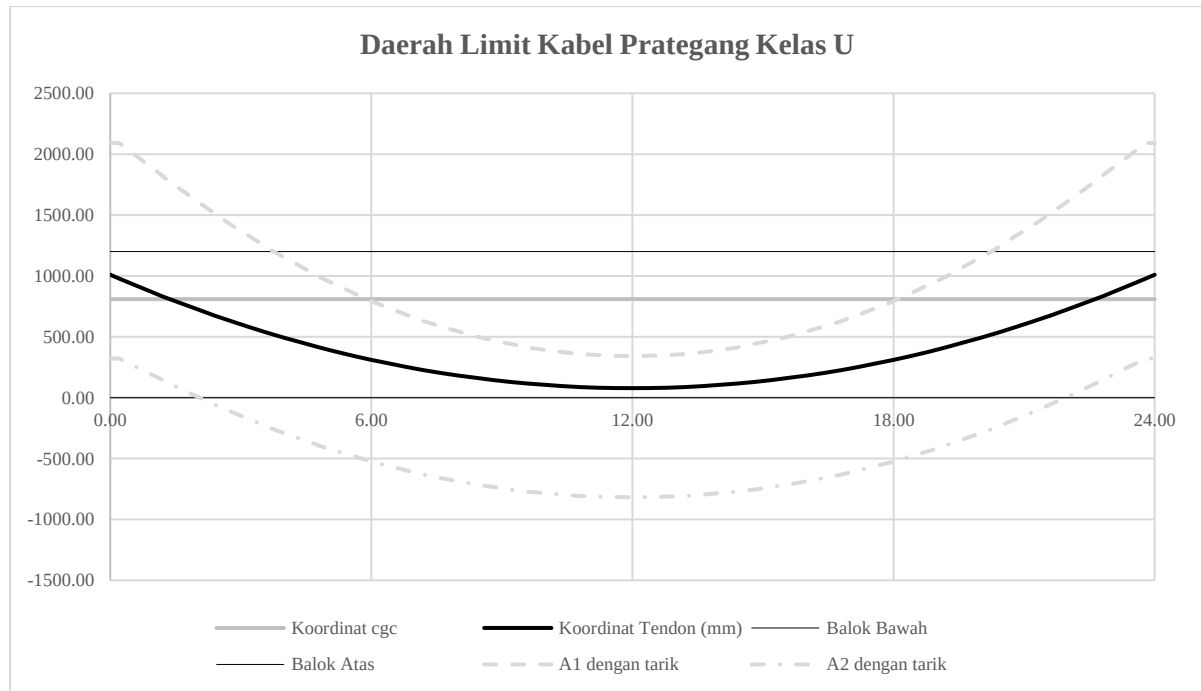
Station (m)	Transfer Moment (KNm)	Service Moment (KNm)	Koord. cgc	Koord. Kt	Koord. Kb	Koord. Tendon (mm)	Koord. A1 (mm)	Koord. A1 +et (mm)	Koord. A2 (mm)	Koord. A2+eb (mm)
0.00	-478.31	-550.98	809.44	982.84	450.05	1009.44	-428.08	1410.93	2091.81	-291.20
0.20	-478.31	-550.98	809.44	982.84	450.05	978.66	-428.08	1410.93	2091.81	-291.20
0.70	-332.27	-375.97	809.44	982.84	450.05	903.99	-292.11	1274.96	1955.84	-202.29
1.20	-188.73	-203.46	809.44	982.84	450.05	832.56	-158.08	1140.92	1821.80	-114.90
1.20	-185.11	-199.37	809.44	982.84	450.05	832.56	-154.90	1137.74	1818.62	-112.70
1.60	-74.11	-66.16	809.44	982.84	450.05	777.74	-51.40	1034.25	1715.13	-45.12
2.00	35.29	65.45	809.44	982.84	450.05	724.98	50.85	931.99	1612.88	21.49
2.40	143.10	195.46	809.44	982.84	450.05	674.30	151.86	830.98	1511.86	87.12
2.40	146.20	198.96	809.44	982.84	450.05	674.30	154.58	828.26	1509.14	89.01
2.80	245.55	318.29	809.44	982.84	450.05	625.68	247.29	735.55	1416.43	149.49
3.20	343.30	436.02	809.44	982.84	450.05	579.14	338.76	644.08	1324.96	209.01
3.60	439.46	552.15	809.44	982.84	450.05	534.66	428.99	553.85	1234.73	267.55
3.60	442.16	555.20	809.44	982.84	450.05	534.66	431.36	551.48	1232.37	269.19

4.00	528.26	658.61	809.44	982.84	450.05	492.25	511.71	471.13	1152.02	321.62
4.40	612.77	760.43	809.44	982.84	450.05	451.91	590.82	392.03	1072.91	373.07
4.80	695.68	860.65	809.44	982.84	450.05	413.64	668.69	314.16	995.04	423.54
4.80	697.99	863.25	809.44	982.84	450.05	413.64	670.71	312.14	993.02	424.95
5.20	770.63	950.46	809.44	982.84	450.05	377.43	738.46	244.38	925.27	469.17
5.60	841.66	1036.06	809.44	982.84	450.05	343.30	804.97	177.87	858.75	512.42
6.00	911.10	1120.07	809.44	982.84	450.05	311.23	870.24	112.60	793.48	554.70
6.00	913.02	1122.23	809.44	982.84	450.05	311.23	871.92	110.92	791.80	555.86
6.40	972.36	1193.42	809.44	982.84	450.05	281.24	927.24	55.61	736.49	591.99
6.80	1030.10	1263.02	809.44	982.84	450.05	253.31	981.31	1.54	682.42	627.14
7.20	1086.24	1331.01	809.44	982.84	450.05	227.45	1034.14	-51.29	629.59	661.32
7.20	1087.76	1332.73	809.44	982.84	450.05	227.45	1035.47	-52.63	628.25	662.25
7.60	1134.03	1388.18	809.44	982.84	450.05	203.66	1078.56	-95.71	585.17	690.42
8.00	1178.70	1442.04	809.44	982.84	450.05	181.94	1120.40	-137.55	543.33	717.61
8.40	1221.77	1494.29	809.44	982.84	450.05	162.28	1161.00	-178.15	502.73	743.84
8.40	1222.91	1495.58	809.44	982.84	450.05	162.28	1162.00	-179.15	501.73	744.53
8.80	1256.30	1535.50	809.44	982.84	450.05	144.70	1193.02	-210.17	470.71	764.86
9.20	1288.08	1573.83	809.44	982.84	450.05	129.18	1222.79	-239.95	440.93	784.21
9.60	1318.27	1610.56	809.44	982.84	450.05	115.74	1251.33	-268.49	412.40	802.59

9.60	1319.03	1611.41	809.44	982.84	450.05	115.74	1252.00	-269.15	411.73	803.05
10.00	1339.65	1635.95	809.44	982.84	450.05	104.36	1271.06	-288.22	392.66	815.60
10.40	1358.68	1658.90	809.44	982.84	450.05	95.05	1288.89	-306.04	374.84	827.19
10.80	1376.11	1680.24	809.44	982.84	450.05	87.81	1305.47	-322.63	358.25	837.80
10.80	1376.48	1680.67	809.44	982.84	450.05	87.81	1305.81	-322.96	357.92	838.03
11.20	1384.42	1689.91	809.44	982.84	450.05	82.64	1312.98	-330.14	350.75	842.86
11.60	1390.75	1697.55	809.44	982.84	450.05	79.53	1318.92	-336.07	344.81	846.71
12.00	1395.49	1703.59	809.44	982.84	450.05	78.50	1323.61	-340.77	340.12	849.60
12.00	1395.49	1703.59	809.44	982.84	450.05	78.50	1323.61	-340.77	340.12	849.60
12.40	1390.75	1697.55	809.44	982.84	450.05	79.53	1318.92	-336.07	344.81	846.71
12.80	1384.42	1689.91	809.44	982.84	450.05	82.64	1312.98	-330.14	350.75	842.86
13.20	1376.48	1680.67	809.44	982.84	450.05	87.81	1305.81	-322.96	357.92	838.03
13.20	1376.11	1680.24	809.44	982.84	450.05	87.81	1305.47	-322.63	358.25	837.80
13.60	1358.68	1658.90	809.44	982.84	450.05	95.05	1288.89	-306.04	374.84	827.19
14.00	1339.65	1635.95	809.44	982.84	450.05	104.36	1271.06	-288.22	392.66	815.60
14.40	1319.03	1611.41	809.44	982.84	450.05	115.74	1252.00	-269.15	411.73	803.05
14.40	1318.27	1610.56	809.44	982.84	450.05	115.74	1251.33	-268.49	412.40	802.59
14.80	1288.08	1573.83	809.44	982.84	450.05	129.18	1222.79	-239.95	440.93	784.21
15.20	1256.30	1535.50	809.44	982.84	450.05	144.70	1193.02	-210.17	470.71	764.86

15.60	1222.91	1495.58	809.44	982.84	450.05	162.28	1162.00	-179.15	501.73	744.53
15.60	1221.77	1494.29	809.44	982.84	450.05	162.28	1161.00	-178.15	502.73	743.84
16.00	1178.70	1442.04	809.44	982.84	450.05	181.94	1120.40	-137.55	543.33	717.61
16.40	1134.03	1388.18	809.44	982.84	450.05	203.66	1078.56	-95.71	585.17	690.42
16.80	1087.76	1332.73	809.44	982.84	450.05	227.45	1035.47	-52.63	628.25	662.25
16.80	1086.24	1331.01	809.44	982.84	450.05	227.45	1034.14	-51.29	629.59	661.32
17.20	1030.10	1263.02	809.44	982.84	450.05	253.31	981.31	1.54	682.42	627.14
17.60	972.36	1193.42	809.44	982.84	450.05	281.24	927.24	55.61	736.49	591.99
18.00	913.02	1122.23	809.44	982.84	450.05	311.23	871.92	110.92	791.80	555.86
18.00	911.10	1120.07	809.44	982.84	450.05	311.23	870.24	112.60	793.48	554.70
18.40	841.66	1036.06	809.44	982.84	450.05	343.30	804.97	177.87	858.75	512.42
18.80	770.63	950.46	809.44	982.84	450.05	377.43	738.46	244.38	925.27	469.17
19.20	697.99	863.25	809.44	982.84	450.05	413.64	670.71	312.14	993.02	424.95
19.20	695.68	860.65	809.44	982.84	450.05	413.64	668.69	314.16	995.04	423.54
19.60	612.77	760.43	809.44	982.84	450.05	451.91	590.82	392.03	1072.91	373.07
20.00	528.26	658.61	809.44	982.84	450.05	492.25	511.71	471.13	1152.02	321.62
20.40	442.16	555.20	809.44	982.84	450.05	534.66	431.36	551.48	1232.37	269.19
20.40	439.46	552.15	809.44	982.84	450.05	534.66	428.99	553.85	1234.73	267.55
20.80	343.30	436.02	809.44	982.84	450.05	579.14	338.76	644.08	1324.96	209.01

21.20	245.55	318.29	809.44	982.84	450.05	625.68	247.29	735.55	1416.43	149.49
21.60	146.20	198.96	809.44	982.84	450.05	674.30	154.58	828.26	1509.14	89.01
21.60	143.10	195.46	809.44	982.84	450.05	674.30	151.86	830.98	1511.86	87.12
22.00	35.29	65.45	809.44	982.84	450.05	724.98	50.85	931.99	1612.88	21.49
22.40	-74.11	-66.16	809.44	982.84	450.05	777.74	-51.40	1034.25	1715.13	-45.12
22.80	-185.11	-199.37	809.44	982.84	450.05	832.56	-154.90	1137.74	1818.62	-112.70
22.80	-188.73	-203.46	809.44	982.84	450.05	832.56	-158.08	1140.92	1821.80	-114.90
23.30	-332.27	-375.97	809.44	982.84	450.05	903.99	-292.11	1274.96	1955.84	-202.29
23.80	-478.31	-550.98	809.44	982.84	450.05	978.66	-428.08	1410.93	2091.81	-291.20
24.00	-478.31	-550.98	809.44	982.84	450.05	1009.44	-428.08	1410.93	2091.81	-291.20



Gambar 6. 9 Daerah Limit Kabel SNI Kelas U

6.3 Kelas T

6.3.1 Data Perancangan

Panjang bentang (L)	= 24.00 m
Tinggi balok pratekan (H)	= 1.06 m
Lebar balok pratekan (B)	= 0.40 m
Dimensi balok pratekan	= 40/100 cm
f'_c balok pratekan	= 40.00 MPa
f'_c pelat atap	= 40.00 MPa
f_{yu} tulangan pratekan	= 1770.00 MPa
f_y tulangan lunak	= 390.00 MPa
Jarak antar balok pratekan	= 6.00 m
Cover	= 40.00 mm
Tebal pelat (t_f)	= 14.00 cm

Untuk tebal pelat yang digunakan, perencanaan pada tiap lantai atap dengan balok pratekan ketebalan yang digunakan yaitu 14 cm.

D duct = 77.00 mm

6.3.2 Kuat Tekan Beton saat *jacking*

Tabel 6. 8 Perbandingan kuat tekan beton pada berbagai umur
(Departemen Pekerjaan Umum, 1971)

Umur beton (hari)	3	7	14	21	28	90	365
Semen portland biasa	0.40	0.65	0.88	0.95	1.00	1.20	1.35
Semen portland dengan kekuatan awal yang tinggi	0.55	0.75	0.90	0.95	1.00	1.15	1.20

Semen yang digunakan adalah semen Portland biasa tipe I, dan direncanakan di-*jacking* pada umur 14 hari,

Faktor koreksi untuk suhu, U dihitung dengan persamaan dari PBI 1971 Ps. 10.9.3. Direncanakan suhu = 30°C

$$U = \frac{\sum \Delta h(S + 10^\circ\text{C})}{30^\circ\text{C}}$$

Dimana:

S = Suhu dalam °C

h = hari.

U = waktu jacking setelah koreksi (hari)

$$U = \frac{14(30 + 10)}{30} = 18.67 \text{ hari}$$

Umur jacking akibat koreksi suhu adalah 18.67 hari sehingga interpolasi hasil dari tabel 6.1, koefisien adalah = 0.93.

$$f_{ci}' = 0.93 \times f_{c'}$$

$$f_{ci}' = 0.93 \times 40 = 37.07$$

Sehingga akibat koreksi U , maka kuat tekan inisial beton pada umur 14 hari, $f_{ci}' = 37.07$ MPa.

6.3.3 Penentuan Tegangan Izin Tendon dan Beton

SNI 2847:2013 Ps. 18.4.1 dan Ps. 18.5.1

Tegangan baja tidak boleh melampaui nilai-nilai berikut:

1. Tegangan izin akibat gaya pengangkur tendon 0.94 f_{py} , tetapi tidak lebih besar dari nilai terkecil dari 0.8 f_{pu} dan nilai maksimum yang direkomendasikan oleh pabrik pembuat tendon pratekan atau perangkat angkur.
2. Tendon pasca tarik pada daerah angkur dan sambungan sesaat setelah penyaluran gaya pratekan 0.70 f_{pu}

Namun berdasarkan T.Y Lin dan Burns perumusan diatas juga berlaku untuk tendon pratarik segera setelah peralihan gaya pratekan.

Tegangan izin pada beton tidak boleh melebihi nilai-nilai berikut:

a. Segera setelah peralihan gaya pratekan(sebelum kehilangan), tegangan serat-serat terluar memiliki nilai sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tekan pada tumpuan} &= \sigma_{tk} = 0.70f_{ci}' \\ &= -25.95 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tarik pada tumpuan} &= \sigma_{tr} = 0.50\sqrt{f_{ci}'} \\ &= 3.04 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tekan pada lapangan} &= \sigma_{tk} = 0.60f_{ci}' \\ &= -22.24 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tarik pada lapangan} &= \sigma_{tr} = 0.62\sqrt{f_{ci}'} \\ &= 3.77 \text{ MPa}\end{aligned}$$

b. Pada beban kerja setelah terjadi kehilangan gaya pratekan.

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tekan pada tumpuan} &= \sigma_{tk} = 0.45f_c' \\ &= -18.00 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tarik pada tumpuan} &= \sigma_{tr} = 0.62\sqrt{f_c'} \\ &= 3.92 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tekan pada lapangan} &= \sigma_{tk} = 0.45f_c' \\ &= -18.00 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tarik pada lapangan} &= \sigma_{tr} = 0.62\sqrt{f_c'} \\ &= 3.92 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Dimana :

f_{pu} = kuat tarik tendon pratekan yang diisyaratkan, MPa

f_{py} = kuat leleh tendon pratekan yang diisyaratkan, MPa

f_c = kuat tekan beton saat pemberian pratekan awal, MPa

f_{ci} = kuat tekan beton yang diisyaratkan, MPa

Besar gaya prategang yang dibutuhkan diambil berdasarkan beberapa persamaan, yaitu persamaan pada serat atas dan bawah tengah bentang saat transfer dan saat beban layan.

Pada perencanaan ini beton pratekan diizinkan tarik berdasarkan kelas U dengan tegangan izin tarik sebesar $1.00\sqrt{f'c'} = 6.32 \text{ MPa}$.

6.3.4 Rekapitulasi Pembebanan yang Terjadi

Tabel 6. 9 Rekapitulasi kombinasi pembebanan hasil ETABS

Kombinasi Pembebanan Ultimate		
1.4D		
Momen tumpuan kiri	-644.43	kNm
Momen lapangan	1991.37	kNm
Momen tumpuan kanan	-644.43	kNm
1.2D+1.6L		
Momen tumpuan kiri	-697.44	kNm
Momen lapangan	2156.78	kNm
Momen tumpuan kanan	-697.44	kNm
1.2D+1L+1EX Max		
Momen tumpuan kiri	-705.41	kNm
Momen lapangan	1988.08	kNm
Momen tumpuan kanan	-705.41	kNm
1.2D+1L+1EX Min		
Momen tumpuan kiri	-580.07	kNm
Momen lapangan	1988.08	kNm
Momen tumpuan kanan	-580.07	kNm
Vu	433.58	kN

Tu	158.95	kNm
Kombinasi Pembebanan Layan		
1D saat jacking		
Momen tumpuan kiri	-478.31	kNm
Momen lapangan	1359.49	kNm
Momen tumpuan kanan	-478.31	kNm
1D+1L		
Momen tumpuan kiri	-550.98	kNm
Momen lapangan	1703.59	kNm
Momen tumpuan kanan	-550.98	kNm
1D+1L+1EX Max		
Momen tumpuan kiri	-469.9	kNm
Momen lapangan	1703.63	kNm
Momen tumpuan kanan	-469.9	kNm
1D+1L+1EX Min		
Momen tumpuan kiri	-632.06	kNm
Momen lapangan	1703.63	kNm
Momen tumpuan kanan	-632.06	kNm

Untuk perhitungan struktur pratekan, SNI 2847:2013 Ps. 18.10.3 memberikan standar momen-momen yang digunakan untuk menghitung kekuatan perlu harus merupakan jumlah momen akibat reaksi yang ditimbulkan oleh prategang (dengan suatu faktor beban sebesar 1.00) dan momen akibat beban terfaktor.

Sehingga, untuk perhitungan kekuatan layan (*serviceability*) dan perhitungan gaya prategang, pembebanan yang dipakai adalah beban dengan faktor 1.00 sedangkan untuk menghitung kuat struktur tetap menggunakan kombinasi beban *ultimate*.

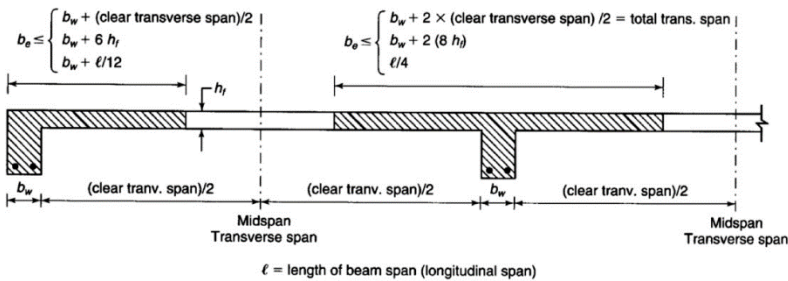
6.3.5 Analisis Penampang

6.3.5.1 Mencari lebar efektif:

SNI 2847:2013 Ps. 8.12.2

Dalam mencari lebar efektif (b_e), maka didasarkan pada perumusan yang terdapat pada SNI, dimana lebar efektif sayap balok T tidak boleh melebihi seperempat bentang balok, dan lebar efektif sayap dari masing-masing sisi badan balok tidak boleh melebihi:

- delapan kali tebal pelat
- setengah jarak bersih antara balok-balok yang bersebelahan



Gambar 6. 10 Parameter penentuan lebar efektif

$$B_c = \frac{L}{4} = \frac{24}{4} = 6.00 \text{ m}$$

$$B_e = b_w + 2(8tf) = 0.40 + 2(8 \times 0.14) = 2.64 \text{ m}$$

$$B_e = b_w + 2(\text{clear span}/2) = 0.4 + 2\left(\frac{6.00 - 0.40}{2}\right) = 6.00 \text{ m}$$

Sehingga nilai b_{eff} yang terkecil adalah 2.64 m. Sesuai dengan persyaratan pertama dimana lebar efektif sayap balok T tidak boleh melebihi seperempat bentang balok atau 6.00 m. Penggunaan lebar efektif di dalam perhitungan beton pratekan hanya digunakan

pada saat analisis tegangan yang terjadi pada beton pratekan sendiri, sementara untuk perhitungan beban yang ada lebar yang digunakan ialah sebesar 6.00 m, sesuai dengan jarak antar balok pratekan yang sesungguhnya.

Luas penampang balok pratekan didapat sebagai berikut:

$$A_{\text{pelat}} = \frac{b_e \times t_f}{n} = \frac{2.64 \times 0.14}{1} = 0.37 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{balok}} = b \times (h - t_f) = 0.40 \times (1.20 - 0.14) = 0.42 \text{ m}^2$$

Nilai statis momen garis netral penampang balok sebagai berikut:

$$c = \frac{h}{2} + t_f = \frac{1.06}{2} + 0.14 = 0.67 \text{ m}$$

$$y_t = \frac{\left(A_{\text{pelat}} \times \frac{t_f}{2}\right) + (A_{\text{balok}} \times c)}{A_{\text{total}}} \text{ mm}^3$$

$$y_t = \frac{(0.37 \times \frac{0.14}{2}) + (0.42 \times 0.67)}{0.79} = 0.39 \text{ m}$$

$$y_b = \text{cgc} = 1.2 - 0.39 = 0.81 \text{ m}$$

$$d_t = y_t - \frac{t_f}{2} = 0.39 - \frac{0.14}{2} = 0.32 \text{ m}$$

$$d_b = y_b - \frac{h - t_f}{2} = 0.81 - \frac{1.20 - 0.14}{2} = 0.28 \text{ m}$$

Setelah didapat data-data diatas diperlukan nilai batasan letak kabel tendon hendak dipasang yang disebut daerah limit kabel kabel. Tendon dipasang pada daerah yang menyebabkan beton menjadi tertekan dimana daerah tersebut dibatasi oleh nilai dan wilayah kern pada penampang balok.

Dimana:

$$K_t = \frac{W_b}{A_{\text{total}}} \text{ dan } K_b = \frac{W_t}{A_{\text{total}}}$$

$$W_t = \frac{I_{\text{komposit}}}{y_t} \text{ dan } W_b = \frac{I_{\text{komposit}}}{y_t}$$

Keterangan:

K_t = kern atas (m)

K_b = kern bawah (m)

I = momen inersia (m^4)

Nilai I_{komposit} didapat sebagai berikut:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 + (A_{\text{balok}} \times db^2) + \frac{1}{12}\frac{be}{n}tf^3 + (A_{\text{pelat}} \times dt^2)$$

$$I = \frac{1}{12} \times 0.4 \times 1.06^3 + (0.42 \times 0.28^2) + \frac{1}{12} \frac{2.64}{1} 0.14^3$$

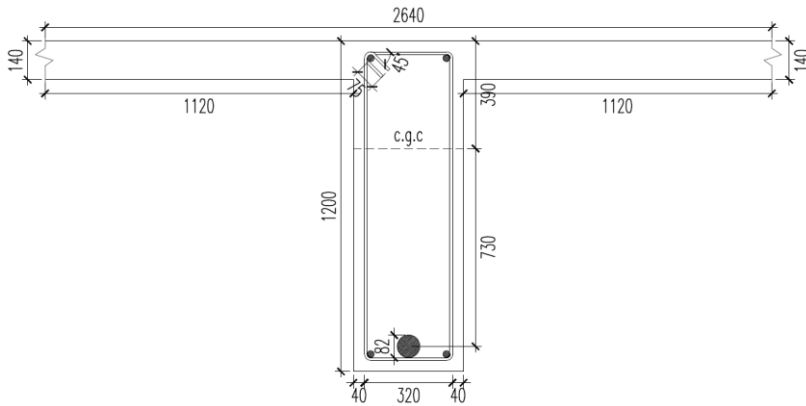
$$+ (0.37 \times 0.32^2) = 0.11 \text{ m}^4$$

$$W_t = \frac{I_{\text{komposit}}}{y_t} = \frac{0.11 \text{ m}^4}{0.39 \text{ m}} = 0.29 \text{ m}^3$$

$$W_b = \frac{I_{\text{komposit}}}{y_b} = \frac{0.11 \text{ m}^4}{0.81 \text{ m}} = 0.14 \text{ m}^3$$

$$K_t = \frac{W_b}{A_{\text{total}}} = \frac{0.14 \text{ m}^3}{0.79 \text{ m}^2} = 0.17 \text{ m}$$

$$K_b = \frac{W_t}{A_{\text{total}}} = \frac{0.29 \text{ m}^3}{0.79 \text{ m}^2} = 0.36 \text{ m}$$



Gambar 6. 11 Penampang balok tengah bentang

6.3.6 Penentuan Gaya Prategang Awal (F_o)

Digunakan decking (selimut beton) = 40 mm

Digunakan diameter tulangan lentur = 25 mm = D25

- Eksentrisitas pada tumpuan (e) = -200 = 200 mm (di atas cgc)
- Eksentrisitas tengah bentang (e) = $y_b - d' - 0.5 D_{tul} = 0.81 - 0.04 - 0.5 (0.025) = 0.73 \text{ m} = 730 \text{ mm}$

Besar gaya prategang yang dibutuhkan diambil berdasarkan beberapa persamaan, yaitu persamaan pada serat atas dan bawah tengah bentang saat transfer dan saat beban layan.

Kondisi saat *jacking* di lapangan:

Output dari ETABS dengan kombinasi 1D

Momen tumpuan kiri = -478.31 kNm

Momen lapangan = 1359.49 kNm

Momen tumpuan kanan = -478.31 kNm

Serat atas:

$$\sigma_t \geq -\frac{Fo}{A} + \frac{Fo \times e}{\frac{Wt}{Fo \times 0.73}} - \frac{M_{lapangan}}{\frac{Wt}{1359.49}}$$

$$3774.71 \geq -\frac{Fo}{0.79} + \frac{Fo \times 0.73}{0.29} - \frac{1359.49}{0.29}$$

$$Fo = 6556.53 \text{ kN}$$

Serat bawah:

$$\sigma_b \leq -\frac{Fo}{A} - \frac{Fo \times e}{\frac{Wb}{Fo \times 0.73}} + \frac{M_{lapangan}}{\frac{Wb}{1359.49}}$$

$$-22240 \leq -\frac{Fo}{0.79} - \frac{Fo \times 0.73}{0.14} + \frac{1359.49}{0.14}$$

$$Fo = 4887.63 \text{ kN}$$

Kondisi saat *jacking* di tumpuan:

Serat atas:

$$\sigma_t \leq -\frac{Fo}{A} + \frac{Fo \times e}{\frac{Wt}{Fo \times (-0.20)}} - \frac{M_{lapangan}}{\frac{Wt}{(-478.31)}}$$

$$-25946.67 \leq -\frac{Fo}{0.79} + \frac{Fo \times (-0.20)}{0.29} - \frac{(-478.31)}{0.29}$$

$$Fo = 14084.25 \text{ kN}$$

Serat bawah:

$$\sigma_b \geq -\frac{Fo}{A} - \frac{Fo \times e}{\frac{Wb}{Fo \times (-0.20)}} + \frac{M_{lapangan}}{\frac{Wb}{(-478.31)}}$$

$$3044.12 \geq -\frac{Fo}{0.79} - \frac{Fo \times (-0.20)}{0.14} + \frac{(-478.31)}{0.14}$$

$$Fo = 33742.45 \text{ kN}$$

Kondisi saat beban layan di lapangan:

Output dari ETABS dengan kombinasi 1D+1L

Momen tumpuan kiri = -550.98 kNm

Momen lapangan = 1703.59 kNm

Momen tumpuan kanan = -550.98 kNm

Serat atas:

$$\sigma_t \leq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{M_{lapangan}}{Wt}$$

$$-18000 \leq -\frac{Fe}{0.79} + \frac{Fe \times 0.73}{0.29} - \frac{1703.59}{0.29}$$

Fe = -9232.10 kN (asumsi kehilangan prategang 20%)

Fo = -11540.12 kN

Serat bawah:

$$\sigma_b \geq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{M_{lapangan}}{Wb}$$

$$6324.56 \geq -\frac{Fe}{0.79} - \frac{Fe \times 0.73}{0.14} + \frac{1703.59}{0.14}$$

Fe = 921.35 kN (asumsi kehilangan prategang 20%)

Fo = 1151.69 kN

Kondisi saat beban layan di tumpuan

Serat atas:

$$\sigma_t \geq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{M_{tumpuan}}{Wt}$$

$$-18000 \geq -\frac{Fe}{0.79} + \frac{Fe \times (-0.2)}{0.29} - \frac{(-550.98)}{0.29}$$

Fe = 10162.46 kN (asumsi kehilangan prategang 20%)

Fo = 12703.08 kN

Serat bawah:

$$\sigma_b \leq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{M_{tumpuan}}{Wb}$$

$$6324.56 \leq -\frac{Fe}{0.79} - \frac{Fe \times (-0.2)}{0.14} + \frac{(-550.98)}{0.14}$$

Fe = 53452.96 kN (asumsi kehilangan prategang 20%)

Fo = 66816.2 kN

Sehingga untuk tegangan awal, diberi:

Fo = 1178.44 kN

Asumsi kehilangan gaya prategang sebesar 20% maka,

Fe = 942.75 kN

Kontrol tegangan sebelum kehilangan:

Output dari ETABS dengan kombinasi 1D

Momen tumpuan kiri = -367.69 kNm

Momen lapangan = 1525.43 kNm

Momen tumpuan kanan = -367.69 kNm

Serat atas:

$$\begin{aligned}\sigma_t &\geq -\frac{Fo}{A} + \frac{Fo \times e}{Wt} - \frac{M_{lapangan}}{Wt} \\ 3774.71 &\geq -\frac{1178.44}{0.79} + \frac{1178.44 \times 0.73}{0.29} - \frac{1525.43}{0.29} \\ 3774.71 &\geq -3231.45 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}\sigma_b &\leq -\frac{Fo}{A} - \frac{Fo \times e}{Wb} + \frac{M_{lapangan}}{Wb} \\ 2134.69 &\leq -\frac{1178.44}{0.79} - \frac{1178.44 \times 0.73}{0.14} + \frac{1525.43}{0.14} \\ 2134.69 &\leq -22240.00 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

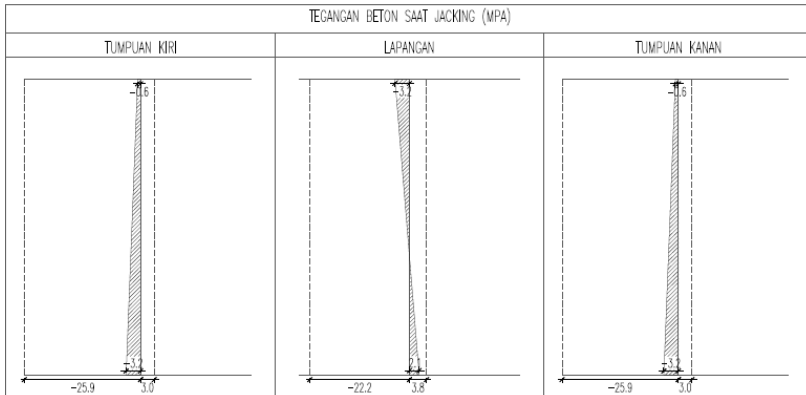
Kondisi saat *jacking* di tumpuan:

Serat atas:

$$\begin{aligned}\sigma_t &\leq -\frac{Fo}{A} + \frac{Fo \times e}{Wt} - \frac{M_{tumpuan}}{Wt} \\ -634.25 &\leq -\frac{1178.44}{0.79} + \frac{1178.44 \times (-0.20)}{0.29} - \frac{(-367.69)}{0.29} \\ -634.25 &\leq 3044.12 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}\sigma_b &\geq -\frac{Fo}{A} - \frac{Fo \times e}{Wb} + \frac{M_{tumpuan}}{Wb} \\ -3247.94 &\geq -\frac{1178.44}{0.79} - \frac{1178.44 \times (-0.20)}{0.14} + \frac{(-367.69)}{0.14} \\ -3247.94 &\geq -25946.67 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$



Gambar 6. 12 Diagram tegangan saat jacking

6.3.7 Penentuan Tendon

Tendon baja yang akan dipakai dengan spek dari *multistrand post-tensioning* sebagai berikut :

f_{pu} = 1770.00 MPa (*strand-stress-relieved*)

f_{pzin} 70% = 1239.00 MPa (*strand-stress-relieved*)

Luas tendon = F_o/f_{pzin} = 951.12 mm²

f_{py} = 1526.00 MPa (*strand-stress-relieved*)

Tendon baja yang akan dipakai dengan spek dari *multistrand post-tensioning* sebagai berikut :

Tendon unit = 6-12

jumlah strand = 8.00

Min breaking load = 2124 kN

D strand = 15.70 mm

jumlah tendon = 1.00

D duct = 77.00 mm

Luas tendon yang digunakan

A pakai = 1549.37 mm²

A pakai > A perlu OK

Nilai tegangan pakai

$$f_{\text{pakai}} = F_o/A_{\text{pakai}} = 760.60 \text{ Mpa}$$

6.3.8 Kehilangan Gaya Prategang

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1

Kehilangan pratekan adalah berkurangnya gaya pratekan dalam tendon saat tertentu disbanding pada saat stressing. Kehilangan pratekan dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori, yaitu:

6.3.8.1 Kehilangan Segera (kehilangan langsung)

Kehilangan langsung adalah kehilangan gaya awal pratekan sesaat setelah pemberian gaya pratekan pada komponen balok pratekan. Kehilangan secara langsung terdiri dari :

a. Kehilangan akibat slip angker

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1a

Kehilangan akibat pengangkuran/slip angkur terjadi saat tendon baja dilepas setelah mengalami penarikan dan gaya pratekan dialihkan ke angkur. Rumus perhitungan kehilangan pratekan akibat pengangkuran.

Cek apakah kehilangan pratekan akibat pengangkuran berpengaruh sampai ke tengah bentang :

$$x = \sqrt{\frac{Es \cdot x \cdot g}{f_{\text{pakai}} \cdot x \left(\mu \frac{\alpha}{L} + K \right)}}$$

Dimana:

- x = Panjang pengaruh slip angker (mm)
- Es = Modulus elastisitas baja prategang(MPa)
- f_{pakai} = Tegangan yang terjadi pada baja prategang(Mpa)
- μ = Koefisien friksi dari kurvatur baja prategang
- K = Koefisien *wobble effect*

- G = Besar selip dari angker, ambil nilai 2.5 (mm)
 f = fokus dari baja prategang, $e_{lap} + e_{tumpuan}$ (mm)
 α = sudut kelengkungan tendon ($8f/L$)
 L = bentang struktur beton (m)

Direncanakan tendon prategang berjenis multri (7-wires strand) dengan duct metal, sehingga sesuai dari Tabel 6.3, diambil nilai

$$K = 0.0016 \text{ /meter}$$

$$\mu = 0.19 \text{ /radial}$$

$$x = \sqrt{\frac{200000 \times 2.5}{760.60 \times (0.19 \frac{0.31}{24} + 0.0016)}} = 640.49 \text{ mm}$$

Sehingga diperoleh nilai dari $x = 640.49 \text{ mm} = 0.64 \text{ m}$. Dengan hasil perhitungan pengaruh pengangkurian sampai ke tumpuan kantilever $x < 12 \text{ m}$, maka kehilangan akibat pengangkurian tidak mempengaruhi.

Tabel 6. 10 Koefisien *Wobble effect* dan Koefisien Kurvatur
(Sumber: T. Y. & Burns, n.d.)

Type Tendon	Wobble effect Coefficient		Curvature Coefficient
	K/foot	K/meter	μ /radial
Tendon in flexible metal sheathing:	0.0010-0.0015	0.0033-0.0049	0.15-0.25 0.15-0.25 0.08-0.30
- Wire tendon	0.0005-	0.0016-	
- 7-wires strand	0.0020	0.0066	
- Hight-strength bars	0.0001-0.0006	0.0003-0.0020	

Tendon in Rigid Metal Duct 7-wires strand	0.0002	0.00066	0.15-0.25
Pregreased tendons Wire tendons and 7-wire strand	0.0003- 0.0020	0.0010- 0.0066	0.05-0.15
Mastic-Coated Tendons Wire tendons and 7-wire strand	0.0010- 0.0020	0.0033- 0.0066	0.05-0.15

b. Kehilangan akibat perpendekan elastis

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1b

Dikarenakan jumlah tendon yang digunakan hanya berjumlah 1 buah, maka kehilangan gaya pratekan akibat perpendekan elastis tidak mempengaruhi.

c. Kehilangan akibat gesekan (Wobble Effect)

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.2

Perhitungan kehilangan pratekan diakibatkan oleh gesekan antara material beton dan baja pratekan saat proses pemberian gaya pratekan. Kehilangan pratekan akibat gesekan (wobble effect) dihitung dengan perumusan sebagai berikut :

$$F_{pf} = F_o \times e^{-(\mu\alpha + KL)}$$

Dimana :

- F_{pf} = Kehilangan akibat gesekan (MPa)
- e = bilangan natural 2.73
- μ = Koefisien friksi dari kurvatur baja prategang
- K = Koefisien *wobble effect*
- α = sudut kelengkungan tendon ($8f/L$)

F_o = Gaya prategang awal yang diberikan (kN)

$$F_{pf} = 1178.44 \times e^{-(0.19 \times 0.31 + 0.0016 \times 24)} = 1069.12 \text{ kN}$$

$$\Delta F_{pf} = 1178.44 - 1490.15 = 109.32 \text{ kN}$$

$$\Delta f_{pf} = \frac{109.32}{A_p} = \frac{109.32}{1549.37} = 70.56 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat gesek adalah

$$\% \Delta f_{pf} = \frac{87.42}{760.60} = 9.28 \%$$

d. Kehilangan akibat kekangan kolom

Konstruksi beton pratekan dengan desain cor monolit perlu diperhitungkan kehilangan pratekan akibat kekangan kolom. Hal ini terjadi karena saat dilakukan jacking beton terkekang oleh kekakuan kolom. Gaya perlawanan yang diberikan oleh kolom menahan reaksi perpindahan beton akibat gaya jacking yang terjadi. Gaya perlawanan kolom ini menyebabkan berkurangnya gaya pratekan karena sebagian gaya pratekan yang diberikan digunakan mengatasi perlawanan gaya kolom.

Semakin kaku komponen kolom yang mengekang balok pratekan maka semakin besar gaya pratekan yang hilang untuk melawan kolom agar mengikuti lenturan balok akibat gaya jacking. Hal ini juga menyebabkan semakin besarnya momen yang diterima kolom sebagai kontribusi dari jacking yang terjadi. Sebaliknya jika kolom didesain tidak kaku maka gaya pratekan yang hilang semakin kecil serta momen yang diterima kolom juga berkurang.

Untuk mengeliminasi kehilangan prategang akibat kekangan kolom dan menghindari momen kumulatif yang terjadi pada dasar kolom lantai dasar, maka pada saat jacking, dasar kolom tiap lantai didesain dengan sendi, dalam realisasinya dilapangan menggunakan penampang lingkaran dan menggunakan pengegang spiral. Perubahan

penampang yang signifikan pada dasar kolom, memperkecil kemampuan kolom untuk menahan momen yang terjadi akibat jacking

Dapat di hitung kehilangan yang terjadi akibat desain sendi ini. Perumusan yang digunakan untuk kehilangan gaya pratekan akibat kekangan kolom ialah sebagai berikut :

$$\Delta F_k = \frac{M_B - M_A}{h}$$

Dari hasil perhitungan ETABS, diperoleh nilai maksimum nilai momen ialah sebagai berikut

$$M_B = -151.11 \text{ kNm}$$

$$M_A = -151.11 \text{ kNm}$$

$$\Delta F_k = \frac{(151.11 + 151.11)}{6} \times 10 = 50.37 \text{ kN}$$

$$\Delta f_k = \frac{50.37}{A_p} = \frac{50.37}{1549.37} = 32.51 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat kekangan kolom adalah

$$\% \Delta f_{fk} = \frac{32.51}{760.60} = 4.27 \%$$

6.3.8.2 Kehilangan yang tergantung oleh waktu (kehilangan tidak langsung)

Hilangnya gaya awal yang ada terjadi secara bertahap dan dalam waktu yang relatif lama (tidak secara langsung seketika saat pemberian gaya pratekan), adapun macam kehilangan tidak langsung adalah sebagai berikut:

a. Kehilangan akibat rangkai

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1c

$$CR = K_{cr} \times \left(\frac{E_s}{E_c} \right) \times (f_{cir} - f_{cds})$$

Dimana :

K_{cr} = 2 untuk metode pra-tarik

= 1,6 untuk metode pasca-tarik

f_{cds} = tegangan.beton didaerah c.g.s. akibat sluruh beban mati pada struktur setelah diberi gaya prategang

f_{cir} = tegangan beton didaerah c.g.s. akibat gaya awal pratekan

$$f_{cir} = \frac{F_o}{A} + \frac{F_o x e x e}{I}$$

$$f_{cir} = \frac{1178.44}{0.79} + \frac{1178.44 \times 0.73 \times 0.73}{0.11} = 7.14 MPa$$

$$f_{cds} = \frac{M x e}{I}$$

$$f_{cds} = \frac{1359.49 \times 0.73}{0.11} = 8.92 MPa$$

$$E_s/E_c = \frac{200000}{29725.41} = 6.73 Mpa$$

$$CR = 1.6 \times 6.73 \times (7.14 - 8.92) = 19.20 MPa$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat rangkai adalah

$$\% \Delta f_{CR} = \frac{-19.20}{760.60} = -2.52 \%$$

b. Kehilangan akibat susut

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1d

Rumus perhitungan kehilangan pratekan akibat susut :

$$SH = 8,2 \times 10^{-6} \cdot Ksh \cdot Es \cdot (1 - 0,0236(V/S)) \times (100 - RH)$$

Dimana:

SH = Kehilangan gaya prategang akibat susut beton (kN)

Ksh = 1 untuk Pra-tarik, 0.77 untuk pascatarik curing 7 hari

V/S = ratio volume dibagi luas permukaan

RH = kelembaban relative udara sekitar, Kota Aceh RH=84 (%)

$$\frac{V}{S} = \frac{\text{luas penampang beton}}{\text{keliling penampang beton}} = \frac{0.79 \times 1000}{7.68} = 10.33 \text{ cm}$$

$$SH = 8,2 \times 10^{-6} \times 0.77 \times 200000 \times (1 - 0.0236 \times 6.73) \times (100 - 84) \\ = 0.15 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat rangkai adalah

$$\% \Delta f_{SH} = \frac{0.15}{760.60} = 0.02 \%$$

c. Kehilangan akibat relaksasi baja

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1e

Relaksasi baja adalah berkurangnya tegangan dalam baja akibat berjalannya waktu pada panjang tetap.

Perumusan yang digunakan ini ialah perumusan yang digunakan oleh komisi PCI untuk menyelesaikan serangkaian permasalahan akibat relaksasi baja

Rumus perhitungan kehilangan pratekan akibat relaksasi baja:

$$RE = [Kre - J(SH + CR + ES)]C$$

Dimana:

RE = Kehilangan gaya prategang akibat relaksasi baja (kN)

Kre = Koefisien baja prategang (MPa) lihat Tabel 6.4

J = Koefisien baja prategang lihat Tabel 6.4

C = Koefisien akibat tegangan yang terjadi pada baja prategang lihat Tabel 6.3

Perencanaan digunakan tendon strand *stress relieved* dengan mutu 1770MPa, sehingga diambil nilai:

$$K_{re} = 128 \text{ MPa}$$

$$J = 0.14$$

$$C = 0.49$$

$$RE = [128 - 0.14 (0.15 + 11.06 + 0.00)] \times 0.49 = 62.71 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat relaksasi baja adalah

$$\% \Delta f_{RE} = \frac{62.71}{760.60} = 8.24 \%$$

Total kehilangan prategang:

$$\% \Delta f = \% \Delta f_A + \% \Delta f_{ES} + \% \Delta f_{FK} + \% \Delta f_{CR} + \% \Delta f_{SH} + \% \Delta f_{RE}$$

$$\begin{aligned} \% \Delta f &= 9.28\% + 4.27\% + (-2.52\%) + 0.02\% + 8.24\% \\ &= 21.82\% \end{aligned}$$

Sehingga $F_e = 921.35 \text{ kN}$

Tabel 6. 11 Nilai K_{re} dan J (T. Y. & Burns, n.d.)

Type of tendon	K_{re}	J
Strand atau wire stress-relieved Derajat 1860 MPa	138	0.15
Strand atau wire stress-relieved Derajat 1720 MPa	128	0.14
Kawat stress-relieved derajat 1655 atau 1620 MPa	121	0.13
Strand low-relaxation derajat 1860 MPa	35	0.04
Kawat low-relaxation derajat 1720 MPa	32	0.037
Kawat low-relaxation derajat 1655 atau 1620 MPa	30	0.025
Batang stress-relieved derajat 1000 atau 1100 MPa	40	0.05

Tabel 6. 12 Nilai C (T. Y. & Burns, n.d.)

fpi/fpu	Stress relieved strand or wire	Stress-relieved bar or low relaxation strand or wire
0.80	-	1.28
0.79	-	1.22
0.78	-	1.16
0.77	-	1.10
0.76	-	1.05
0.75	1.45	1.00
0.74	1.36	0.95
0.73	1.27	0.90
0.72	1.18	0.85
0.71	1.09	0.80
0.70	1.00	0.75
0.69	0.94	0.70
0.68	0.89	0.66
0.67	0.83	0.61
0.66	0.78	0.57
0.65	0.73	0.53
0.64	0.68	0.49
0.63	0.63	0.45
0.62	0.58	0.41
0.61	0.53	0.37
0.60	0.49	0.33

6.3.9 Kontrol Gaya Setelah Kehilangan Prategang

6.3.9.1 Kontrol Akibat Beban Layan

Kondisi saat beban layan di lapangan:

Output dari ETABS dengan kombinasi 1D+1L

Momen tumpuan kiri = -550.98 kNm

Momen lapangan = 1703.59 kNm

Momen tumpuan kanan = -550.98 kNm

Serat atas:

$$\begin{aligned}
 \sigma_t &\leq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{M_{lapangan}}{Wt} \\
 -18000 &\leq -\frac{921.35}{0.79} + \frac{921.35 \times 0.73}{0.29} - \frac{1703.59}{0.29} \\
 -18000 &\leq -4772.86 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &\geq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{M_{lapangan}}{Wb} \\
 6324.56 &\geq -\frac{921.35}{0.79} - \frac{921.35 \times 0.73}{0.14} + \frac{1703.59}{0.14} \\
 6324.56 &\geq 6324.56 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

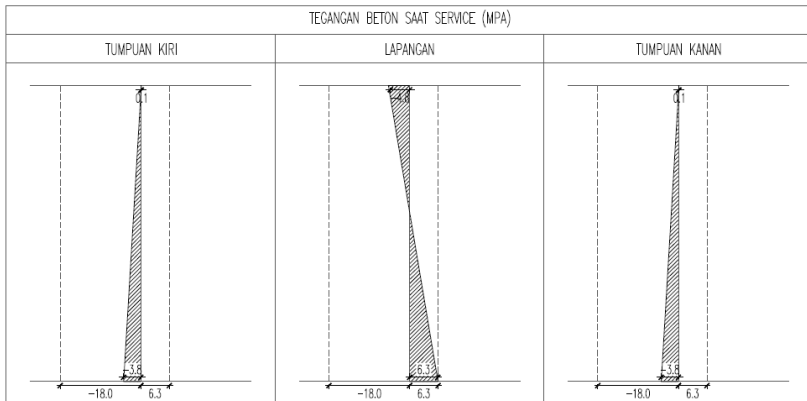
Kondisi saat beban layan di tumpuan

Serat atas :

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &= -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{M_{tumpuan}}{Wb} \\
 124.78 &\leq -\frac{921.35}{0.79} - \frac{921.35 \times (-0.2)}{0.14} + \frac{(-550.98)}{0.14} \\
 124.78 &\leq 6324.56 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Serat bawah :

$$\begin{aligned}
 \sigma_t &\geq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{M_{tumpuan}}{Wt} \\
 -3825.68 &\geq -\frac{921.35}{0.79} + \frac{921.35 \times (-0.2)}{0.29} - \frac{(-550.98)}{0.29} \\
 -3825.68 &\geq -18000.00 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$



Gambar 6. 13 Diagram tegangan saat beban layan

6.3.9.2 Kontrol Persyaratan SPRMK

SNI 2847:2013 Ps 21.5.2.5

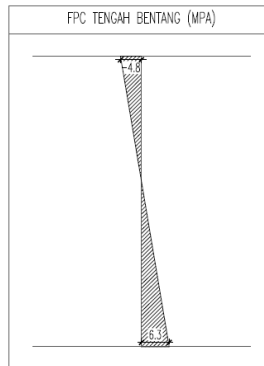
Prategang rata-rata, f_{pc} , yang dihitung untuk luas yang sama dengan dimensi penampang komponen struktur terkecil yang dikalikan dengan dimensi penampang tegak lurus tidak boleh melebihi yang lebih kecil dari 3,5 MPa dan $f'_c/10$.

f_{pc} adalah tegangan tekan beton (setelah semua kehilangan gaya terjadi) di titik berat penampang yang menahan beban terapan luar, atau di permukaan badan dan sayap bila titik berat berada dalam sayap (MPa). Dalam komponen struktur komposit, f_{pc} adalah tegangan tekan resultan di pusat penampang komposit, atau di pertemuan badan dan sayap bila titik berat berada dalam sayap, akibat baik prategang maupun momen yang ditahan oleh komponen struktur pracetak yang bekerja sendirian.

$f'_c/10 = 40/10 = 4 \text{ Mpa}$ dan 3.50 Mpa
maka diambil nilai 3.50 Mpa

Tegangan di tengah bentang setelah kehilangan prategang:

Serat atas = -4.77 MPa
 Serat bawah = 6.32 MPa
 $f_{pc} = (y_b/y_{tot}) \times (-4.30 - 3.92) + 3.92 = -1.16 \text{ MPa}$
 $< 3.50 \text{ MPa OK}$



Gambar 6. 14 Diagram tegangan setelah kehilangan prategang

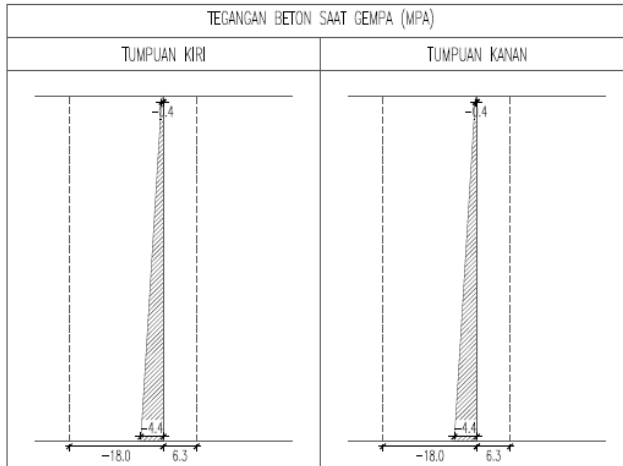
6.3.9.3 Kontrol Momen Gempa SPRMK

Menurut SNI 2847:2013, tendon pratekan diperbolehkan menerima 25% momen positif atau negatif.

Ketika terjadi gempa dan beban hidup maksimum output dari ETABS dengan kombinasi 1D+1L+ Ex

Momen tumpuan (kiri) = -632.06 kNm

Momen tumpuan (kanan) = -632.06 kNm



Gambar 6. 15 Diagram tegangan pada tumpuan saat terjadi gempa

Momen tumpuan kiri

Kondisi saat beban layan di tumpuan

Serat atas:

$$\begin{aligned}
 \sigma_t &\leq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{Mtumpuan}{Wt} \\
 -18000 &\leq -\frac{921.35}{0.79} + \frac{921.35 \times (-0.2)}{0.20} - \frac{(-632.06)}{0.20} \\
 -18000 &\leq 409.06 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &\geq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{Mtumpuan}{Wb} \\
 6324.56 &\geq -\frac{921.35}{0.79} - \frac{921.35 \times (-0.2)}{0.14} + \frac{(-632.06)}{0.14} \\
 6324.56 &\geq -4414.85 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Momen tumpuan kanan

Kondisi saat beban layan di tumpuan

Serat atas:

$$\begin{aligned}
\sigma_t &\leq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{Mtumpuan}{Wt} \\
-18000 &\leq -\frac{921.35}{0.79} + \frac{921.35 \times (-0.2)}{0.20} - \frac{(-632.06)}{0.20} \\
-18000 &\leq 409.06 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
\end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}
\sigma_b &\geq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{Mtumpuan}{Wb} \\
3921.22 &\geq -\frac{921.35}{0.79} - \frac{921.35 \times (-0.2)}{0.14} + \frac{(-632.06)}{0.14} \\
3921.22 &\geq -4414.85 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
\end{aligned}$$

Kontrol lentur yang dilakukan terhadap beton pratekan sudah memenuhi syarat, baik saat sebelum atau sesudah kehilangan pratekan dengan F_o sebesar 1178.44 kN. Lihat gambar 6.6

6.3.9.4 Perhitungan Lendutan

Kemampuan layan struktur beton pratekan ditinjau dari perilaku defleksi komponen tersebut. Elemen beton pratekan memiliki dimensi yang lebih langsing dibanding beton bertulang biasa sehingga kontrol lendutan sangat diperlukan untuk memenuhi batas layan yang disyaratkan pada SNI 2847:2013 tabel 9.5.b.

$$f_{izin} = \frac{L}{480} = \frac{24000}{480} = 50.00 \text{ mm}$$

Lendutan saat *jacking*

4. Lendutan akibat tekanan tendon

Tekanan tendon menyebabkan balok tertekuk keatas sehingga lendutan yang terjadi berupa lendutan keatas (*chamber*).

$$\begin{aligned}
p' &= 8 \times F_o \times f / L^2 \\
&= 8 \times 1178440 \times 930.94 / (24000)^2 \\
&= 15.24 \text{ N/mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta p' &= 5/384 \times (p' \times l^4 / (E_c \times I)) \\
 &= 5/384 \times (15.24 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.11 \times 10^{12})) \\
 &= 19.88 \text{ mm } (\uparrow)
 \end{aligned}$$

5. Lendutan akibat momen yang terjadi pada portal

Dalam perhitungan lendutan pada portal akibat beban sendiri balok prategang, pelat, dan beban hidup, maka Analisis lendutan yang dilakukan adalah sebagai keutuhan portal, bukan lendutan balok diatas dua tumpuan. Perumusan yang digunakan dalam perhitungan lendutan balok prategang dalam portal adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \Delta g &= 5/48 \times (L^4 / (E_c \times I)) \times (M_b - 0.1(M_{a1} + M_{a2})) \\
 &= -\frac{5}{48} \times \frac{(1359.49 - 0.1(-478.31 - 478.31)) 24000^4}{29725.41 \times 0.11 \times 10^{12}} \\
 &= 26.37 \text{ mm } (\downarrow)
 \end{aligned}$$

6. Lendutan akibat beban sendiri balok

$$q_o = W \times A = 2400 \times 0.79 = 1904.64 \text{ kg/m}^3 = 19.05 \text{ N/mm}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta q_o &= 5/384 \times (q_o \times l^4 / (E_c \times I)) \\
 &= 5/384 \times (19.05 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.11 \times 10^{12})) \\
 &= 24.85 \text{ mm } (\downarrow)
 \end{aligned}$$

$$\Delta \text{ total} = -19.88 + 26.37 + 24.85 = 31.34 (\downarrow) < 50.00 \text{ mm (OK)}$$

Lendutan saat beban layan

4. Lendutan akibat tekanan tendon

$$\begin{aligned}
 p' &= 8 \times F_e \times f / L^2 \\
 &= 8 \times (921.35 \times 1000) \times 930.94 / (24000)^2 \\
 &= 11.91 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\Delta p' = 5/384 \times (p' \times L^4 / (E_c \times I))$$

$$= 5/384 \times (11.91 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.11 \times 10^{12}))$$

$$= 15.54 \text{ mm } (\uparrow)$$

5. Lendutan akibat momen yang terjadi pada portal

$$\Delta g = 5/48 \times (L^4 / (E_c \times I)) \times (M_b - 0.1(M_{a1} + M_{a2}))$$

$$= \frac{5}{48} \times \frac{(1703.59 - 0.1(-550.98 - 550.98)) 24000^4}{29725.41 \times 0.11 \times 10^{12}}$$

$$= 32.87 \text{ mm } (\downarrow)$$

6. Lendutan akibat beban sendiri balok

$$q_o = W \times A = 2400 \times 0.79 = 1904.64 \text{ kg/m}^3 = 19.05 \text{ N/mm}$$

$$\Delta q_o = 5/384 \times (q_o \times l^4 / (E_c \times I))$$

$$= 5/384 \times (19.05 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.11 \times 10^{12}))$$

$$= 24.85 \text{ mm } (\downarrow)$$

$$\Delta \text{ total} = -15.54 + 32.87 + 24.85 = 42.71 (\downarrow) < 50.00 \text{ mm (OK)}$$

6.3.10 Perhitungan Momen Nominal

Menurut SNI 2847:2013, pasal. 21.5.2.5, baja prategang tidak boleh menyumbang lebih dari seperempat kekuatan lentur positif atau negatif di penampang kritis pada daerah sendi plastis dan harus diangkur pada atau melewati muka eksterior joint.

a. Momen Nominal Tendon Prategang pada Tumpuan

(SNI 2847:2013 Ps. 18.7)

Kuat lentur komponen struktur prategang dapat dihitung menggunakan asumsi yang seperti pada komponen struktur nonprategang Tendon prategang tidak mempunyai titik leleh yang pasti seperti halnya tulangan lunak

Ketika panampang prategang mencapai kuat lenturnya (didefinisikan dengan regangan beton tekan maksimum sebesar

0,003), tegangan di baja prategang pada kekuatan nominal f_{ps} , akan sangat bervariasi tergantung pada jumlah prategangnya

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \rho_p \frac{f_{pu}}{f_{c'}} \right]$$

f_{ps} = tegangan pada tendon disaat penampang mencapai kuat nominalnya, MPa

f_{pu} = kuat tarik tendon prategang yang disyaratkan MPa

γ_p = faktor yang memperhitungkan tipe tendon prategang

= 0.55 tulangan ulir ($f_{py}/f_{pu} \geq 0.80$)

= 0.40 kawat dan strand *stress-relieved* ($f_{py}/f_{pu} \geq 0.85$)

= 0.28 kawat dan strand relaksasi rendah ($f_{py}/f_{pu} \geq 0.90$)

d = jarak serat tekan terluar ke titik berat tulangan tekan, mm

d_p = jarak serat tekan terluar ke titik berat tendon, mm

Sehingga direncanakan:

$f_{c'}$ = 40.00 MPa

β_1 = 0.76

γ_p = 0.40

b_w = 400.00 mm

B_{eff} = 2640 mm

d_p = 749.44 mm

A_{ps} = 1549.37 mm²

ρ_p = 0.01

f_{pu} = 1770.0 MPa

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \rho_p \frac{f_{pu}}{f_{c'}} \right]$$

$$f_{ps} = 1770 \times \left[1 - \frac{0.40}{0.76} \times 0.01 \times \frac{1770.0}{40} \right] = 1558.14 \text{ MPa}$$

$$T = A_{ps} \times f_{ps} = 2414127.54 \text{ N}$$

$$C = T$$

$$\text{Luas daerah tekan} = C/f_c' = 71003.75 \text{ mm}^2$$

$$a = 71003.75 / 0.85 \times b_w = 177.51 \text{ mm}$$

$$M_n = T \times \left[d - \frac{a}{2} \right]$$

$$M_n = 2414127.54 \times \left[749.44 - \frac{177.51}{2} \right] = 1594967704.77 \text{ Nmm}$$

$$= 1549.97 \text{ kNm}$$

$$\phi M_n = 1435.47 > 705.41 \text{ kNm (OK)}$$

b. Momen Nominal Tendon Prategang pada Lapangan

Direncanakan:

$$f_c' = 40.00 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0.76$$

$$\gamma_p = 0.40$$

$$b_w = 400.00 \text{ mm}$$

$$B_{\text{eff}} = 2640 \text{ mm}$$

$$d_p = 1111.50 \text{ mm}$$

$$A_{ps} = 1549.37 \text{ mm}^2$$

$$\rho_p = 0.01$$

$$f_{pu} = 1770.0 \text{ MPa}$$

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \rho_p \frac{f_{pu}}{f_c'} \right]$$

$$f_{ps} = 1770 \times \left[1 - \frac{0.40}{0.76} \times 0.01 \times \frac{1770}{40} \right] = 1558.14 \text{ MPa}$$

$$T = A_{ps} \times f_{ps} = 2414127.54 \text{ N}$$

$$C = T$$

$$\text{Luas daerah tekan} = C/f_c' = 71003.75 \text{ mm}^2$$

$$a = 71003.75 / 0.85 \times b_{\text{eff}} = 26.90 \text{ mm}$$

$a < t_f$, maka dihitung seperti balok biasa

$$Mn = T \times \left[d - \frac{a}{2} \right]$$

$$Mn = 2414127.54 \times \left[1111.50 - \frac{26.90}{2} \right] = 2650838350.76 \text{ Nmm}$$

$$= 2650.84 \text{ kNm}$$

$$\phi Mn = 2385.75 > 2156.78 \text{ kNm (OK)}$$

c. Perencanaan kebutuhan tulangan lunak sendi plastis:

Menurut SNI 2847:2013, pasal. 21.5.2.5, baja prategang tidak boleh menyumbang lebih dari seperempat kekuatan lentur positif atau negatif di penampang kritis pada daerah sendi plastis dan harus diangkur pada atau melewati muka eksterior joint.

Sehingga momen yang harus ditanggung tulangan lunak di daerah sendi plastis adalah $\mu - 25\% \phi Mn = 705.41 - 358.87 = 346.54 \text{ kNm}$. Jadi momen yang digunakan untuk perhitungan tulangan lunak adalah 346.54 kNm

Direncanakan:

$$f_c' = 40.00 \text{ Mpa}$$

$$f_y = 390.00 \text{ Mpa}$$

$$b_w = 400.00 \text{ mm}$$

$$H = 1200.00 \text{ m}$$

$$L = 24.00 \text{ m}$$

$$D_{\text{lentur}} = 25.00 \text{ mm}$$

$$D_{\text{Sengkan}} = 10.00 \text{ mm}$$

$$\text{cover} = 40.00 \text{ mm}$$

$$d = 1137.50 \text{ mm}$$

$$\rho_{\min} = \frac{1.4}{f_y} = \frac{1.4}{390} = 0.0036$$

$$\rho_{min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4 \times f_y} = \frac{\sqrt{40}}{4 \times 390} = 0.00405$$

Jadi dipakai $\rho_{min} = 0.00405$

Karena mutu beton berada di atas 28 MPa, maka nilai β_1 , digunakan perumusan sesuai dengan (SNI 2847:2013 ps 12.2.7.3)

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left(\frac{f'_c - 28}{7} \right) = 0.76$$

$$\rho_{bal} = \frac{0,85\beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) = \frac{0,85 \times 0.76 \times 40}{390} \left(\frac{600}{600 + 390} \right)$$

$$\rho_{bal} = 0.0404$$

Agar menjaga agar beton terkontrol tarik, maka $\rho_{max} = 0.75 \rho_{bal}$

$$\rho_{max} = 0.0303$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f'_c} = \frac{390}{0.85 \times 40} = 11.47$$

$$Rn = \frac{Mu}{\phi b d^2} = \frac{346.54 \times 10^6}{0.9 \times 400 \times 1137.5^2} = 0.74 \text{ MPa}$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times m \times Rn}{f_y}} \right)$$

$$\rho = \frac{1}{11.47} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 11.47 \times 0.74}{390}} \right) = 0.00193$$

Syarat:

$$\rho_{min} < \rho_{pakai} < \rho_{max}$$

$$\text{Maka } \rho_{pakai} = \rho_{min} = 0.00405$$

Menentukan luas tulangan atas (As) dari ρ yang didapat:

$$As = \rho b d = 0.00405 \times 400 \times 1137.50 = 1844.66 \text{ mm}^2$$

Direncanakan dengan tulangan D25, maka

$$n = \frac{As_{perlu}}{0.25 \pi \phi^2} = \frac{1844.66}{0.25 \times \pi \times 25^2} = 4$$

Direncanakan tulangan lentur untuk menahan beban gempa pada daerah sendi plastis adalah 4D25 atas bawah, karena gempa yang terjadi 2 arah.

6.3.11 Kontrol Retak

Perhitungan kuat ultimate dari beton pratekan harus memenuhi persyaratan SNI 2847:2013 Ps.18.8.2 mengenai jumlah total baja tulangan non pratekan dan pratekan harus cukup untuk menghasilkan beban terfaktor paling sedikit 1.2 beban retak yang terjadi berdasarkan nilai modulus retak sebesar $0.62 \sqrt{f'c'}$ sehingga didapatkan $\phi Mn > 1.2Mcr$, dengan nilai $\phi = 0.8$.

Momen Retak (Mcr) pada struktur beton pratekan, dihitung berdasar teori elastis. Retak terjadi apabila serat beton terjauh mencapai: *Modulus of rupture* ($f_r = 0.62 \sqrt{f'c'}$)

$$-\frac{F}{A} - \frac{F \cdot e}{Wb} + \frac{Mcr}{Wb} = fr$$

$$Mcr = F \cdot e + \frac{F \cdot Wb}{A} + fr \cdot Wb = F(e + kt) + fr \cdot Wb$$

Dimana:

Mcr = Momen saat serat bawah beton mengalami retak (kNm)

F = Gaya Prategang (N)

e = eksentrisitas tendon tengah bentang (m)

fr = Tegangan tarik dari beton (MPa)

$(F \times (e+kt))$ sering disebut sebagai momen dekompresi, sedangkan $(fr \times Wb)$ adalah sumbangan dari tegangan tarik beton.

$$fr = 0.62 \sqrt{f'_c} = 0.62 \sqrt{40} = 3.92 \text{ Mpa}$$

$$I_g = 111392600430.11 \text{ mm}^4$$

$$y_t = 390.56 \text{ mm}$$

a. Tumpuan

$$F = 921.35 \text{ kN}$$

$$e = 0.20 \text{ m}$$

$$k_b = 0.36 \text{ m}$$

$$W_t = 285209218.53 \text{ mm}^3$$

$$M1 = 921.35 \times (0.20+0.36) = 515391810.67 \text{ Nmm}$$

$$= 515.39 \text{ kNm}$$

$$M2 = 3.92 \times 285209218.53 = 1118369317.88 \text{ Nmm}$$

$$= 1118.37 \text{ kNm}$$

$$Mcr = 1633.76 \text{ kNm}$$

syarat $\phi M_n > 1.2 M_{cr}$

$$2200.32 > 1960.51 \text{ kNm (OK)}$$

b. Lapangan

$$F = 921.35 \text{ kN}$$

$$e = 0.73 \text{ m}$$

$$k_t = 0.17 \text{ m}$$

$$W_b = 137617639.27 \text{ mm}^3$$

$$M_1 = 921.35 \times (0.73 + 0.17) = 833219627.40 \text{ Nmm}$$

$$= 833.22 \text{ kNm}$$

$$M_2 = 3.92 \times 285209218.53 = 539629631.02 \text{ Nmm}$$

$$= 539.630 \text{ kNm}$$

$$M_{cr} = 1372.85 \text{ kNm}$$

$$\text{syarat } \phi M_n > 1.2 M_{cr}$$

$$2385.75 > 1647.42 \text{ kNm (OK)}$$

Sehingga dengan kontrol momen retak maka hasil perhitungan beton pratekan telah memenuhi persyaratan.

6.3.12 Perhitungan Tulangan Geser

Perhitungan Tulangan Geser yang dipengaruhi beban gempa dihitung dari kapasitas balok memikul momen probable.

Menurut SNI 2847:2013 Pasal 21.3, gaya geser rencana V_e harus ditentukan dari peninjauan gaya statik pada bagian tumpuan. Momen-momen dengan tanda berlawanan sehubungan dengan kuat lentur maximum M_{pr} , harus dianggap bekerja pada muka-muka tumpuan, dan komponen struktur tersebut dibebani penuh beban gravitasi terfaktor serta V_e harus dicari dari nilai terbesar akibat beban gempa arah ke kanan dan ke kiri.

M_{pr} merupakan kuat momen lentur mungkin dari suatu komponen struktur yang ditentukan menggunakan sifat-sifat komponen struktur pada muka join dengan menganggap kuat tarik pada tulangan longitudinal sebesar minimum $1,25 f_y$.

Besarnya momen probable dipengaruhi oleh disain kemampuan tulangan lenturnya. Harga momen probable dapat dicari dengan rumus berikut:

$$M_{pr} = \left[(A_s \times f_s' - A_s' \times f_s') \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \right] + [A_s' \times f_s' \times (d - d')]$$

$$a = \frac{A_s \times f_s}{0.85 \times f_c' \times b}$$

Dimana:

f_s = $1.25 f_y = 1.25 \times 390 = 487.5$ MPa

f_s' = Tegangan dari tulangan tekan (MPa)

A_s' = Luas penampang tulangan tekan (mm²)

D' = Jarak antara serat tarik ke tulangan tekan (mm)

Tabel 6. 13 Rekapitulasi perhitungan M_{pr}

Lokasi	n	D_{tul}	A_s (mm ²)	a (mm)	M_{pr} (kNm)
Gempa tumpuan kanan +	4.00	25	1964.29	10.67	1084.15
Gempa tumpuan kanan -	4.00	25	1964.29	70.41	1055.55
Gempa tumpuan kiri +	4.00	25	1964.29	10.67	1084.15
Gempa tumpuan kiri -	4.00	25	1964.29	70.41	1055.55

6.3.12.1 Menghitung kebutuhan Tulangan Geser didalam sendi plastis

Menghitung V_e :

$$V_e = \frac{M_{pr1} \pm M_{pr2}}{l_n} \pm V_u$$

Dimana:

V_e = Gaya geser efektif yang terjadi di sendi plastis (kN)

M_{pr} = Momen probable (kNm)

V_u = Geser gravitasi dari ETABS (kN)

l_n = bentang bersih (m)

Gaya geser akibat gravitasi, V_u at d

$$V_u = 433.58 \text{ kN}$$

$$M_{pr1} = 1084.15 \text{ kNm}$$

$$M_{pr2} = 1055.55 \text{ kNm}$$

$$l_n = 24.00 - 0.40 = 23.60 \text{ m}$$

$$V_e = \frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{l_n} + V_u$$

$$V_e = \frac{1085.15 + 1055.55}{23.6} + 433.58 = 524.25 \text{ kN}$$

$$V_e = \frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{l_n} - V_u$$

$$V_e = \frac{1085.15 + 1055.55}{23.6} - 433.58 = -342.91 \text{ kN}$$

$$V_e = \frac{M_{pr1} - M_{pr2}}{l_n} + V_u$$

$$V_e = \frac{1085.15 - 1055.55}{23.6} + 433.58 = 432.37 \text{ kN}$$

$$V_e = \frac{M_{pr1} - M_{pr2}}{l_n} - V_u$$

$$V_e = \frac{1085.15 - 1055.55}{23.6} - 433.58 = -434.79 \text{ kN}$$

Maka diambil V_e yang terbesar sebagai beban pada sendi plastis, yaitu 524.25 kN.

Tulangan transversal untuk memikul geser dengan menganggap $V_c=0$ bila memenuhi persyaratan:

3. Gaya geser akibat gempa (M_{pr}) > 0,5 x total geser akibat kombinasi gempa dan gravitasi (1,2D + 1L)

$$V_e = \frac{1085.15 + 1055.55}{23.6} = 90.67 \text{ kN}$$

$$0.5 \times 433.58 = 216.79 \text{ kN} > 90.67 \text{ kN (NOT OK)}$$

4. Gaya aksial tekan < 0,2 x $A_g \times f'_c = 0.2 \times (400 \times 1200) \times 40 = 1587.20 \text{ kN}$

Gaya aksial P_u pada balok dari ETABS sebesar 166.05 kN < 1587.20 kN maka syarat ke-2 memenuhi (OK)

Tidak kedua syarat terpenuhi, maka $V_c \neq 0$. Perhitungan V_c dengan rumus sebagai berikut,

SNI 2847:2013 Ps. 11.3.2 memberikan perumusan besar tegangan geser yang dapat ditahan beton prategang:

$$V_c = \left(0.05 \times \lambda \times \sqrt{f'c'} + 4.8 \frac{V_u \times dp}{Mu} \right) \times bw \times d$$

Dimana:

V_c = Besar gaya geser yang dapat dipikul beton (kN)

λ = Beton normal, nilai = 1.00

dp = Jarak dari serat atas tekan ke titik berat tendon (mm)

M_u = Besar momen ultimate di tengah bentang (kNm)

V_u = Besar gaya geser ultimate sejauh d (kN)

$$V_c = \left(0.05 \times \lambda \times \sqrt{f'c'} + 4.8 \frac{V_u \times dp}{Mu} \right) \times bw \times d$$

$$V_c = \left(0.05 \times 1 \times \sqrt{40} + 4.8 \frac{433.58 \times 797.44}{2156.78} \right) \times 400 \times 1137.50$$

$$V_c = 472.92 \text{ kN}$$

$$V_{cmin} = \left(0.17 \times \lambda \times \sqrt{f'c'} \right) \times bw \times d$$

$$V_{cmin} = \left(0.17 \times 1 \times \sqrt{40} \right) \times 400 \times 1137.50 = 489.20 \text{ kN}$$

$$V_{cmax} = \left(0.42 \times \lambda \times \sqrt{f'c'} \right) \times bw \times d$$

$$V_{cmax} = \left(0.42 \times 1 \times \sqrt{40} \right) \times 400 \times 1137.50 = 1208.62 \text{ kN}$$

Maka digunakan $V_c = 489.20 \text{ kN}$

Menghitung gaya geser yang harus ditanggung tulangan (V_s):

$$V_s = V_e - V_c$$

$$V_s = 209.79 \text{ kN}$$

$$\text{Sehingga } A_s \text{ perlu} = V_s / f_y = 537.92 \text{ mm}^2$$

$$\text{Direncanakan diameter} = 10.00 \text{ mm}$$

$$\text{Luas double stirup} = 157.14 \text{ mm}^2$$

Jarak maksimum antar sengkang yang tertutup pada sendi plastis tidak boleh melebihi SNI 2847:2013 Ps.21.5.3.2:

$$s_{\max 1} = d/4 = 187.36 \text{ mm}$$

$$s_{\max 2} = 6d = 150.00 \text{ mm}$$

$$s_{\max 3} = 150.00 \text{ mm}$$

$$\text{diambil } s = 150.00 \text{ mm}$$

$$\text{Direncanakan} = D10-150$$

Dipasang dari jarak maksimum 50.00 mm dari muka kolom, hingga jarak sendi plastis = $2h = 2400.00 \text{ mm}$.

6.3.12.2 Menghitung kebutuhan Tulangan Geser diluar sendi plastis

Telah didapatkan:

$$V_u \text{ at } d = 433.58 \text{ kN}$$

$$\text{Kapasitas geser beton, } V_c = 489.20 \text{ kN}$$

$$\phi V_c = 0.75 \times 489.20 = 366.90 \text{ kN}$$

$V_u > \phi V_c$ sehingga perlu diberi tulangan tambahan dengan $V_s = V_u - \phi V_c = 66.68 \text{ kN}$

Direncanakan tulangan sengkang minimum:

$$A_{v \min} = \frac{1}{16} \sqrt{f_c'} \frac{b_w \times s}{f_{yt}} \geq \frac{1}{3} \frac{b_w \times s}{f_{yt}}$$

$$A_v \text{ min} = \frac{1}{16} \sqrt{40} \frac{400 \times 1000}{390} = 405.42 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_v \text{ min} = \frac{1}{3} \times \frac{400 \times 1000}{390} = 341.88 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Maka digunakan A_{vmin} = 405.52 mm²/m

Direncanakan diameter = 10.00 mm

Luas double stirup = 157.14 mm²

Jarak sengkang perlu = 333.33 mm

Jarak maksimum antar sengkang tertutup tidak boleh melebihi SNI 2847:2013, Ps. 21.5.3.3 dan 21.5.3.4:

- $d/2$ = 1200/2 = 600 mm
- 600 mm

Dari jarak yang sudah di hitung, diambil jarak sengkang yang paling kecil, yaitu = 300 mm.

Sengkang dipasang D10-300.

6.3.13 Perhitungan Tulangan Torsi

(SNI 2847:2013 Pasal 11.5.3.7.)

Penulangan lentur akibat torsi dapat dihitung sebagai berikut:

$$T_u < \phi \times 0.083 \lambda \sqrt{f_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{f_{pc}}{0.33 \lambda \sqrt{f_c}}}$$

Dimana:

λ = beton normal ambil nilai 1.00

ϕ = Faktor reduksi beban torsi, ambil nilai 0.75

f_{cp} = tegangan sera tatas beton pada masa layan (MPa)

Kontrol kebutuhan torsi:

$$A_{cp} = b \times h = 400 \times 1200 = 480000.00 \text{ mm}^2$$

$$P_{cp} = 2(b+h) = 2 \times (400 + 1200) = 3200.00 \text{ mm}$$

$$T_u (\text{dari ETABS}) = 158.95 \text{ kN.m} = 158950 \text{ Nmm}$$

$$T_u < 0.75 \times 0.083 \times 1.00 \times \sqrt{40} \left(\frac{480000^2}{3200} \right) \sqrt{1 + \frac{4.77}{0.33 \cdot 1 \cdot \sqrt{40}}}$$

$$206.18 \text{ kN.m} < 158.95 \text{ kNm (OK)}$$

Persyaratan diatas terpenuhi, maka balok prategang **tidak memerlukan** tulangan torsi.

6.3.14 Perencanaan Angkur

Angkur adalah bagian dari system pratekan pasca tarik yang terletak pada kedua ujung struktur beton pratekan, fungsinya untuk menyalurkan gaya prategang dari tendon ke beton. Angkur terdiri dari angkur hidup dan angkur mati, perencanaan struktur ini menggunakan sistem prategang VSL.

Rekapitulasi Gaya pada Tendon

Tipe strand	= Y1770S7
d strand	= 15.70 mm
f _{pk}	= 1770 Mpa
f _{p0.1k}	= 1526 Mpa
F _{pk}	= 265 KN
Strand pakai	= 6-12
Jumlah strand	= 8.00 buah

6.3.14.1 Perencanaan Angkur Mati

Tipe angkur	= VSL - AF
φ _A	= 265 mm
Cover (F)	= 45 mm

Penulangan daerah lokal:

$$\text{Diameter tulangan } (\phi_R) = 20 \text{ mm}$$

Jarak antar tulangan (P)	= 55 mm
Jumlah tulangan (r)	= 8 buah
Panjang area penulangan (I)	= 385 mm
Panjang sengkang (M)	= 390 mm
Diameter sengkang (ϕS)	= 16 mm

6.3.14.2 Perencanaan Angkur Hidup

Tipe angkur	=	VSL - GC
ϕA	=	230 mm
Cover (F)	=	50 mm

Penulangan daerah lokal:

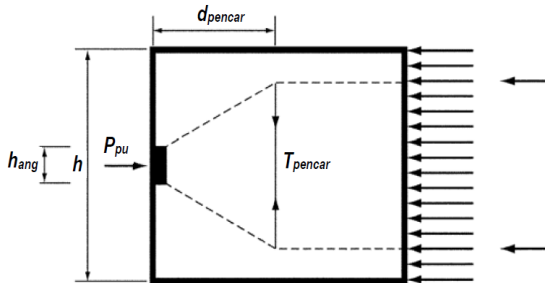
Diameter tulangan (ϕR)	= 20 mm
Jarak antar tulangan (P)	= 50 mm
Jumlah tulangan (r)	= 6 buah
Panjang area penulangan (I)	= 250 mm
Panjang sengkang (M)	= 275 mm
Diameter sengkang (ϕS)	= 10 mm

6.3.15 Perencanaan Daerah Angkur

Balok pratekan pasca tarik, kegagalan bisa disebabkan oleh hancurnya bantalan beton pada daerah tepat dibelakang angkur tendon akibat tekanan yang sangat besar. Kegagalan ini diperhitungkan pada kondisi ekstrim saat transfer, yaitu saat gaya pratekan maksimum dan kekuatan beton minimum. Kuat tekan nominal beton pada daerah pengangkuran global di isyaratkan oleh SNI 2847:2013 pasal 18.13.4.2. Bila diperlukan, pada daerah pengangkuran dapat dipasang tulangan untuk memikul gaya pencair, pengelupasan dan gaya tarik tepi longitudinal yang timbul akibat pengangkuran tendon sesuai pasal 18.13.3.2

Dalam studi ini digunakan angkur hidup. Hal ini dikarenakan metode pemberian gaya pratekan dengan sistem pasca tarik. Penulangan pengekangan di seluruh pengangkuran harus sedemikian

rupa hingga mencegah pembelahan dan bursting yang merupakan hasil dari gaya tekan terpusat besar yang disalurkan melalui alat angkut. Metode perhitungan perencanaan daerah pengangkutan global sesuai dengan SNI 2847:2013 pasal 18.13.3.2.



(a) Penampang persegi

Gambar 6. 16 Ilustrasi penulangan global daerah angkut

$$T_{\text{PENCAR}} = 0,25\Sigma P_u \left(1 - \frac{a}{h}\right)$$

$$d_{\text{PENCAR}} = 0,5(h - 2e)$$

Dimana:

P_u = Jumlah gaya tendon terfaktor total untuk pengaturan penarikan tendon yang ditinjau = 1.2 F_o (kN)

a = Tinggi angkut atau kelompok angkut yang berdekatan pada arah yang ditinjau (mm)

h = Tinggi penampang pada arah yang ditinjau (mm)

e = Eksentrisitas angkut atau kelompok angkut yang berdekatan terhadap sumbu berat penampang (selalu diambil sebagai nilai positif)

a = 230 mm (angkut strand 6-12, VSL tabel)

e = -200 mm

$$\begin{aligned} h &= 1200 \text{ mm} \\ P &= 1178.44 \text{ kN} \\ P_u &= 1.2 \times 1178.44 = 1414.13 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$T_{\text{pencar}} = 0.25 \times 1414.13 \left(1 - \frac{230}{1200}\right) = 285.77 \text{ kN}$$

$$d_{\text{pencar}} = 0.5 (1200 - 2 \times 200) = 0.40 \text{ m}$$

$$A_{vp} = \frac{T_{\text{pencar}}}{f_y} = 862.06 \text{ mm}^2$$

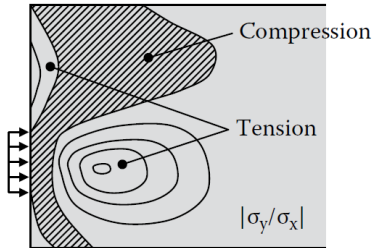
Digunakan tulangan D10 double leg ($A_s = 157.14 \text{ mm}^2$), maka kebutuhan tulangan ialah sebanyak 6 buah

Spasi antar sengkang dihitung dengan cara sebagai berikut

$$S = \frac{h}{n} = \frac{1200}{8} = 150 \text{ mm}$$

6.3.15.1 Perencanaan tulangan daerah terkelupas :

Pada daerah penyaluran gaya prategang, tegangan yang terjadi didalam tendon bukan hanya kompresi, namun juga tegangan tarik. Tegangan tarik yang terdapat pada permukaan ujung beton akan cenderung terkupas, untuk itu disediakan tulangan tambahan. Lihat area tarik kupas pada gambar 6.8



Gambar 6. 17 Isobar dari tegangan beton pada daerah angkur
(Sumber: Gilbert, Mickleborough, & Ranzi, 2017)

T.Y. Lin merekomendasikan $T = 0.03F_o$

$F_o = 1178.44 \text{ kN}$

$T = 35.35 \text{ kN}$

$f_y = 390.00 \text{ MPa}$

$A_s = T/f_y = 90.65 \text{ mm}^2$

$A_s \text{ D10} = 78.57 \text{ mm}^2$

$n = 2$

$s = 150 \text{ mm}$

Dipasang tulangan ujung **D10-150**

6.3.15.2 Perencanaan hidrolik jack

Sesuai dengan brosur VSL, untuk menarik tendon supaya menghasilkan gaya prategang digunakan alat jacking dengan spesifikasi:

Designation = ZPE-12/St2

Jack capacity = 1850.00 KN

6.3.15.3 Perencanaan Grouting

Sesuai dengan brosur VSL = $f_c \text{ cube } 100 \text{ MPa}$

$f_c' \text{ grouting} = \sim 85 \text{ MPa}$

6.3.16 Daerah Limit Kabel

Agar tegangan terjadi tidak melebihi tegangan izin, maka penempatan tendon harus didalam area daerah limit kabel yang dihitung sebagai berikut:

$$a1 = \frac{M_{\text{service}}}{F_e} + \frac{ft' \times A \times Kt}{F_e}$$

a1 berjarak dari kern atas penampang.

$$a2 = \frac{M_{\text{jacking}}}{F_o} + \frac{ft' \times A \times Kb}{F_o}$$

a2 berjarak dari kern bawah penampang.

Perhitungan daerah limit kabel:

L	= 24000.00 mm
e lapangan	= 730.94mm
e tumpuan	= 200.00 mm
fokus	= 930.94 mm
D tendon	= 77.00 mm
Ft' = fb'	= 6.32 MPa
Fo	= 1178443.23 N
Fe	= 921351.70 N
A	= 793600.00 mm ²

Koordinat Tendon:

$$Y = 4fx(l-x)/l^2$$

Daerah Limit:

yt	= 390.56 mm
yb	= 809.44 mm
Kt	= 173.41 mm
Kb	= 359.39 mm
et	= 1530.68 mm
eb	= 944.67 mm

Tabel 6. 14 Rekapitulasi Perhitungan Daerah Limit Kabel Prategang Kelas T

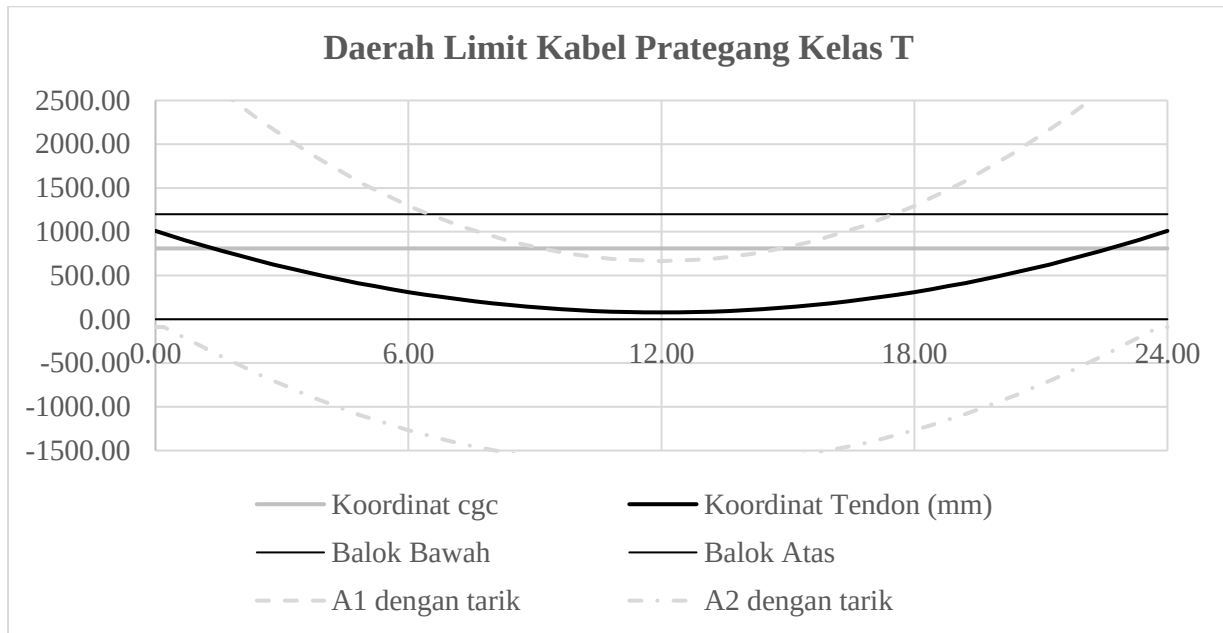
Station (m)	Transfer Moment (KNm)	Service Moment (KNm)	Koord. cgc	Koord. Kt	Koord. Kb	Koord. Tendon (mm)	Koord. A1 (mm)	Koord. A1 +et (mm)	Koord. A2 (mm)	Koord. A2+eb (mm)
0.00	-478.31	-550.98	809.44	982.84	450.05	1009.44	-428.08	1410.93	2091.81	-291.20
0.20	-478.31	-550.98	809.44	982.84	450.05	978.66	-428.08	1410.93	2091.81	-291.20
0.70	-332.27	-375.97	809.44	982.84	450.05	903.99	-292.11	1274.96	1955.84	-202.29
1.20	-188.73	-203.46	809.44	982.84	450.05	832.56	-158.08	1140.92	1821.80	-114.90
1.20	-185.11	-199.37	809.44	982.84	450.05	832.56	-154.90	1137.74	1818.62	-112.70
1.60	-74.11	-66.16	809.44	982.84	450.05	777.74	-51.40	1034.25	1715.13	-45.12
2.00	35.29	65.45	809.44	982.84	450.05	724.98	50.85	931.99	1612.88	21.49
2.40	143.10	195.46	809.44	982.84	450.05	674.30	151.86	830.98	1511.86	87.12
2.40	146.20	198.96	809.44	982.84	450.05	674.30	154.58	828.26	1509.14	89.01
2.80	245.55	318.29	809.44	982.84	450.05	625.68	247.29	735.55	1416.43	149.49
3.20	343.30	436.02	809.44	982.84	450.05	579.14	338.76	644.08	1324.96	209.01
3.60	439.46	552.15	809.44	982.84	450.05	534.66	428.99	553.85	1234.73	267.55
3.60	442.16	555.20	809.44	982.84	450.05	534.66	431.36	551.48	1232.37	269.19
4.00	528.26	658.61	809.44	982.84	450.05	492.25	511.71	471.13	1152.02	321.62
4.40	612.77	760.43	809.44	982.84	450.05	451.91	590.82	392.03	1072.91	373.07

4.80	695.68	860.65	809.44	982.84	450.05	413.64	668.69	314.16	995.04	423.54
4.80	697.99	863.25	809.44	982.84	450.05	413.64	670.71	312.14	993.02	424.95
5.20	770.63	950.46	809.44	982.84	450.05	377.43	738.46	244.38	925.27	469.17
5.60	841.66	1036.06	809.44	982.84	450.05	343.30	804.97	177.87	858.75	512.42
6.00	911.10	1120.07	809.44	982.84	450.05	311.23	870.24	112.60	793.48	554.70
6.00	913.02	1122.23	809.44	982.84	450.05	311.23	871.92	110.92	791.80	555.86
6.40	972.36	1193.42	809.44	982.84	450.05	281.24	927.24	55.61	736.49	591.99
6.80	1030.10	1263.02	809.44	982.84	450.05	253.31	981.31	1.54	682.42	627.14
7.20	1086.24	1331.01	809.44	982.84	450.05	227.45	1034.14	-51.29	629.59	661.32
7.20	1087.76	1332.73	809.44	982.84	450.05	227.45	1035.47	-52.63	628.25	662.25
7.60	1134.03	1388.18	809.44	982.84	450.05	203.66	1078.56	-95.71	585.17	690.42
8.00	1178.70	1442.04	809.44	982.84	450.05	181.94	1120.40	-137.55	543.33	717.61
8.40	1221.77	1494.29	809.44	982.84	450.05	162.28	1161.00	-178.15	502.73	743.84
8.40	1222.91	1495.58	809.44	982.84	450.05	162.28	1162.00	-179.15	501.73	744.53
8.80	1256.30	1535.50	809.44	982.84	450.05	144.70	1193.02	-210.17	470.71	764.86
9.20	1288.08	1573.83	809.44	982.84	450.05	129.18	1222.79	-239.95	440.93	784.21
9.60	1318.27	1610.56	809.44	982.84	450.05	115.74	1251.33	-268.49	412.40	802.59
9.60	1319.03	1611.41	809.44	982.84	450.05	115.74	1252.00	-269.15	411.73	803.05
10.00	1339.65	1635.95	809.44	982.84	450.05	104.36	1271.06	-288.22	392.66	815.60

10.40	1358.68	1658.90	809.44	982.84	450.05	95.05	1288.89	-306.04	374.84	827.19
10.80	1376.11	1680.24	809.44	982.84	450.05	87.81	1305.47	-322.63	358.25	837.80
10.80	1376.48	1680.67	809.44	982.84	450.05	87.81	1305.81	-322.96	357.92	838.03
11.20	1384.42	1689.91	809.44	982.84	450.05	82.64	1312.98	-330.14	350.75	842.86
11.60	1390.75	1697.55	809.44	982.84	450.05	79.53	1318.92	-336.07	344.81	846.71
12.00	1395.49	1703.59	809.44	982.84	450.05	78.50	1323.61	-340.77	340.12	849.60
12.00	1395.49	1703.59	809.44	982.84	450.05	78.50	1323.61	-340.77	340.12	849.60
12.40	1390.75	1697.55	809.44	982.84	450.05	79.53	1318.92	-336.07	344.81	846.71
12.80	1384.42	1689.91	809.44	982.84	450.05	82.64	1312.98	-330.14	350.75	842.86
13.20	1376.48	1680.67	809.44	982.84	450.05	87.81	1305.81	-322.96	357.92	838.03
13.20	1376.11	1680.24	809.44	982.84	450.05	87.81	1305.47	-322.63	358.25	837.80
13.60	1358.68	1658.90	809.44	982.84	450.05	95.05	1288.89	-306.04	374.84	827.19
14.00	1339.65	1635.95	809.44	982.84	450.05	104.36	1271.06	-288.22	392.66	815.60
14.40	1319.03	1611.41	809.44	982.84	450.05	115.74	1252.00	-269.15	411.73	803.05
14.40	1318.27	1610.56	809.44	982.84	450.05	115.74	1251.33	-268.49	412.40	802.59
14.80	1288.08	1573.83	809.44	982.84	450.05	129.18	1222.79	-239.95	440.93	784.21
15.20	1256.30	1535.50	809.44	982.84	450.05	144.70	1193.02	-210.17	470.71	764.86
15.60	1222.91	1495.58	809.44	982.84	450.05	162.28	1162.00	-179.15	501.73	744.53
15.60	1221.77	1494.29	809.44	982.84	450.05	162.28	1161.00	-178.15	502.73	743.84

16.00	1178.70	1442.04	809.44	982.84	450.05	181.94	1120.40	-137.55	543.33	717.61
16.40	1134.03	1388.18	809.44	982.84	450.05	203.66	1078.56	-95.71	585.17	690.42
16.80	1087.76	1332.73	809.44	982.84	450.05	227.45	1035.47	-52.63	628.25	662.25
16.80	1086.24	1331.01	809.44	982.84	450.05	227.45	1034.14	-51.29	629.59	661.32
17.20	1030.10	1263.02	809.44	982.84	450.05	253.31	981.31	1.54	682.42	627.14
17.60	972.36	1193.42	809.44	982.84	450.05	281.24	927.24	55.61	736.49	591.99
18.00	913.02	1122.23	809.44	982.84	450.05	311.23	871.92	110.92	791.80	555.86
18.00	911.10	1120.07	809.44	982.84	450.05	311.23	870.24	112.60	793.48	554.70
18.40	841.66	1036.06	809.44	982.84	450.05	343.30	804.97	177.87	858.75	512.42
18.80	770.63	950.46	809.44	982.84	450.05	377.43	738.46	244.38	925.27	469.17
19.20	697.99	863.25	809.44	982.84	450.05	413.64	670.71	312.14	993.02	424.95
19.20	695.68	860.65	809.44	982.84	450.05	413.64	668.69	314.16	995.04	423.54
19.60	612.77	760.43	809.44	982.84	450.05	451.91	590.82	392.03	1072.91	373.07
20.00	528.26	658.61	809.44	982.84	450.05	492.25	511.71	471.13	1152.02	321.62
20.40	442.16	555.20	809.44	982.84	450.05	534.66	431.36	551.48	1232.37	269.19
20.40	439.46	552.15	809.44	982.84	450.05	534.66	428.99	553.85	1234.73	267.55
20.80	343.30	436.02	809.44	982.84	450.05	579.14	338.76	644.08	1324.96	209.01
21.20	245.55	318.29	809.44	982.84	450.05	625.68	247.29	735.55	1416.43	149.49
21.60	146.20	198.96	809.44	982.84	450.05	674.30	154.58	828.26	1509.14	89.01

21.60	143.10	195.46	809.44	982.84	450.05	674.30	151.86	830.98	1511.86	87.12
22.00	35.29	65.45	809.44	982.84	450.05	724.98	50.85	931.99	1612.88	21.49
22.40	-74.11	-66.16	809.44	982.84	450.05	777.74	-51.40	1034.25	1715.13	-45.12
22.80	-185.11	-199.37	809.44	982.84	450.05	832.56	-154.90	1137.74	1818.62	-112.70
22.80	-188.73	-203.46	809.44	982.84	450.05	832.56	-158.08	1140.92	1821.80	-114.90
23.30	-332.27	-375.97	809.44	982.84	450.05	903.99	-292.11	1274.96	1955.84	-202.29
23.80	-478.31	-550.98	809.44	982.84	450.05	978.66	-428.08	1410.93	2091.81	-291.20
24.00	-478.31	-550.98	809.44	982.84	450.05	1009.44	-428.08	1410.93	2091.81	-291.20



Gambar 6. 18 Daerah Limit Kabel SNI Kelas T

6.4 Kelas C

6.4.1 Data Perancangan

Panjang bentang (L)	= 24.00 m
Tinggi balok pratekan (H)	= 1.06 m
Lebar balok pratekan (B)	= 0.40 m
Dimensi balok pratekan	= 40/100 cm
f_c' balok pratekan	= 40.00 MPa
f_c' pelat atap	= 40.00 MPa
f_{yu} tulangan pratekan	= 1770.00 MPa
f_y tulangan lunak	= 390.00 MPa
Jarak antar balok pratekan	= 6.00 m
Cover	= 40.00 mm
Tebal pelat (tf)	= 14.00 cm

Untuk tebal pelat yang digunakan, perencanaan pada tiap lantai atap dengan balok pratekan ketebalan yang digunakan yaitu 14 cm.

D duct = 77.00 mm

6.4.2 Kuat Tekan Beton saat *jacking*

Tabel 6. 15 Perbandingan kuat tekan beton pada berbagai umur
(Departemen Pekerjaan Umum, 1971)

Umur beton (hari)	3	7	14	21	28	90	365
Semen portland biasa	0.40	0.65	0.88	0.95	1.00	1.20	1.35
Semen portland dengan kekuatan awal yang tinggi	0.55	0.75	0.90	0.95	1.00	1.15	1.20

Semen yang digunakan adalah semen Portland biasa tipe I, dan direncanakan di-*jacking* pada umur 14 hari,

Faktor koreksi untuk suhu, U dihitung dengan persamaan dari PBI 1971 Ps. 10.9.3. Direncanakan suhu = 30°C

$$U = \frac{\sum \Delta h (S + 10^\circ\text{C})}{30^\circ\text{C}}$$

Dimana:

S = Suhu dalam °C

h = hari.

U = waktu jacking setelah koreksi (hari)

$$U = \frac{14(30 + 10)}{30} = 18.67 \text{ hari}$$

Umur jacking akibat koreksi suhu adalah 18.67 hari sehingga interpolasi hasil dari tabel 6.1, koefisien adalah = 0.93.

$$fci' = 0.93 \times fc'$$

$$fci' = 0.93 \times 40 = 37.07$$

Sehingga akibat koreksi U , maka kuat tekan inisial beton pada umur 14 hari, $fci' = 37.07$ MPa.

6.4.3 Penentuan Tegangan Izin Tendon dan Beton

SNI 2847:2013 Ps. 18.4.1 dan Ps. 18.5.1

Tegangan baja tidak boleh melampaui nilai-nilai berikut:

1. Tegangan izin akibat gaya pengangkatan tendon 0.94 fpy, tetapi tidak lebih besar dari nilai terkecil dari 0.8 fpu dan nilai maksimum yang direkomendasikan oleh pabrik pembuat tendon pratekan atau perangkat angkur.
2. Tendon pasca tarik pada daerah angkur dan sambungan sesaat setelah penyaluran gaya pratekan 0.70 fpu

Namun berdasarkan T.Y Lin dan Burns perumusan diatas juga berlaku untuk tendon pratarik segera setelah peralihan gaya pratekan.

Tegangan izin pada beton tidak boleh melebihi nilai-nilai berikut:

a. Segera setelah peralihan gaya pratekan(sebelum kehilangan), tegangan serat-serat terluar memiliki nilai sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tekan pada tumpuan} &= \sigma_{tk} = 0.70 f_{ci}' \\ &= -25.95 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tarik pada tumpuan} &= \sigma_{tr} = 0.50 \sqrt{f_{ci}'} \\ &= 3.04 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tekan pada lapangan} &= \sigma_{tk} = 0.60 f_{ci}' \\ &= -22.24 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tarik pada lapangan} &= \sigma_{tr} = 0.62 \sqrt{f_{ci}'} \\ &= 3.77 \text{ MPa}\end{aligned}$$

b. Pada beban kerja setelah terjadi kehilangan gaya pratekan.

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tekan pada tumpuan} &= \sigma_{tk} = 0.45 f_c' \\ &= -18.00 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tarik pada tumpuan} &= \sigma_{tr} = 0.62 \sqrt{f_c'} \\ &= 3.92 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tekan pada lapangan} &= \sigma_{tk} = 0.45 f_c' \\ &= -18.00 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tarik pada lapangan} &= \sigma_{tr} = 1.00 \sqrt{f_c'} \\ &= 6.32 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Dimana :

f_{pu} = kuat tarik tendon pratekan yang diisyaratkan, MPa

f_{py} = kuat leleh tendon pratekan yang diisyaratkan, MPa

f_c' = kuat tekan beton saat pemberian pratekan awal, MPa

f'_{ci} = kuat tekan beton yang diisyaratkan, MPa

Besar gaya prategang yang dibutuhkan diambil berdasarkan beberapa persamaan, yaitu persamaan pada serat atas dan bawah tengah bentang saat transfer dan saat beban layan.

Pada perencanaan ini beton pratekan diizinkan tarik berdasarkan kelas U dengan tegangan izin tarik sebesar $1.00\sqrt{f'c} = 6.32$ MPa.

6.4.4 Rekapitulasi Pembebanan yang Terjadi

Tabel 6. 16 Rekapitulasi kombinasi pembebanan hasil ETABS

Kombinasi Pembebanan Ultimate		
1.4D		
Momen tumpuan kiri	-644.43	kNm
Momen lapangan	1991.37	kNm
Momen tumpuan kanan	-644.43	kNm
1.2D+1.6L		
Momen tumpuan kiri	-697.44	kNm
Momen lapangan	2156.78	kNm
Momen tumpuan kanan	-697.44	kNm
1.2D+1L+1EX Max		
Momen tumpuan kiri	-705.41	kNm
Momen lapangan	1988.08	kNm
Momen tumpuan kanan	-705.41	kNm
1.2D+1L+1EX Min		
Momen tumpuan kiri	-580.07	kNm
Momen lapangan	1988.08	kNm
Momen tumpuan kanan	-580.07	kNm
Vu	433.58	kN

Tu	158.95	kNm
Kombinasi Pembebanan Layan		
1D saat jacking		
Momen tumpuan kiri	-478.31	kNm
Momen lapangan	1359.49	kNm
Momen tumpuan kanan	-478.31	kNm
1D+1L		
Momen tumpuan kiri	-550.98	kNm
Momen lapangan	1703.59	kNm
Momen tumpuan kanan	-550.98	kNm
1D+1L+1EX Max		
Momen tumpuan kiri	-469.9	kNm
Momen lapangan	1703.63	kNm
Momen tumpuan kanan	-469.9	kNm
1D+1L+1EX Min		
Momen tumpuan kiri	-632.06	kNm
Momen lapangan	1703.63	kNm
Momen tumpuan kanan	-632.06	kNm

Untuk perhitungan struktur pratekan, SNI 2847:2013 Ps. 18.10.3 memberikan standar momen-momen yang digunakan untuk menghitung kekuatan perlu harus merupakan jumlah momen akibat reaksi yang ditimbulkan oleh prategang (dengan suatu faktor beban sebesar 1.00) dan momen akibat beban terfaktor.

Sehingga, untuk perhitungan kekuatan layan (*serviceability*) dan perhitungan gaya prategang, pembebanan yang dipakai adalah beban dengan faktor 1.00 sedangkan untuk menghitung kuat struktur tetap menggunakan kombinasi beban *ultimate*.

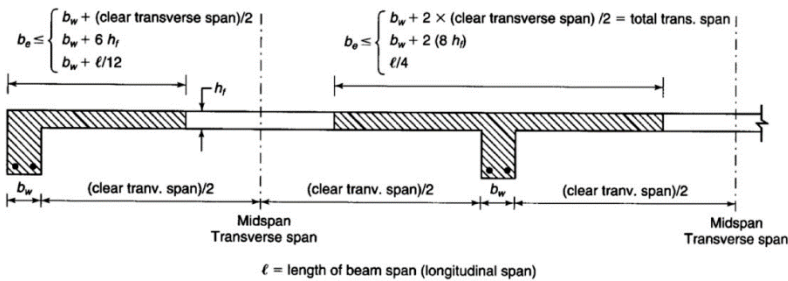
6.4.5 Analisis Penampang

6.4.5.1 Mencari lebar efektif:

SNI 2847:2013 Ps. 8.12.2

Dalam mencari lebar efektif (b_e), maka didasarkan pada perumusan yang terdapat pada SNI, dimana lebar efektif sayap balok T tidak boleh melebihi seperempat bentang balok, dan lebar efektif sayap dari masing-masing sisi badan balok tidak boleh melebihi:

- delapan kali tebal pelat
- setengah jarak bersih antara balok-balok yang bersebelahan



Gambar 6. 19 Parameter penentuan lebar efektif

$$B_c = \frac{L}{4} = \frac{24}{4} = 6.00 \text{ m}$$

$$B_e = bw + 2(8tf) = 0.40 + 2(8 \times 0.14) = 2.64 \text{ m}$$

$$B_e = bw + 2(\text{clear span}/2) = 0.4 + 2\left(\frac{6.00 - 0.40}{2}\right) = 6.00 \text{ m}$$

Sehingga nilai b_{eff} yang terkecil adalah 2.64 m. Sesuai dengan persyaratan pertama dimana lebar efektif sayap balok T tidak boleh melebihi seperempat bentang balok atau 6.00 m. Penggunaan lebar efektif di dalam perhitungan beton pratekan hanya digunakan

pada saat analisis tegangan yang terjadi pada beton pratekan sendiri, sementara untuk perhitungan beban yang ada lebar yang digunakan ialah sebesar 6.00 m, sesuai dengan jarak antar balok pratekan yang sesungguhnya.

Luas penampang balok pratekan didapat sebagai berikut:

$$A_{\text{pelat}} = \frac{b_e \times t_f}{n} = \frac{2.64 \times 0.14}{1} = 0.37 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{balok}} = b \times (h - t_f) = 0.40 \times (1.20 - 0.14) = 0.42 \text{ m}^2$$

Nilai statis momen garis netral penampang balok sebagai berikut:

$$c = \frac{h}{2} + t_f = \frac{1.06}{2} + 0.14 = 0.67 \text{ m}$$

$$y_t = \frac{\left(A_{\text{pelat}} \times \frac{t_f}{2}\right) + (A_{\text{balok}} \times c)}{A_{\text{total}}} \text{ mm}^3$$

$$y_t = \frac{(0.37 \times \frac{0.14}{2}) + (0.42 \times 0.67)}{0.79} = 0.39 \text{ m}$$

$$y_b = \text{cgc} = 1.2 - 0.39 = 0.81 \text{ m}$$

$$d_t = y_t - \frac{t_f}{2} = 0.39 - \frac{0.14}{2} = 0.32 \text{ m}$$

$$d_b = y_b - \frac{h - t_f}{2} = 0.81 - \frac{1.20 - 0.14}{2} = 0.28 \text{ m}$$

Setelah didapat data-data diatas diperlukan nilai batasan letak kabel tendon hendak dipasang yang disebut daerah limit kabel kabel. Tendon dipasang pada daerah yang menyebabkan beton menjadi tertekan dimana daerah tersebut dibatasi oleh nilai dan wilayah kern pada penampang balok.

Dimana:

$$K_t = \frac{W_b}{A_{\text{total}}} \text{ dan } K_b = \frac{W_t}{A_{\text{total}}}$$

$$W_t = \frac{I_{\text{komposit}}}{y_t} \text{ dan } W_b = \frac{I_{\text{komposit}}}{y_t}$$

Keterangan:

K_t = kern atas (m)

K_b = kern bawah (m)

I = momen inersia (m^4)

Nilai I_{komposit} didapat sebagai berikut:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 + (A_{\text{balok}} \times db^2) + \frac{1}{12}\frac{be}{n}tf^3 + (A_{\text{pelat}} \times dt^2)$$

$$I = \frac{1}{12} \times 0.4 \times 1.06^3 + (0.42 \times 0.28^2) + \frac{1}{12} \frac{2.64}{1} 0.14^3$$

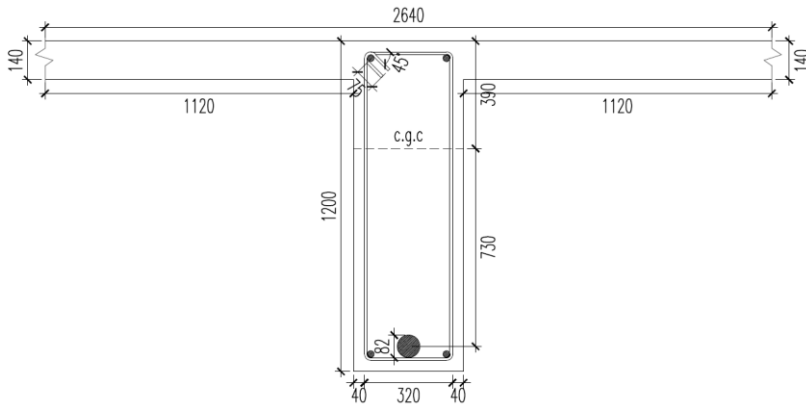
$$+ (0.37 \times 0.32^2) = 0.11 \text{ m}^4$$

$$W_t = \frac{I_{\text{komposit}}}{y_t} = \frac{0.11 \text{ m}^4}{0.39 \text{ m}} = 0.29 \text{ m}^3$$

$$W_b = \frac{I_{\text{komposit}}}{y_b} = \frac{0.11 \text{ m}^4}{0.81 \text{ m}} = 0.14 \text{ m}^3$$

$$K_t = \frac{W_b}{A_{\text{total}}} = \frac{0.14 \text{ m}^3}{0.79 \text{ m}^2} = 0.17 \text{ m}$$

$$K_b = \frac{W_t}{A_{\text{total}}} = \frac{0.29 \text{ m}^3}{0.79 \text{ m}^2} = 0.36 \text{ m}$$



Gambar 6. 20 Penampang balok tengah bentang

6.4.6 Penentuan Gaya Prategang Awal (F_0)

Digunakan decking (selimut beton) = 40 mm

Digunakan diameter tulangan lentur = 25 mm = D25

- Eksentrisitas pada tumpuan (e) = -200 = 200 mm (di atas cgc)
- Eksentrisitas tengah bentang (e) = $y_b - d' - 0.5 D_{tul} = 0.81 - 0.04 - 0.5 (0.025) = 0.73 \text{ m} = 730 \text{ mm}$

Besar gaya prategang yang dibutuhkan diambil berdasarkan beberapa persamaan, yaitu persamaan pada serat atas dan bawah tengah bentang saat transfer dan saat beban layan.

Kondisi saat *jacking* di lapangan:

Output dari ETABS dengan kombinasi 1D

Momen tumpuan kiri = -478.31 kNm

Momen lapangan = 1359.49 kNm

Momen tumpuan kanan = -478.31 kNm

Serat atas:

$$\sigma_t \geq -\frac{Fo}{A} + \frac{Fo \times e}{\frac{Wt}{Fo \times 0.73}} - \frac{M_{lapangan}}{\frac{Wt}{1359.49}}$$

$$3774.71 \geq -\frac{Fo}{0.79} + \frac{Fo \times 0.73}{0.29} - \frac{1359.49}{0.29}$$

$$Fo = 6556.53 \text{ kN}$$

Serat bawah:

$$\sigma_b \leq -\frac{Fo}{A} - \frac{Fo \times e}{\frac{Wb}{Fo \times 0.73}} + \frac{M_{lapangan}}{\frac{Wb}{1359.49}}$$

$$-22240 \leq -\frac{Fo}{0.79} - \frac{Fo \times 0.73}{0.14} + \frac{1359.49}{0.14}$$

$$Fo = 4887.63 \text{ kN}$$

Kondisi saat *jacking* di tumpuan:

Serat atas:

$$\sigma_t \leq -\frac{Fo}{A} + \frac{Fo \times e}{\frac{Wt}{Fo \times (-0.20)}} - \frac{M_{lapangan}}{\frac{Wt}{(-478.31)}}$$

$$-25946.67 \leq -\frac{Fo}{0.79} + \frac{Fo \times (-0.20)}{0.29} - \frac{(-478.31)}{0.29}$$

$$Fo = 14084.25 \text{ kN}$$

Serat bawah:

$$\sigma_b \geq -\frac{Fo}{A} - \frac{Fo \times e}{\frac{Wb}{Fo \times (-0.20)}} + \frac{M_{lapangan}}{\frac{Wb}{(-478.31)}}$$

$$3044.12 \geq -\frac{Fo}{0.79} - \frac{Fo \times (-0.20)}{0.14} + \frac{(-478.31)}{0.14}$$

$$Fo = 33742.45 \text{ kN}$$

Kondisi saat beban layan di lapangan:

Output dari ETABS dengan kombinasi 1D+1L

Momen tumpuan kiri = -550.98 kNm

Momen lapangan = 1703.59 kNm

Momen tumpuan kanan = -550.98 kNm

Serat atas:

$$\sigma_t \leq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{M_{lapangan}}{Wt}$$

$$-18000 \leq -\frac{Fe}{0.79} + \frac{Fe \times 0.73}{0.29} - \frac{1703.59}{0.29}$$

Fe = -9232.10 kN (asumsi kehilangan prategang 20%)
 Fo = -11540.12 kN

Serat bawah:

$$\sigma_b \geq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{M_{lapangan}}{Wb}$$

$$6324.56 \geq -\frac{Fe}{0.79} - \frac{Fe \times 0.73}{0.14} + \frac{1703.59}{0.14}$$

Fe = 921.35 kN (asumsi kehilangan prategang 20%)
 Fo = 1151.69 kN

Kondisi saat beban layan di tumpuan

Serat atas:

$$\sigma_t \geq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{M_{lapangan}}{Wt}$$

$$-18000 \geq -\frac{Fe}{0.79} + \frac{Fe \times (-0.2)}{0.29} - \frac{(-550.98)}{0.29}$$

Fe = 10162.46 kN (asumsi kehilangan prategang 20%)
 Fo = 12703.08 kN

Serat bawah:

$$\sigma_b \leq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{M_{lapangan}}{Wb}$$

$$6324.56 \leq -\frac{Fe}{0.79} - \frac{Fe \times (-0.2)}{0.14} + \frac{(-550.98)}{0.14}$$

Fe = 53452.96 kN (asumsi kehilangan prategang 20%)
 Fo = 66816.2 kN

Sehingga untuk tegangan awal, diberi:

$$Fo = 966.27 \text{ kN}$$

Asumsi kehilangan gaya prategang sebesar 20% maka,

$$Fe = 773.02 \text{ kN}$$

Kontrol tegangan sebelum kehilangan:

Output dari ETABS dengan kombinasi 1D

$$\text{Momen tumpuan kiri} = -367.69 \text{ kNm}$$

Momen lapangan = 1525.43 kNm

Momen tumpuan kanan = -367.69 kNm

Serat atas:

$$\begin{aligned}\sigma_t &\geq -\frac{Fo}{A} + \frac{Fo \times e}{Wt} - \frac{M_{lapangan}}{Wt} \\ 3774.71 &\geq -\frac{966.27}{0.79} + \frac{966.27 \times 0.73}{0.29} - \frac{1525.43}{0.29} \\ 3774.71 &\geq -3507.85 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}\sigma_b &\leq -\frac{Fo}{A} - \frac{Fo \times e}{Wb} + \frac{M_{lapangan}}{Wb} \\ -22240.00 &\leq -\frac{966.27}{0.79} - \frac{966.27 \times 0.73}{0.14} + \frac{1525.43}{0.14} \\ -22240.00 &\leq 3528.95 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

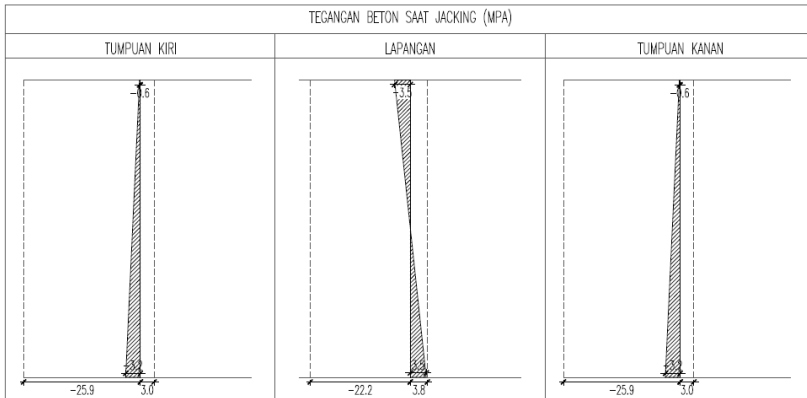
Kondisi saat *jacking* di tumpuan:

Serat atas:

$$\begin{aligned}\sigma_t &\leq -\frac{Fo}{A} + \frac{Fo \times e}{Wt} - \frac{M_{tumpuan}}{Wt} \\ -218.12 &\leq -\frac{966.27}{0.79} + \frac{966.27 \times (-0.20)}{0.29} - \frac{(-367.69)}{0.29} \\ -218.12 &\leq 3044.12 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}\sigma_b &\geq -\frac{Fo}{A} - \frac{Fo \times e}{Wb} + \frac{M_{tumpuan}}{Wb} \\ -3288.94 &\geq -\frac{966.27}{0.79} - \frac{966.27 \times (-0.20)}{0.14} + \frac{(-367.69)}{0.14} \\ -3288.94 &\geq -25946.67 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$



Gambar 6. 21 Diagram tegangan saat jacking

6.4.7 Penentuan Tendon

Tendon baja yang akan dipakai dengan spek dari *multistrand post-tensioning* sebagai berikut :

$$f_{pu} = 1770.00 \text{ MPa (strand-stress-relieved)}$$

$$f_{pizin} 70\% = 1239.00 \text{ MPa (strand-stress-relieved)}$$

$$\text{Luas tendon} = F_o / f_{pizin} = 779.88 \text{ mm}^2$$

$$f_{py} = 1526.00 \text{ MPa (strand-stress-relieved)}$$

Tendon baja yang akan dipakai dengan spek dari *multistrand post-tensioning* sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Tendon unit} &= 6-12 \\ \text{jumlah strand} &= 8.00 \\ \text{Min breaking load} &= 2124 \text{ kN} \\ \text{D strand} &= 15.70 \text{ mm} \\ \text{jumlah tendon} &= 1.00 \\ \text{D duct} &= 77.00 \text{ mm} \end{aligned}$$

Luas tendon yang digunakan

$$A_{pakai} = 1549.37 \text{ mm}^2$$

$$A_{pakai} > A_{perlu} \quad \text{OK}$$

Nilai tegangan pakai

$$f_{\text{pakai}} = F_o/A_{\text{pakai}} = 623.66 \text{ Mpa}$$

6.4.8 Kehilangan Gaya Prategang

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1

Kehilangan pratekan adalah berkurangnya gaya pratekan dalam tendon saat tertentu disbanding pada saat stressing. Kehilangan pratekan dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori, yaitu:

6.4.8.1 Kehilangan Segera (kehilangan langsung)

Kehilangan langsung adalah kehilangan gaya awal pratekan sesaat setelah pemberian gaya pratekan pada komponen balok pratekan. Kehilangan secara langsung terdiri dari :

a. Kehilangan akibat slip angker

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1a

Kehilangan akibat pengangkuran/slip angkur terjadi saat tendon baja dilepas setelah mengalami penarikan dan gaya pratekan dialihkan ke angkur. Rumus perhitungan kehilangan pratekan akibat pengangkuran.

Cek apakah kehilangan pratekan akibat pengangkuran berpengaruh sampai ke tengah bentang :

$$x = \sqrt{\frac{E_s x g}{f_{\text{pakai}} x \left(\mu \frac{\alpha}{L} + K \right)}}$$

Dimana:

- x = Panjang pengaruh slip angker (mm)
- E_s = Modulus elastisitas baja prategang(MPa)
- f_{pakai} = Tegangan yang terjadi pada baja prategang(Mpa)
- μ = Koefisien friksi dari kurvatur baja prategang
- K = Koefisien *wobble effect*

- G = Besar selip dari angker, ambil nilai 2.5 (mm)
 f = fokus dari baja prategang, $e_{lap} + e_{tumpuan}$ (mm)
 α = sudut kelengkungan tendon ($8f/L$)
 L = bentang struktur beton (m)

Direncanakan tendon prategang berjenis multri (7-wires strand) dengan duct metal, sehingga sesuai dari Tabel 6.3, diambil nilai

$$K = 0.0016 \text{ /meter}$$

$$\mu = 0.19 \text{ /radial}$$

$$x = \sqrt{\frac{200000 \times 2.5}{623.66 \times (0.19 \frac{0.31}{24} + 0.0016)}} = 707.32 \text{ mm}$$

Sehingga diperoleh nilai dari $x = 707.32 \text{ mm} = 0.71 \text{ m}$. Dengan hasil perhitungan pengaruh pengangkuran sampai ke tumpuan kantilever $x < 12 \text{ m}$, maka kehilangan akibat pengangkuran tidak mempengaruhi.

Tabel 6. 17 Koefisien *Wobble effect* dan Koefisien Kurvatur
(Sumber: T. Y. & Burns, n.d.)

	Wobble effect Coefficient		Curvature Coefficient
Type Tendon	K/foot	K/meter	μ /radial
Tendon in flexible metal sheathing:	0.0010-	0.0033-	
- Wire tendon	0.0015	0.0049	0.15-0.25
- 7-wires strand	0.0005-	0.0016-	0.15-0.25
- Hight-strength bars	0.0020	0.0066	0.08-0.30
	0.0001-	0.0003-	
	0.0006	0.0020	

Tendon in Rigid Metal Duct 7-wires strand	0.0002	0.00066	0.15-0.25
Pregreased tendons Wire tendons and 7-wire strand	0.0003- 0.0020	0.0010- 0.0066	0.05-0.15
Mastic-Coated Tendons Wire tendons and 7-wire strand	0.0010- 0.0020	0.0033- 0.0066	0.05-0.15

b. Kehilangan akibat perpendekan elastis

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1b

Dikarenakan jumlah tendon yang digunakan hanya berjumlah 1 buah, maka kehilangan gaya pratekan akibat perpendekan elastis tidak mempengaruhi.

c. Kehilangan akibat gesekan (Wobble Effect)

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.2

Perhitungan kehilangan pratekan diakibatkan oleh gesekan antara material beton dan baja pratekan saat proses pemberian gaya pratekan. Kehilangan pratekan akibat gesekan (wobble effect) dihitung dengan perumusan sebagai berikut :

$$F_{pf} = F_o \times e^{-(\mu\alpha + KL)}$$

Dimana :

- F_{pf} = Kehilangan akibat gesekan (MPa)
- e = bilangan natural 2.73
- μ = Koefisien friksi dari kurvatur baja prategang
- K = Koefisien *wobble effect*
- α = sudut kelengkungan tendon ($8f/L$)

F_o = Gaya prategang awal yang diberikan (kN)

$$F_{pf} = 966.27 \times e^{-(0.19 \times 0.31 + 0.0016 \times 24)} = 876.63 \text{ kN}$$

$$\Delta F_{pf} = 966.27 - 1490.15 = 89.64 \text{ kN}$$

$$\Delta f_{pf} = \frac{89.64}{A_p} = \frac{89.64}{1549.37} = 57.86 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat gesek adalah

$$\% \Delta f_{pf} = \frac{57.86}{623.66} = 9.28 \%$$

d. Kehilangan akibat kekangan kolom

Konstruksi beton pratekan dengan desain cor monolit perlu diperhitungkan kehilangan pratekan akibat kekangan kolom. Hal ini terjadi karena saat dilakukan jacking beton terkekang oleh kekakuan kolom. Gaya perlawanan yang diberikan oleh kolom menahan reaksi perpindahan beton akibat gaya jacking yang terjadi. Gaya perlawanan kolom ini menyebabkan berkurangnya gaya pratekan karena sebagian gaya pratekan yang diberikan digunakan mengatasi perlawanan gaya kolom.

Semakin kaku komponen kolom yang mengekang balok pratekan maka semakin besar gaya pratekan yang hilang untuk melawan kolom agar mengikuti lenturan balok akibat gaya jacking. Hal ini juga menyebabkan semakin besarnya momen yang diterima kolom sebagai kontribusi dari jacking yang terjadi. Sebaliknya jika kolom didesain tidak kaku maka gaya pratekan yang hilang semakin kecil serta momen yang diterima kolom juga berkurang.

Untuk mengeliminasi kehilangan prategang akibat kekangan kolom dan menghindari momen kumulatif yang terjadi pada dasar kolom lantai dasar, maka pada saat jacking, dasar kolom tiap lantai didesain dengan sendi, dalam realisasinya dilapangan menggunakan penampang lingkaran dan menggunakan pengekang spiral. Perubahan

penampang yang signifikan pada dasar kolom, memperkecil kemampuan kolom untuk menahan momen yang terjadi akibat jacking

Dapat di hitung kehilangan yang terjadi akibat desain sendi ini. Perumusan yang digunakan untuk kehilangan gaya pratekan akibat kekangan kolom ialah sebagai berikut :

$$\Delta F_k = \frac{M_B - M_A}{h}$$

Dari hasil perhitungan ETABS, diperoleh nilai maksimum nilai momen ialah sebagai berikut

$$M_B = -151.11 \text{ kNm}$$

$$M_A = -151.11 \text{ kNm}$$

$$\Delta F_k = \frac{(151.11 + 151.11)}{6} \times 10 = 50.37 \text{ kN}$$

$$\Delta f_k = \frac{50.37}{A_p} = \frac{50.37}{1549.37} = 32.51 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat kekangan kolom adalah

$$\% \Delta f_{fk} = \frac{32.51}{623.66} = 5.21 \%$$

6.4.8.2 Kehilangan yang tergantung oleh waktu (kehilangan tidak langsung)

Hilangnya gaya awal yang ada terjadi secara bertahap dan dalam waktu yang relatif lama (tidak secara langsung seketika saat pemberian gaya pratekan), adapun macam kehilangan tidak langsung adalah sebagai berikut:

a. Kehilangan akibat rangkak

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1c

$$CR = K_{cr} \times \left(\frac{E_s}{E_c} \right) \times (f_{cir} - f_{cds})$$

Dimana :

K_{cr} = 2 untuk metode pra-tarik

= 1,6 untuk metode pasca-tarik

f_{cds} = tegangan.beton didaerah c.g.s. akibat sluruh beban mati pada struktur setelah diberi gaya prategang

f_{cir} = tegangan beton didaerah c.g.s. akibat gaya awal pratekan

$$f_{cir} = \frac{F_o}{A} + \frac{F_o \times e \times e}{I}$$

$$f_{cir} = \frac{966.27}{0.79} + \frac{966.27 \times 0.73 \times 0.73}{0.11} = 5.85 \text{ MPa}$$

$$f_{cds} = \frac{M \times e}{I}$$

$$f_{cds} = \frac{1359.49 \times 0.73}{0.11} = 8.92 \text{ MPa}$$

$$E_s/E_c = \frac{200000}{29725.41} = 6.73 \text{ Mpa}$$

$$CR = 1.6 \times 6.73 \times (5.85 - 8.92) = -33.03 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat rangkak adalah

$$\% \Delta f_{CR} = \frac{-33.03}{623.66} = -5.30 \%$$

d. Kehilangan akibat susut

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1d

Rumus perhitungan kehilangan pratekan akibat susut :

$$SH = 8,2 \times 10^{-6} \cdot Ksh.Es.(1 - 0,0236(V/S)) \times (100 - RH)$$

Dimana:

- SH = Kehilangan gaya prategang akibat susut beton (kN)
 Ksh = 1 untuk Pra-tarik, 0.77 untuk pascatarik curing 7 hari
 V/S = ratio volume dibagi luas permukaan
 RH = kelembaban relative udara sekitar, Kota Aceh RH=84 (%)

$$\frac{V}{S} = \frac{\text{luas penampang beton}}{\text{keliling penampang beton}} = \frac{0.79 \times 1000}{7.68} = 10.33 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \text{SH} &= 8,2 \times 10^{-6} \times 0.77 \times 200000 \times (1 - 0.0236 \times 6.73) \times (100 - 84) \\ &= 0.15 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat rangkai adalah

$$\% \Delta f_{\text{SH}} = \frac{0.15}{623.66} = 0.024 \%$$

e. Kehilangan akibat relaksasi baja

SNI 2847:2013 Ps. 18.6.1e

Relaksasi baja adalah berkurangnya tegangan dalam baja akibat berjalannya waktu pada panjang tetap.

Perumusan yang digunakan ini ialah perumusan yang digunakan oleh komisi PCI untuk menyelesaikan serangkaian permasalahan akibat relaksasi baja

Rumus perhitungan kehilangan pratekan akibat relaksasi baja:

$$RE = [Kre - J(SH + CR + ES)]C$$

Dimana:

- RE = Kehilangan gaya prategang akibat relaksasi baja (kN)
 Kre = Koefisien baja prategang (MPa) lihat Tabel 6.4
 J = Koefisien baja prategang lihat Tabel 6.4
 C = Koefisien akibat tegangan yang terjadi pada baja prategang lihat Tabel 6.3

Perencanaan digunakan tendon strand *stress relieved* dengan mutu 1770MPa, sehingga diambil nilai:

$$K_{re} = 128 \text{ MPa}$$

$$J = 0.14$$

$$C = 0.49$$

$$RE = [128 - 0.14 (0.15 + 11.06 + 0.00)] \times 0.49 = 62.71 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat relaksasi baja adalah

$$\% \Delta f_{RE} = \frac{62.71}{623.66} = 10.06 \%$$

Total kehilangan prategang:

$$\% \Delta f = \% \Delta f_A + \% \Delta f_{ES} + \% \Delta f_{FK} + \% \Delta f_{CR} + \% \Delta f_{SH} + \% \Delta f_{RE}$$

$$\begin{aligned} \% \Delta f &= 9.28\% + 5.21\% + (-5.30\%) + 0.024\% + 10.06\% \\ &= 24.57\% \end{aligned}$$

Sehingga $F_e = 728.87 \text{ kN}$

Tabel 6. 18 Nilai K_{re} dan J (T. Y. & Burns, n.d.)

Type of tendon	K_{re}	J
Strand atau wire stress-relieved Derajat 1860 MPa	138	0.15
Strand atau wire stress-relieved Derajat 1720 MPa	128	0.14
Kawat stress-relieved derajat 1655 atau 1620 MPa	121	0.13
Strand low-relaxation derajat 1860 MPa	35	0.04
Kawat low-relaxation derajat 1720 MPa	32	0.037
Kawat low-relaxation derajat 1655 atau 1620 MPa	30	0.025
Batang stress-relieved derajat 1000 atau 1100 MPa	40	0.05

Tabel 6. 19 Nilai C (T. Y. & Burns, n.d.)

fpi/fpu	Stress relieved strand or wire	Stress-relieved bar or low relaxation strand or wire
0.80	-	1.28
0.79	-	1.22
0.78	-	1.16
0.77	-	1.10
0.76	-	1.05
0.75	1.45	1.00
0.74	1.36	0.95
0.73	1.27	0.90
0.72	1.18	0.85
0.71	1.09	0.80
0.70	1.00	0.75
0.69	0.94	0.70
0.68	0.89	0.66
0.67	0.83	0.61
0.66	0.78	0.57
0.65	0.73	0.53
0.64	0.68	0.49
0.63	0.63	0.45
0.62	0.58	0.41
0.61	0.53	0.37
0.60	0.49	0.33

6.4.9 Kontrol Gaya Setelah Kehilangan Prategang

6.4.9.1 Kontrol Akibat Beban Layan

Kondisi saat beban layan di lapangan:

Output dari ETABS dengan kombinasi 1D+1L

Momen tumpuan kiri = -550.98 kNm

Momen lapangan = 1703.59 kNm

Momen tumpuan kanan = -550.98 kNm

Serat atas:

$$\begin{aligned}
 \sigma_t &\leq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{Mlapangan}{Wt} \\
 -18000 &\leq -\frac{728.87}{0.79} + \frac{728.87 \times 0.73}{0.29} - \frac{1703.59}{0.29} \\
 -18000 &\leq -5023.61 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &\geq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{Mlapangan}{Wb} \\
 7589.47 &\geq -\frac{728.87}{0.79} - \frac{728.87 \times 0.73}{0.14} + \frac{1703.59}{0.14} \\
 7589.47 &\geq 6324.56 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

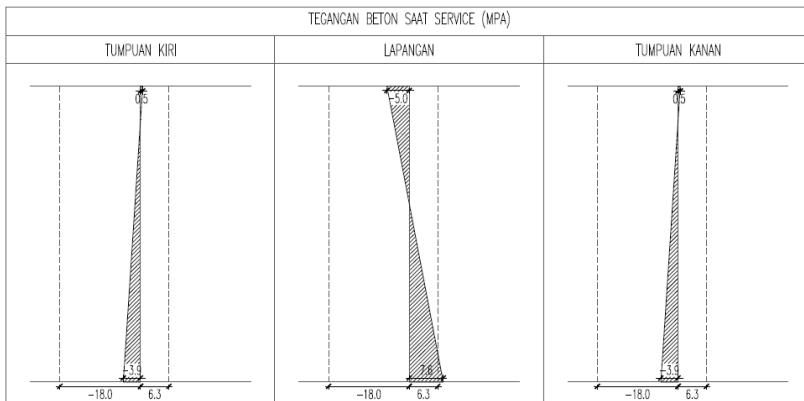
Kondisi saat beban layan di tumpuan

Serat atas :

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &\leq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{Mtumpuan}{Wb} \\
 502.31 &\leq -\frac{728.87}{0.79} - \frac{728.87 \times (-0.2)}{0.14} + \frac{(-550.98)}{0.14} \\
 502.31 &\leq 6324.56 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Serat bawah :

$$\begin{aligned}
 \sigma_t &\geq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{Mtumpuan}{Wt} \\
 -3862.87 &\geq -\frac{728.87}{0.79} + \frac{728.87 \times (-0.2)}{0.29} - \frac{(-550.98)}{0.29} \\
 -3862.87 &\geq -18000.00 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$



Gambar 6. 22 Diagram tegangan saat beban layan

6.4.9.2 Kontrol Persyaratan SPRMK

SNI 2847:2013 Ps 21.5.2.5

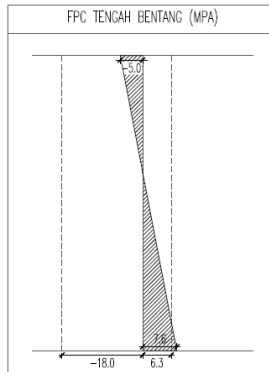
Prategang rata-rata, f_{pc} , yang dihitung untuk luas yang sama dengan dimensi penampang komponen struktur terkecil yang dikalikan dengan dimensi penampang tegak lurus tidak boleh melebihi yang lebih kecil dari 3,5 MPa dan $f'_c/10$.

f_{pc} adalah tegangan tekan beton (setelah semua kehilangan gaya terjadi) di titik berat penampang yang menahan beban terapan luar, atau di permukaan badan dan sayap bila titik berat berada dalam sayap (MPa). Dalam komponen struktur komposit, f_{pc} adalah tegangan tekan resultan di pusat penampang komposit, atau di pertemuan badan dan sayap bila titik berat berada dalam sayap, akibat baik prategang maupun momen yang ditahan oleh komponen struktur pracetak yang bekerja sendirian.

$f'_c/10 = 40/10 = 4 \text{ Mpa}$ dan 3.50 Mpa
maka diambil nilai 3.50 Mpa

Tegangan di tengah bentang setelah kehilangan prategang:

Serat atas = -5.02 MPa
 Serat bawah = 7.59 MPa
 $f_{pc} = (y_b/y_{tot}) \times (-4.30 - 3.92) + 3.92 = -0.92 \text{ MPa}$
 $< 3.50 \text{ MPa OK}$



Gambar 6. 23 Diagram tegangan setelah kehilangan prategang

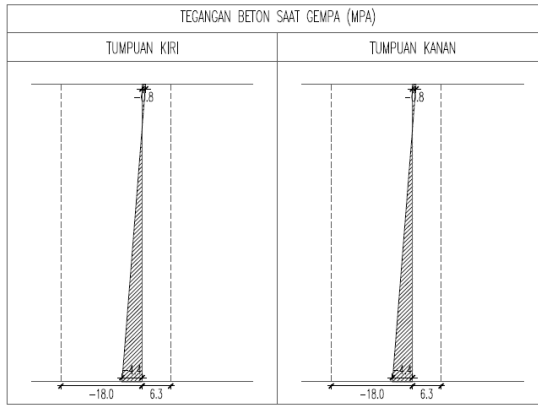
6.4.9.3 Kontrol Momen Gempa SPRMK

Menurut SNI 2847:2013, tendon pratekan diperbolehkan menerima 25% momen positif atau negatif.

Ketika terjadi gempa dan beban hidup maksimum output dari ETABS dengan kombinasi 1D+1L+ Ex

Momen tumpuan (kiri) = -632.06 kNm

Momen tumpuan (kanan) = -632.06 kNm



Gambar 6. 24 Diagram tegangan pada tumpuan saat terjadi gempa

Momen tumpuan kiri

Kondisi saat beban layan di tumpuan

Serat atas:

$$\begin{aligned}
 \sigma_t &\leq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{Mtumpuan}{Wt} \\
 -18000 &\leq -\frac{728.87}{0.79} + \frac{728.87 \times (-0.2)}{0.20} - \frac{(-632.06)}{0.20} \\
 -18000 &\leq 786.59 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &\geq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{Mtumpuan}{Wb} \\
 6324.56 &\geq -\frac{728.87}{0.79} - \frac{728.87 \times (-0.2)}{0.14} + \frac{(-632.06)}{0.14} \\
 6324.56 &\geq -4452.04 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Momen tumpuan kanan

Kondisi saat beban layan di tumpuan

Serat atas:

$$\sigma_t \leq -\frac{Fe}{A} + \frac{Fe \times e}{Wt} - \frac{Mtumpuan}{Wt}$$

$$\begin{aligned}
 -18000 &\leq -\frac{728.87}{0.79} + \frac{728.87 \times (-0.2)}{0.20} - \frac{(-632.06)}{0.20} \\
 -18000 &\leq 786.59 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Serat bawah:

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &\geq -\frac{Fe}{A} - \frac{Fe \times e}{Wb} + \frac{Mtumpuan}{Wb} \\
 6324.56 &\geq -\frac{728.87}{0.79} - \frac{728.87 \times (-0.2)}{0.14} + \frac{(-632.06)}{0.14} \\
 6324.56 &\geq -4452.04 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Kontrol lentur yang dilakukan terhadap beton pratekan sudah memenuhi syarat, baik saat sebelum atau sesudah kehilangan pratekan dengan F_o sebesar 1178.44 kN. Lihat gambar 6.6

6.4.9.4 Perhitungan Lendutan

Kemampuan layan struktur beton pratekan ditinjau dari perilaku defleksi komponen tersebut. Elemen beton pratekan memiliki dimensi yang lebih langsing dibanding beton bertulang biasa sehingga kontrol lendutan sangat diperlukan untuk memenuhi batas layan yang disyaratkan pada SNI 2847:2013 tabel 9.5.b.

$$f_{izin} = \frac{L}{480} = \frac{24000}{480} = 50.00 \text{ mm}$$

Lendutan saat *jacking*

7. Lendutan akibat tekanan tendon

Tekanan tendon menyebabkan balok tertekuk keatas sehingga lendutan yang terjadi berupa lendutan keatas (*chamber*).

$$\begin{aligned}
 p' &= 8 \times F_o \times f / L^2 \\
 &= 8 \times 966270 \times 623.66 / (24000)^2 \\
 &= 12.49 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta p' &= 5/384 \times (p' \times l^4 / (Ec \times I)) \\
 &= 5/384 \times (12.49 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.11 \times 10^{12})) \\
 &= 16.30 \text{ mm } (\uparrow)
 \end{aligned}$$

8. Lendutan akibat momen yang terjadi pada portal

Dalam perhitungan lendutan pada portal akibat beban sendiri balok prategang, pelat, dan beban hidup, maka Analisis lendutan yang dilakukan adalah sebagai keutuhan portal, bukan lendutan balok diatas dua tumpuan. Perumusan yang digunakan dalam perhitungan lendutan balok prategang dalam portal adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \Delta g &= 5/48 \times (L^4 / (Ec \times I)) \times (Mb - 0.1(Ma_1 + Ma_2)) \\
 &= -\frac{5}{48} \times \frac{(1359.49 - 0.1(-478.31 - 478.31)) 24000^4}{29725.41 \times 0.11 \times 10^{12}} \\
 &= 26.37 \text{ mm } (\downarrow)
 \end{aligned}$$

9. Lendutan akibat beban sendiri balok

$$qo = W \times A = 2400 \times 0.79 = 1904.64 \text{ kg/m}^3 = 19.05 \text{ N/mm}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta qo &= 5/384 \times (qo \times l^4 / (Ec \times I)) \\
 &= 5/384 \times (19.05 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.11 \times 10^{12})) \\
 &= 24.85 \text{ mm } (\downarrow)
 \end{aligned}$$

$$\Delta \text{ total} = -16.30 + 26.37 + 24.85 = 34.92 (\downarrow) < 50.00 \text{ mm (OK)}$$

Lendutan saat beban layan

7. Lendutan akibat tekanan tendon

$$\begin{aligned}
 p' &= 8 \times Fe \times f / L^2 \\
 &= 8 \times 966270 \times 623.66 / (24000)^2 \\
 &= 9.42 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta p' &= 5/384 \times (p' \times L^4 / (Ec \times I)) \\
 &= 5/384 \times (9.42 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.11 \times 10^{12}))
 \end{aligned}$$

$$= 12.30 \text{ mm } (\uparrow)$$

8. Lendutan akibat momen yang terjadi pada portal

$$\begin{aligned}\Delta g &= 5/48 \times (L^4 / (E_c \times I)) \times (M_b - 0.1(M_{a1} + M_{a2})) \\ &= -\frac{5}{48} \times \frac{(1703.59 - 0.1(-550.98 - 550.98)) 24000^4}{29725.41 \times 0.11 \times 10^{12}} \\ &= 32.87 \text{ mm } (\downarrow)\end{aligned}$$

9. Lendutan akibat beban sendiri balok

$$q_o = W \times A = 2400 \times 0.79 = 1904.64 \text{ kg/m}^3 = 19.05 \text{ N/mm}$$

$$\begin{aligned}\Delta q_o &= 5/384 \times (q_o \times l^4 / (E_c \times I)) \\ &= 5/384 \times (19.05 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.11 \times 10^{12})) \\ &= 24.85 \text{ mm } (\downarrow)\end{aligned}$$

$$\Delta \text{ total} = -12.30 + 32.87 + 24.85 = 45.42 (\downarrow) < 50.00 \text{ mm (OK)}$$

6.4.10 Perhitungan Momen Nominal

Menurut SNI 2847:2013, pasal. 21.5.2.5, baja prategang tidak boleh menyumbang lebih dari seperempat kekuatan lentur positif atau negatif di penampang kritis pada daerah sendi plastis dan harus diangkur pada atau melewati muka eksterior joint.

d. Momen Nominal Tendon Prategang pada Tumpuan

(SNI 2847:2013 Ps. 18.7)

Kuat lentur komponen struktur prategang dapat dihitung menggunakan asumsi yang seperti pada komponen struktur nonprategang Tendon prategang tidak mempunyai titik leleh yang pasti seperti halnya tulangan lunak

Ketika panampang prategang mencapai kuat lenturnya (didefinisikan dengan regangan beton tekan maksimum sebesar

0,003), tegangan di baja prategang pada kekuatan nominal f_{ps} , akan sangat bervariasi tergantung pada jumlah prategangnya

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \rho_p \frac{f_{pu}}{f_{c'}} \right]$$

f_{ps} = tegangan pada tendon disaat penampang mencapai kuat nominalnya, MPa

f_{pu} = kuat tarik tendon prategang yang disyaratkan MPa

γ_p = faktor yang memperhitungkan tipe tendon prategang

= 0.55 tulangan ulir ($f_{py}/f_{pu} \geq 0.80$)

= 0.40 kawat dan strand *stress-relieved* ($f_{py}/f_{pu} \geq 0.85$)

= 0.28 kawat dan strand relaksasi rendah ($f_{py}/f_{pu} \geq 0.90$)

d = jarak serat tekan terluar ke titik berat tulangan tekan, mm

d_p = jarak serat tekan terluar ke titik berat tendon, mm

Sehingga direncanakan:

$f_{c'}$ = 40.00 MPa

β_1 = 0.76

γ_p = 0.40

b_w = 400.00 mm

B_{eff} = 2640 mm

d_p = 749.44 mm

A_{ps} = 1549.37 mm²

ρ_p = 0.01

f_{pu} = 1770.0 MPa

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \rho_p \frac{f_{pu}}{f_{c'}} \right]$$

$$f_{ps} = 1770 \times \left[1 - \frac{0.40}{0.76} \times 0.01 \times \frac{1770.0}{40} \right] = 1558.14 \text{ MPa}$$

$$T = A_{ps} \times f_{ps} = 2414127.54 \text{ N}$$

$$C = T$$

$$\text{Luas daerah tekan} = C/f_c' = 71003.75 \text{ mm}^2$$

$$a = 71003.75 / 0.85 \times b_w = 177.51 \text{ mm}$$

$$M_n = T \times \left[d - \frac{a}{2} \right]$$

$$M_n = 2414127.54 \times \left[749.44 - \frac{177.51}{2} \right] = 1594967704.77 \text{ Nmm}$$

$$= 1549.97 \text{ kNm}$$

$$\phi M_n = 1435.47 > 705.41 \text{ kNm (OK)}$$

e. Momen Nominal Tendon Prategang pada Lapangan

Direncanakan:

$$f_c' = 40.00 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0.76$$

$$\gamma_p = 0.40$$

$$b_w = 400.00 \text{ mm}$$

$$B_{\text{eff}} = 2640 \text{ mm}$$

$$d_p = 1111.50 \text{ mm}$$

$$A_{ps} = 1549.37 \text{ mm}^2$$

$$\rho_p = 0.01$$

$$f_{pu} = 1770.0 \text{ MPa}$$

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \rho_p \frac{f_{pu}}{f_c'} \right]$$

$$f_{ps} = 1770 \times \left[1 - \frac{0.40}{0.76} \times 0.01 \times \frac{1770}{40} \right] = 1558.14 \text{ MPa}$$

$$T = A_{ps} \times f_{ps} = 2414127.54 \text{ N}$$

$$C = T$$

$$\text{Luas daerah tekan} = C/f_c' = 71003.75 \text{ mm}^2$$

$$a = 71003.75 / 0.85 \times b_{\text{eff}} = 26.90 \text{ mm}$$

$a < t_f$, maka dihitung seperti balok biasa

$$Mn = T \times \left[d - \frac{a}{2} \right]$$

$$Mn = 2414127.54 \times \left[1111.50 - \frac{26.90}{2} \right] = 2650838350.76 \text{ Nmm}$$

$$= 2650.84 \text{ kNm}$$

$$\phi Mn = 2385.75 > 2156.78 \text{ kNm (OK)}$$

f. Perencanaan kebutuhan tulangan lunak sendi plastis:

Menurut SNI 2847:2013, pasal. 21.5.2.5, baja prategang tidak boleh menyumbang lebih dari seperempat kekuatan lentur positif atau negatif di penampang kritis pada daerah sendi plastis dan harus diangkur pada atau melewati muka eksterior joint.

Sehingga momen yang harus ditanggung tulangan lunak di daerah sendi plastis adalah $\mu - 25\% \cdot \phi Mn = 705.41 - 358.87 = 346.54 \text{ kNm}$. Jadi momen yang digunakan untuk perhitungan tulangan lunak adalah 346.54 kNm

Direncanakan:

$$f_c' = 40.00 \text{ Mpa}$$

$$f_y = 390.00 \text{ Mpa}$$

$$b_w = 400.00 \text{ mm}$$

$$H = 1200.00 \text{ m}$$

$$L = 24.00 \text{ m}$$

$$D_{\text{lentur}} = 25.00 \text{ mm}$$

$$D_{\text{Sengkan}} = 10.00 \text{ mm}$$

$$\text{cover} = 40.00 \text{ mm}$$

$$d = 1137.50 \text{ mm}$$

$$\rho_{\min} = \frac{1.4}{f_y} = \frac{1.4}{390} = 0.0036$$

$$\rho_{min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4 \times f_y} = \frac{\sqrt{40}}{4 \times 390} = 0.00405$$

Jadi dipakai $\rho_{min} = 0.00405$

Karena mutu beton berada di atas 28 MPa, maka nilai β_1 , digunakan perumusan sesuai dengan (SNI 2847:2013 ps 12.2.7.3)

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left(\frac{f'_c - 28}{7} \right) = 0.76$$

$$\rho_{bal} = \frac{0,85\beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) = \frac{0,85 \times 0.76 \times 40}{390} \left(\frac{600}{600 + 390} \right)$$

$$\rho_{bal} = 0.0404$$

Agar menjaga agar beton terkontrol tarik, maka $\rho_{max} = 0.75 \rho_{bal}$

$$\rho_{max} = 0.0303$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f'_c} = \frac{390}{0.85 \times 40} = 11.47$$

$$Rn = \frac{Mu}{\phi b d^2} = \frac{346.54 \times 10^6}{0.9 \times 400 \times 1137.5^2} = 0.74 \text{ MPa}$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times m \times Rn}{f_y}} \right)$$

$$\rho = \frac{1}{11.47} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 11.47 \times 0.74}{390}} \right) = 0.00193$$

Syarat:

$$\rho_{min} < \rho_{pakai} < \rho_{max}$$

$$\text{Maka } \rho_{pakai} = \rho_{min} = 0.00405$$

Menentukan luas tulangan atas (As) dari ρ yang didapat:

$$As = \rho b d = 0.00405 \times 400 \times 1137.50 = 1844.66 \text{ mm}^2$$

Direncanakan dengan tulangan D25, maka

$$n = \frac{As_{perlu}}{0.25 \pi \phi^2} = \frac{1844.66}{0.25 \times \pi \times 25^2} = 4$$

Direncanakan tulangan lentur untuk menahan beban gempa pada daerah sendi plastis adalah 4D25 atas bawah, karena gempa yang terjadi 2 arah.

6.4.11 Kontrol Retak

Perhitungan kuat ultimate dari beton pratekan harus memenuhi persyaratan SNI 2847:2013 Ps.18.8.2 mengenai jumlah total baja tulangan non pratekan dan pratekan harus cukup untuk menghasilkan beban terfaktor paling sedikit 1.2 beban retak yang terjadi berdasarkan nilai modulus retak sebesar $0.62 \sqrt{f'c'}$ sehingga didapatkan $\phi Mn > 1.2Mcr$, dengan nilai $\phi = 0.8$.

Momen Retak (Mcr) pada struktur beton pratekan, dihitung berdasar teori elastis. Retak terjadi apabila serat beton terjauh mencapai: *Modulus of rupture* ($f_r = 0.62 \sqrt{f'c'}$)

$$-\frac{F}{A} - \frac{F \cdot e}{Wb} + \frac{Mcr}{Wb} = fr$$

$$Mcr = F \cdot e + \frac{F \cdot Wb}{A} + fr \cdot Wb = F(e + kt) + fr \cdot Wb$$

Dimana:

Mcr = Momen saat serat bawah beton mengalami retak (kNm)

F = Gaya Prategang (N)

e = eksentrisitas tendon tengah bentang (m)

fr = Tegangan tarik dari beton (MPa)

$(F \times (e+kt))$ sering disebut sebagai momen dekompresi, sedangkan $(fr \times Wb)$ adalah sumbangan dari tegangan tarik beton.

$$fr = 0.62 \sqrt{f'_c} = 0.62 \sqrt{40} = 3.92 \text{ Mpa}$$

$$I_g = 111392600430.11 \text{ mm}^4$$

$$y_t = 390.56 \text{ mm}$$

c. Tumpuan

$$F = 728.87 \text{ kN}$$

$$e = 0.20 \text{ m}$$

$$k_b = 0.36 \text{ m}$$

$$W_t = 285209218.53 \text{ mm}^3$$

$$M1 = 728.87 \times (0.20+0.36) = 407717495.87 \text{ Nmm}$$

$$= 407.72 \text{ kNm}$$

$$M2 = 3.92 \times 285209218.53 = 1118369317.88 \text{ Nmm}$$

$$= 1118.37 \text{ kNm}$$

$$Mcr = 1526.09 \text{ kNm}$$

syarat $\phi M_n > 1.2 M_{cr}$

$$2200.32 > 1831.30 \text{ kNm (OK)}$$

d. Lapangan

$$F = 728.87 \text{ kN}$$

$$e = 0.73 \text{ m}$$

$$kt = 0.17 \text{ m}$$

$$W_b = 137617639.27 \text{ mm}^3$$

$$M_1 = 728.87 \times (0.73 + 0.17) = 659145552.87 \text{ Nmm}$$

$$= 659.15 \text{ kNm}$$

$$M_2 = 3.92 \times 285209218.53 = 539629631.02 \text{ Nmm}$$

$$= 539.630 \text{ kNm}$$

$$M_{cr} = 1198.78 \text{ kNm}$$

$$\text{syarat } \phi M_n > 1.2 M_{cr}$$

$$2385.75 > 1438.53 \text{ kNm (OK)}$$

Sehingga dengan kontrol momen retak maka hasil perhitungan beton pratekan telah memenuhi persyaratan.

6.4.12 Perhitungan Tulangan Geser

Perhitungan Tulangan Geser yang dipengaruhi beban gempa dihitung dari kapasitas balok memikul momen probable.

Menurut SNI 2847:2013 Pasal 21.3, gaya geser rencana V_e harus ditentukan dari peninjauan gaya statik pada bagian tumpuan. Momen-momen dengan tanda berlawanan sehubungan dengan kuat lentur maximum M_{pr} , harus dianggap bekerja pada muka-muka tumpuan, dan komponen struktur tersebut dibebani penuh beban gravitasi terfaktor serta V_e harus dicari dari nilai terbesar akibat beban gempa arah ke kanan dan ke kiri.

M_{pr} merupakan kuat momen lentur mungkin dari suatu komponen struktur yang ditentukan menggunakan sifat-sifat komponen struktur pada muka join dengan menganggap kuat tarik pada tulangan longitudinal sebesar minimum $1,25 f_y$.

Besarnya momen probable dipengaruhi oleh disain kemampuan tulangan lenturnya. Harga momen probable dapat dicari dengan rumus berikut:

$$M_{pr} = \left[(A_s \times f_s' - A_s' \times f_s') \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \right] + [A_s' \times f_s' \times (d - d')]$$

$$a = \frac{A_s \times f_s}{0.85 \times f_c' \times b}$$

Dimana:

f_s = $1.25 f_y = 1.25 \times 390 = 487.5$ MPa

f_s' = Tegangan dari tulangan tekan (MPa)

A_s' = Luas penampang tulangan tekan (mm²)

D' = Jarak antara serat tarik ke tulangan tekan (mm)

Tabel 6. 20 Rekapitulasi perhitungan M_{pr}

Lokasi	n	D_{tul}	A_s (mm ²)	a (mm)	M_{pr} (kNm)
Gempa tumpuan kanan +	4.00	25	1964.29	10.67	1084.15
Gempa tumpuan kanan -	4.00	25	1964.29	70.41	1055.55
Gempa tumpuan kiri +	4.00	25	1964.29	10.67	1084.15
Gempa tumpuan kiri -	4.00	25	1964.29	70.41	1055.55

6.4.12.1 Menghitung kebutuhan Tulangan Geser didalam sendi plastis

Menghitung V_e :

$$V_e = \frac{M_{pr1} \pm M_{pr2}}{l_n} \pm V_u$$

Dimana:

V_e = Gaya geser efektif yang terjadi di sendi plastis (kN)

M_{pr} = Momen probable (kNm)

V_u = Geser gravitasi dari ETABS (kN)

l_n = bentang bersih (m)

Gaya geser akibat gravitasi, V_u at d

$$V_u = 433.58 \text{ kN}$$

$$M_{pr1} = 1084.15 \text{ kNm}$$

$$M_{pr2} = 1055.55 \text{ kNm}$$

$$l_n = 24.00 - 0.40 = 23.60 \text{ m}$$

$$V_e = \frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{l_n} + V_u$$

$$V_e = \frac{1085.15 + 1055.55}{23.6} + 433.58 = 524.25 \text{ kN}$$

$$V_e = \frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{l_n} - V_u$$

$$V_e = \frac{1085.15 + 1055.55}{23.6} - 433.58 = -342.91 \text{ kN}$$

$$V_e = \frac{M_{pr1} - M_{pr2}}{l_n} + V_u$$

$$V_e = \frac{1085.15 - 1055.55}{23.6} + 433.58 = 432.37 \text{ kN}$$

$$V_e = \frac{M_{pr1} - M_{pr2}}{l_n} - V_u$$

$$V_e = \frac{1085.15 - 1055.55}{23.6} - 433.58 = -434.79 \text{ kN}$$

Maka diambil V_e yang terbesar sebagai beban pada sendi plastis, yaitu 524.25 kN.

Tulangan transversal untuk memikul geser dengan menganggap $V_c=0$ bila memenuhi persyaratan:

5. Gaya geser akibat gempa (M_{pr}) > 0,5 x total geser akibat kombinasi gempa dan gravitasi (1,2D + 1L)

$$V_e = \frac{1085.15 + 1055.55}{23.6} = 90.67 \text{ kN}$$

$$0.5 \times 433.58 = 216.79 \text{ kN} > 90.67 \text{ kN (NOT OK)}$$

6. Gaya aksial tekan < 0,2 x $A_g \times f'_c = 0.2 \times (400 \times 1200) \times 40 = 1587.20 \text{ kN}$

Gaya aksial P_u pada balok dari ETABS sebesar 166.05 kN < 1587.20 kN maka syarat ke-2 memenuhi (OK)

Tidak kedua syarat terpenuhi, maka $V_c \neq 0$. Perhitungan V_c dengan rumus sebagai berikut,

SNI 2847:2013 Ps. 11.3.2 memberikan perumusan besar tegangan geser yang dapat ditahan beton prategang:

$$V_c = \left(0.05 \times \lambda \times \sqrt{f_c'} + 4.8 \frac{V_u \times dp}{Mu} \right) \times bw \times d$$

Dimana:

V_c = Besar gaya geser yang dapat dipikul beton (kN)

λ = Beton normal, nilai = 1.00

dp = Jarak dari serat atas tekan ke titik berat tendon (mm)

M_u = Besar momen ultimate di tengah bentang (kNm)

V_u = Besar gaya geser ultimate sejauh d (kN)

$$V_c = \left(0.05 \times \lambda \times \sqrt{f_c'} + 4.8 \frac{V_u \times dp}{Mu} \right) \times bw \times d$$

$$V_c = \left(0.05 \times 1 \times \sqrt{40} + 4.8 \frac{433.58 \times 797.44}{2156.78} \right) \times 400 \times 1137.50$$

$$V_c = 472.92 \text{ kN}$$

$$V_{cmin} = \left(0.17 \times \lambda \times \sqrt{f_c'} \right) \times bw \times d$$

$$V_{cmin} = \left(0.17 \times 1 \times \sqrt{40} \right) \times 400 \times 1137.50 = 489.20 \text{ kN}$$

$$V_{cmax} = \left(0.42 \times \lambda \times \sqrt{f_c'} \right) \times bw \times d$$

$$V_{cmax} = \left(0.42 \times 1 \times \sqrt{40} \right) \times 400 \times 1137.50 = 1208.62 \text{ kN}$$

Maka digunakan $V_c = 489.20 \text{ kN}$

Menghitung gaya geser yang harus ditanggung tulangan (V_s):

$$V_s = V_e - V_c$$

$$V_s = 209.79 \text{ kN}$$

$$\text{Sehingga } A_s \text{ perlu} = V_s / f_y = 537.92 \text{ mm}^2$$

$$\text{Direncanakan diameter} = 10.00 \text{ mm}$$

$$\text{Luas double stirup} = 157.14 \text{ mm}^2$$

Jarak maksimum antar sengkang yang tertutup pada sendi plastis tidak boleh melebihi SNI 2847:2013 Ps.21.5.3.2:

$$s_{\max 1} = d/4 = 187.36 \text{ mm}$$

$$s_{\max 2} = 6d = 150.00 \text{ mm}$$

$$s_{\max 3} = 150.00 \text{ mm}$$

$$\text{diambil } s = 150.00 \text{ mm}$$

$$\text{Direncanakan} = D10-150$$

Dipasang dari jarak maksimum 50.00 mm dari muka kolom, hingga jarak sendi plastis = $2h = 2400.00 \text{ mm}$.

6.4.12.2 Menghitung kebutuhan Tulangan Geser diluar sendi plastis

Telah didapatkan:

$$V_u \text{ at } d = 433.58 \text{ kN}$$

$$\text{Kapasitas geser beton, } V_c = 489.20 \text{ kN}$$

$$\phi V_c = 0.75 \times 489.20 = 366.90 \text{ kN}$$

$V_u > \phi V_c$ sehingga perlu diberi tulangan tambahan dengan $V_s = V_u - \phi V_c = 66.68 \text{ kN}$

Direncanakan tulangan sengkang minimum:

$$A_v \min = \frac{1}{16} \sqrt{f_c'} \frac{b_w \times s}{f_{yt}} \geq \frac{1}{3} \frac{b_w \times s}{f_{yt}}$$

$$A_v \text{ min} = \frac{1}{16} \sqrt{40} \frac{400 \times 1000}{390} = 405.42 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_v \text{ min} = \frac{1}{3} \times \frac{400 \times 1000}{390} = 341.88 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Maka digunakan A_{vmin} = 405.42 mm²/m

Direncanakan diameter = 10.00 mm

Luas double stirup = 157.14 mm²

Jarak sengkang perlu = 333.33 mm

Jarak maksimum antar sengkang tertutup tidak boleh melebihi SNI 2847:2013, Ps. 21.5.3.3 dan 21.5.3.4:

- $d/2$ = 1200/2 = 600 mm
- 600 mm

Dari jarak yang sudah di hitung, diambil jarak sengkang yang paling kecil, yaitu = 300 mm.

Sengkang dipasang D10-300.

6.4.13 Perhitungan Tulangan Torsi

(SNI 2847:2013 Pasal 11.5.3.7.)

Penulangan lentur akibat torsi dapat dihitung sebagai berikut:

$$T_u < \phi \times 0.083 \lambda \sqrt{f_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{f_{pc}}{0.33 \lambda \sqrt{f_c}}}$$

Dimana:

λ = beton normal ambil nilai 1.00

ϕ = Faktor reduksi beban torsi, ambil nilai 0.75

f_{cp} = tegangan sera tatas beton pada masa layan (MPa)

Kontrol kebutuhan torsi:

$$A_{cp} = b \times h = 400 \times 1200 = 480000.00 \text{ mm}^2$$

$$P_{cp} = 2 (b+h) = 2 \times (400 + 1200) = 3200.00 \text{ mm}$$

$$T_u (\text{dari ETABS}) = 158.95 \text{ kN.m} = 158950 \text{ Nmm}$$

$$T_u < 0.75 \times 0.083 \times 1.00 \times \sqrt{40} \left(\frac{480000^2}{3200} \right) \sqrt{1 + \frac{4.77}{0.33 \cdot 1 \cdot \sqrt{40}}}$$

$$206.18 \text{ kN.m} < 158.95 \text{ kNm (OK)}$$

Persyaratan diatas terpenuhi, maka balok prategang **tidak memerlukan** tulangan torsi.

6.4.14 Perencanaan Angkur

Angkur adalah bagian dari system pratekan pasca tarik yang terletak pada kedua ujung struktur beton pratekan, fungsinya untuk menyalurkan gaya prategang dari tendon ke beton. Angkur terdiri dari angkur hidup dan angkur mati, perencanaan struktur ini menggunakan sistem prategang VSL.

Rekapitulasi Gaya pada Tendon

Tipe strand	= Y1770S7
d strand	= 15.70 mm
f _{pk}	= 1770 Mpa
f _{p0.1k}	= 1526 Mpa
F _{pk}	= 265 KN
Strand pakai	= 6-12
Jumlah strand	= 8.00 buah

6.4.14.1 Perencanaan Angkur Mati

Tipe angkur	= VSL - AF
φ _A	= 265 mm
Cover (F)	= 45 mm

Penulangan daerah lokal:

$$\text{Diameter tulangan } (\phi_R) = 20 \text{ mm}$$

Jarak antar tulangan (P)	= 55 mm
Jumlah tulangan (r)	= 8 buah
Panjang area penulangan (I)	= 385 mm
Panjang sengkang (M)	= 390 mm
Diameter sengkang (ϕS)	= 16 mm

6.4.14.2 Perencanaan Angkur Hidup

Tipe angkur	=	VSL - GC
ϕA	=	230 mm
Cover (F)	=	50 mm

Penulangan daerah lokal:

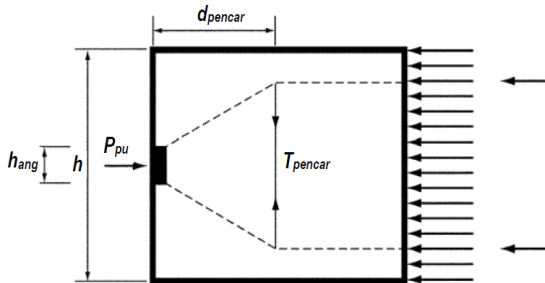
Diameter tulangan (ϕR)	= 20 mm
Jarak antar tulangan (P)	= 50 mm
Jumlah tulangan (r)	= 6 buah
Panjang area penulangan (I)	= 250 mm
Panjang sengkang (M)	= 275 mm
Diameter sengkang (ϕS)	= 10 mm

6.4.15 Perencanaan Daerah Angkur

Balok pratekan pasca tarik, kegagalan bisa disebabkan oleh hancurnya bantalan beton pada daerah tepat dibelakang angkur tendon akibat tekanan yang sangat besar. Kegagalan ini diperhitungkan pada kondisi ekstrim saat transfer, yaitu saat gaya pratekan maksimum dan kekuatan beton minimum. Kuat tekan nominal beton pada daerah pengangkuran global di isyaratkan oleh SNI 2847:2013 pasal 18.13.4.2. Bila diperlukan, pada daerah pengangkuran dapat dipasang tulangan untuk memikul gaya pencair, pengelupasan dan gaya tarik tepi longitudinal yang timbul akibat pengangkuran tendon sesuai pasal 18.13.3.2

Dalam studi ini digunakan angkur hidup. Hal ini dikarenakan metode pemberian gaya pratekan dengan sistem pasca tarik. Penulangan pengekanan di seluruh pengangkuran harus sedemikian

rupa hingga mencegah pembelahan dan bursting yang merupakan hasil dari gaya tekan terpusat besar yang disalurkan melalui alat angkur. Metode perhitungan perencanaan daerah pengangkuran global sesuai dengan SNI 2847:2013 pasal 18.13.3.2.



(a) Penampang persegi

Gambar 6. 25 Ilustrasi penulangan global daerah angkur

$$T_{\text{PENCAR}} = 0,25\Sigma P_u \left(1 - \frac{a}{h}\right)$$

$$d_{\text{PENCAR}} = 0,5(h - 2e)$$

Dimana:

P_u = Jumlah gaya tendon terfaktor total untuk pengaturan penarikan tendon yang ditinjau = 1.2 F_o (kN)

a = Tinggi angkur atau kelompok angkur yang berdekatan pada arah yang ditinjau (mm)

h = Tinggi penampang pada arah yang ditinjau (mm)

e = Eksentrisitas angkur atau kelompok angkur yang berdekatan terhadap sumbu berat penampang (selalu diambil sebagai nilai positif)

a = 230 mm (angkur strand 6-12, VSL tabel)

e = -200 mm

$$h = 1200 \text{ mm}$$

$$P = 966.27 \text{ kN}$$

$$P_u = 1.2 \times 966.27 = 1159.53 \text{ kN}$$

$$T_{\text{pencar}} = 0.25 \times 1159.53 \left(1 - \frac{230}{1200}\right) = 234.32 \text{ kN}$$

$$d_{\text{pencar}} = 0.5 (1200 - 2 \times 200) = 0.40 \text{ m}$$

$$A_{vp} = \frac{T_{\text{pencar}}}{f_y} = 706.85 \text{ mm}^2$$

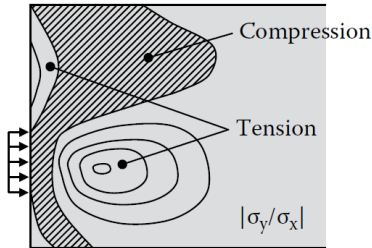
Digunakan tulangan D10 double leg ($A_s = 157.14 \text{ mm}^2$), maka kebutuhan tulangan ialah sebanyak 6 buah

Spasi antar sengkang dihitung dengan cara sebagai berikut

$$S = \frac{h}{n} = \frac{1200}{8} = 150 \text{ mm}$$

6.4.15.1 Perencanaan tulangan daerah terkelupas :

Pada daerah penyaluran gaya prategang, tegangan yang terjadi didalam tendon bukan hanya kompresi, namun juga tegangan tarik. Tegangan tarik yang terdapat pada permukaan ujung beton akan cenderung terkupas, untuk itu disediakan tulangan tambahan. Lihat area tarik kupas pada gambar 6.8



Gambar 6. 26 Isobar dari tegangan beton pada daerah angkur
(Sumber: Gilbert, Mickleborough, & Ranzi, 2017)

T.Y. Lin merekomendasikan $T = 0.03F_o$

F_o = 966.27 kN

T = 28.99 kN

f_y = 390.00 MPa

$A_s = T/f_y$ = 74.33 mm²

A_s D10 = 78.57 mm²

n = 1

s = 300.00 mm

Dipasang tulangan ujung **D10-150**

6.4.15.2 Perencanaan hidrolik jack

Sesuai dengan brosur VSL, untuk menarik tendon supaya menghasilkan gaya prategang digunakan alat jacking dengan spesifikasi:

Designation = ZPE-12/St2

Jack capacity = 1850.00 KN

6.4.15.3 Perencanaan Grouting

Sesuai dengan brosur VSL = f_c cube 100MPa

f_c' grouting = ~85MPa

6.4.16 Daerah Limit Kabel

Agar tegangan terjadi tidak melebihi tegangan izin, maka penempatan tendon harus didalam area daerah limit kabel yang dihitung sebagai berikut:

$$a1 = \frac{M_{\text{service}}}{F_e} + \frac{f t' \times A \times K t}{F_e}$$

a1 berjarak dari kern atas penampang.

$$a2 = \frac{M_{\text{jacking}}}{F_o} + \frac{f t' \times A \times K b}{F_o}$$

a2 berjarak dari kern bawah penampang.

Perhitungan daerah limit kabel:

L	= 24000.00 mm
e lapangan	= 730.94mm
e tumpuan	= 200.00 mm
fokus	= 930.94 mm
D tendon	= 77.00 mm
Ft' = fb'	= 6.32 MPa
Fo	= 966273.75 N
Fe	= 728865.30 N
A	= 793600.00 mm ²

Koordinat Tendon:

$$Y = 4fx(l-x)/l^2$$

Daerah Limit:

yt	= 390.56 mm
yb	= 809.44 mm
Kt	= 173.41 mm
Kb	= 359.39 mm
et	= 1866.78 mm
eb	= 1194.14 mm

Tabel 6. 21 Rekapitulasi perhitungan daerah limit kabel Prategang kelas C

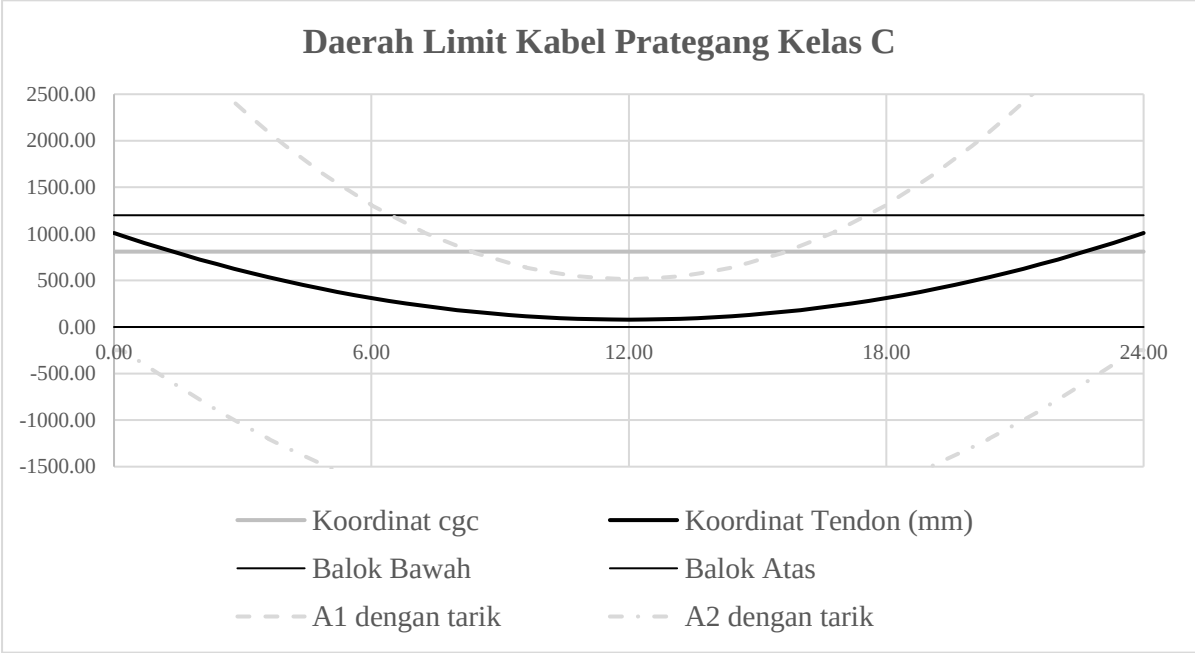
Station (m)	Transfer Moment (KNm)	Service Moment (KNm)	Koord. cgc	Koord. Kt	Koord. Kb	Koord. Tendon (mm)	Koord. A1 (mm)	Koord. A1 +et (mm)	Koord. A2 (mm)	Koord. A2+eb (mm)
0.00	-478.31	-550.98	809.44	982.84	450.05	1009.44	1738.78	3605.56	945.05	-249.09
0.20	-478.31	-550.98	809.44	982.84	450.05	978.66	1738.78	3605.56	945.05	-249.09
0.70	-332.27	-375.97	809.44	982.84	450.05	903.99	1498.67	3365.45	793.91	-400.23
1.20	-188.73	-203.46	809.44	982.84	450.05	832.56	1261.99	3128.77	645.36	-548.78
1.20	-185.11	-199.37	809.44	982.84	450.05	832.56	1256.37	3123.15	641.62	-552.52
1.60	-74.11	-66.16	809.44	982.84	450.05	777.74	1073.62	2940.40	526.75	-667.40
2.00	35.29	65.45	809.44	982.84	450.05	724.98	893.05	2759.83	413.52	-780.62
2.40	143.10	195.46	809.44	982.84	450.05	674.30	714.67	2581.45	301.96	-892.19
2.40	146.20	198.96	809.44	982.84	450.05	674.30	709.87	2576.65	298.75	-895.39
2.80	245.55	318.29	809.44	982.84	450.05	625.68	546.16	2412.94	195.93	-998.21
3.20	343.30	436.02	809.44	982.84	450.05	579.14	384.63	2251.41	94.76	-1099.38
3.60	439.46	552.15	809.44	982.84	450.05	534.66	225.30	2092.08	-4.75	-1198.89
3.60	442.16	555.20	809.44	982.84	450.05	534.66	221.12	2087.90	-7.54	-1201.68
4.00	528.26	658.61	809.44	982.84	450.05	492.25	79.23	1946.02	-96.65	-1290.80
4.40	612.77	760.43	809.44	982.84	450.05	451.91	-60.46	1806.32	-184.11	-1378.26

4.80	695.68	860.65	809.44	982.84	450.05	413.64	-197.96	1668.82	-269.92	-1464.06
4.80	697.99	863.25	809.44	982.84	450.05	413.64	-201.54	1665.25	-272.30	-1466.45
5.20	770.63	950.46	809.44	982.84	450.05	377.43	-321.18	1545.60	-347.47	-1541.62
5.60	841.66	1036.06	809.44	982.84	450.05	343.30	-438.63	1428.15	-420.99	-1615.14
6.00	911.10	1120.07	809.44	982.84	450.05	311.23	-553.89	1312.89	-492.86	-1687.00
6.00	913.02	1122.23	809.44	982.84	450.05	311.23	-556.85	1309.93	-494.83	-1688.98
6.40	972.36	1193.42	809.44	982.84	450.05	281.24	-654.53	1212.26	-556.24	-1750.39
6.80	1030.10	1263.02	809.44	982.84	450.05	253.31	-750.01	1116.77	-616.00	-1810.15
7.20	1086.24	1331.01	809.44	982.84	450.05	227.45	-843.30	1023.48	-674.10	-1868.25
7.20	1087.76	1332.73	809.44	982.84	450.05	227.45	-845.66	1021.12	-675.68	-1869.82
7.60	1134.03	1388.18	809.44	982.84	450.05	203.66	-921.74	945.04	-723.56	-1917.71
8.00	1178.70	1442.04	809.44	982.84	450.05	181.94	-995.62	871.16	-769.79	-1963.94
8.40	1221.77	1494.29	809.44	982.84	450.05	162.28	-1067.32	799.46	-814.37	-2008.51
8.40	1222.91	1495.58	809.44	982.84	450.05	162.28	-1069.08	797.70	-815.55	-2009.69
8.80	1256.30	1535.50	809.44	982.84	450.05	144.70	-1123.86	742.92	-850.10	-2044.24
9.20	1288.08	1573.83	809.44	982.84	450.05	129.18	-1176.44	690.34	-882.99	-2077.14
9.60	1318.27	1610.56	809.44	982.84	450.05	115.74	-1226.83	639.95	-914.24	-2108.38
9.60	1319.03	1611.41	809.44	982.84	450.05	115.74	-1228.01	638.77	-915.02	-2109.16
10.00	1339.65	1635.95	809.44	982.84	450.05	104.36	-1261.68	605.10	-936.36	-2130.51

10.40	1358.68	1658.90	809.44	982.84	450.05	95.05	-1293.15	573.63	-956.05	-2150.20
10.80	1376.11	1680.24	809.44	982.84	450.05	87.81	-1322.44	544.34	-974.09	-2168.23
10.80	1376.48	1680.67	809.44	982.84	450.05	87.81	-1323.03	543.75	-974.48	-2168.62
11.20	1384.42	1689.91	809.44	982.84	450.05	82.64	-1335.70	531.08	-982.69	-2176.83
11.60	1390.75	1697.55	809.44	982.84	450.05	79.53	-1346.18	520.60	-989.24	-2183.39
12.00	1395.49	1703.59	809.44	982.84	450.05	78.50	-1354.47	512.31	-994.14	-2188.29
12.00	1395.49	1703.59	809.44	982.84	450.05	78.50	-1354.47	512.31	-994.14	-2188.29
12.40	1390.75	1697.55	809.44	982.84	450.05	79.53	-1346.18	520.60	-989.24	-2183.39
12.80	1384.42	1689.91	809.44	982.84	450.05	82.64	-1335.70	531.08	-982.69	-2176.83
13.20	1376.48	1680.67	809.44	982.84	450.05	87.81	-1323.03	543.75	-974.48	-2168.62
13.20	1376.11	1680.24	809.44	982.84	450.05	87.81	-1322.44	544.34	-974.09	-2168.23
13.60	1358.68	1658.90	809.44	982.84	450.05	95.05	-1293.15	573.63	-956.05	-2150.20
14.00	1339.65	1635.95	809.44	982.84	450.05	104.36	-1261.68	605.10	-936.36	-2130.51
14.40	1319.03	1611.41	809.44	982.84	450.05	115.74	-1228.01	638.77	-915.02	-2109.16
14.40	1318.27	1610.56	809.44	982.84	450.05	115.74	-1226.83	639.95	-914.24	-2108.38
14.80	1288.08	1573.83	809.44	982.84	450.05	129.18	-1176.44	690.34	-882.99	-2077.14
15.20	1256.30	1535.50	809.44	982.84	450.05	144.70	-1123.86	742.92	-850.10	-2044.24
15.60	1222.91	1495.58	809.44	982.84	450.05	162.28	-1069.08	797.70	-815.55	-2009.69
15.60	1221.77	1494.29	809.44	982.84	450.05	162.28	-1067.32	799.46	-814.37	-2008.51

16.00	1178.70	1442.04	809.44	982.84	450.05	181.94	-995.62	871.16	-769.79	-1963.94
16.40	1134.03	1388.18	809.44	982.84	450.05	203.66	-921.74	945.04	-723.56	-1917.71
16.80	1087.76	1332.73	809.44	982.84	450.05	227.45	-845.66	1021.12	-675.68	-1869.82
16.80	1086.24	1331.01	809.44	982.84	450.05	227.45	-843.30	1023.48	-674.10	-1868.25
17.20	1030.10	1263.02	809.44	982.84	450.05	253.31	-750.01	1116.77	-616.00	-1810.15
17.60	972.36	1193.42	809.44	982.84	450.05	281.24	-654.53	1212.26	-556.24	-1750.39
18.00	913.02	1122.23	809.44	982.84	450.05	311.23	-556.85	1309.93	-494.83	-1688.98
18.00	911.10	1120.07	809.44	982.84	450.05	311.23	-553.89	1312.89	-492.86	-1687.00
18.40	841.66	1036.06	809.44	982.84	450.05	343.30	-438.63	1428.15	-420.99	-1615.14
18.80	770.63	950.46	809.44	982.84	450.05	377.43	-321.18	1545.60	-347.47	-1541.62
19.20	697.99	863.25	809.44	982.84	450.05	413.64	-201.54	1665.25	-272.30	-1466.45
19.20	695.68	860.65	809.44	982.84	450.05	413.64	-197.96	1668.82	-269.92	-1464.06
19.60	612.77	760.43	809.44	982.84	450.05	451.91	-60.46	1806.32	-184.11	-1378.26
20.00	528.26	658.61	809.44	982.84	450.05	492.25	79.23	1946.02	-96.65	-1290.80
20.40	442.16	555.20	809.44	982.84	450.05	534.66	221.12	2087.90	-7.54	-1201.68
20.40	439.46	552.15	809.44	982.84	450.05	534.66	225.30	2092.08	-4.75	-1198.89
20.80	343.30	436.02	809.44	982.84	450.05	579.14	384.63	2251.41	94.76	-1099.38
21.20	245.55	318.29	809.44	982.84	450.05	625.68	546.16	2412.94	195.93	-998.21
21.60	146.20	198.96	809.44	982.84	450.05	674.30	709.87	2576.65	298.75	-895.39

21.60	143.10	195.46	809.44	982.84	450.05	674.30	714.67	2581.45	301.96	-892.19
22.00	35.29	65.45	809.44	982.84	450.05	724.98	893.05	2759.83	413.52	-780.62
22.40	-74.11	-66.16	809.44	982.84	450.05	777.74	1073.62	2940.40	526.75	-667.40
22.80	-185.11	-199.37	809.44	982.84	450.05	832.56	1256.37	3123.15	641.62	-552.52
22.80	-188.73	-203.46	809.44	982.84	450.05	832.56	1261.99	3128.77	645.36	-548.78
23.30	-332.27	-375.97	809.44	982.84	450.05	903.99	1498.67	3365.45	793.91	-400.23
23.80	-478.31	-550.98	809.44	982.84	450.05	978.66	1738.78	3605.56	945.05	-249.09
24.00	-478.31	-550.98	809.44	982.84	450.05	1009.44	1738.78	3605.56	945.05	-249.09



Gambar 6. 27 Daerah Limit Kabel SNI Kelas C

6.5 Perencanaan Kolom

Dalam sub bab ini akan diuraikan desain dan *detailing* penulangan struktur kolom, seperti terlihat pada gambar dibawah ini.

6.5.1 Data Asumsi Awal Perencanaan Kolom

H	= 4000 mm
B	= 450 mm
Mutu Beton	= 30 Mpa
Mutu Baja Tulangan	= 420 Mpa
Tebal decking	= 40 mm
Diameter Tulangan Utama (D)	= 20 mm
Diameter Sengkang (Ø)	= 16 mm

6.5.2 Gaya Dalam yang Terjadi pada Kolom

Tabel 6. 22 Gaya dalam yang diterima kolom

Kombinasi Beban	No	Lokasi	P	M2	M3
			kN	kN.m	kN.m
1.4D	1	Bawah	-614	308	0
	2	Atas	-598	-407	0
1.2D + 1.6L	3	Bawah	-648	339	0
	4	Atas	-635	-442	0
1.2D + L + Ex x	5	Bawah	-601	330	95
	6	Atas	-587	-398	48
1.2D + L + Ex y	7	Bawah	-604	292	-95
	8	Atas	-590	-416	-48
0.9D + Ex x	9	Bawah	-597	374	28
	10	Atas	-584	-375	14
0.9D + Ex y	11	Bawah	-607	248	-28
	12	Atas	-594	-438	-14
0.9D - Ex x	13	Bawah	-349	195	95

	14	Atas	-340	-223	48
0.9D - Ex y	15	Bawah	-352	157	-95
	16	Atas	-343	-242	-48
1.2D + L - Ex x	17	Bawah	-345	239	28
	18	Atas	-337	-201	14
1.2D + L - Ex y	19	Bawah	-356	113	-28
	20	Atas	-347	-264	-14

6.5.3 Syarat Komponen Struktur Kolom

SNI Pasal 21.6.1 mensyaratkan :

6.5.3.1 Gaya aksial terfaktor maksimum yang bekerja pada kolom harus melebihi $A_g f'_c / 10$ (SNI 2847:2013 pasal 21.6.1).

$$P_u = 647.95 \text{ kN}$$

$$P_u = A_g \times \frac{f'_c}{10} = 450 \times 450 \times \frac{30}{10} = 607.50 \text{ kN}$$

$$\text{Gaya aksial terfaktor} = 647.95 \text{ kN} > A_g \times \frac{f'_c}{10} = 607.50 \text{ kN}$$

memenuhi syarat (OK)

6.5.3.2 Sisi terpendek penampang kolom tidak kurang dari 300 mm (SNI 2847:2013 pasal 21.6.1.1)

Ukuran penampang terpendek 450 mm > 300 mm (OK)

6.5.3.3 Rasio dimensi penampang tidak kurang dari 0,4 (SNI 2847:2013 pasal 21.6.1.2)

$$\text{Ratio } b/h = 4500/4500 = 1 > 0,4 \text{ (OK)}$$

6.5.4 Konfigurasi Penulangan

Berdasarkan SNI 2847-2013 Pasal 21.6.3.1, luas tulangan longitudinal penahan lentur tidak boleh kurang dari 0.01 A_g dan lebih dari 0.06 A_g . Sebagai asumsi awal, tulangan longitudinal kolom dipasang sebanyak 20 buah dengan diameter 20 mm. Penampang

tersebut selanjutnya dievaluasi menggunakan program bantu spColumn dengan data pembebanan pada **table 4.27**.

Dengan konfigurasi seperti terlihat pada **gambar 4.46** kolom memiliki rasio tulangan, $\rho_g = 3.10\%$ atau 20D20 Dengan rasio tersebut, maka persyaratan SNI 2847-2013 Pasal 21.6.3.1 telah terpenuhi.

6.5.5 Kontrol spasi tulangan

Spasi bersih minimum tulangan sejajar dalam suatu lapis harus sebesar db tetapi tidak kurang dari 25 mm (SNI 2847:2013 pasal 7.6.1)

$$S = \frac{b_w - 2 \cdot \text{decking} - 2 \cdot \phi_{\text{senggang}} - n \cdot \phi_{\text{tul utama}}}{n - 1}$$

$$= \frac{450 - 2 \cdot 50 - 2 \cdot 16 - 7 \cdot 20}{6 - 1} = 46 \text{ mm} > 25 \text{ mm}$$

6.5.6 Cek Kapasitas Kolom Terhadap Beban Aksial

SNI 2847-2013 Pasal 10.3.6.2 mengatur besarnya beban aksial terfaktor hasil analisis struktur harus mampu ditahan oleh kapasitas beban aksial penampang kolom yang dihitung pada persamaan berikut :

$$A_{st} = 20 \times 0.25 \pi D^2 = 20 \times 0.25 \pi 20^2 = 6283.19 \text{ mm}^2$$

$$\phi P_n(\text{max}) = 0.8 \times \phi \times [0.85 \times f'_c \times (A_g - A_{st}) + f_y \times A_{st}]$$

$$\phi P_n(\text{max}) = 3974.08 \text{ kN} > P_u = 547.95 \text{ kN} \dots\dots\dots \text{OK}$$

6.5.7 Desain Tulangan Transversal Kolom

a. Tulangan Transversal Sebagai Pengekang Inti Beton (Confinement)

Selain menahan gaya geser, tulangan transversal memiliki fungsi yang sangat penting untuk diperhitungkan, yaitu sebagai pengekang atau *confinement*. Ketika menerima gaya gempa, kolom mengalami momen maksimum pada bagian ujungnya. Deformasi non-linear dapat terjadi dan sebagai material yang getas, beton sangat rentan mengalami keruntuhan karena tidak memiliki daktilitas yang memadai.

Spasi Tulangan Confinement di Daerah Sendi Plastis

Besar spasi tulangan *confinement* tersebut harus memenuhi pertaruan **SNI 2847:2013 Pasal 21.6.4.3** seperti berikut :

Spasi tulangan maksimum adalah yang terkecil di antara :

1. $\frac{1}{4}$ dimensi penampang kolom terkecil = $\frac{1}{4} \times 450 = 112.50$ mm
2. 6 kali diameter tulangan longitudinal = $6 \times 20 = 120.00$ mm
3. So menurut persamaan

$$S_o \leq 100 + (350 - h_x)/3$$

dimana :

$$x_1 = 106.00 \text{ mm}$$

$$h_x = x_i \text{ terbesar} = 106.00 \text{ mm}$$

$$S_o = 100 + \left(\frac{350 - 106}{3} \right) = 181.33 \text{ mm}$$

Dengan demikian spasi yang digunakan yaitu 100 mm.

SNI 2847:2013 Pasal 21.6.4.4 mengatur luas tulangan geser yang perlu disediakan untuk memberikan pengekanan yang cukup. Luas tersebut harus diambil yang paling kecil antara :

$$A_{sh1} = 0,3 \left(\frac{s_b f'_c}{f_{yt}} \right) \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \text{ dan, } A_{sh2} = 0,09 \frac{s_b f'_c}{f_{yt}}$$

Dimana :

S = jarak spasi tulangan transversal (mm)

B_c = dimensi potongan melintang dari inti kolom, diukur dari pusat ke pusat dari tulangan pengekanan (mm)

A_g = luasan penampang kolom (mm²)

A_{ch} = luasan penampang kolom diukur dari daerah terluar tulangan transversal (mm)

f_{yt} = kuat leleh tulangan transversal (MPa)

Untuk daerah sepanjang lo dari ujung-ujung kolom, total luas penampang hoop tidak boleh kurang dari salah satu yang terbesar antara (SNI 2847:2013 pasal 21.6.4.4):

- $A_{sh1} = 0,3 \cdot \left(\frac{s \cdot b_c \cdot f'_c}{f_{yt}} \right) \cdot \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right)$

- $A_{sh2} = 0,09 \cdot \left(\frac{s \cdot b_c \cdot f_c}{f_{yt}} \right)$
- b_c = lebar penampang inti beton (yang terkekang)

$$= b - 2 \left(t_s + \frac{1}{2} \cdot d_s \right)$$

$$= 450 - 2 \left(50 + \frac{1}{2} \cdot 16 \right)$$

$$= 318 \text{ mm}$$
- $A_{ch} = (b - 2t_s) \times (h - 2t_s)$

$$= (450 - 2 \cdot 50) \times (450 - 2 \cdot 50)$$

$$= 136.900 \text{ mm}^2$$
- $A_{sh1} = 0,3 \cdot \left(\frac{100 \cdot 319 \cdot 30}{420} \right) \cdot \left(\frac{450 \times 450}{136.900} - 1 \right)$

$$= 326.53 \text{ mm}^2$$
- $A_{sh2} = 0,09 \cdot \left(\frac{100 \cdot 318 \cdot 30}{420} \right) = 204.43 \text{ mm}^2$

Jadi digunakan 2D16-100 dengan $A_{s.pasang} = 2 \times 0,25 \times \pi \times (16)^2 = 402.12 \text{ mm}^2 > 326.53 \text{ mm}^2$

Adapun **Persyaratan SNI 2847:2013 Pasal 21.6.4.1** mengatur tinggi zona pemasangan tulangan. Tulangan *hoop* dengan spasi yang telah dihitung tersebut harus dipasang sepanjang l_o dari ujung-ujung kolom. l_o dipilih yang terbesar antara :

1. Tinggi elemen kolom di join, $h = 450 \text{ mm}$
2. $\frac{1}{6}$ bentang bersih $= \frac{1}{6} \times (4000 - 450) = 490 \text{ mm}$
3. 450 mm

Jadi panjang l_o sebesar 490 mm dari ujung-ujung kolom.

Spasi Tulangan Confinement di Daerah Luar Sendi Plastis

Untuk daerah kolom diluar l_o , tulangan *confinement* dapat dipasang dengan spasi berdasarkan syarat SNI 2847:2013 Pasal 21.6.4.5. Spasi harus diambil yang terkecil dari dua syarat berikut :

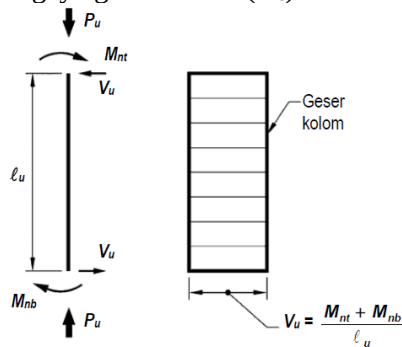
- 1) $6 \times \text{diameter tulangan longitudinal terkecil} = 6 \times 20 \text{ mm} = 120 \text{ mm}$
- 2) 150 mm.

Dengan demikian, untuk daerah luar l_o , tulangan dipasang tiap interval 100 mm.

b. Tulangan Transversal Sebagai Penahan Gaya Geser

Menentukan Gaya Geser Desain

SNI 2847:2013 Pasal 21.6.5.1 mengatur pendetailan tulangan geser pada struktur rangka pemikul momen khusus. Sama seperti dalam mendesain komponen balok, momen probabilistik (M_{pr}) digunakan untuk memperoleh gaya geser desain (V_e).



Gambar 6. 28 Penentuan gaya geser pada kolom

Gambar 6.28 menunjukkan perhitungan besar gaya geser desain yang harus diambil. Nilai M_{pr} pada ujung-ujung kolom diperoleh dari diagram interaksi dengan faktor kuat lebih pada material tulangan longitudinal sebesar 25% ($f_s = 1,25f_y$). Momen nominal terfaktor paling besar dari semua kombinasi harus diambil sebagai M_{pr} . Dengan adanya faktor kuat lebih, tegangan leleh baja sebesar 420 MPa diperbesar 1,25% menjadi 525 MPa.

Sehingga gaya geser desain yang digunakan untuk menentukan jarak dan luas tulangan transversal ditentukan dari nilai (a), tetapi tidak perlu lebih besar dari nilai (b) dan harus melebihi nilai (c).

$$(a) V_{e1} = \frac{M_{prc\ atas} + M_{prbawah}}{l_u}$$

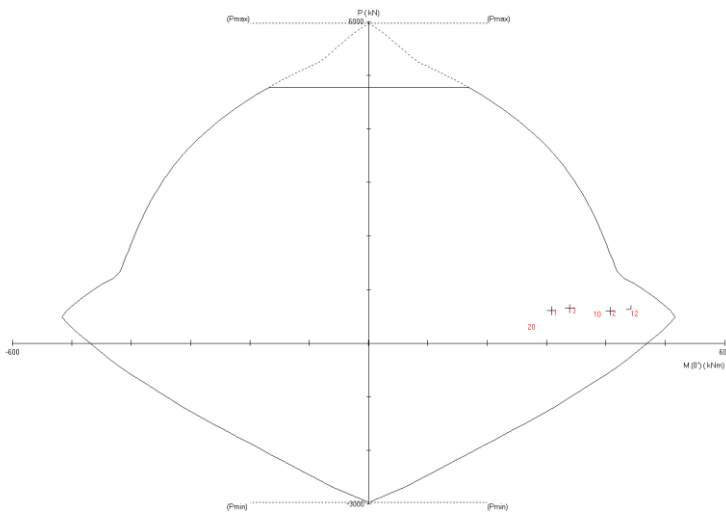
$$(b) V_{e2} = \frac{M_{pr+} + M_{pr-}}{l_n}$$

(c) V_u hasil analisis struktur

- Pehitungan gaya geser desain

(a) Menghitung nilai V_{e1}

$M_{prc.atas}$ dan $M_{prc.bawah}$ didapatkan dari diagram interaksi Pn-Mpr kolom. Diagram interaksi didapat dengan menggunakan $f_s = 1,25 f_y$ dan $\phi = 1$. Berikut merupakan output diagram interaksi dengan $f_s = 1,25 f_y$.



Gambar 6. 29 Diagram Interaksi P-M Kolom Desain $f_s=1.25f_y$

Tabel Output program spColumn, ujung bawah kolom lt.1

Dari ETABS, didapatkan $M_{prc bawah} = 507.80 \text{ kNm}$

Dan didapatkan $M_{prc atas} = 509.32 \text{ kNm}$.

Maka, dapat dihitung

$$V_{e1} = \frac{M_{prc bawah} + M_{prc atas}}{l_u} = \frac{507.80 \text{ kN.m} + 509.32 \text{ kN.m}}{(4-0.45) \text{ m}} = 435.12 \text{ kN}$$

(b) Menghitung V_{e2}

Nilai Mpr 1 dan Mpr 2 merupakan nilai pada balok

(c) Vu hasil analisis struktur ETABS

Berdasarkan output ETABS didapatkan nilai $V_u = 48.36$ kN, sedangkan didapatkan $V_{e_{maks}}$ hasil perhitungan sebesar 435.12 kN, maka nilai $V_e > V_u$.

Berdasarkan persyaratan SNI 2847:2013 pasal 21.6.5.1 yaitu nilai V_e tidak boleh lebih kecil dari nilai gaya geser terfaktor yang dibutuhkan berdasarkan analisis struktur.

Sehingga perencanaan geser memenuhi persyaratan (OK).

- Perhitungan Tulangan Geser

a. Mengecek kontribusi beton diabaikan atau tidak

Berdasarkan SNI 2847:2013, kontribusi beton diabaikan dalam menahan gaya geser rencana bila:

- Gaya geser yang ditimbulkan gempa, V_{sway} , mewakili setengah atau lebih dari kekuatan geser perlu maksimum dalam l_o .

$$50\%.V_e > V_u$$

$$50\%.435.12 \text{ kN} > 48.36 \text{ kN (OK)}$$

- Gaya tekan aksial terfaktor, $P_u = 647.95$ kN harus kurang dari

$$\frac{A_g \times f'_c}{20} = \frac{450 \times 450 \times 30}{20} = 303.75 \text{ kN} < P_u = 647.95 \text{ (NOT OK)}$$

Sehingga V_c diperhitungkan.

b. Berdasarkan SNI 2847:2013 pasal 11.2.1.2 perhitungan kuat geser beton bila ikut berkontribusi menahan geser, yaitu:

$$d = 450 - 50 - 16 - \frac{20}{2} = 384.00 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \cdot \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \cdot \lambda \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \\ &= 0,17 \cdot \left(1 + \frac{336.56 \times 10^3}{14 \times 450 \times 450} \right) \cdot 1 \sqrt{30} \cdot 450 \cdot 384 \end{aligned}$$

$$= 161.09 \text{ kN}$$

- c. Menghitung tulangan transversal penahan geser untuk daerah sepanjang l_0 dari ujung-ujung kolom. Besarnya nilai V_s dihitung berdasarkan tulangan sengkang terpasang 4 D16 -100 dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{V_e}{\phi} - V_c \\ &= \frac{254.28}{0.75} - 161.09 \\ &= 181.30 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$A_v = 2 \times 0.25 \times \pi \times 16^2 = 402 \text{ mm}^2$$

$$s = \frac{A_v \times f_y \times d}{V_s} = \frac{402 \times 420 \times 384}{181.30 \times 10^3} = 357.74 \text{ mm} > s_{pakai} = 100 \text{ mm}$$

(OK)

Sehingga pada daerah sepanjang l_0 dipakai 2D16-100 mm

- d. Berdasarkan SNI 2847:2013 spasi minimum untuk tulangan transversal penahan geser untuk daerah sepanjang sisa tinggi kolom bersih (tinggi kolom total dikurangi l_0 pada masing-masing ujung kolom) sebagai berikut:

- 6 x diameter tulangan longitudinal terkecil
 $6 \times 20 \text{ mm} = 120 \text{ mm}$
- 150 mm

Jadi sengkang diluar daerah plastis adalah 2D16-100 mm.

4.4.3.8 Sambungan Lewatan

Karena seluruh tulangan pada sambungan lewatan disalurkan pada lokasi yang sama, maka sambungan lewatan yang digunakan tergolong kelas B. Untuk sambungan kelas B panjang minimum sambungan lewatannya adalah $1,3l_d$ (SNI 2847:2013 pasal 12.15.1). Besarnya l_d ditetapkan berdasarkan SNI 2847:2013 pasal 12.2.3 dengan menggunakan nilai $K_r = 0$ untuk penyederhanaan desain.

$$l_d = \left(\frac{f_y}{1,1 \times \lambda \times \sqrt{f'c}} \frac{\Psi_t \Psi_e \Psi_s}{\frac{c_b + k_{tr}}{d_b}} \right) \cdot db \text{ (SNI 2847:2013 pasal 12.2.4)}$$

Dimana:

$\Psi_t = 1$ (situasi lainnya)

$\Psi_e = 1$ (tulangan tanpa pelapis)

$\Psi_s = 1$ (tulangan $\geq D22$)

$\lambda = 1$ (beton biasa)

$d = 20$ mm

nilai c_b merupakan nilai terkecil dari parameter dibawah ini:

$$c_1 = 50 + 16 + \frac{20}{2} = 66.00 \text{ mm}$$

$$c_2 = \frac{450 - 2 \times 66}{2} = 79.50 \text{ mm}$$

maka $c_b = c_{\min} = 66$ mm

$$(c_b + k_{tr})/d_b = 2.5$$

$$l_d = \left(\frac{420}{1,1 \times 1 \times \sqrt{40}} \frac{1.1.1}{2.5} \right) \times 20 = 557.98 \text{ mm}$$

$$1,3 l_d = 1,3 \times 557.98 \text{ mm} = 725 \text{ mm}$$

Berdasarkan SNI 2847:2013 pasal 12.17.2.4, pada komponen struktur tekan bertulangan pengikat, dimana pengikat sepanjang panjang sambungan lewatan memiliki luas efektif tidak kurang dari **0,0015 h** dalam keduaarah, panjang sambungan lewatan diizinkan untuk dikalikan dengan 0,83, tetapi panjang lewatan tidak boleh kurang dari 300 mm. Kaki pengikat yang tegak lurus terhadap dimensi **h** harus digunakan dalam menentukan luas efektif.

$$0,0015 \times h \times s = 0,0015 \times 450 \times 100 = 67.50 \text{ mm}^2 < A_v = 402 \text{ mm}^2$$

Sehingga panjang lewatan dapat dikurangi menjadi

$$0,83 \times 1,3 l_d = 0,83 \times 725 = 601.74 \text{ mm} \sim 602 \text{ mm}$$

Digunakan sambungan lewatan sepanjang 602 mm

6.6 Hubungan Balok Kolom

a. Mengecek syarat panjang joint

Berdasarkan SNI 2847:2013 pasal 21.7.2.3, dimensi kolom yang sejajar dengan tulangan balok tidak boleh kurang dari 20 kali diameter tulangan longitudinal terbesar.

B = 400.00 mm

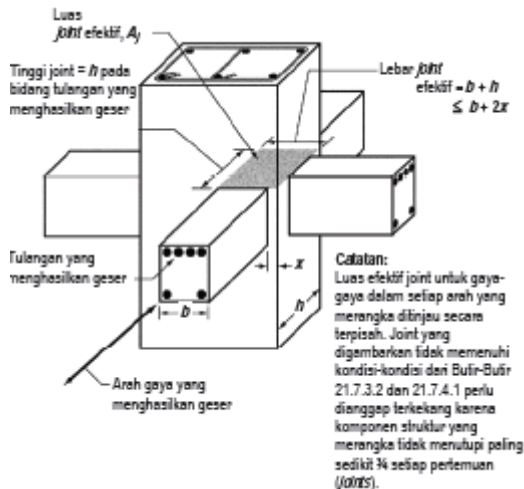
H = 450.00 mm

db balok = 20 mm

20 x db = 20 x 20 = 400 mm (OK)

b. Menentukan luas efektif joint

Berdasarkan SNI 2847:2013 pasal 21.7.4.1, A_j merupakan perkalian tinggi efektif dengan lebar joint efektif.



Gambar 6. 30 Ilustrasi luas joint efektif

b = 400 mm

h = 450 mm

$x = \frac{(450-400)}{2} = 25 \text{ mm}$

Tinggi joint = 400 mm

Lebar joint efektif merupakan nilai terkecil dari: (Gambar 4.16)

$$\begin{aligned}
 b + h &= 400 + 450 = 850 \text{ mm} \\
 b + 2x &= 400 + 2 \cdot (25) = 450 \text{ mm} \\
 A_j &= \text{tinggi joint} \times \text{lebar efektif joint} \\
 &= 450 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \\
 &= 202500 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

c. Menentukan luas efektif joint

Untuk joint interior, jumlah tulangan confinement setidaknya setengah dari tulangan confinement yang dibutuhkan pada ujung-ujung kolom. Spasi vertical tulangan confinement ini diizinkan diperbesar hingga 150 mm (SNI 2847:2013 pasal 21.7.3.2)

$$\frac{A_{sh}}{s} = 0.5 \frac{A_{sh}}{s} = 0.5 \frac{402.12}{100} = 0.12 \text{ mm}$$

Digunakan 2D16

$$A_{sh} = 201 \text{ mm}^2$$

$$s = \frac{12.43}{0.12} = 150 \text{ mm}$$

Jadi digunakan **2D16–150 mm**

d. Menghitung gaya geser pada joint

- Menghitung M_g

Balok yang memasuki joint memiliki:

$$M_{prb1} = 1055.54 \text{ KN.m}$$

Pada joint, kekakuan kolom atas dan kolom bawah sama.

$$\begin{aligned}
 M_e &= 0.5 M_{prb1} \\
 &= 527.77 \text{ KN.m}
 \end{aligned}$$

- Menghitung geser pada kolom atas

$$\begin{aligned}
 V_{\text{sway}} &= \frac{M_e + M_e}{l} \\
 &= \frac{2 \times 527.77}{4 - 1.06} \\
 &= 356.60 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

- Berdasarkan SNI 2847:2013 pasal 21.7.2.1, hitung gaya - gaya pada tulangan balok longitudinal. Dalam perhitungan diasumsikan bahwa tegangan pada tulangan tarik lentur adalah $1.25 f_y$.

1. Gaya tarik pada tulangan balok di tumpuan kiri

$$A_s \text{ balok } (A_p) = 1743.04 \text{ mm}^2$$

$$T_1 = A_s \times 1.25 \cdot f_y = 915.09 \text{ KN}$$

- Menghitung gaya geser

$$V_j = (T_1) - V_{\text{sway}}$$

$$= (915.09) - 356.60$$

$$= 558.49 \text{ KN (searah } V_{\text{sway}})$$

e. Cek kuat geser joint

Berdasarkan SNI 2847:2013 pasal 21.7.4.1, untuk menghitung kuat geser joint yang dikekang di keempat sisinya sebagai berikut

$$V_n = 1,7 \times \sqrt{f_c} \times A_j$$

$$= 1,7 \times \sqrt{30} \times 202500.00$$

$$= 1264.61 \text{ kN}$$

$$\phi V_n = 0,75 \times 1264.61 \text{ kN}$$

$$= 948.46 \text{ kN}$$

$$= 948.46 \text{ kN} > V_j = 558.49 \text{ KN (OK)}$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB VII

PEMBEBANAN DAN ANALISIS STRUKTUR MENURUT EN1998-1-1:2004

7.1 Umum

Pembebanan yang terjadi terdiri atas pembebanan gravitasi dari EN1992-1-1:2004 dan beban gempa dari EN1998-1-1:2004. Struktur kemudian dimodelkan dengan bantuan program ETABS v16, kemudian dikontrol terhadap beberapa faktor sehingga permodelan bisa mendekati kondisi asli dari bangunan.

7.2 Permodelan Struktur

a. Variabel gedung yang diinput pada program ETABS v16:

Mutu beton f_c'	= 40.00 MPa
Jumlah lantai	= 12.00
Tinggi tiap lantai	= 4.00 m
Tinggi gedung	= 48.00 m
Lebar antar kolom	= 6.00 m
Jumlah baris	= 4.00
Tinggi balok induk (h)	= 0.80 m
Lebar balok induk (b)	= 0.40 m
Panjang dan lebar kolom	= 0.90 m

Pembebanan Gravitasi

Beban Mati	
Berat beton	= 23.54 KN/m ³
Finishing	= 0.21 KN/m ²
Tegel	= 0.24 KN/m ²
Dinding	= 2.45 KN/m ²
Plafond dan penggantung	= 0.18 KN/m ²
Plumbing dan ducting	= 0.25 KN/m ²
Beban Hidup	
Lantai atap	= 0.98 KN/m ²
Lantai	= 2.45 KN/m ²

7.3 Pembebanan Gempa

Lokasi = Aceh

PGA = 0.62

Ground type = D (Table 3.1 EN1998-1-1:2004)

Didesain menggunakan type 2 *elastic response spectra*, sehingga Eurocode merekomendasikan parameter:

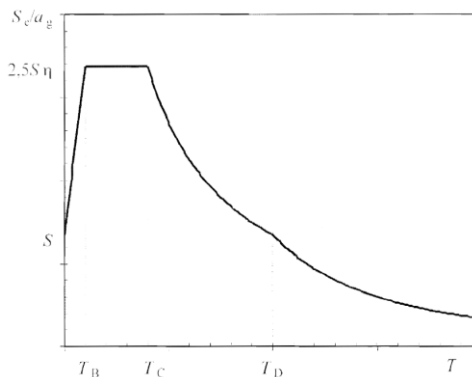
$S = 1.80$

$T_b = 0.01 \text{ s}$

$T_c = 0.30 \text{ s}$

$T_d = 1.20 \text{ s}$

Parameter tersebut didefinisikan di Gambar 7.1.



Gambar 7. 1 Tipikal Response Spectrum dari Eurocode (Sumber: Eurocode, 2004)

Behaviour value q:

EN 1998-1-1:2004 5.2.2.2

Perilaku daktail dari struktur pada Eurocode dihitung tergantung kepada tingkat daktilitas (*High*, *Low*, atau *Medium*) serta sistem struktur.

Tabel 7. 1 Nilai q untuk perilaku bangunan (Eurocode, 2004b)

STRUCTURAL TYPE	DCM	DCH
Frame system, dual system, coupled wall system	$3,0\alpha_y/\alpha_l$	$4,5\alpha_y/\alpha_l$
Uncoupled wall system	3,0	$4,0\alpha_y/\alpha_l$
Torsionally flexible system	2,0	3,0
Inverted pendulum system	1,5	2,0

Jenis struktur = DCH (high ductility)

$$q = 4.5 \times \frac{\alpha_0}{\alpha_1}$$

EN 1998-1-1:2004 5.2.2.2(5)

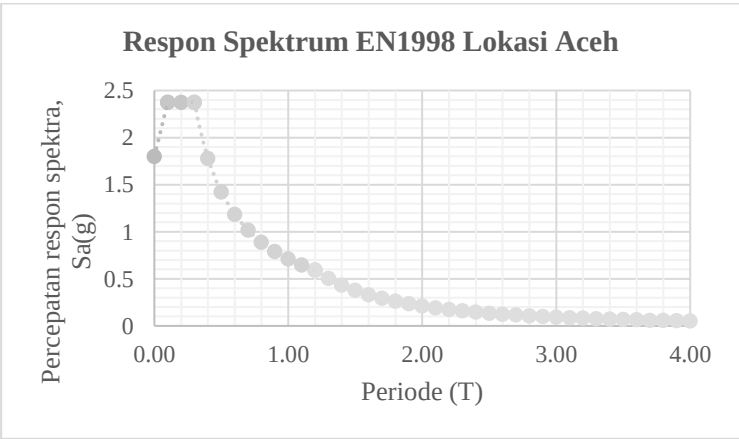
Multistorey, Multi-bay frames or frame-equivalent dual structures:

a_0/a_1 = 1.30

q = 5.85

Lower bound level β = 0.20

Sehingga didapat kesimpulan dari perhitungan diatas, daktilitas struktur memiliki nilai q sebesar 5.85.



Gambar 7. 2 Response Spectrum EN1992-1-1:2004 Lokasi Aceh

7.4 Kontrol Model

Agar mendekati kondisi real, model struktur utama yang sudah di input pada program ETABS v16 dikontrol terhadap:

1. Base Reaction
2. Partisipasi Massa
3. Base Shear
4. Waktu Getar Alami Fundamental
5. Drift

7.4.1 Kontrol Base Reaction

Tabel 7. 2 Total Beban yang Dihitung

Beban Mati	Jumlah	Panjang	Lebar	Tinggi	q m3	Berat	
Balok Induk	456	0.80	0.40	6.00	23.54	20606.20	KN
Balok Anak	11	0.20	0.40	36.00	23.54	745.62	KN
Balok Pratekan	3	24.00	0.40	1.06	23.54	718.51	KN
Kolom 90X90	100	0.90	0.90	4.00	23.54	7625.65	KN
Kolom 80X80	100	0.80	0.80	4.00	23.54	6025.21	KN
Kolom 70X70	75	0.70	0.70	4.00	23.54	3459.79	KN
Kolom 40X40	16	0.40	0.40	4.00	23.54	241.01	KN
Pelat Atap	1	24.00	24.00	0.14	23.54	1897.94	KN
Pelat Lantai	11	24.00	21.58	0.14	23.54	18767.86	KN
Dinding	4	1.00	24.00	44.00	2.45	10355.82	KN

Tegel dan finishing	11	24.00	24.00	1.00	0.44	2796.07	KN
Beban Hidup							
Lantai	11.00	24.00	24.00	1.00	2.45	15533.73	KN
Atap	1.00	24.00	24.00	1.00	0.98	564.86	KN

Total DL+LL menurut perhitungan manual:

DL = 73239.67 kN

LL = 14529.04 kN

Total 1DL+1LL = 87768.71 kN

Hasil ETABS 1DL+1LL = 85333.34 kN

Selisih = 2435.37 kN

Persentase selisih = 2.77%

Syarat selisih maksimal = 5.00% OK

dari hasil perhitungan di atas diperoleh kesimpulan bahwa permodelan telah mendekati keadaan sesungguhnya.

7.4.2 Kontrol Partisipasi Massa

Sesuai dengan SNI 1726:2012, Perhitungan respons dinamik struktur harus sedemikian rupa sehingga partisipasi massa dalam menghasilkan respon total sekurang kurangnya adalah 90% (Tabel 7.3)

Tabel 7. 3 Partisipasi massa pada modelling

Mode	Period	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ
1	1.15	0.85	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00
2	1.15	0.00	0.85	0.00	0.85	0.85	0.00
3	1.03	0.00	0.00	0.00	0.85	0.85	0.00

4	0.42	0.08	0.00	0.00	0.94	0.85	0.00
5	0.41	0.00	0.09	0.00	0.94	0.94	0.00
6	0.36	0.00	0.00	0.00	0.94	0.94	0.00
7	0.28	0.03	0.00	0.00	0.96	0.94	0.00
8	0.27	0.00	0.02	0.00	0.96	0.96	0.00
9	0.23	0.00	0.00	0.00	0.96	0.96	0.00
10	0.19	0.02	0.00	0.00	0.98	0.96	0.00
11	0.19	0.00	0.02	0.00	0.98	0.98	0.00
12	0.17	0.00	0.00	0.00	0.98	0.98	0.00

Syarat minimum partisipasi massa adalah 90%

UX = 94% OK

UY = 94% OK

Dari tabel diatas didapatkan bahwa dalam penjumlahan respon ragam menghasilkan respon total telah mencapai 90% untuk arah X dan arah Y. maka ketentuan menurut SNI 1726:2012 pasal 7.9.1 terpenuhi.

7.4.3 Kontrol Base Shear

T1 = 1.37 s

Tb = 0.10 s

Tc = 0.30 s

Td = 1.20 s

T1 > Td maka

Sd(T) = 0.09 g

Sd(T) min = 0.12 g

λ = 0.85

$\lambda \cdot S_d(t)$ = 0.11

W = 90702.13 KN

Vstatik = 8951.23 KN

Tabel 7. 4 Gempa dinamik pada modelling

Load Case/Combo	FX KN	FY KN
QuakeX Max	6246.32	1882.12
QuakeY Max	1873.90	6273.72

Vdinamik = 6246.32 KN

7.4.4 Kontrol Waktu Getar Alami Fundamental (T)

$$T1 = Ct \cdot h^{3/4}$$

Untuk rangka beton pemikul momen:

$$Ct = 0.08$$

$$x = 0.75$$

$$Hn = 48.00 \text{ m}$$

$$T1 = 1.37 \text{ s}$$

$$\text{Syarat } T \text{ ETABS} < T \text{ manual} = 1.15 \text{ OK}$$

7.4.5 Kontrol Drift

EN 1998-1-1:2004 Chapter 4.4.3.2

Kinerja batas layan struktur gedung sangat ditentukan oleh simpangan antar tingkat akibat pengaruh gempa rencana. Dimaksudkan untuk menjaga kenyamanan penghuni, mencegah kerusakan non-struktur, membatasi peretakan beton yang berlebihan.

$$d_s \times v \leq 0.01 h$$

Dimana:

$$V = 0.5 \text{ (faktor kepentingan I)}$$

$$h = \text{Tinggi perlantai} = 4.00 \text{ m}$$

Sehingga batas simpangan antar lantai adalah,

$d_s \leq 80 \text{ mm}$

Tabel 7. 5 Hasil simpangan antar lantai dari ETABS v16.2.0

Story	Elevation	X-Dir	Y-Dir	X-Dir Min	Y-Dir Min
Story12	48	0.06	0.06	-0.06	-0.06
Story11	44	0.05	0.05	-0.05	-0.05
Story10	40	0.05	0.05	-0.05	-0.05
Story9	36	0.05	0.05	-0.05	-0.05
Story8	32	0.05	0.05	-0.05	-0.05
Story7	28	0.04	0.04	-0.04	-0.04
Story6	24	0.04	0.04	-0.04	-0.04
Story5	20	0.03	0.03	-0.03	-0.03
Story4	16	0.03	0.03	-0.03	-0.03
Story3	12	0.02	0.02	-0.02	-0.02
Story2	8	0.02	0.02	-0.02	-0.02
Story1	4	0.01	0.01	-0.01	-0.01
Base	0	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabel 7. 6 Hasil drift dari ETABS v.16.2.0

Story	Eleva- tion	DRIFT					
		X- Dir	Y- Dir	X-Dir Min	Y-Dir Min	XY- dir	XY-dir min
Story12	48	33.83	27.82	-33.69	-27.90	43.80	43.74
Story11	44	11.55	11.80	-11.33	-11.17	16.51	15.91
Story10	40	15.31	15.42	-15.26	-15.32	21.72	21.62

Story9	36	19.25	19.28	-19.27	-19.30	27.24	27.27
Story8	32	20.19	20.19	-20.16	-20.15	28.55	28.50
Story7	28	23.00	22.96	-22.99	-22.96	32.50	32.49
Story6	24	25.77	25.73	-25.78	-25.73	36.42	36.43
Story5	20	28.43	28.41	-28.45	-28.44	40.19	40.22
Story4	16	28.77	28.80	-28.74	-28.76	40.71	40.66
Story3	12	31.85	31.92	-31.89	-31.97	45.09	45.16
Story2	8	38.13	38.26	-38.29	-38.42	54.01	54.24
Story1	4	56.23	56.45	-55.97	-56.20	79.68	79.32
Base	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Kontrol drift < 80 mm (OK)

Sehingga berdasarkan simpangan yang terjadi searah sumbu X dan Sumbu Y memenuhi persyaratan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB VIII

DESAIN BETON PRATEGANG MENGGUNAKAN EN1992-1-1:2004

8.1.1 Data Perancangan

$L = 24.00 \text{ m}$
 $H_p = 1.06 \text{ m}$
 $B_p = 0.40 \text{ m}$
 $l = 6.00 \text{ m}$
 $d' = 40.00 \text{ mm}$
 $tf_s = 12.00 \text{ cm}$
 $d \text{ strand} = 77.00 \text{ mm}$

Mutu beton,

$f_{ck} = 40.00 \text{ MPa}$
 $f_{ct} = 3.51 \text{ MPa}$
 $f_{ck \text{ slab}} = 40.00 \text{ MPa}$

Mutu baja,

$f_{pk} = 1770.00 \text{ MPa}$
 $f_{pk \ 0.1} = 1520.00 \text{ MPa}$
 $f_y = 390.00 \text{ MPa}$
 $f_{ckp(t0)} = 35.00 \text{ MPa}$
 $f_{ctm(t0)} = 3.21 \text{ MPa}$

8.1.2 Tegangan Izin dari beton dan baja

EN1992-1-1:2004 – 5.10.2.2 dan 7.2

Besar dari gaya prategang yang diberikan kepada baja tidak boleh melebihi dari gaya maksimum yang dihitung:

$$P_{\max} = A_p \times \sigma_{p_{\max}}$$

Pada saat *jacking*:

$$\sigma_{p_{\max}} = \min \{k_7 \times f_{pk}; k_8 \times f_{p0.1k}\}$$

Pada saat beban layan:

$$\sigma_{p_{\max}} = \min \{k_1 \times f_{pk}; k_2 \times f_{p0.1k}\}$$

Dimana:

A_p = Luas penampang dari tendon (mm^2)

$\sigma_{p_{\max}}$ = maksimum tegangan yang diberikan kepada tendon.

k_1 = Koefisien yang berada di *national annex*, rekomendasi Eurocode 0.8

k_2 = Koefisien yang berada di *national annex*, rekomendasi Eurocode 0.9

k_7 = Koefisien yang berada di *national annex*, rekomendasi Eurocode 0.75

k_8 = Koefisien yang berada di *national annex*, rekomendasi Eurocode 0.8

f_{pk} = kuat tarik karakteristik dari baja prategang (MPa)

$f_{p0.1k}$ = kuat tarik dari baja prategang dengan pergeseran 0.1% (MPa)

Besar dari tegangan tekan yang terjadi pada beton tidak boleh melebihi dari tegangan maksimum yang dihitung:

Pada saat *jacking*:

$$\sigma_c \leq 0.6 \times f_{ckt}$$

Pada saat beban layan:

$$\sigma_c \leq 0.45 \times f_{ck}$$

Tegangan tarik:

$$\sigma_t = 1.00 \times f_{ctk}$$

$$f_{ctk} = 0.3 \times f_{ck}^{2/3}$$

Dimana :

σ_c = Tegangan tekan yang terjadi pada penampang beton (MPa)

σ_t = Tegangan tarik yang terjadi pada penampang beton (MPa)

$f_{ck(t)}$ = kuat tekan beton silinder pada hari ke-t (MPa)

f_{ck} = kuat tekan beton silinder pada hari ke-28 (MPa)

$f_{ctk(t)}$ = kuat tarik beton yang diisyaratkan, (MPa)

Besar gaya prategang yang dibutuhkan diambil berdasarkan beberapa persamaan, yaitu persamaan pada serat atas dan bawah tengah bentang saat transfer dan saat beban layan.

Saat *jacking*,

Tegangan tekan pada tumpuan $= \sigma_{tk} = 0.60f_{ck(t)}$
 $= -19.80 \text{ MPa}$

Tegangan tarik pada tumpuan $= \sigma_{tr} = 1.00f_{ct(t)}$
 $= 3.09 \text{ MPa}$

Tegangan tekan pada tumpuan $= \sigma_{tk} = 0.70f_{ck(t)}$
 $= -19.80 \text{ MPa}$

Tegangan tarik pada tumpuan $= \sigma_{tr} = 1.00f_{ct(t)}$
 $= 3.09 \text{ MPa}$

Saat beban layan,

Tegangan tekan pada tumpuan $= \sigma_{tk} = 0.45f_{ck}$
 $= -18.00 \text{ MPa}$

Tegangan tarik pada tumpuan $= \sigma_{tr} = 1.00f_{ct}$
 $= 3.51 \text{ MPa}$

Tegangan tekan pada tumpuan $= \sigma_{tk} = 0.45f_{ck}$
 $= -18.00 \text{ MPa}$

Tegangan tarik pada tumpuan $= \sigma_{tr} = 1.30f_{ct}$
 $= 3.51 \text{ MPa}$

8.1.3 Kuat Tekan Beton saat *jacking*

Kekuatan beton pada hari ke- t dirumuskan EN1992-1-1:2004 sedemikian:

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left\{ 1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right\} \right\}$$

$$f_{ck}(t) = (\beta_{cc}(t) \times f_{cm}) - 8.00 \text{ MPa}$$

Dimana:

$\beta_{cc}(t)$ = Koefisien yang dipengaruhi oleh mutu semen dan umur jacking

t = Umur yang direncanakan (hari)

s = Koefisien mutu semen

f_{cm} = $f_{ck} + 8.00 \text{ MPa}$

$f_{ck}(t)$ = Kuat tekan beton pada saat umur t (MPa)

Direncanakan

Semen yang direncanakan adalah semen Portland tipe I (Normal)

$s = 0.38$ (Class S)

Prategang di*jacking* pada umur 14 hari

$t = 14 \text{ hari}$

Maka,

$$\beta_{cc}(14) = \exp \left\{ 0.38 \left\{ 1 - \left(\frac{28}{14} \right)^{1/2} \right\} \right\} = 0.85$$

$$f_{ck} = 40.00 \text{ MPa}; f_{cm} = 48.00 \text{ MPa}$$

$$f_{cm}(14) = 0.85 \times 48.00 = 41.00 \text{ MPa}$$

$$f_{ck}(14) = 41.00 - 8.00 = 33.00 \text{ MPa}$$

Sehingga sesuai perhitungan, beton pratekan pada saat umur jacking (14 hari) memiliki kuat tekan 33.00 MPa.

8.1.4 Rekapitulasi Pembebanan yang Terjadi

Tabel 8. 1 Rekapitulasi pembebanan dari ETABS

Kombinasi Pembebanan Ultimate		
1.35D		
Momen tumpuan kiri	-621.41	kNm
Momen lapangan	1920.25	kNm
Momen tumpuan kanan	-621.41	kNm
1.35D+1.5L+1EX Max		
Momen tumpuan kiri	-798.21	kNm
Momen lapangan	2343.00	kNm
Momen tumpuan kanan	-798.21	kNm
1.35D+1.5L+1EX Min		
Momen tumpuan kiri	-893.39	kNm
Momen lapangan	2343.00	kNm
Momen tumpuan kanan	-893.39	kNm
Vu	482.60	kN
Tu	235.23	kNm
Kombinasi Pembebanan Layan		
1D saat jacking		
Momen tumpuan kiri	-478.31	kNm
Momen lapangan	1395.5	kNm
Momen tumpuan kanan	-478.31	kNm

1D+1L		
Momen tumpuan kiri	-550.98	kNm
Momen lapangan	1703.59	kNm
Momen tumpuan kanan	-550.98	kNm
1D+1L+1EX Max		
Momen tumpuan kiri	-374.21	kNm
Momen lapangan	1703.63	kNm
Momen tumpuan kanan	-374.21	kNm
1D+1L+1EX Min		
Momen tumpuan kiri	-727.24	kNm
Momen lapangan	1703.63	kNm
Momen tumpuan kanan	-727.24	kNm

Untuk perhitungan struktur pratekan, EN1992-1-1:2004 – 2.4.2.2 memberikan standar momen-momen yang digunakan untuk menghitung kekuatan perlu harus merupakan jumlah momen akibat reaksi yang ditimbulkan oleh prategang (dengan suatu faktor beban sebesar 1.00 (*favourable*) dan 1.30 (*unfavourable*)) serta momen akibat beban terfaktor.

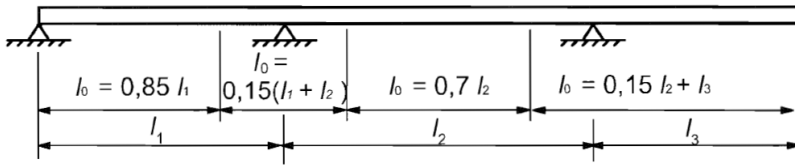
Sehingga, untuk perhitungan kekuatan layan (*serviceability*) dan perhitungan gaya prategang, pembebanan yang dipakai adalah beban dengan faktor 1.00 sedangkan untuk menghitung kuat struktur tetap menggunakan kombinasi beban *ultimate*.

8.1.5 Analisis Penampang

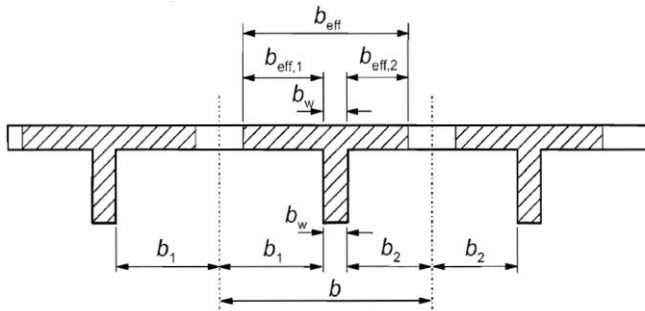
-Mencari lebar efektif

EN1992-1-1:2004 5.3.2.1

$$b_{\text{eff}} = \sum b_{\text{eff},i} + b_2 \leq b$$



Gambar 8. 1 Definisi l_0 untuk penentuan lebar efektif (Sumber: Eurocode, 2004)



Gambar 8. 2 Parameter penentuan lebar efektif (Sumber: Eurocode, 2004)

Sesuai dengan parameter di gambar 8.1 dan gambar 8.2, maka didapatkan nilai:

$$l_1 = 24.00 \text{ m}$$

$$l_0 = 0.85 \times (24) = 20.40 \text{ m}$$

$$b_w = 0.40 \text{ m}$$

$$b_1 = b_2 = 0.5 \times (6 - 0.40) = 2.80 \text{ m}$$

$$0.2 l_0 = 0.2 \times 20.40 = 4.08 \text{ m}$$

$$b_{\text{eff},1} = b_{\text{eff},2} = 0.2 \times 2.8 + 0.1 \times 20.40 = 2.60 \text{ m}$$

$$\text{Maka dipakai } b_{\text{eff},1} = b_{\text{eff},2} = 2.60 \text{ m}$$

$$b_{\text{eff}} = 2.60 + 2.60 + 0.40 = 5.60 \text{ m}$$

Sehingga nilai beff yang dipakai adalah 5.60 m. Sesuai dengan persyaratan pertama dimana lebar efektif sayap balok T tidak boleh melebihi seperempat bentang balok atau 6.00 m. Penggunaan lebar efektif di dalam perhitungan beton pratekan hanya digunakan pada saat analisis tegangan yang terjadi pada beton pratekan sendiri, sementara untuk perhitungan beban yang ada lebar yang digunakan ialah sebesar 6.00 m, sesuai dengan jarak antar balok pratekan yang sesungguhnya.

Luas penampang balok pratekan didapat sebagai berikut:

$$A_{\text{pelat}} = \frac{b_e \times t_f}{n} = \frac{5.60 \times 0.14}{1} = 0.78 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{balok}} = b \times (h - t_f) = 0.40 \times (1.20 - 0.14) = 0.42 \text{ m}^2$$

Nilai statis momen garis netral penampang balok sebagai berikut:

$$c = \frac{h}{2} + t_f = \frac{1.06}{2} + 0.14 = 0.67 \text{ m}$$

$$y_t = \frac{\left(A_{\text{pelat}} \times \frac{t_f}{2} \right) + (A_{\text{balok}} \times c)}{A_{\text{total}}} \text{ mm}^3$$

$$y_t = \frac{\left(0.78 \times \frac{0.14}{2} \right) + (0.42 \times 0.67)}{1.12} = 0.28 \text{ m}$$

$$y_b = c_{gc} = 1.20 - 0.28 = 0.92 \text{ m}$$

$$d_t = y_t - \frac{t_f}{2} = 0.39 - \frac{0.14}{2} = 0.32 \text{ m}$$

$$db = y_b - \frac{h-tf}{2} = 0.81 - \frac{1.20-0.14}{2} = 0.28 \text{ m}$$

Setelah didapat data-data diatas diperlukan nilai batasan letak kabel tendon hendak dipasang yang disebut daerah limit kabel. Tendon dipasang pada daerah yang menyebabkan beton menjadi tertekan dimana daerah tersebut dibatasi oleh nilai dan wilayah kern pada penampang balok.

Dimana:

$$K_t = \frac{W_b}{A_{total}} \text{ dan } K_b = \frac{W_t}{A_{total}}$$

$$W_t = \frac{I_{komposit}}{y_t} \text{ dan } W_b = \frac{I_{komposit}}{y_b}$$

Keterangan:

K_t = kern atas (m)

K_b = kern bawah (m)

I = momen inersia (m^4)

Nilai $I_{komposit}$ didapat sebagai berikut:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 + (A_{balok} \times db^2) + \frac{1}{12} \times \frac{b_e}{n}tf^3 + (A_{pelat} \times dt^2)$$

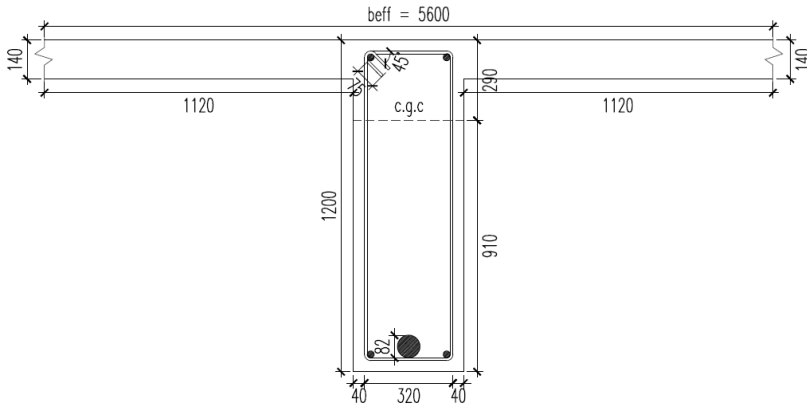
$$I = \frac{1}{12} \times 0.4 \times 1.06^3 + (0.42 \times 0.28^2) + \frac{1}{12} \times \frac{5.60}{1} 0.14^3 + (0.78 \times 0.32^2) = 0.14 \text{ m}^4$$

$$Z_t = \frac{I_{komposit}}{y_t} = \frac{0.14 \text{ m}^4}{0.28 \text{ m}} = 0.50 \text{ m}^3$$

$$Z_b = \frac{I_{komposit}}{y_b} = \frac{0.14 \text{ m}^4}{0.92 \text{ m}} = 0.15 \text{ m}^3$$

$$K_t = \frac{Z_b}{A_{total}} = \frac{0.50 \text{ m}^3}{0.79 \text{ m}^2} = 0.41 \text{ m}$$

$$K_b = \frac{Z_t}{A_{\text{total}}} = \frac{0.15 \text{ m}^3}{0.79 \text{ m}^2} = 0.12 \text{ m}$$



Gambar 8. 3 Penampang beton pratekan EN1992-1-1:2004

■ Mencari Gaya Prategang Awal (F_o)

Digunakan decking (selimut beton) = 40 mm

Digunakan diameter tulangan lentur = 25 mm = D25

- Eksentrisitas pada tumpuan (e) = -200 = 200 mm (di atas cgc)
- Eksentrisitas tengah bentang (e) = $y_b - d' - 0.5 D_{\text{tul}} = 0.92 - 0.04 - 0.5 (0.025) = 0.84 \text{ m} = 840 \text{ mm}$

Besar gaya prategang yang dibutuhkan diambil berdasarkan beberapa persamaan, yaitu persamaan pada serat atas dan bawah tengah bentang saat transfer dan saat beban layan.

OUTPUT dari ETABS dengan kombinasi 1D

Momen tumpuan kiri = -478.31 kNm

Momen lapangan = 1395.50 kNm
 Momen tumpuan kanan = -478.31 kNm
 e tengah bentang = 0.84 m

serat atas :

$$P_{m0} \leq \frac{A \times f_{ct(t)} + \alpha_{top} \times M_0}{\alpha_{top} \times e - 1}$$

$$P_{m0} \leq \frac{1.21 \times 3.09 + 2.42 \times 478.31}{2.42 \times 0.20 - 1}$$

$$P_{m0} \leq 5918.85 \text{ kN}$$

serat bawah :

$$P_{m0} \leq \frac{-A \times f_{ck(t)} + \alpha_{bottom} \times M_0}{\alpha_{bottom} \times e + 1}$$

$$P_{m0} \leq \frac{-1.21 \times 33.00 + 7.93 \times 1395.50}{7.93 \times 0.84 + 1}$$

$$P_{m0} \leq 4582.62 \text{ kN}$$

OUTPUT dari ETABS dengan kombinasi 1D+1L

Momen tumpuan kiri = -727.24 kNm

Momen lapangan = 1703.63 kNm

Momen tumpuan kanan = -727.24 kNm

e tengah bentang = 0.84 m

Kehilangan prategang diperkirakan 20%, maka $\Omega = 0.80$

serat atas :

$$P_{m0} \geq \frac{A \times f_{ck(t)} + \alpha_{top} \times M_T}{\Omega(\alpha_{top} \times e - 1)}$$

$$P_{m0} \geq \frac{1.21 \times 3.09 + 2.42 \times 478.31}{0.80 \times (2.42 \times 0.84 - 1)}$$

$$P_{m0} \geq -21275.00 \text{ kN}$$

serat bawah :

$$P_{m0} \geq \frac{-A \times f_{ck(t)} + \alpha_{bottom} \times M_0}{\Omega(\alpha_{bottom} \times e + 1)}$$

$$P_{m0} \geq \frac{-1.21 \times 33.00 + 7.93 \times 1395.50}{0.80(7.93 \times 0.84 + 1)}$$

$$P_{m0} \geq 1511.33 \text{ kN}$$

Sehingga untuk tegangan awal, diberi:

$$P_{m0} = 1454.05 \text{ kN}$$

Asumsi kehilangan gaya prategang sebesar 20% maka,

$$P_m = 1163.24 \text{ kN}$$

Kontrol tegangan sebelum kehilangan:

OUTPUT dari ETABS dengan kombinasi 1D

Momen tumpuan kiri = -478.31 kNm

Momen lapangan = 1395.50 kNm

Momen tumpuan kanan = -478.31 kNm

e tengah bentang = 0.84 m

Tegangan pada tengah bentang

serat atas:

$$f_{ct,0} = \frac{(P_{m0} \times (\alpha_{top} \times e - 1)) - \alpha_{top} \times M_0}{A}$$

$$f_{ct,0} = \frac{(1454.05 \times (2.42 \times 0.84 - 1)) - 2.42 \times 1395.50}{1.21}$$

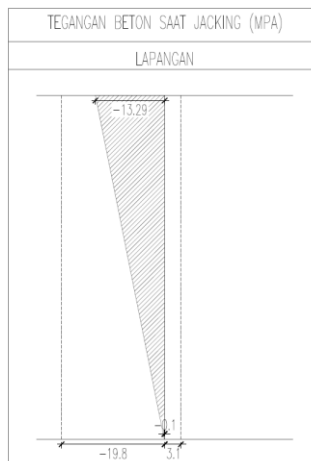
$$f_{ct,0} = -13.29 \text{ MPa} \leq 3.09 \text{ MPa (OK)}$$

serat bawah:

$$f_{cc,0} = \frac{(P_{m0} \times (\alpha_{\text{bottom}} \times e + 1)) - \alpha_{\text{bottom}} \times M_0}{-A}$$

$$f_{cc,0} = \frac{(1454.05 \times (\alpha_{\text{bottom}} \times 0.84 + 1)) - 7.93 \times 1395.50}{-1.21}$$

$$f_{cc,0} = -0.07 \text{ MPa} \leq -19.80 \text{ MPa}$$



Gambar 8. 4 Diagram tegangan tengah bentang pada saat jacking

Penentuan Tendon

$$k.f_{pk} = 1770.00 \text{ MPa (strand-stress-relieved)}$$

$$f_{pk} = f_{p0.1k} = 1526.00 \text{ MPa}$$

EN1992-1-1:2004 7.2(5) menyatakan tegangan izin tendon,

$$f_{pi} = 75\% f_{p0.1k} = 1144.50 \text{ MPa (strand-stress-relieved)}$$

$$\text{Luas tendon} = P_{mo}/f_{pi} = 1270.47 \text{ mm}^2$$

Tendon baja yang akan dipakai dengan spek dari *multistrand post-tensioning* sebagai berikut :

Tendon unit	= 6-12
jumlah strand	= 9.00
Min breaking load	= 2390.00 kN
D strand	= 15.70 mm
jumlah tendon	= 1.00
D duct	= 77.00 mm

Luas tendon yang digunakan

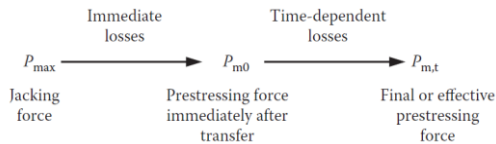
A pakai = 1743.04 mm²

A pakai > A perlu = OK

Nilai tegangan pakai

$f_{\text{pakai}} = P_{m0}/A_{\text{pakai}} = 834.20 \text{ MPa}$

■ Kehilangan Gaya Prategang



Gambar 8. 5 Alur kehilangan prategan pada EN 1992-1-1:2004

Kehilangan prategan adalah berkurangnya gaya prategan dalam tendon saat tertentu disbanding pada saat stressing. Kehilangan prategan dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori, yaitu:

■ Kehilangan segera (kehilangan langsung)

(EN1992-1-1:2004 5.10.5)

Kehilangan langsung adalah kehilangan gaya awal pratekan sesaat setelah pemberian gaya pratekan pada komponen balok pratekan. Kehilangan secara langsung terdiri dari :

$$\begin{aligned}\text{Asumsi kehilangan segera} &= 11.00\% \\ P_{\text{jacking}} &= 1294.10 \text{ KN}\end{aligned}$$

a. Kehilangan akibat perpindahan elastis
(EN1992-1-1:2004 5.10.5.1)

Dikarenakan jumlah tendon yang digunakan hanya berjumlah 1 buah, maka kehilangan gaya pratekan akibat perpindahan elastis tidak mempengaruhi.

b. Kehilangan akibat gesekan (wobble effect)
(EN1992-1-1:2004 5.10.5.2)

Perhitungan kehilangan pratekan diakibatkan oleh gesekan antara material beton dan baja pratekan saat proses pemberian gaya pratekan. Kehilangan pratekan akibat gesekan (wobble effect) dihitung dengan perumusan sebagai berikut :

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{\max} (1 - e^{-\mu(\theta + kx)})$$

Dimana :

$$\begin{aligned}\Delta P &= \text{Kehilangan akibat gesekan (MPa)} \\ e &= \text{bilangan natural 2.73} \\ \mu &= \text{Koefisien friksi dari kurvatur baja prategang} \\ K &= \text{Koefisien wobble effect} \\ \alpha &= \text{sudut kelengkungan tendon (8f/L)} \\ P_{\max} &= \text{Gaya prategang awal yang diberikan (kN)}\end{aligned}$$

Dari ayat (3) dan (4) pasal tersebut, didapat koefisien:

$$\begin{aligned}\mu &= 0.190 \text{ (wire strand tendon)} \\ k &= 0.005 \text{ (wire strand tendon)}\end{aligned}$$

$$P\mu(x) = 1454.05 \times e^{-0.19 \times (0.09 + 0.005 \times 24)} = 1224.02 \text{ kN}$$

$$\Delta P\mu(x) = 1454.05 - 1224.02 = 70.09 \text{ kN}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat gesek adalah

$$\%P\Delta\mu(x) = \frac{70.09}{1294.10} = 5.42 \%$$

c. Akibat selip angker

Kehilangan akibat pengankuran/slip angkur terjadi saat tendon baja dilepas setelah mengalami penarikan dan gaya pratekan dialihkan ke angkur. Rumus perhitungan kehilangan pratekan akibat pengankuran.

$$L_{di} = \sqrt{\frac{EpAp\Delta s}{\beta}}$$

Dimana:

L_{di} = panjang dari pengaruh kehilangan slip angker (m)

E_c = Modulus elastisitas dari beton (Mpa)

E_p = Modulus elastisitas dari baja prategang (Mpa)

β = Kemiringan dari garis kehilangan gaya gesek
= ($\%P\Delta\mu(x) \times P / 0.5 L$)

Δs = Besar selip dari angker, ambil nilai 2.5 (mm)

L = bentang struktur beton (m)

$$L_{di} = \sqrt{\frac{200000 \times 1743.04 \times 2.5}{5.84}} = 12.22 \text{ m}$$

Nilai L_{di} lebih besar dari panjang setengah bentang, sehingga perlu dihitung kehilangan akibat slip angker

$$\Delta P_{s \text{ end}} = 2\beta(L_{di}-L/2)$$

$$\Delta P_{s \text{ end}} = 2 \times 5.84 \times (12.22 - 12) = 2.52 \text{ kN}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat slip angker adalah

$$\%P\Delta s = \frac{2.52}{1294.10} = 0.19 \%$$

d. Kehilangan akibat kekangan kolom

Konstruksi beton pratekan dengan desain cor monolit perlu diperhitungkan kehilangan pratekan akibat kekangan kolom. Hal ini terjadi karena saat dilakukan jacking beton terkekang oleh kekakuan kolom. Gaya perlawanan yang diberikan oleh kolom menahan reaksi perpendekan beton akibat gaya jacking yang terjadi. Gaya perlawanan kolom ini menyebabkan berkurangnya gaya pratekan karena sebagian gaya pratekan yang diberikan digunakan mengatasi perlawanan gaya kolom.

Semakin kaku komponen kolom yang mengekang balok pratekan maka semakin besar gaya pratekan yang hilang untuk melawan kolom agar mengikuti lenturan balok akibat gaya jacking. Hal ini juga menyebabkan semakin besarnya momen yang diterima kolom sebagai kontribusi dari jacking yang terjadi. Sebaliknya jika kolom didesain tidak kaku maka gaya pratekan yang hilang semakin kecil serta momen yang diterima kolom juga berkurang.

Untuk mengeliminasi kehilangan prategang akibat kekangan kolom dan menghindari momen kumulatif yang terjadi pada dasar kolom lantai dasar, maka pada saat jacking, dasar kolom tiap lantai didesain dengan sendi, dalam realisasinya dilapangan menggunakan penampang lingkaran dan menggunakan pengekang spiral. Perubahan penampang yang signifikan pada dasar kolom, memperkecil kemampuan kolom untuk menahan momen yang terjadi akibat jacking

Dapat di hitung kahilangan yang terjadi akibat desain sendi ini. Perumusan yang digunakan untuk kehilangan gaya pratekan akibat kekangan kolom ialah sebagai berikut :

$$\Delta F_k = \frac{M_B - M_A}{h}$$

Dari hasil perhitungan ETABS, diperoleh nilai maksimum nilai momen ialah sebagai berikut

$$M_B = -151.11 \text{ kNm}$$

$$M_A = -151.11 \text{ kNm}$$

$$\Delta F_k = \frac{(151.11 + 151.11)}{4} \times 10 = 75.56 \text{ kN}$$

$$\Delta f_k = \frac{75.56}{A_p} = \frac{75.56}{1743.04} = 43.35 \text{ MPa}$$

Maka persentase kehilangan prategang akibat kekangan kolom adalah

$$\% \Delta f_{fk} = \frac{43.35}{1743.04} = 5.20 \%$$

Total kehilangan segera = 10.61% OK Mendekati asumsi

$$P_{m0} = 1299.74 \text{ KN}$$

■ Kehilangan akibat waktu (tidak langsung)

(EN1992-1-1:2004 5.10.6)

Hilangnya gaya awal yang ada terjadi secara bertahap dan dalam waktu yang relatif lama (tidak secara langsung seketika saat pemberian gaya pratekan), adapun macam kehilangan tidak langsung adalah sebagai berikut:

a. Kehilangan akibat relaksasi baja

Relaksasi baja adalah berkurangnya tegangan dalam baja akibat berjalannya waktu pada panjang tetap. Rumus perhitungan kehilangan pratekan akibat relaksasi baja:

$$\Delta\sigma_{pr} = \sigma_{pi} \times (-0.66\rho_{1000}e^{9.1\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} \times 10^{-5})$$

Dimana:

$\Delta\sigma_{pr}$ = Kehilangan gaya prategang akibat relaksasi dari baja (MPa)

σ_{pi} = Gaya yang dialami baja = P_{m0} (kN)

ρ_{1000} = karakteristik baja prategang (2.50%)

μ = rasio tegangan izin pakai (σ_{pi}/f_{pk})

t = waktu dimana kehilangan akibat relaksasi baja ditinjau (jam). Direncanakan gedung berumur 50tahun, $t = 438000$ jam.

e = bilangan natural 2.73

Perencanaan digunakan tendon strand *stress relieved* dengan mutu 1770MPa, maka:

$$\Delta\sigma_{pr} = 1299.74 \times (-0.66 \times (2.5\%)e^{9.1 \times 0.42} \times 438^{0.75(1-0.42)} \times 10^{-5})$$

$$\Delta\sigma_{pr} = 7.97 \text{ MPa}$$

■ Kehilangan akibat susut, rangkai, dan relaksasi baja

Pada EN1992-1-1:2004, kehilangan gaya prategang yang dipengaruhi waktu, besar kehilangan dihitung sekaligus dengan 1 rumus pada pasal 5.10.6 Persamaan 5.46 sebagai berikut:

$$\Delta\sigma_{c+s+r} = \frac{\varepsilon_{cs} \times EP + 0.8\Delta\sigma_{p,r} + \frac{Ep}{Ecm} \times \varphi(t, t_0) \times \sigma_c, QP}{1 + \frac{Ep \times Ap}{Ecm \times Ac} \left(1 + \frac{Ac}{Ic} \times zcp^2\right) [1 + 0.8 \times \varphi(t, t_0)]}$$

Dimana:

$\Delta\sigma_{c+s+r}$ = Kehilangan tegangan yang dipengaruhi waktu (MPa)

ε_{cs} = estimasi dari regangan susut

- E_p = Modulus elastisitas dari baja (MPa)
 $\Delta\sigma_{p,r}$ = tegangan akibat relaksasi baja (MPa)
 E_{cm} = Modulus elastisitas dari beton (MPa)
 $\varphi_{(t,t_0)}$ = koefisien rangkak pada waktu t saat diberi tegangan di waktu t_0
 $\sigma_{c,QP}$ = tegangan di tendon akibat beban sendiri, gaya prategang awal, dan momen eksternal lainnya di waktu ditinjau (MPa)
 A_p = Total luas tendon pada daerah yang ditinjau (mm^2)
 A_c = Total luas beton pada daerah yang ditinjau (mm^2)
 I_c = Momen inersia dari struktur (mm^4)
 Z_{cp} = eksentrisitas tendon (mm)

Dari perhitungan sebelumnya, diambil nilai:

- E_p = 200000.00 MPa
 $\Delta\sigma_{p,r}$ = 7.97 MPa
 E_{cm} = 35000.00 MPa
 $\sigma_{c,QP}$ = 0.16 MPa
 A_p = 1743.04 mm^2
 A_c = 1.21 m^2
 I_c = 0.14 m^4
 Z_{cp} = 0.84 m

Sehingga, ada 2 variabel yang belum diketahui dan perlu dicari yaitu ε_{cs} dan $\varphi_{(t,t_0)}$:

Perhitungan ε_{cs}

Dihitung sesuai EN1992-1-1:2004 Chapter 3.1.4:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{ca} + \varepsilon_{cd}$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2.5 \times (f_{ck} - 10) \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon_{cd}(\infty) = 1.00 \times k_h \times \varepsilon_{cd}(0)$$

Dimana:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = \text{regangan akibat mutu beton}$$

- $\varepsilon_{cd}(\infty)$ = regangan akibat beton yang mengering pada waktu tinjau
 $\varepsilon_{cd}(0)$ = regangan akibat beton yang mengering pada awal (lihat tabel 8.2)
 k_h = Koefisien berdasarkan kelembapan relative dan mutu beton (lihat Tabel 8.3)
 f_{ck} = Kuat mutu beton 28 hari (MPa)

Tabel 8. 2 nilai dari $\varepsilon_{cd}(0)$ untuk beton dengan semen kelas normal
(Sumber: Eurocode, 2004)

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (MPa)	Relative Humidity (in %)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0.62	0.58	0.49	0.30	0.17	0.00
40/50	0.48	0.46	0.38	0.24	0.13	0.00
60/75	0.38	0.36	0.30	0.19	0.10	0.00
80/95	0.30	0.28	0.24	0.15	0.08	0.00
90/105	0.27	0.25	0.21	0.13	0.07	0.00

Tabel 8. 3 Nilai dari K_h (Sumber: Eurocode, 2004)

h_0	k_h
100	1.0
200	0.85
300	0.75
≥ 500	0.70

$$h_0 = 2x A_c/U = 2 \times 1.21 / 13.60 = 827.40 \text{ mm}$$

Maka diambil nilai:

$$K_h = 0.70$$

$$\varepsilon_{cd}(0) = 0.20 \times 10^{-6}$$

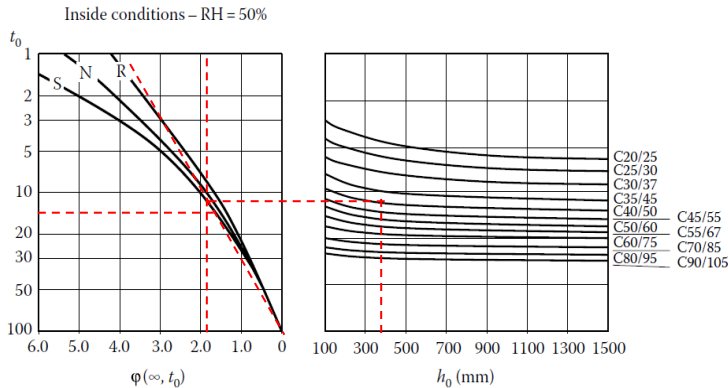
$$\varepsilon_{cd}(\infty) = -140 \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2.5 \times (40 - 10) \times 10^{-6} = -75 \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon_{cs} = -75 \times 10^{-6} + (-140 \times 10^{-6}) = -215 \times 10^{-6}$$

Perhitungan $\phi_{(t,t_0)}$

Perhitungan dilakukan sesuai dengan prosedur yang ada pada Pasal 3.1.4 Figure 3.1 dan didapatkan nilainya = 1.80



Notes:

1. Enter left-hand chart with the age at loading t_0 and move horizontally to the appropriate cement class curve (S, N or R).
2. Establish diagonal line 2.
3. Enter right-hand chart with the notional size h_0 and move vertically to the line representing the appropriate concrete strength class.
4. Move horizontally back to line 2.
5. Move vertically downward to find $\phi(\infty, t_0)$.

For $t_0 > 100$ days, assume $t_0 = 100$ and assume line 2 is the tangent to the appropriate curve.

$$\Delta\sigma_c + s + r = 41.78 \text{ MPa}$$

$$\Delta P_{c+s+r} = A_p \times \Delta\sigma_{c+s+r} = 72.82 \text{ kN}$$

Maka persentase kehilangan prategang berdasarkan waktu adalah

$$\%P\Delta s = \frac{72.82}{1294.10} = 5.60 \%$$

$$\begin{aligned}\text{Kehilangan prategang total} &= 16.21 \% \\ P_{m,t} &= 1218.28 \text{ KN}\end{aligned}$$

■ Kontrol Gaya Setelah Kehilangan Prategang

Kondisi saat beban layan (Tengah Bentang)

serat bawah:

$$f_{ct} = \frac{(P_m \times (\alpha_{top} \times e + 1)) - \alpha_{top} \times M_0}{-A}$$

$$f_{ct} = \frac{(1218.28 \times (2.42 \times 0.84 + 1)) - 2.42 \times 1395.50}{-1.21}$$

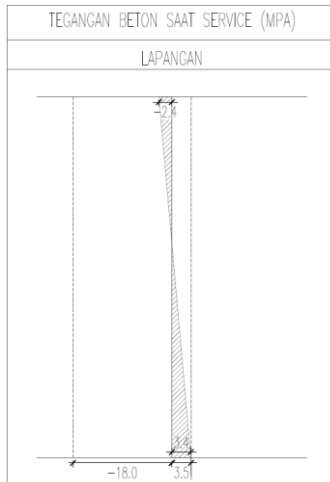
$$f_{ct} = 3.45 \text{ MPa} \leq 3.09 \text{ Mpa (OK)}$$

serat bawah:

$$f_{cc} = \frac{(P_m \times (\alpha_{bottom} \times e - 1)) - \alpha_{bottom} \times M_0}{A}$$

$$f_{cc} = \frac{(1218.28 \times (\alpha_{bottom} \times 0.84 - 1)) - 7.93 \times 1395.50}{1.21}$$

$$f_{cc} = -2.37 \text{ MPa} \leq -19.80 \text{ MPa (OK)}$$



Gambar 8. 6 Diagram tegangan tengah bentang saat service load

■ Kontrol Lendutan

Kemampuan layan struktur beton pratekan ditinjau dari perilaku defleksi komponen tersebut. Elemen beton pratekan memiliki dimensi yang lebih langsing dibanding beton bertulang biasa sehingga kontrol lendutan sangat diperlukan untuk memenuhi batas layan yang disyaratkan.

$$f_{izin} = \frac{L}{500} = \frac{24000}{500} = 48.00 \text{ mm}$$

Lendutan saat *jacking*

1. Lendutan akibat tekanan tendon

Tekanan tendon menyebabkan balok tertekuk keatas sehingga lendutan yang terjadi berupa lendutan keatas (*chamber*).

$$\begin{aligned} p' &= 8 \times F_o \times f / L^2 \\ &= 8 \times 1454048.69 \times 1040.90 / (24000)^2 \end{aligned}$$

$$= 21.02 \text{ N/mm}$$

$$\begin{aligned}\Delta p' &= 5/384 \times (p' \times l^4 / (E_c \times I)) \\ &= 5/384 \times (21.02 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.14 \times 10^{12})) \\ &= 65.35 \text{ mm } (\uparrow)\end{aligned}$$

2. Lendutan akibat beban sendiri balok

$$q_0 = W \times A = 2400 \times 1.21 = 29.04 \text{ N/mm}$$

$$\begin{aligned}\Delta q_0 &= 5/384 \times (q_0 \times l^4 / (E_c \times I)) \\ &= 5/384 \times (29.04 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.14 \times 10^{12})) \\ &= 31.64 \text{ mm } (\downarrow)\end{aligned}$$

$$\Delta \text{ total} = -65.35 + 31.64 = -33.72 (\uparrow) < 48.00 \text{ mm (OK)}$$

Lendutan saat beban layan

10. Lendutan akibat tekanan tendon

$$\begin{aligned}p' &= 8 \times F_e \times f / L^2 \\ &= 8 \times 1218281.75 \times 1040.90 / (24000)^2 \\ &= 17.61 \text{ N/mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta p' &= 5/384 \times (p' \times L^4 / (E_c \times I)) \\ &= 5/384 \times (17.61 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.14 \times 10^{12})) \\ &= 15.52 \text{ mm } (\uparrow)\end{aligned}$$

11. Lendutan akibat beban sendiri balok

$$q_0 = W \times A = 2400 \times 0.79 = 19.05 \text{ N/mm}$$

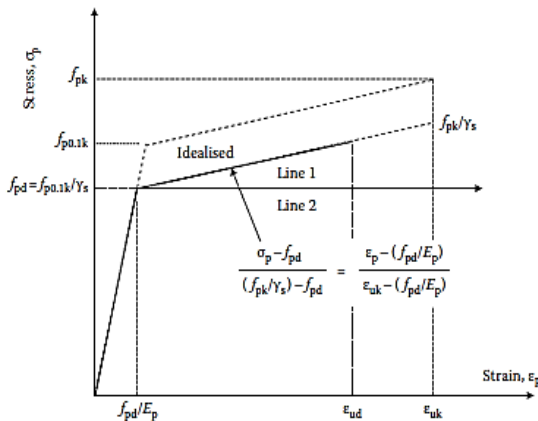
$$\begin{aligned}\Delta q_0 &= 5/384 \times (q_0 \times l^4 / (E_c \times I)) \\ &= 5/384 \times (29.04 \times (24000)^4 / (29725.41 \times 0.11 \times 10^{12})) \\ &= 31.64 \text{ mm } (\downarrow)\end{aligned}$$

$$\Delta \text{ total} = -15.52 + 31.64 = 16.11 (\downarrow) < 48.00 \text{ mm (OK)}$$

Perhitungan Momen Nominal

(EN1992-1-1:2004 - 6.1)

Kuat lentur komponen struktur prategang dapat dihitung menggunakan asumsi yang seperti pada komponen struktur nonprategang. Tendon prategang tidak mempunyai titik leleh yang pasti seperti halnya tulangan lunak. Eurocode menyatakan bahwa regangan pada saat beton hancur adalah 0.0035, asumsi ini membuat tegangan baja prategang dihitung secara elastis. Namun secara praktis, tegangan baja yang terjadi adalah f_{pd} .



Gambar 8. 7 Kurva tegangan regangan dari beton pratekan yang disederhanakan (Gilbert et al., 2017)

$$f_{pd} = \frac{f_{p0.1k}}{\gamma_s}$$

f_{pd} = tegangan tendon desain MPa

$f_{p1.0k}$ = kuat leleh tendon prategang metode pergeseran 0.1, MPa

γ_s = faktor keamanan baja prategang

Tabel 8. 4 Nilai γ dari material beton prategang
(Sumber: Eurocode, 2004)

<i>Design situation</i>	<i>γ_c for concrete</i>	<i>γ_s for reinforcing steel</i>	<i>γ_s for prestressing steel</i>
Persistent and transient	1.5	1.15	1.15
Accidental	1.2	1.0	1.0

Sehingga direncanakan:

$$f_{pu} = 1770.0 \text{ MPa}$$

$$f_{p0.1k} = 1526.00 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s = 1.15 \text{ (Dari tab 8.4)}$$

$$f_c' = 40.00 \text{ MPa}$$

$$b_w = 400.00 \text{ mm}$$

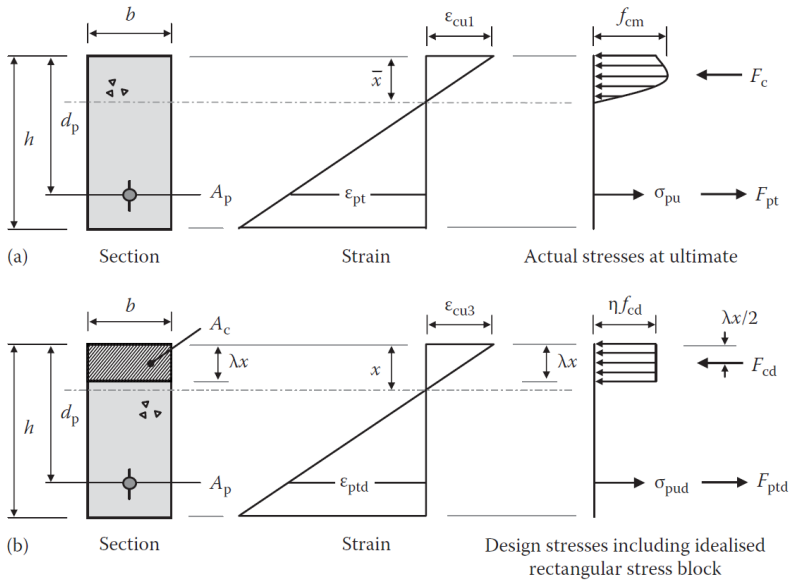
$$B_{eff} = 5600.00 \text{ mm}$$

$$d_p = 1111.50 \text{ mm}$$

$$A_{ps} = 1743.04 \text{ mm}^2$$

$$f_{pd} = \frac{1526.00}{1.15} = 1326.96 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{40.00}{1.5} = 26.67 \text{ MPa}$$



Gambar 8. 8 Ilustrasi kekuatan lentur dari Eurocode
(sumber: Eurocode, 2004)

■ Momen Nominal Tendon Prategang pada Lapangan

$$T = A_{ps} \times f_{pd} = 2312933.56 \text{ N}$$

$$C = T$$

$$\lambda x = \frac{T}{\eta \times f_{cd} \times b \times w}$$

$$\lambda x = \frac{2312933.56}{1.00 \times 26.67 \times 400} = 24.20 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} = 2312933.56 \times \left[1111.50 - \frac{24.20}{2} \right] = 2552.91 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 2552.91 \text{ kNm} \geq M_{ED} = 2343.00 \text{ kNm (OK)}$$

■ Momen Nominal Tendon Prategang pada Lapangan

$$T = A_{ps} \times f_{pd} = 2312933.56 \text{ N}$$

$$C = T$$

$$\lambda x = \frac{T}{\eta \times f_{cd} \times b_{eff}}$$

$$\lambda x = \frac{2312933.56}{1.00 \times 26.67 \times 5600} = 338.80 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} = 2312933.56 \times \left[1119.40 - \frac{338.80}{2} \right] = 2338.34 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 2338.34 \text{ kNm} \geq M_{ED} = 893.39 \text{ kNm (OK)}$$

■ Perencanaan lentur sendi plastis

(EN1992-1-1:2004 - 5.4.3.1.2(1))

Pada daerah kritis (sendi plastis) = h, dalam memikul beban gempa, kuat lentur tendon diabaikan. Sehingga penulangan lentur pada sendi plastis:

Direncanakan:

$$d_{tul} = 25.00 \text{ mm}$$

$$A_s = 491.07 \text{ mm}^2$$

$$n = 5.00 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 2455.36 \text{ mm}^2$$

$$d_p = 1137.50 \text{ mm}$$

$$\rho = 0.0054$$

$$f_{ck} = 40.00 \text{ MPa}$$

Kontrol apakah ρ lebih dari ρ_{min} yang diizinkan:

$$\rho_{\min} = 0.5 \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right)$$

$$\rho_{\min} = 0.5 \left(\frac{3.09}{390} \right) = 0.0040$$

$$\rho > \rho_{\min} \text{ (OK)}$$

$$\eta = 1.00$$

$$\lambda = 0.80$$

$$Y_s = 1.15$$

$$Y_c = 1.50$$

$$\alpha = 1.00$$

$$f_{cd} = 26.67 \text{ MPa}$$

Mutu tulangan baja non prategang:

$$f_y = 390.00 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_{p0.1k} / Y_s = 339.13 \text{ MPa}$$

Maka perhitungan momen lentur:

$$T = A_{ps} \times f_{pd} = 832686.34 \text{ N}$$

$$C = T$$

$$\lambda x = \frac{T}{\eta \times f_{cd} \times b \times e_{eff}}$$

$$\lambda x = \frac{832686.34}{1.00 \times 26.67 \times 5600} = 121.96 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} = 832686.34 \times \left[1137.50 - \frac{121.96}{2} \right] = 914.68 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 914.68 \text{ kNm} \geq M_{ED} = 893.39 \text{ kNm (OK)}$$

■ Kontrol Momen Retak

Penampang prategang didesain supaya tidak terjadi retak, sehingga momen yang terjadi perlu dikontrol.

$$M_{cr} = Z \left(f_{ctm} - \sigma_{cs} + \frac{P}{A} \right) + P \times e$$

Dimana:

- M_{cr} = Momen saat serat tarik beton mengalami retak (kNm)
- f_{ctm} = Tegangan tarik beton (MPa)
- σ_{cs} = Tegangan beton akibat pengaruh susut baja
- P = Gaya prategang yang diberikan (kN)
- e = eksentrisitas tendon (mm)

Dari perhitungan sebelumnya didapatkan:

$$\varepsilon_{cs}(\infty) = -225.00 \times 10^{-6}$$

$$\rho = 0.005$$

Tidak ada tulangan lunak pada daerah tekan maka,

$$\rho_{cw} = 0.00$$

$$f_{ctm} = 3.51 \text{ MPa}$$

$$Z_{\text{bottom komposit}} = 0.15 \text{ m}^3$$

$$\sigma_{cs} = \left(\frac{2.5\rho_w - 0.8\rho_{cw}}{1 + 50\rho_w} E_s \times \varepsilon_{cs} \right)$$

$$\sigma_{cs} = \left(\frac{2.5\rho \times 0.005 - 0.8 \times 0}{1 + 50 \times 0.005} \times 200000 \times 225 \times 10^{-6} \right)$$

$$\sigma_{cs} = 0.04 \text{ Mpa}$$

Sehingga momen crack di lapangan:

$$M_{cr} = 0.15 \left(3.51 - 0.04 + \frac{1454.05}{1.21} \right) + 1454.05 \times 0.84$$

$$M_{cr} = 1935.17 \text{ kNm}$$

$$M_{cr} = 1935.17 \text{ kNm}$$

$$M_D = 1703.63 \text{ kNm (OK)}$$

Momen crack di tumpuan:

$$M_{cr} = 0.50 \left(3.51 - 0.04 + \frac{1454.05}{1.21} \right) + 1454.05 \times 0.20$$

$$M_{cr} = 2625.23 \text{ kNm}$$

$$M_{cr} = 2625.23 \text{ kNm}$$

$$M_D = 727.24 \text{ kNm (OK)}$$

Perhitungan Gaya Geser

Kuat geser dari beton pada penampang tidak retak diatur pada EN1992-1-1:2004 - 6.2.2(2)

$$VR_{d,c} = \frac{I \times bw}{S} \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha_1 \times \sigma_{cp} \times f_{ctd}}$$

Dimana:

$VR_{d,c}$ = Kuat beton memikul tegangan geser (kN)

I = Momen inersia penampang (m^4)

bw = Lebar balok pratekan (mm)

f_{ctd} = Tegangan tarik desain dari beton (MPa)

α_1 = koefisien bernilai 1.00 untuk post- tension

σ_{cp} = Tegangan beton akibat gaya prategang (MPa)

Dari perhitungan sebelumnya, direncanakan:

$$f_{ctd} = 2.34 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cp1} = 1.01 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cp2} = 8.00 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cp} \text{ pakai} = 1.01 \text{ MPa}$$

$$\alpha_1 = 1.00$$

$$S = 169060733.30 \text{ mm}^3$$

$$V_{RD,c} = 927.25 \text{ kN}$$

Geser yang terjadi, V_u at d

$$x = 1200.00 \text{ mm}$$

$$V_{ED} = 482.60 \text{ kN}$$

$$V_{RD,c} = 927.25 \text{ kN}$$

Maka direncanakan tulangan geser minimum

Perhitungan tulangan geser minimum

(EN1992-1-1:2004 9.2.2(5))

$$\text{Direncanakan } D \text{ sengkang} = 10.00 \text{ mm}$$

$$\text{As double stirrup} = 157.14 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{w, \min} = \frac{0.08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$$

$$\rho_{\min} = 0.0013$$

$$\text{kemiringan sengkang } (\alpha) = 90.00 \text{ deg}$$

$$d = 1275.00 \text{ mm}$$

Jarak maksimum pemasangan sengkang diambil terkecil dari:

$$s_{\max 1} 0.75d(1+\cot\alpha) = 956.25 \text{ mm}$$

$$s_{\max 2} 0.6d(1+\cot\alpha) = 765.00 \text{ mm}$$

$$s_{\max 3} 0.75d = 956.25 \text{ mm}$$

$$s_{\max 4} = 600.00 \text{ mm}$$

$$s_{\max} = 600.00 \text{ mm}$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s \times b \times \sin\alpha}$$

$$A_{sw}/s = 0.52$$

$s = 302.82 \text{ mm}$

$s_{\text{pakai}} = 300.00 \text{ mm}$

Direncanakan double leg stirrup D10-300

Perencanaan sengkang sendi plastis

(EN1992-1-1:2004 - 5.5.3.1.3(6))

Pada daerah kritis di sendi plastis ($=h$), direncanakan sengkang dengan jarak yang relatif lebih rapat dari sengkang lapangan karena bersifat seperti confinement pada saat gempa terjadi. Eurocode menyaratkan jarak sengkang maks:

$d_{\text{min tul lentur}} = 25.00 \text{ mm}$

$s_{\text{max1}} \text{ hw}/4 = 300.00 \text{ mm}$

$s_{\text{max2}} 24d_s = 240.00 \text{ mm}$

$s_{\text{max3}} = 175.00 \text{ mm}$

$s_{\text{max4}} 6db_l = 150.00 \text{ mm}$

$s_{\text{max}} = 150.00 \text{ mm}$

Direncanakan double leg stirrup D10-150

Perhitungan Tulangan Torsi

Kekuatan beton memikul torsi dirumuskan Eurocode sebagai berikut:

$$TR_{d,c} = J_t \times f_{ctd} \sqrt{1 + 10\sigma_{cp}/f_{ck}}$$

$$J_t = 0.33 \sum x^2 y$$

Dimana:

$TR_{d,c}$ = Kapasitas beton memikul beban torsi (kN)

J_t = Konstanta torsi (mm³)

f_{ctd} = kekuatan desain beton memikul tarik (MPa)

σ_{cp} = Tegangan beton karena gaya pratekan (MPa)

f_{ck} = kuat tekan beton pada umur 28 hari (MPa)

Didapatkan:

$$\begin{aligned} J_t &= 687984000.00 \text{ mm}^3 \\ f_{ctd} &= 2.34 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$TRd, c = 687984000.00 \times 2.34 \sqrt{1 + 10 \times 1.01/40}$$

$$TRd, c = 1800.83 \text{ kNm}$$

$$T_{ED} \text{ (Didapat dari ETABS)} = 235.23 \text{ kNm}$$

Syarat torsi tidak menambah jumlah tulangan longitudinal:

$$\begin{aligned} \frac{T_{ed}}{TRd, c} + \frac{V_{ed}}{VRd, c} &\leq 1.00 \\ \frac{235.23}{1800.83} + \frac{482.60}{927.25} &= 0.65 \leq 1.00 \text{ (OK)} \end{aligned}$$

Beton kuat menahan torsi yang ada tanpa memerlukan tambahan tulangan torsi.

■ Perencanaan Angkur

Angkur adalah bagian dari system pratekan pasca tarik yang terletak pada kedua ujung struktur beton pratekan, fungsinya untuk menyalurkan gaya prategang dari tendon ke beton. Angkur terdiri dari angkur hidup dan angkur mati, perencanaan struktur ini menggunakan sistem prategang VSL.

Rekapitulasi Gaya pada Tendon

$$\begin{aligned} \text{Tipe strand} &= \text{Y1770S7} \\ d \text{ strand} &= 15.70 \text{ mm} \\ f_{pk} &= 1770 \text{ MPa} \\ f_{p0.1k} &= 1526 \text{ MPa} \\ F_{pk} &= 265 \text{ KN} \\ \text{Strand pakai} &= 6-12 \\ \text{Jumlah strand} &= 9.00 \text{ buah} \end{aligned}$$

■ Perencanaan Angkur Mati

Tipe ankur = VSL - AF
 ϕA = 265 mm
 Cover (F) = 45 mm

Penulangan daerah lokal:

Diameter tulangan (ϕR) = 20 mm
 Jarak antar tulangan (P) = 55 mm
 Jumlah tulangan (r) = 8 buah
 Panjang area penulangan (I) = 385 mm
 Panjang sengkang (M) = 390 mm
 Diameter sengkang (ϕS) = 16 mm

■ Perencanaan Angkur Hidup

Tipe ankur = VSL - GC
 ϕA = 230 mm
 Cover (F) = 50 mm

Penulangan daerah lokal:

Diameter tulangan (ϕR) = 20 mm
 Jarak antar tulangan (P) = 50 mm
 Jumlah tulangan (r) = 6 buah
 Panjang area penulangan (I) = 250 mm
 Panjang sengkang (M) = 275 mm
 Diameter sengkang (ϕS) = 10 mm

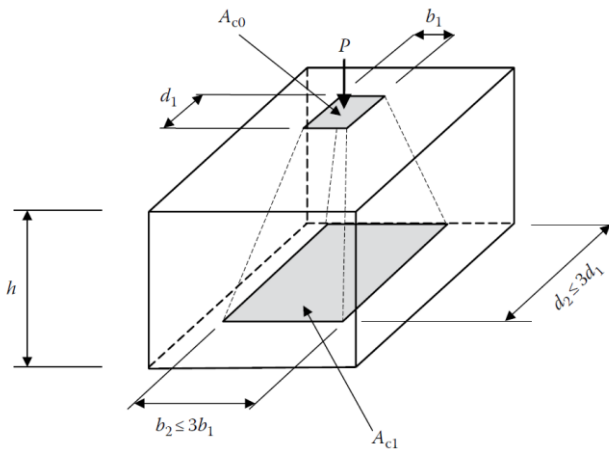
■ Perencanaan Daerah Angkur

EN 1992-1-1:2004 6.7(2)

Balok pratekan pasca tarik, kegagalan bisa disebabkan oleh hancurnya bantalan beton pada daerah tepat dibelakang ankur tendon akibat tekanan yang sangat besar. Kegagalan ini diperhitungkan pada kondisi ekstrim saat transfer, yaitu saat gaya pratekan maksimum dan kekuatan beton minimum. Bila diperlukan, pada daerah

pengangkuran dapat dipasang tulangan untuk memikul gaya pencar, pengelupasan dan gaya tarik tepi longitudinal yang timbul akibat pengangkuran tendon

Dalam studi ini digunakan angkur hidup. Hal ini dikarenakan metode pemberian gaya pratekan dengan sistem pasca tarik. Penulangan pengekanan di seluruh pengangkuran harus sedemikian rupa hingga mencegah pembelahan dan bursting yang merupakan hasil dari gaya tekan terpusat besar yang disalurkan melalui alat angkur. Perhitungan kebutuhan luas tulangan untuk bursting:



Gambar 8. 9 Ilustrasi distribusi area untuk menentukan kekuatan batas

(Sumber : Design of Prestressed Concrete to Eurocode 2)

$$FR_{du} = A_{c0} \times f_{cd} \times \sqrt{A_{c1}/A_{c0}} \leq 3.00 \times f_{cd} \times A_{c0}$$

Dimana:

F_{Rdu} = kapasitas beton dalam menahan gaya pencar (kN)

A_p = luas penampang baja prategang (mm²)

A_{c0} = luas penampang beton dibelakang daerah angkur (mm²)

A_{c1} = luas penampang beton setelah pada area distribusi (mm²)

- f_{cd} = tegangan desain dari kuat tekan beton (MPa)
 $b1$ = panjang area dibelakang angkur (mm)
 $d1$ = panjang area dibelakang angkur (mm)
 $b2$ = panjang pada area distribusi (mm)
 $d2$ = panjang pada area distribusi (mm)

Dari pemilihan angkur, didapatkan data:

- $b1$ = 230 mm
 $d1$ = 230 mm
 $b2$ (ambil $3b1$) < b_w = 400 mm
 $d2$ (ambil $3d1$) = 690 mm

- A_p = 4658.50 mm²
 A_{c0} = 48241.50 mm²
 A_{c1} = 276000 mm²
 f_{cd} = 26.67 Mpa

$$FRdu = 48241.50 \times 26.67 \times \sqrt{\frac{48241.50}{48241.50}} = 3077.04 \text{ kN}$$

$$P_{m0} = 1454.05 \text{ kN}$$

Gaya penahan lebih besar dari P_{m0} ,

Namun tetap diberi tulangan daerah angkur:

a. Arah Vertikal

$$\text{Panjang} = h = 1.32 \text{ m}$$

$$M_{burst} = \frac{P_{m0}}{8} (h - a)$$

$$M_{burst} = 176.30 \text{ kNm}$$

$$P_{burst} = \frac{M_b}{0.5h}$$

$$P_{burst} = 293.84 \text{ kN}$$

Direncanakan tulangan dengan D25, $f_y = 390 \text{ MPa}$

$A_{\text{perlu}} = 753.43 \text{ mm}^2$
 $AD10 \text{ (double leg)} = 157.14 \text{ mm}^2$
 Pemasangan dari 0.2h-1.0h
 $0.2h = 240 \text{ mm}$
 $1h = 1200 \text{ mm}$
 Panjang = 960 mm
 ambil $s = 200 \text{ mm}$
 Dipasang double leg stirup D10-200

Arah Horizontal

Panjang = $b = 0.40 \text{ m}$
 $M_b = 30.90 \text{ kNm}$
 $F_{bt} = 154.49 \text{ kN}$

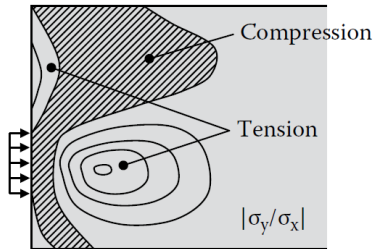
Direncanakan tulangan dengan D25, $f_y = 390 \text{ MPa}$

$A_{\text{perlu}} = 396.14 \text{ mm}^2$
 $AD10 \text{ (double leg)} = 157.14 \text{ mm}^2$

Pemasangan dari 0.2b-1.0b
 $0.2b = 80 \text{ mm}$
 $1b = 400 \text{ mm}$
 Panjang = 320 mm
 ambil $s = 100 \text{ mm}$
 Dipasang double leg stirup D10-100

Perencanaan tulangan daerah terkelupas :

Pada daerah penyaluran gaya prategang, tegangan yang terjadi didalam tendon bukan hanya kompresi, namun juga tegangan tarik. Tegangan tarik yang terdapat pada permukaan ujung beton akan cenderung terkupas, untuk itu disediakan tulangan tambahan. Lihat area tarik kupas pada gambar 6.8



Gambar 6. 31 Isobar dari tegangan beton pada daerah angkur
(Sumber: Gilbert, Mickleborough, & Ranzi, 2017)

T.Y. Lin merekomendasikan $T = 0.03F_o$

F_o = 1454.05 kN

T = 43.62 kN

f_y = 390.00 MPa

$A_s = T/f_y$ = 111.85 mm²

$A_s \text{ D10}$ = 78.57 mm²

n = 2

s = 150 mm

Dipasang tulangan ujung **D10-150**

8.1.16.2 Perencanaan hidrolik jack

Sesuai dengan brosur VSL, untuk menarik tendon supaya menghasilkan gaya prategang digunakan alat jacking dengan spesifikasi:

Designation = ZPE-12/St2

Jack capacity = 1850.00 KN

8.1.16.3 Perencanaan Grouting

Sesuai dengan brosur VSL = f_c cube 100MPa

f_c' grouting = ~85MPa

8.1.17 Daerah Limit Kabel

Agar tegangan terjadi tidak melebihi tegangan izin, maka penempatan tendon harus didalam area daerah limit kabel yang dihitung sebagai berikut:

e1, diambil yang terkecil dari:

$$e1 \leq \frac{M_{\text{jacking}}}{P_{\text{mo}}} + \frac{Z_{\text{top}} \times f_{\text{ct},0}}{P_{\text{mo}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{top}}}$$

$$e1 \leq \frac{M_{\text{jacking}}}{P_{\text{mo}}} - \frac{Z_{\text{bottom}} \times f_{\text{cc},0}}{P_{\text{mo}}} - \frac{1}{\alpha_{\text{bottom}}}$$

e2, diambil yang terkecil dari:

$$e2 \geq \frac{M_{\text{service}}}{P_{\text{mt}}} + \frac{Z_{\text{top}} \times f_{\text{cc},t}}{P_{\text{mt}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{top}}}$$

$$e2 \geq \frac{M_{\text{service}}}{P_{\text{mt}}} - \frac{Z_{\text{bottom}} \times f_{\text{ct},t}}{P_{\text{mt}}} - \frac{1}{\alpha_{\text{bottom}}}$$

Dimana e1 dan e2 berjarak dari cgc.

Rekapitulasi perencanaan:

L	= 24000.00 mm
e lapangan	= 840.90 mm
e tumpuan	= 200.00 mm
fokus	= 1040.90 mm
D tendon	= 77.00 mm
a	= 1208000.00 mm ²

Koordinat Kabel

yt	= 280.60 mm
----	-------------

$$y_b = 919.40 \text{ mm}$$

$$Y1 = 4fx(l-x)/l^2$$

$$P_{m0} = 1299.74 \text{ kN}$$

$$M_0 = 1395.50 \text{ kNm}$$

$$\alpha_{top} = A/Z_{top} = 5.66 /m$$

$$\alpha_{bottom} = A/Z_{bottom} = 5.66 /m$$

$$Z_{top} = 0.07 \text{ m}^3$$

$$Z_{bottom} = 0.07 \text{ m}^3$$

$$f_{ct,0} = 3086.48 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{cc,0} = -19800.00 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{m,t} = 1218.28 \text{ KN}$$

$$M_T = 1703.63 \text{ kNm}$$

$$\alpha_{top \text{ komposit}} = A/Z_{top} = 2.42 /m$$

$$\alpha_{bottom \text{ komposit}} = A/Z_{bottom} = 7.93 /m$$

$$Z_{top \text{ komposit}} = 0.50 \text{ m}^3$$

$$Z_{bottom \text{ komposit}} = 0.15 \text{ m}^3$$

$$f_{ct,t} = 3508.82 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{cc,t} = -18000.00 \text{ kN/m}^2$$

Tabel 8. 5 Rekapitulasi Daerah Limit Kabel EN1992-1-1:2004

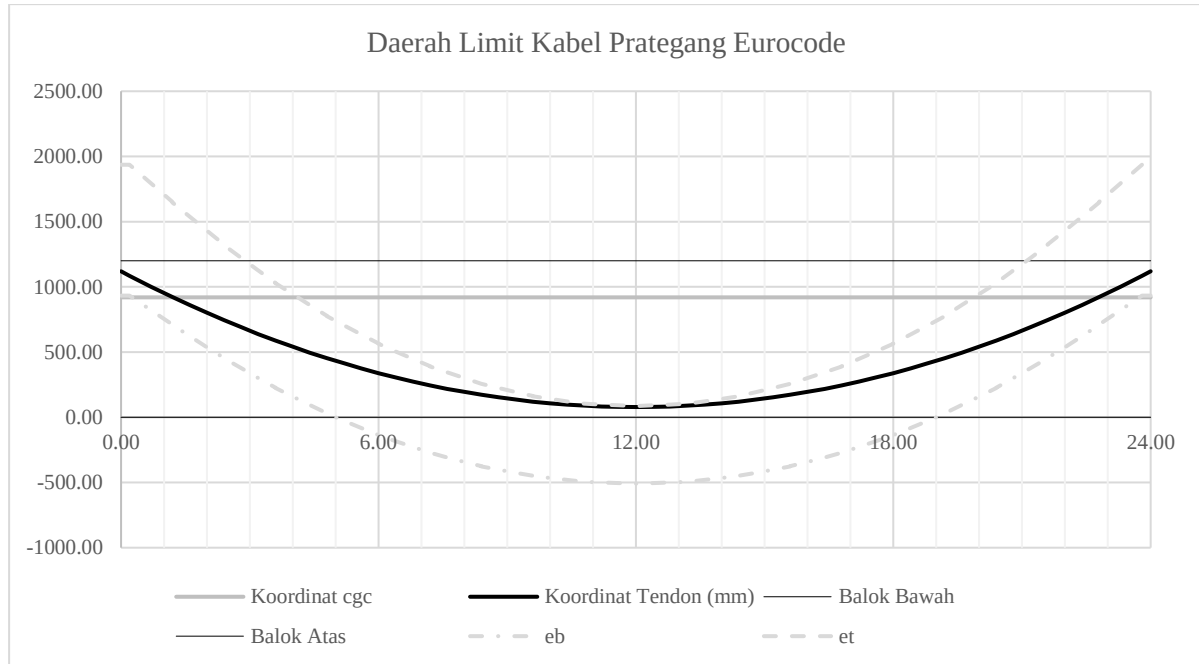
Station (m)	Transfer Moment (KNm)	Service Moment (KNm)	Koord. cgc	Koord. Tendon (mm)	eb1	eb2	eb	et1	et2	et
0.00	-478.31	-550.98	919.40	1119.40	-13.45	596.44	-13.45	932.86	-1017.06	-7413.25
0.20	-478.31	-550.98	919.40	1085.00	-13.45	596.44	-13.45	932.86	-1017.06	-7413.25
0.70	-332.27	-375.97	919.40	1001.51	98.91	708.80	98.91	820.50	-873.41	-7269.60
1.20	-188.73	-203.46	919.40	921.63	209.34	819.24	209.34	710.06	-731.81	-7128.00
1.20	-185.11	-199.37	919.40	921.63	212.13	822.02	212.13	707.28	-728.45	-7124.64
1.60	-74.11	-66.16	919.40	860.33	297.53	907.42	297.53	621.88	-619.11	-7015.30
2.00	35.29	65.45	919.40	801.35	381.70	991.60	381.70	537.70	-511.08	-6907.27
2.40	143.10	195.46	919.40	744.68	464.64	1074.54	464.64	454.76	-404.36	-6800.55
2.40	146.20	198.96	919.40	744.68	467.03	1076.92	467.03	452.38	-401.49	-6797.68
2.80	245.55	318.29	919.40	690.32	543.47	1153.36	543.47	375.94	-303.54	-6699.73
3.20	343.30	436.02	919.40	638.28	618.68	1228.57	618.68	300.73	-206.91	-6603.10
3.60	439.46	552.15	919.40	588.54	692.66	1302.55	692.66	226.75	-111.58	-6507.77
3.60	442.16	555.20	919.40	588.54	694.73	1304.63	694.73	224.67	-109.08	-6505.27
4.00	528.26	658.61	919.40	541.12	760.98	1370.88	760.98	158.42	-24.20	-6420.39
4.40	612.77	760.43	919.40	496.02	826.00	1435.90	826.00	93.40	59.38	-6336.81

4.80	695.68	860.65	919.40	453.23	889.79	1499.69	889.79	29.61	141.64	-6254.55
4.80	697.99	863.25	919.40	453.23	891.57	1501.46	891.57	27.84	143.78	-6252.41
5.20	770.63	950.46	919.40	412.75	947.45	1557.35	947.45	-28.05	215.36	-6180.83
5.60	841.66	1036.06	919.40	374.58	1002.11	1612.00	1002.11	-82.70	285.63	-6110.56
6.00	911.10	1120.07	919.40	338.73	1055.53	1665.43	1055.53	-136.13	354.58	-6041.61
6.00	913.02	1122.23	919.40	338.73	1057.00	1666.90	1057.00	-137.60	356.36	-6039.83
6.40	972.36	1193.42	919.40	305.19	1102.66	1712.56	1102.66	-183.25	414.79	-5981.40
6.80	1030.10	1263.02	919.40	273.96	1147.08	1756.98	1147.08	-227.68	471.92	-5924.27
7.20	1086.24	1331.01	919.40	245.04	1190.28	1800.17	1190.28	-270.87	527.73	-5868.46
7.20	1087.76	1332.73	919.40	245.04	1191.45	1801.35	1191.45	-272.05	529.14	-5867.05
7.60	1134.03	1388.18	919.40	218.44	1227.05	1836.95	1227.05	-307.64	574.66	-5821.53
8.00	1178.70	1442.04	919.40	194.16	1261.42	1871.32	1261.42	-342.01	618.86	-5777.33
8.40	1221.77	1494.29	919.40	172.18	1294.56	1904.45	1294.56	-375.15	661.75	-5734.44
8.40	1222.91	1495.58	919.40	172.18	1295.43	1905.33	1295.43	-376.03	662.81	-5733.38
8.80	1256.30	1535.50	919.40	152.52	1321.12	1931.02	1321.12	-401.71	695.58	-5700.61
9.20	1288.08	1573.83	919.40	135.17	1345.57	1955.47	1345.57	-426.17	727.04	-5669.15
9.60	1318.27	1610.56	919.40	120.14	1368.80	1978.70	1368.80	-449.40	757.19	-5639.00
9.60	1319.03	1611.41	919.40	120.14	1369.38	1979.28	1369.38	-449.98	757.89	-5638.30
10.00	1339.65	1635.95	919.40	107.41	1385.25	1995.15	1385.25	-465.85	778.03	-5618.16

10.40	1358.68	1658.90	919.40	97.00	1399.89	2009.79	1399.89	-480.48	796.87	-5599.32
10.80	1376.11	1680.24	919.40	88.91	1413.30	2023.19	1413.30	-493.89	814.39	-5581.80
10.80	1376.48	1680.67	919.40	88.91	1413.59	2023.48	1413.59	-494.18	814.74	-5581.45
11.20	1384.42	1689.91	919.40	83.13	1419.69	2029.59	1419.69	-500.29	822.32	-5573.87
11.60	1390.75	1697.55	919.40	79.66	1424.56	2034.46	1424.56	-505.16	828.59	-5567.60
12.00	1395.49	1703.59	919.40	78.50	1428.21	2038.10	1428.21	-508.80	833.55	-5562.64
12.00	1395.49	1703.59	919.40	78.50	1428.21	2038.10	1428.21	-508.80	833.55	-5562.64
12.40	1390.75	1697.55	919.40	79.66	1424.56	2034.46	1424.56	-505.16	828.59	-5567.60
12.80	1384.42	1689.91	919.40	83.13	1419.69	2029.59	1419.69	-500.29	822.32	-5573.87
13.20	1376.48	1680.67	919.40	88.91	1413.59	2023.48	1413.59	-494.18	814.74	-5581.45
13.20	1376.11	1680.24	919.40	88.91	1413.30	2023.19	1413.30	-493.89	814.39	-5581.80
13.60	1358.68	1658.90	919.40	97.00	1399.89	2009.79	1399.89	-480.48	796.87	-5599.32
14.00	1339.65	1635.95	919.40	107.41	1385.25	1995.15	1385.25	-465.85	778.03	-5618.16
14.40	1319.03	1611.41	919.40	120.14	1369.38	1979.28	1369.38	-449.98	757.89	-5638.30
14.40	1318.27	1610.56	919.40	120.14	1368.80	1978.70	1368.80	-449.40	757.19	-5639.00
14.80	1288.08	1573.83	919.40	135.17	1345.57	1955.47	1345.57	-426.17	727.04	-5669.15
15.20	1256.30	1535.50	919.40	152.52	1321.12	1931.02	1321.12	-401.71	695.58	-5700.61
15.60	1222.91	1495.58	919.40	172.18	1295.43	1905.33	1295.43	-376.03	662.81	-5733.38
15.60	1221.77	1494.29	919.40	172.18	1294.56	1904.45	1294.56	-375.15	661.75	-5734.44

16.00	1178.70	1442.04	919.40	194.16	1261.42	1871.32	1261.42	-342.01	618.86	-5777.33
16.40	1134.03	1388.18	919.40	218.44	1227.05	1836.95	1227.05	-307.64	574.66	-5821.53
16.80	1087.76	1332.73	919.40	245.04	1191.45	1801.35	1191.45	-272.05	529.14	-5867.05
16.80	1086.24	1331.01	919.40	245.04	1190.28	1800.17	1190.28	-270.87	527.73	-5868.46
17.20	1030.10	1263.02	919.40	273.96	1147.08	1756.98	1147.08	-227.68	471.92	-5924.27
17.60	972.36	1193.42	919.40	305.19	1102.66	1712.56	1102.66	-183.25	414.79	-5981.40
18.00	913.02	1122.23	919.40	338.73	1057.00	1666.90	1057.00	-137.60	356.36	-6039.83
18.00	911.10	1120.07	919.40	338.73	1055.53	1665.43	1055.53	-136.13	354.58	-6041.61
18.40	841.66	1036.06	919.40	374.58	1002.11	1612.00	1002.11	-82.70	285.63	-6110.56
18.80	770.63	950.46	919.40	412.75	947.45	1557.35	947.45	-28.05	215.36	-6180.83
19.20	697.99	863.25	919.40	453.23	891.57	1501.46	891.57	27.84	143.78	-6252.41
19.20	695.68	860.65	919.40	453.23	889.79	1499.69	889.79	29.61	141.64	-6254.55
19.60	612.77	760.43	919.40	496.02	826.00	1435.90	826.00	93.40	59.38	-6336.81
20.00	528.26	658.61	919.40	541.12	760.98	1370.88	760.98	158.42	-24.20	-6420.39
20.40	442.16	555.20	919.40	588.54	694.73	1304.63	694.73	224.67	-109.08	-6505.27
20.40	439.46	552.15	919.40	588.54	692.66	1302.55	692.66	226.75	-111.58	-6507.77
20.80	343.30	436.02	919.40	638.28	618.68	1228.57	618.68	300.73	-206.91	-6603.10
21.20	245.55	318.29	919.40	690.32	543.47	1153.36	543.47	375.94	-303.54	-6699.73
21.60	146.20	198.96	919.40	744.68	467.03	1076.92	467.03	452.38	-401.49	-6797.68

21.60	143.10	195.46	919.40	744.68	464.64	1074.54	464.64	454.76	-404.36	-6800.55
22.00	35.29	65.45	919.40	801.35	381.70	991.60	381.70	537.70	-511.08	-6907.27
22.40	-74.11	-66.16	919.40	860.33	297.53	907.42	297.53	621.88	-619.11	-7015.30
22.80	-185.11	-199.37	919.40	921.63	212.13	822.02	212.13	707.28	-728.45	-7124.64
22.80	-188.73	-203.46	919.40	921.63	209.34	819.24	209.34	710.06	-731.81	-7128.00
23.30	-332.27	-375.97	919.40	1001.51	98.91	708.80	98.91	820.50	-873.41	-7269.60
23.80	-478.31	-550.98	919.40	1085.00	-13.45	596.44	-13.45	932.86	-1017.06	-7413.25
24.00	-478.31	-550.98	919.40	1119.40	-13.45	596.44	-13.45	932.86	-1017.06	-7413.25



Gambar 8. 10 Daerah Limit Kabel EN1992-1-1:2004

Tabel 8. 6 Rekapitulasi hasil perancangan berdasarkan SNI 2847:2013 dan EN1992-1-1:2004

	SNI 2847:2013 Kelas U	SNI 2847:2013 Kelas T	SNI 2847:2013 Kelas C	EN1992-1- 1:2004
Lokasi bangunan	Aceh	Aceh	Aceh	Aceh
Karakteristik bangunan	Perkantoran 8 lantai	Perkantoran 8 lantai	Perkantoran 8 lantai	Perkantoran 8 lantai
Bentang	24000.00	24000.00	24000.00	24000.00
Tinggi balok (H)	1060.00	1060.00	1060.00	1060.00
Lebar web (bw)	400.00	400.00	400.00	400.00
fc'	40.00	40.00	40.00	40.00
Umur jacking	14 hari	14 hari	14 hari	14 hari
fy	390.00	390.00	390.00	390.00
fyu	1770.00	1770.00	1770.00	1770.00
Cover	40.00	40.00	40.00	40.00
Sistem prategang	VSL	VSL	VSL	VSL
Dimensi penampang	1200/400	1200/400	1200/400	1200/400
Beban gempa				
<i>Jacking</i>				

Momen lapangan	1359.49	1359.49	1359.49	1359.49
Momen tumpuan	-478.31	-478.31	-478.31	-478.31
<i>Service</i>				
Momen lapangan	1703.59	1703.59	1703.59	1703.59
Momen tumpuan	-550.98	-550.98	-550.98	-550.98
Beban geser	433.58	433.58	433.58	482.60
Beban torsi	158.95	158.95	158.95	235.23
Lebar efektif	2640.00	2640.00	2640.00	5600.00
fci'	37.07	37.07	37.07	33.00
Eksentrisitas tumpuan	-200.00	-200.00	-200.00	-200.00
Eksentrisitas lapangan	730.94	730.94	730.94	840.90
Tegangan izin				
<i>Jacking</i>				
Lapangan serat atas	3.77	3.77	3.77	3.09
Lapangan serat bawah	-22.24	-22.24	-22.24	-19.80
Tumpuan serat atas	3.04	3.04	3.04	-
Tumpuan serat bawah	-25.95	-25.95	-25.95	-
<i>Service</i>				
Lapangan serat atas	-18.00	-18.00	-18.00	-18.00

Lapangan serat bawah	3.92	6.32	3.92	3.51
Tumpuan serat atas	3.92	6.32	3.92	-
Tumpuan serat bawah	-18.00	-18.00	-18.00	-
Fo	1642.53	1178.44	966.27	1454.05
Kehilangan Fo:	21.64%	21.82%	24.57%	16.21%
Slip angker (A)	-	-	-	-
Perpendekan elastis (ES)	-	-	-	-
Wobble effect (PF)	9.28%	9.28%	9.28%	5.42%
Rangkak (CR)	1.17%	-2.52%	-5.30%	5.60%
Susut (SH)	0.02%	0.02%	0.02%	
Relaksasi baja (RE)	6.57%	8.24%	10.06%	
Kekangan kolom	4.60%	4.27%	5.21%	5.20%
Fe	1287.08	921.35	728.87	1218.28
ϕ Mn lapangan	2634.94	2385.75	2385.75	2552.91
Tul. Lentur sendi plastis	4D25	4D25	4D25	5D25
ϕ Vn	366.90	366.90	366.90	2420.51
ϕ Tn	198.90	206.18	209.92	3938.88
Tulangan Geser	D10-300	D10-300	D10-300	D10-300
Tulangan Torsi	-	-	-	-

Mcr	2044.31	1647.42	1438.53	1935.17
Tulangan Angkur:				
Daerah Global	2D10-300	2D10-300	2D10-300	2D10-200
Daerah Lokal	-	-	-	-
Lendutan jacking	23.51	31.34	34.92	33.72
Lendutan service	36.00	42.17	45.42	18.65
Tendon	6-12	6-12	6-12	6-12
Jumlah strand	9.00	8.00	8.00	9.00
Duct	77.00	77.00	77.00	77.00
Jacking	ZPE-12/St2	ZPE-12/St2	ZPE-12/St2	ZPE-12/St2

BAB IX

KESIMPULAN

9.1 Kesimpulan

Berdasarkan keseluruhan hasil studi yang telah dilakukan dalam penyusunan Tugas Akhir “Studi komparasi desain beton pratekan berdasarkan SNI 2847:2013 dan Eurocode EN1992-1-1:2004 dengan tinjauan gempa” ini dapat ditarik beberapa kesimpulan diantaranya sebagai berikut:

- a.** Spesifikasi desain beton pratekan berdasarkan SNI 2857:2013

Kelas U:

Dimensi penampang = 1200/400

$F_o = 1642.53 \text{ kN}$

$F_e = 1287.07 \text{ kN}$

Eksentrisitas tumpuan = -200.00 mm

Eksentrisitas lapangan = 730.94 mm

Tendon = 6-12

Jumlah strand = 9.00 strand

Duct = 77.00 mm

Jacking = ZPE-12/St2

Angkur Hidup = VSL GC 6-12

Angkur Mati = VSL AF 6-12

Grouting = 82MPa

Kelas T:

Dimensi penampang = 1200/400

$F_o = 1178.44 \text{ kN}$

$F_e = 921.35 \text{ kN}$

Eksentrisitas tumpuan = -200.00 mm

Eksentrisitas lapangan = 730.94 mm

Tendon = 6-12

Jumlah strand = 8.00 strand

Duct = 77.00 mm

Jacking = ZPE-12/St2
 Angkur Hidup = VSL GC 6-12
 Angkur Mati = VSL AF 6-12
 Grouting = 82MPa

Kelas C:

Dimensi penampang = 1200/400
 $F_o = 966.27 \text{ kN}$
 $F_e = 728.87 \text{ kN}$
 Eksentrisitas tumpuan = -200.00 mm
 Eksentrisitas lapangan = 730.94 mm
 Tendon = 6-12
 Jumlah strand = 8.00 strand
 Duct = 77.00 mm
 Jacking = ZPE-12/St2
 Angkur Hidup = VSL GC 6-12
 Angkur Mati = VSL AF 6-12
 Grouting = 82MPa

■ Spesifikasi desain beton pratekan berdasarkan EN1992-1-1:2004

Dimensi penampang = 1200/400
 $F_o = 1454.05 \text{ kN}$
 $F_e = 1218.28 \text{ kN}$
 Eksentrisitas tumpuan = -200.00 mm
 Eksentrisitas lapangan = 665.88 mm
 Tendon = 6-12
 Jumlah strand = 9.00 strand
 Duct = 77.00 mm
 Jacking = ZPE-12/St2

Tabel 9. 1 Perbandingan hasil desain dan pembahasan dari perbedaan SNI 2847:2013 dan Eurocode EN1992-1-1:2004

No	Aspek	SNI 2847:2013 Kelas U	EN1992-1-1:2004	Pembahasan
1	Asumsi Desain	Ps.10.2.3 - Maksimum regangan beton pada serat tekan ekstrim adalah 0.003.	Ps. 6.1(2) - Maksimum regangan beton pada serat tekan ekstrim adalah 0.0035 untuk $f_c' < 50\text{MPa}$ - regangan awal pada baja prategang diperhitungkan saat memperhitungkan tegangan baja yang terjadi	- Regangan beton pada Eurocode memiliki relasi $0.0028+0.0027 [(98-f_{cm})/100]^4$ - nilai regangan ini berdampak pada tegangan yang terjadi pada baja saat kekuatan batas, serta pada SNI, akan berpengaruh pada nilai

2	Filosofi Perancangan	SNI 1727 Menggunakan <i>Load Resistance Factor Design</i> $Design\ Resistance\ (\phi R_n) \geq Design\ Load\ effect\ (\gamma S_n)$	Ps. 2.4.2 Menggunakan kombinasi <i>Load factor</i> dan <i>allowable stress</i> $Design\ Resistance\ (\psi R_n) \geq Allowable\ material\ stress\ (S_n / \gamma)$	- Faktor reduksi SNI dipengaruhi oleh perilaku tegangan atau regangan yang berlaku - Faktor reduksi Eurocode memiliki pilihan <i>favourable</i> dan <i>unfavourable</i> dengan nilai faktor yang berbeda
3	Kombinasi pembebanan	SNI 1727 a. 1,4 D b. 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (La atau H) c. 1,2 D + 1,0 L ± 1,6 W + 0,5 (La atau H) d. 1,2 D ± 1,0 E + - 1,0 L 3. 0,9 D ± (1,6 W atau 1,0 E)	EN1990-1-1:2004 $\gamma_G \times G_k + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + E$	- Faktor beban pada Eurocode bervariasi tergantung jenis struktur, serta jenis beban yang terjadi - Pada prategang, faktor pembebanan ini berpengaruh pada kuat <i>ultimate</i> dari struktur
4	<i>National Annex</i>	- Tidak mengakomodasi didalam standar	- Mengakomodasi nilai koefisien dari masing-masing negara	- Lebih akurat sesuai dengan kondisi geografis masing-masing negara.

				- Tidak ada national annex Eurocode di Indonesia
5	Lebar efektif	Ps.8.12.2 $L / 4$ $b + 2(8tf)$ $b + 2(0.5 \times (L-b))$ Hasil perancangan: 2640.00 mm	Ps. 5.3.2.1 $b + 2(0.2bi + 0.1 l_0)$ Hasil Perancangan: 5600.00 mm	- Perhitungan pada Eurocode sangat dipengaruhi oleh lokasi struktur - Hasil perancangan nilai beff dari EN lebih besar sehingga berpengaruh ke eksentrisitas dan Inersia
6	Kuat tekan inisial beton pada waktu (t) fci'	- Menggunakan koefisien pada PBI 1971 yang dikoreksi terhadap umur (U) Hasil Perancangan: 37.07 MPa	Ps. 3.1.1.6 - Koefisien bergantung pada klasifikasi semen S, N, atau R Hasil Perancangan: 33.00 MPa	- Koefisien Eurocode memfasilitasi mutu beton yang bervariasi dalam memberikan nilai perkiraan kuat tekan, karena koefisien PBI hanya untuk mutu semen tertentu.

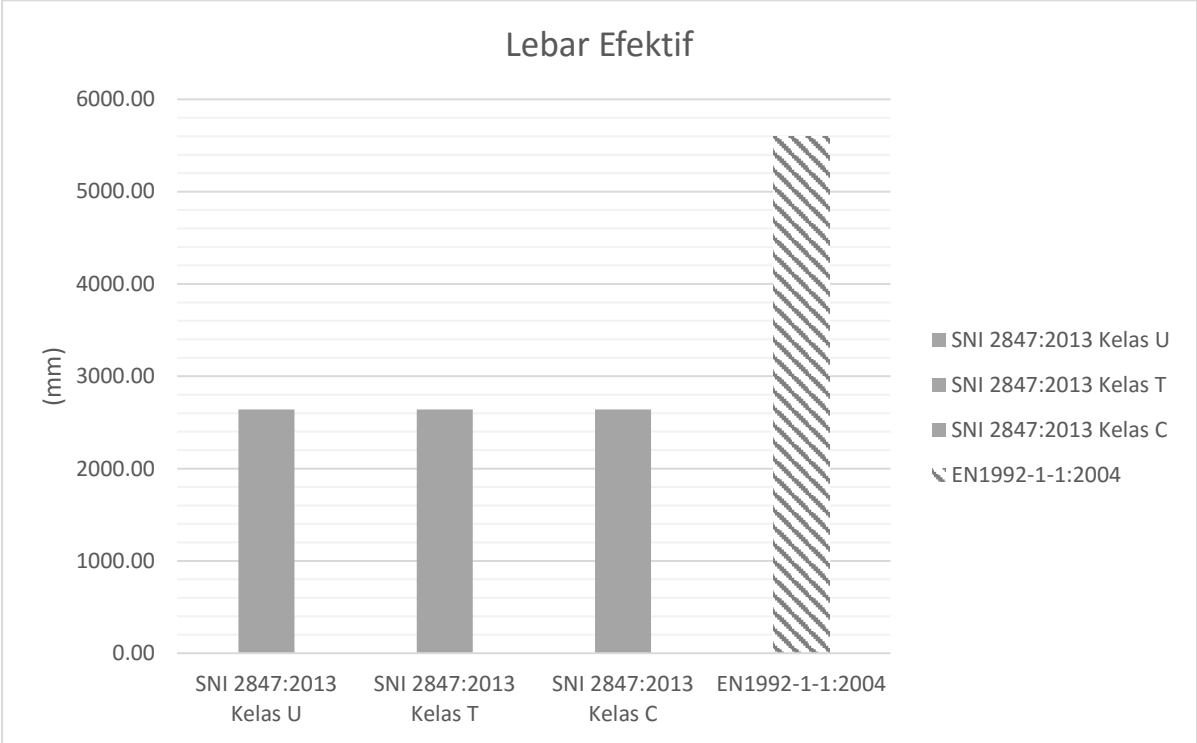
7	Tegangan material	- Tegangan izin baja prategang bernilai 0.70 tegangan tarik - <i>modulus rupture</i> $0.62\sqrt{f_{ci}}$ MPa Hasil Perancangan: 3.92 MPa	Ps. 7.2.(5) - Tegangan izin baja prategang bernilai 0.75 tegangan leleh - <i>modulus rupture</i> $0.3f_{ct}^{2/3}$ MPa Hasil Perancangan: 3.51 MPa	- Tegangan izin tekan tendon untuk gaya prategang relatif mirip - Pada Eurocode tidak dijelaskan spesifik nilai izin dari tegangan tarik beton dalam penyaluran gaya prategang
8	Kehilangan F_o :	Hasil Perancangan: Total 21.64%	Hasil Perancangan: Total 16.21%	
	Wobble effect (PF)	Ps. 18.6.2 $F_{pf}(x) = F_o \times e^{(-\mu\alpha + kx)}$ $\mu = 0.19$ $k = 0.0016$ Hasil Perancangan:	Ps. 5.10.5.2 $P_{\mu}(x) = P_{max} \times e^{(-\mu(\theta + kx))}$ $\mu = 0.190$ $k = 0.005$ Hasil Perancangan:	- Perbedaan hasil perhitungan yang signifikan diakibatkan karena rumus dan nilai koefisien μ dan k yang berbeda. Pada rumus <i>wobble effect</i> Eurocode, μ dikalikan dengan kx, sehingga menghasilkan

		9.28%	5.42%	nilai kehilangan yang lebih kecil
	Rangkak (CR)	Hasil Perancangan: 1.17%		- Rumus yang diberikan Eurocode sangat rumit dan perlu ketelitian yang tinggi serta data perencanaan yang lengkap
	Susut (SH)	Hasil Perancangan: 0.02%		- Relaksasi baja bernilai kecil karena gaya prategang lebih kecil dari SNI.
	Relaksasi baja (RE)	Hasil Perancangan: 6.57%		- Umur rencana bangunan Eurocode 50 tahun
9	Mu	Ps. 18.7 $f_{ps} = f_{pu}[1 - \gamma_p / \beta_1 \rho_p f_{pu} / (f_c')]$	Ps. 6.1 $f_{pd} = f_{p0.1k} / \gamma_s$	- tegangan tendon yang terjadi pada saat kekuatan batas, nilai yang diperkirakan oleh SNI lebih besar (0.87

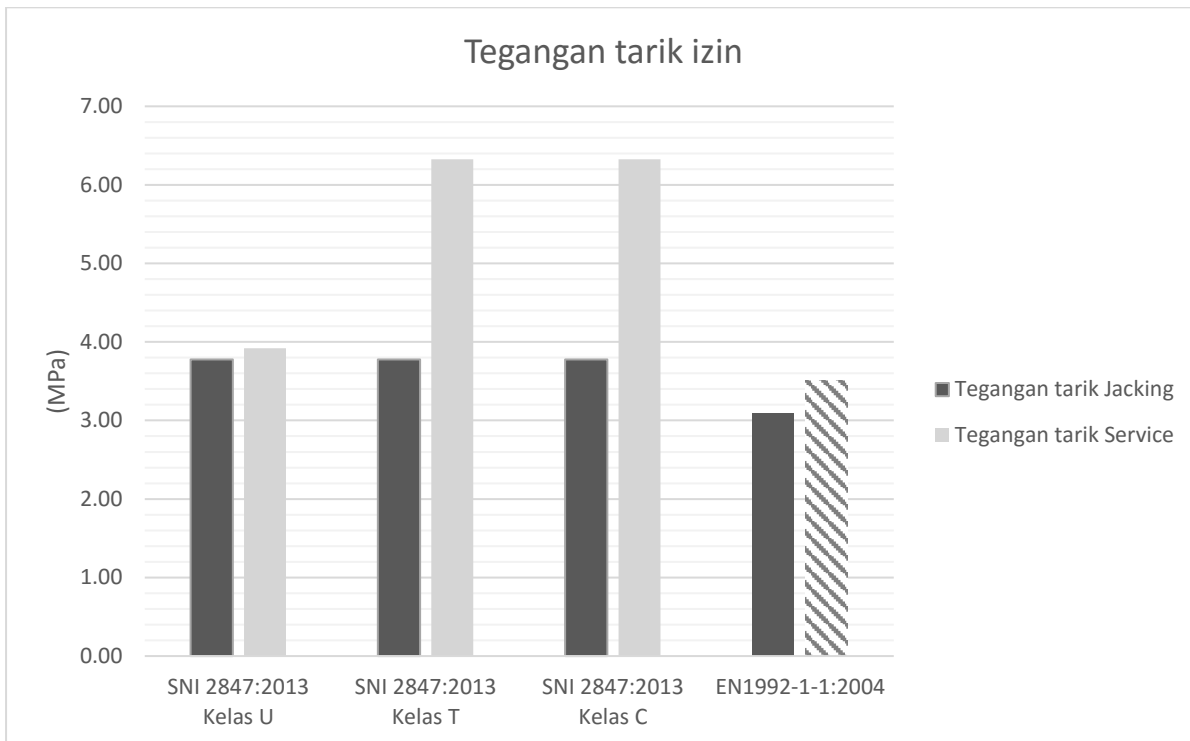
				fpu, sedangkan EN 0.75fpu) - tegangan leleh yang diperbolehkan di EN dibagi oleh faktor reduksi material baja prategang sebesar 1.15
10	Mcr	Ps. 18.8.2 $M_{cr} = f_r \times W_b + F \times (e + k t)$ - Perlu dikontrol $M_n > 1.2 M_{cr}$ Hasil Perencanaan: 2044.31 kNm	(Gilbert et al., 2017) $M_{cr} = (f_r - \sigma_{cs}) \times W_b + F \times (e + k t)$ $\sigma_{cs} = ((2.5 \rho_w - 0.8 \rho_{cw}) / (1 + 50 \rho_w)) E_s \times \varepsilon_{cs}$ Hasil Perencanaan: 1935.17 kNm	- Momen crack pada Eurocode memperhitungkan faktor relaksasi dari tulangan baja non prategang σ_{cs} - modulus rupture SNI yang bernilai lebih besar - Syarat SNI lebih ketat mengenai momen nominal dan momen crack

11	Kapasitas geser	Ps. 11.3.2 $V_c = (0.05 \times \lambda \times \sqrt{f_c'} + 4.8 (V_u \times dp) / Mu) \times bw \times d$ Hasil Perencanaan: V_u 433.58 kN φV_n 366.90 kN	Ps. 6.2.2(2) $V_{Rd,c} = (1 \times bw) / S \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_1 \times \sigma_{cp} \times f_{ctd}}$ Hasil Perencanaan: V_u 482.60 kN V_{Rdc} 927.25 kN	- Eurocode memiliki beban geser yang lebih besar akibat kombinasi pembebanan - Eurocode memiliki kapasitas geser yang lebih besar akibat inersia yang besar - SNI merumuskan dengan memperhitungkan V_u dan Mu, sedangkan Eurocode memperhitungkan faktor dari tegangan beton serta inersia penampang
12	Kapasitas torsi	Ps. 11.5.2 $T_n = 0.083 \lambda \sqrt{f_c} (A_{cp}^2 / P_{cp}) \times \sqrt{(1 + f_{pc} / (0.33 \lambda \sqrt{f_c}))}$	Ps. 6.3.2(5) $T_{Rd,c} = j t \times f_{tctd} \sqrt{(1 + 10 \sigma_{cp} / f_{ck})}$ $j t = 0.33 \sum (x^2 y)$	- Eurocode memiliki beban torsi yang lebih besar akibat kombinasi pembebanan

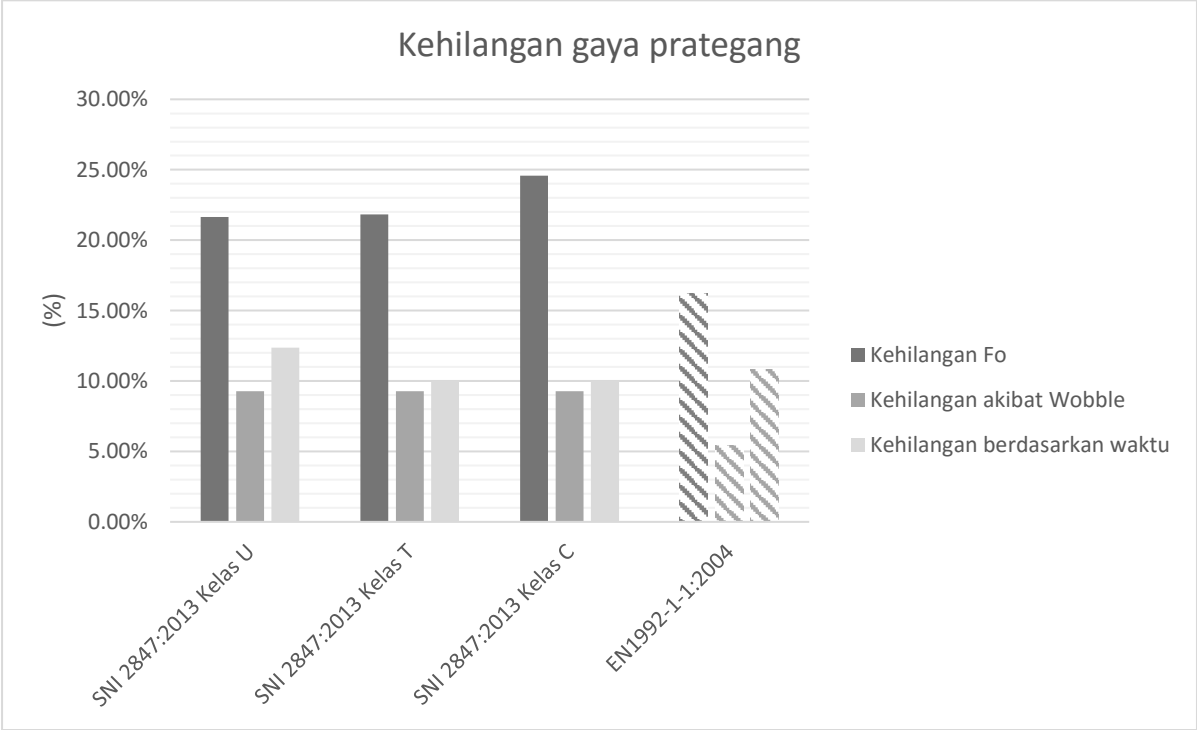
		Hasil Perencanaan: Tu 158.95 kN ϕT_n 198.90 kN	Hasil Perencanaan: Tu 235.23 kN T_{Rdc} 1800.83 kN	- Kapasitas torsi crack SNI lebih kecil karena tidak memperhitungkan sayap balok T (karena tidak diberi tulangan sengkang) sedangkan Beff dari EN lebih besar.
13	Kontrol Sendi Plastis	Ps. 21.5.2.5 - Tendon diperbolehkan memikul beban gempa hingga 25% kekuatannya - tegangan akibat gaya prategang rata-rata harus dibawah $f_c'/10$ atau 3.5MPa - Sendi plastis berada di ujung balok dengan panjang 2h Hasil Perencanaan: Lentur 4D25	EN1998-1-1:2004 - Tidak diatur kekuatan tendon memikul momen gempa, sehingga diasumsikan tendon hanya memikul beban gravitasi - Sendi plastis berada di ujung balok dengan panjang h Hasil Perencanaan: Lentur 5D25	- Pada SNI, diatur persyaratan tegangan akibat gaya prategang rata-rata - Persyaratan SPRM diatur pada EN1998-1-1:2004 - Jarak maks sengkang pada sendi plastis pada kedua standar bernilai sama



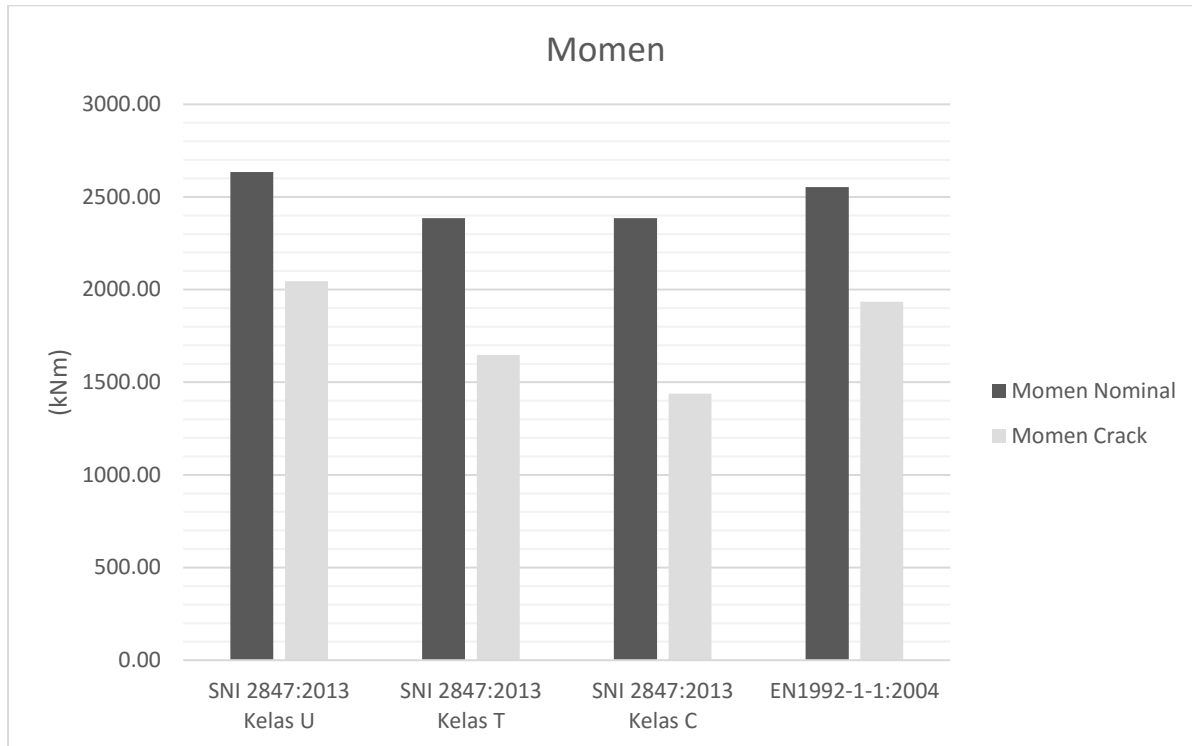
Gambar 9. 1 Grafik komparasi lebar efektif



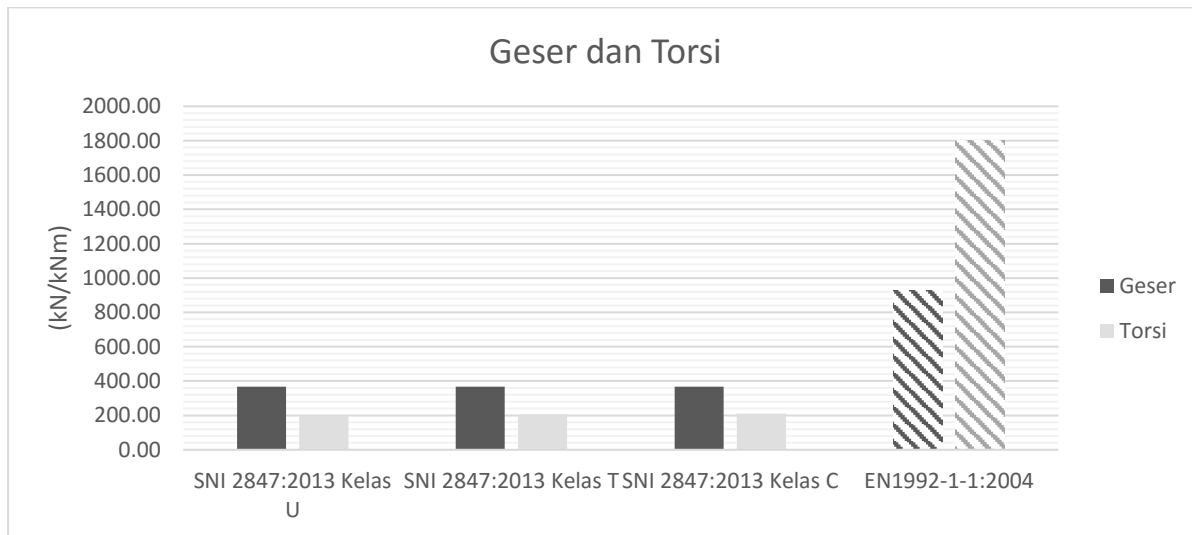
Gambar 9.2 Grafik komparasi tegangan tarik izin



Gambar 9. 3 Grafik komparasi kehilangan gaya prategang



Gambar 9. 4 Grafik komparasi kapasitas momen



Gambar 9. 5 Grafik komparasi kapasitas geser dan torsi

Perancangan balok prategang dengan standart EN1992-1-1:2004 menghasilkan gaya prategang 12% lebih kecil dari SNI 2847:2013. Namun penggunaan strand berjumlah sama karena dibutuhkan untuk memikul momen yang terjadi akibat penggunaan sistem *full prestressed*. Perancangan balok dengan Eurocode juga memerlukan waktu yang relatif lebih lama karena detail perumusan yang tinggi. Hal tersebut juga membuat perancang harus memiliki data yang diperlukan dengan lengkap, karena variable yang harus dicari juga banyak. Disamping itu, ketelitian dari perancang sangat diperlukan, karena notasi dari tiap variable yang berbeda dari yang biasa dipakai di Indonesia.

Dari hasil perancangan dengan kasus gedung 10 lantai ini, Penulis menyimpulkan untuk sementara, lebih efisien merancang balok pratekan menggunakan SNI 2847:2013. Hal ini dikarenakan alasan kecepatan perhitungan dan ketelitian yang lebih unggul dibandingkan perbedaan yang tidak signifikan (12%).

Namun, perlu dilakukan studi lebih lanjut perbedaan desain balok prategang dengan skala yang lebih besar sehingga dapat dilihat perbedaan secara utuh.

9.2 Saran

Berdasarkan pada hasil perancangan yang dilakukan, berikut beberapa saran yang penulis dapat ajukan:

- Guna memperkaya perbandingan antara SNI 2847:2013 dan EN1992-1-1:2004 untuk beton prategang yang menerima beban gempa dapat dilakukan studi lebih lanjut mengenai:
 1. Prategang sistem pretension
 2. Prategang pada jembatan
 3. Balok dengan penampang boleh retak
 4. Balok dengan bentang dan gaya prategang yang besar
- Diperlukan studi lebih lanjut terhadap perbandingan gempa SNI 1726:2012 dan EN 1998-1-1:2004 agar implementasi Eurocode di Indonesia lebih realistis
- Diperlukan studi lebih lanjut untuk menentukan *National Annex* dari Eurocode di Indonesia

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2012). *SNI 1726:2012 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*.
<https://doi.org/10.1080/0893569032000131613>
- Badan Standarisasi Nasional Indonesia. (2013). *SNI 2847:2013 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*.
- Departemen Pekerjaan Umum. (1971). *Peraturan Beton Bertulang Indonesia*.
- Eurocode. (2004a). *EN 1992 -Design of concrete structures*.
<https://doi.org/10.1136/aim.2010.003699>
- Eurocode. (2004b). *EN 1998: Design of structures for earthquake resistance*.
- Gilbert, R. I., Mickleborough, N. C., & Ranzi, G. (2017). *Design of Prestressed Concrete to Eurocode 2*.
- T. Y., L., & Burns, N. H. (n.d.). *Design of Prestressed Concrete Structures*.
- Toniolo, G., & di Prisco, M. (2017). *Reinforced Concrete Design to Eurocode 2*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52033-9>
- VSL International Ltd. (n.d.). Vsl Strand Post-Tensioning Systems.

LAMPIRAN

AF anchorage

- Anchorage used for vertical tendons, where the prestressing force has to be transferred to the structure at the lowest end of the tendon, when there is no access to the dead-end anchorage and strands cannot be installed prior to concreting
- Units ranging from 6-4 to 6-31

- Used when prestressing force has to be transferred to the structure at the far end of the tendon without access to the anchor
- Strand anchored by compression fittings bearing on a bearing plate
- Units ranging from 6-2 to 6-55

- The type L (loop) anchorage is often used for vertical tendons in reservoir walls and for 'nailing' pier-head segments to piers in segmental bridge construction
- Strands are installed into the duct after concreting and simultaneously stressed from both ends
- Units ranging from 6-2 to 6-22

- The most versatile anchorage for a variety of structures and strengthening work (concrete, steel, masonry, etc.)
- The prestressing force is transferred to the structure by a bearing plate
- Units ranging from 6-1 to 6-55

The intermediate anchorage, Z, is used for tendons where the ends cannot be fitted using normal stressing anchorages (e.g. in circular pressure shafts/pressure tunnels and in egg-shaped digesters).
→ for further details refer to the Technical section Page T 30

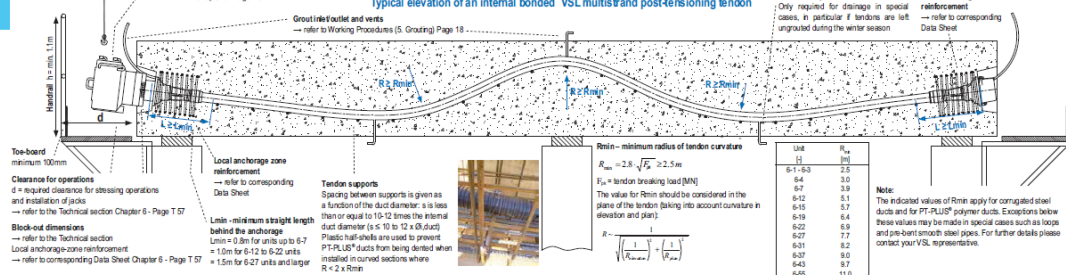
Dead End

Drain at low point of tendon

Drain at low point of tendon
Only required for drainage in special cases, in particular if tendons are left ungrouted during the winter season

Local anchorage-zone

reinforcement
→ refer to corresponding
Data Sheet



Page 18 - VSL STRAND POST-TENSIONING SYSTEM

VSL STRAND POST-TENSIONING SYSTEMS - Page 11

TECHNICAL DATA FOR THE VSL POST-TENSIONING SYSTEM

1. TENDONS

Whenever possible 0.8" (and not 0.5") strand should be used, due to its better economy.

1.1 Strand Properties 15 mm (0.5")

Strand type	Y1800S7	pEN 10138 - 3 (2009)	Y1770S7	ASTM A416-06
	15.3	15.7	15.7	15.24
Nominal cross section	A_n (mm ²)	140	150	140
Nominal mass	M (kg/m)	1.085	1.172	1.102
Nominal yield strength	f_{yk} (MPa)	1630 ¹⁾	1640 ¹⁾	1620 ¹⁾
Nominal tensile strength	f_{tk} (MPa)	1860	1860	1770
Specif./min. breaking load	F_{pk} (kN)	260.4	279.0	250.7
Young's modulus	(GPa)		approx. 195	
Relaxation ²⁾ after 1000 h at 20 °C and 0.7 x F_{pk}	(%)		max. 2.5	

- Characteristic value measured at 0.1% permanent extension
- Minimum load at 0.1% extension for lowrelaxation strand
- Valid for relaxation class acc. to pEN 10138-3 or lowrelaxation grade acc. to ASTM A416-06

1.2 Tendon Properties 15 mm (0.8") and corresponding duct diameters

Unit	Strands numbers	Breaking load				Steel duct ¹⁾ minimum recommended				Plastic duct VSL PP-C1080				PE pipe			
		Y1800S7 (pEN)	Y1770S7 (pEN)	Grade 270 (ASTM)	Grade 270 (ASTM)	Ø / I _Ø	a	Ø / I _Ø	a	Ø / I _Ø	a	Ø _{ext} x I _{ext}	a	Ø / I _Ø	a	Ø _{ext} x I _{ext}	a
		Ø15.3 mm A _n 140 mm ²	Ø15.7 mm A _n 150 mm ²	Ø15.7 mm A _n 150 mm ²	Ø15.24 mm A _n 140 mm ²	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm x mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm x mm]	[mm]
B-1	1	180	195	200.5	180	5	30/95	7	20/65	8	26/100	8					
B-2	2	320	358	353	321	40/45	9	45/50	12	9	45/40	9					
B-3	3	480	507	509	480	45/45	9	45/50	12	9	45/40	9					
B-4	4	1040	1116	1086	1043	45/50 ¹⁾	9	50/55 ¹⁾	10	10	50/40	10					
B-5	5	1300	1388	1365	1300	45/50	9	50/55	10	10	50/40	10					
B-6	6	1860	1974	1960	1864	50/62	9	60/67	12	28/85	11	73/45.5	15				
B-7	7	2420	2568	2542	2420	50/62	9	60/67	12	28/85	11	73/45.5	15				
B-8	8	3080	3268	3232	3080	50/62	9	60/67	12	28/85	11	73/45.5	15				
B-9	9	3740	3954	3906	3740	50/62	9	60/67	12	28/85	11	73/45.5	15				
B-10	10	2800	2958	2925	2800	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-11	11	3460	3638	3592	3460	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-12	12	4120	4326	4266	4120	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-13	13	4780	5004	4934	4780	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-14	14	5440	5688	5608	5440	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-15	15	6100	6366	6276	6100	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-16	16	6760	7038	6938	6760	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-17	17	7420	7704	7594	7420	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-18	18	8080	8368	8248	8080	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-19	19	8740	9036	8906	8740	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-20	20	9400	9702	9562	9400	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-21	21	10060	10368	10218	10060	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-22	22	10720	11034	10874	10720	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-23	23	11380	11698	11528	11380	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-24	24	12040	12360	12180	12040	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-25	25	12700	13020	12830	12700	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-26	26	13360	13680	13480	13360	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-27	27	14020	14340	14130	14020	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-28	28	14680	15000	14780	14680	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-29	29	15340	15660	15430	15340	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-30	30	16000	16320	16080	16000	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-31	31	16660	16980	16730	16660	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-32	32	17320	17640	17380	17320	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-33	33	17980	18300	18030	17980	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-34	34	18640	18960	18680	18640	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-35	35	19300	19620	19330	19300	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-36	36	19960	20280	19980	19960	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-37	37	20620	20940	20640	20620	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-38	38	21280	21600	21280	21280	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-39	39	21940	22260	21940	21940	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				
B-40	40	22600	22920	22580	22600	50/67	9	59/62	14	75/81	13	90/45.4	17				

- Flat duct (parallel to and length 7 times, height 3 times)
- Flat duct PP-PLUS for use with VSL anchorage, see 2.2.3
- Sufficiently for short cables with little curvature. For other cases contact local VSL representative.
- Given values may slightly vary depending on local availability of ducts. In any case the filling ratio (cross-section steel / duct) must not exceed 0.5 (EN202)
- Da refers to outer pipe diameter. For Bb diameter refer to section 2.2.3 (Page 13)

Page 11 - VSL STRAND POST-TENSIONING SYSTEMS

1.3 Strand Properties 13 mm (0.5")

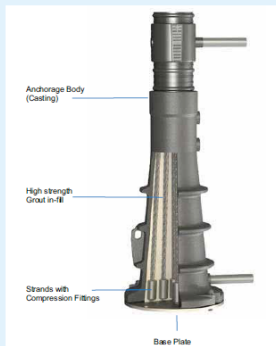
Strand type	pEN 10138 - 3 (2009)	ASTM A416-06
	12.5	12.9
Nominal diameter	d (mm)	12.7
Nominal cross section	A_n (mm ²)	93
Nominal mass	M (kg/m)	0.726
Nominal yield strength	f_{yk} (MPa)	1634 ¹⁾
Nominal tensile strength	f_{tk} (MPa)	1860
Specif./min. breaking load	F_{pk} (kN)	173.0
Young's modulus	(GPa)	approx. 195
Relaxation ²⁾ after 1000 h at 20 °C and 0.7 x F_{pk}	(%)	max. 2.5

- Characteristic value measured at 0.1% permanent extension
- Valid for relaxation class acc. to pEN 10138-3 or lowrelaxation grade acc. to ASTM A416-06
- Minimum load at 0.1% extension for lowrelaxation strand

1.4 Tendon Properties 13 mm (0.5") and corresponding duct diameters

Unit	Strands numbers	Breaking load				Steel duct ¹⁾				Plastic duct VSL PP-C1080	
		Y1800S7 (pEN)	Grade 270 (ASTM)	Grade 270 (ASTM)	Grade 270 (ASTM)	Ø / I _Ø	a	Ø / I _Ø	a	Ø _{ext} x I _{ext}	a
		Ø12.5 mm A _n 93 mm ²	Ø12.9 mm A _n 100 mm ²	Ø12.7 mm A _n 96 mm ²	Ø12.7 mm A _n 96 mm ²	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm x mm]	[mm]
B-1	1	173	186	184	202/25	3	25/100	6	22/225	6	
B-2	2	346	372	367	346	5	40/45	9	40/45	9	
B-3	3	519	558	551	519	5	40/45	9	40/45	9	
B-4	4	692	744	736	692	5	40/45	9	40/45	9	
B-5	5	865	930	919	865	5	40/45	9	40/45	9	
B-6	6	1038	1116	1102	1038	5	40/45	9	40/45	9	
B-7	7	1211	1300	1286	1207	7	50/62	12	50/62	12	
B-8	8	1384	1484	1468	1384	7	50/62	12	50/62	12	
B-9	9	1557	1674	1653	1557	7	50/62	12	50/62	12	
B-10	10	1730	1858	1837	1730	7	50/62	12	50/62	12	
B-11	11	1903	2040	2016	1903	7	50/62	12	50/62	12	
B-12	12	2076	2222	2194	2076	7	50/62	12	50/62	12	
B-13	13	2249	2404	2369	2249	7	50/62	12	50/62	12	
B-14	14	2422	2586	2542	2422	7	50/62	12	50/62	12	
B-15	15	2595	2768	2717	2595	7	50/62	12	50/62	12	
B-16	16	2768	2949	2888	2768	7	50/62	12	50/62	12	
B-17	17	2941	3122	3051	2941	7	50/62	12	50/62	12	
B-18	18	3114	3293	3212	3114	7	50/62	12	50/62	12	
B-19	19	3287	3466	3375	3287	7	50/62	12	50/62	12	
B-20	20	3460	3638	3537	3460	7	50/62	12	50/62	12	
B-21	21	3633	3810	3699	3633	7	50/62	12	50/62	12	
B-22	22	3806	4082	3961	3806	7	50/62	12	50/62	12	
B-23	23	3979	4254	4123	3979	7	50/62	12	50/62	12	
B-24	24	4152	4426	4285	4152	7	50/62	12	50/62	12	
B-25	25	4325	4608	4457	4325	7	50/62	12	50/62	12	
B-26	26	4498	4789	4628	4498	7	50/62	12	50/62	12	
B-27	27	4671	5060	4889	4671	7	50/62	12	50/62	12	
B-28	28	4844	5231	5050	4844	7	50/62	12	50/62	12	
B-29	29	5017	5402	5211	5017	7	50/62	12	50/62	12	
B-30	30	5190	5573	5372	5190	7	50/62	12	50/62	12	
B-31	31	5363	5744	5533	5363	7	50/62	12	50/62	12	
B-32	32	5536	5915	5694	5536	7	50/62	12	50/62	12	
B-33	33	5709	6086	5855	5709	7	50/62	12	50/62	12	
B-34	34	5882	6257	6046	5882	7	50/62	12	50/62	12	
B-35	35	6055	6428	6217	6055	7	50/62	12	50/62	12	
B-36	36	6228	6699	6478	6228	7	50/62	12	50/62	12	
B-37	37	6401	6870	6649	6401	7	50/62	12	50/62	12	
B-38	38	6574	7041	6820	6574	7	50/62	12	50/62	12	
B-39	39	6747	7212	6991	6747	7	50/62	12	50/62	12	
B-40	40	6920	7383	7162	6920	7	50/62	12	50/62	12	
B-41	41	7093	7554	7333	7093	7	50/62	12	50/62	12	
B-42	42	7266	7725	7504	7266	7	50/62	12	50/62	12	
B-43	43	7439	7896	7675	7439	7	50/62	12	50/62	12	
B-44	44	7612	8067	7846	7612	7	50/62	12	50/62	12	
B-45	45	7785	8238	8017	7785	7	50/62	12	50/62	12	
B-46	46	7958	8409	8188	7958	7	50/62	12	50/62	12	
B-47	47	8131	8580	8359	8131	7	50/62	12	50/62	12	
B-48	48	8304	8751	8530	8304	7	50/62	12	50/62	12	
B-49	49	8477	8922	8701	8477	7	50/62	12	50/62	12	
B-50	50	8650	9093	8872	8650	7	50/62	12	50/62	12	
B-51	51	8823	9264	9043	8823	7	50/62	12	50/62	12	
B-52	52	8996	9435	9214	8996	7	50/62	12	50/62	12	
B-53	53	9169	9606	9385	9169	7	50/62	12	50/62	12	
B-54	54	9342	9777	9556	9342	7	50/62	12	50/62	12	
B-55	55	9515	9948	9727	9515	7	50/62	12	50/62	12	
B-56	56	9688	10119	9898	9688	7	50/62	12	50/62	12	
B-57	57	9861	10290	10069	9861	7	50/62	12	50/62	12	
B-58	58	10034	10461	10240	10034	7	50/62	12	50/62	12	
B-59	59	10207	10632	10411	10207	7	50/62	12	50/62	12	
B-60	60	10380	10803	10582	10380	7	50/62	12	50/62	12	
B-61	61	10553	10974	10753	10553	7	50/62	12	50/62	12	
B-62	62	10726	11145	10924	10726	7	50/62	12	50/62	12	
B-63	63	10899	11316	11095	10899	7	50/62	12	50/62	12	
B-64	64	11072	11487	11268	11072	7	50/62	12	50/62	12	
B-65	65	11245	11658	11439	11245	7	50/62	12	50/62	12	
B-66	66	11418	11829	11610	11418	7	50/62	12	50/62	12	
B-67	67	11591	12000	11781	11591	7	50/62	12	50/62	12	
B-68	68	11764	12171	11952	11764	7	50/62	12	50/62	12	
B-69	69	11937	12342	12123	11937	7	50/62	12	50/62	12	
B-70	70	12110	12513	12294	12110	7	50/62	12	50/62	12	
B-71	71	12283	12684	12465	12283	7	50/62	12	50/62	12	
B-72	72	12456	12855	12636	12456	7	50/62	12	50/62	12	
B-73	73	12629	13026	12807	12629	7	50/62	12	50/62	12	
B-74	74	12802	13197	12978	12802	7	50/62	12	50/62	12	
B-75	75	12975	13368	13149	12975	7	50/62	12	50/62	12	
B-76	76	13148	13539	13320	13148	7	50/62	12	50/62	12	
B-77	77	13321	13710	13491	13321	7	50/62	12	50/62	12	
B-78	78	13494	13881	13662	13494	7	50/62	12	50/62	12	
B-79	79	13667	14052	13833	13667	7	50/62	12	50/62	12	
B-80	80	13840	14223	14004	13840	7	50/62	12	50/62	12	
B-81	81	14013	14394	14175	14013	7	50/62	12	50/62	12	
B-82	82	14186	14565	14346	14186	7	50/62	12	50/62	12	
B-83	83	14359	14736	14517	14359	7	50/62	12	50/62	12	
B-84	84	14532	14907	14688	14532	7	50/62	12	50/62	12	
B-85	85	14705	15078	14859	14705	7	50/62	12	50/62	12	
B-86	86	14878	15249	15030	14878	7	50/62	12	50/62	12	
B-87	87	15051	15420	15201	15051	7	50/62	12	50/62	12	
B-88	88	15224	15591	15372	15224	7	50/62	12	50/62	12	
B-89	89	15397	15762	15543	15397	7	50/62	12	50/62	12	
B-90	90	15570	15933	15714	15570	7	50/62	12	50/62	12	
B-91	91	15743	16104	15885	15743	7	50/62	12	50/62	12	
B-92	92	15916	16275	16056	15916	7	50/62	12	50/62	12	
B-93	93	16089	16446	16227	16089	7	50/62	12	50/62	12	
B-94	94	16262	16617	16398	16262	7	50/62	12	50/62	12	
B-95	95	16435	16788	16569	16435	7	50/62	12	50/62	12	
B-96	96	16608	16959	16740	16608	7	50/62	12	50/62	12	
B-97	97	16781	17130	16911	16781	7	50/62	12	50/62	12	
B-98	98	16954	17301	17082	16954	7	50/62	12	50/62	12	
B-99	99	17127	17472	17253	17127	7	50/62	12	50/62	12	
B-100	100	17300	17643	17424	17300	7	50/62	12	50/62	12	

Multistrand Post-Tensioning System Internal Bonded Post-Tensioning **DEAD END ANCHORAGE TYPE AF**



Unit	ØA	B	C	D
S-4	240	700	60	800
S-7	260	700	60	800
S-12	285	700	60	800
S-15	285	700	60	800
S-19	315	700	60	800
S-22	333	750	60	850
S-27	353	800	60	890
S-31	380	900	60	1000

Notes

All dimensions in [mm]

System applicable to strands with $A_p = 140 \text{ mm}^2$ or $A_p = 150 \text{ mm}^2$

Minimum in-fill grout strength at time of stressing $f_{c, \text{min}} = 100 \text{ MPa}$

System can be used with corrugated steel duct or PT-Plus® duct

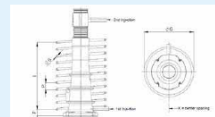
Data Sheet No 918

Page 1 of 1 - VSL STRAND POST-TENSIONING SYSTEMS

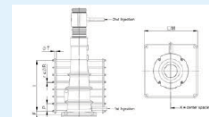


Multistrand Post-Tensioning System Internal Bonded Post-Tensioning **ANCHORAGE TYPE AF (Strand $F_{pk} = 265/279 \text{ kN}$)** LOCAL ZONE REINFORCEMENT $f_{yk} = 390/460/500 \text{ N/mm}^2$

OPTION A - SPIRAL REINFORCEMENT



OPTION B - STIRRUP REINFORCEMENT



Strand $F_{pk} = 350 \text{ kN}$

Min. yield strength for local zone reinforcement $f_{yk} = 360 \text{ N/mm}^2$

A. Spiral Reinforcement							B. Stirrup Reinforcement								
Unit	F	P	ØS	ØR	n	X	F	P	ØR	M	F	P	ØR	M	X
S-4	350	420	30	8	235	3	235	30	235	30	235	30	235	30	3
S-7	350	420	45	12	235	3	315	30	420	30	235	30	420	30	3
S-12	350	420	30	16	230	3	330	30	420	30	235	30	420	30	3
S-15	350	420	45	16	415	1	425	30	420	30	235	30	420	30	3
S-19	350	420	30	20	465	3	410	30	420	30	235	30	420	30	3
S-22	350	420	30	24	415	1	315	30	420	30	235	30	420	30	3
S-27	350	420	30	24	545	3	505	30	420	30	235	30	420	30	3
S-31	350	420	30	24	565	3	605	30	420	30	235	30	420	30	3

Strand $F_{pk} = 350 \text{ kN}$

Min. yield strength for local zone reinforcement $f_{yk} = 460 \text{ N/mm}^2$

A. Spiral Reinforcement							B. Stirrup Reinforcement						
Unit	F	P	Ø	SR	n	x	F	P	Ø	SR	n	x	
S-4	350	420	80	8	235	7	235	420	70	10	235	7	235
S-7	350	440	95	12	205	8	375	420	70	10	205	7	375
S-12	350	440	95	16	370	8	330	380	80	10	370	7	330
S-15	350	450	90	16	415	9	435	440	90	10	415	9	435
S-19	350	475	95	18	415	9	435	450	90	10	415	9	435
S-22	350	480	90	18	465	9	435	460	90	10	465	9	435
S-27	350	500	90	20	545	10	545	540	90	20	545	10	545
S-31	350	520	90	20	585	11	625	575	95	20	585	10	625

Strand $F_{pk} = 279 \text{ kN}$

Min. yield strength for local zone reinforcement $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$

A. Spiral Reinforcement						B. Stirrup Reinforcement							
Strand	F	P	ØA	M	A	F	P	ØA	M	A	B		
S-4	80	90	12	240	3	280	45	400	12	240	3	280	
S-7	80	90	12	18	305	6	325	45	400	12	240	3	280
S-12	80	90	12	18	305	6	325	45	400	12	240	3	280
S-15	80	90	12	18	305	6	325	45	400	12	240	3	280
S-19	80	90	12	18	305	6	325	45	400	12	240	3	280
S-22	80	90	12	18	305	6	325	45	400	12	240	3	280
S-27	80	90	12	18	305	6	325	45	400	12	240	3	280
S-31	80	90	12	18	305	6	325	45	400	12	240	3	280

Notes

All dimensions in [mm]

Min. required concrete strength $f_{c, \text{min}} = 120/135 \text{ MPa}$ at stressing

X = minimal center spacing between anchorages

For calculation of minimum edge distance refer to 4.4.1

Reinforcement, edge distance, center spacing may be modified, contact VSL

Strand $A_p = 150 \text{ mm}^2$, $f_{yk} = 1770 \text{ N/mm}^2$ (EN 155) $F_{pk} = 265/240$

Strand $A_p = 150 \text{ mm}^2$, $f_{yk} = 1860 \text{ N/mm}^2$ (EN 155) $F_{pk} = 279/240$

For maximum tendon force refer to 4.2.5

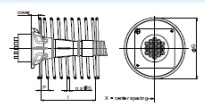
Data Sheet No 919

VSL STRAND POST-TENSIONING SYSTEMS - Page 132

Multistrand Post-Tensioning System
Internal Bonded Post-Tensioning
ANCHORAGE TYPE GC (Strand $F_{pk}=260 / 265 \text{ kN}$)
LOCAL ZONE REINFORCEMENT $f_{yk}=460 \text{ N/mm}^2$



OPTION A - SPIRAL REINFORCEMENT



CONCRETE 30/35 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

CONCRETE 24/30 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

CONCRETE 20/25 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

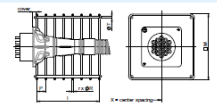
CONCRETE 16/20 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

Notes

All dimensions in [mm]
Min. yield strength for local zone reinforcement $f_{yk} = 400 \text{ N/mm}^2$
Min. required concrete strength $f_{cm} / f_{cu} / f_{ck}$ in MPa at anchoring
Stand $A_{yk} = 150 \text{ mm}^2$, $f_{yk} = 1770 \text{ N/mm}^2$ (S1770), $F_{pk} = 205.26 \text{ kN}$
Stand $A_{yk} = 140 \text{ mm}^2$, $f_{yk} = 1800 \text{ N/mm}^2$ (S1780), $F_{pk} = 200.44 \text{ kN}$

OPTION B - STIRRUP REINFORCEMENT



CONCRETE 30/35 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

CONCRETE 24/30 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

CONCRETE 20/25 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

For max. tendon force and temporary over stressing refer to 4.1 and 4.2.8 resp.

X = minimal center spacing between anchorages

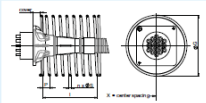
n = number of spiral turns including 90° and bent required at anchorage length

Reinforcement, edge distance, center spacing may be modified, contact VSL

Multistrand Post-Tensioning System
Internal Bonded Post-Tensioning
ANCHORAGE TYPE GC (Strand $F_{pk}=260$ or 265 kN)
LOCAL ZONE REINFORCEMENT $f_{yk}=390 \text{ N/mm}^2$



OPTION A - SPIRAL REINFORCEMENT



CONCRETE 30/35 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

CONCRETE 24/30 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

CONCRETE 20/25 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

CONCRETE 16/20 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

Notes

All dimensions in [mm]

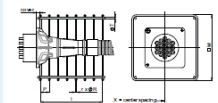
Min. yield strength for local zone reinforcement $f_{yk} = 300 \text{ N/mm}^2$

Min. required concrete strength $f_{cm} / f_{cu} / f_{ck}$ in MPa at anchoring

Stand $A_{yk} = 150 \text{ mm}^2$, $f_{yk} = 1770 \text{ N/mm}^2$ (S1770), $F_{pk} = 205.26 \text{ kN}$

Stand $A_{yk} = 140 \text{ mm}^2$, $f_{yk} = 1800 \text{ N/mm}^2$ (S1780), $F_{pk} = 200.44 \text{ kN}$

OPTION B - STIRRUP REINFORCEMENT



CONCRETE 30/35 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

CONCRETE 24/30 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

CONCRETE 20/25 MPa

D	A. Spiral Reinforcement				B. Stirrup Reinforcement			
	1	2	3	4	1	2	3	4
100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	125	125	125	125	125	125	125	125
150	150	150	150	150	150	150	150	150
175	175	175	175	175	175	175	175	175
200	200	200	200	200	200	200	200	200

For max. tendon force and temporary over stressing refer to 4.1 and 4.2.8 resp.

X = minimal center spacing between anchorages

n = number of spiral turns including 90° and bent required at anchorage length

Reinforcement, edge distance, center spacing may be modified, contact VSL

6. STRESSING EQUIPMENT AND CLEARANCE REQUIREMENTS

This section gives an overview of VSL stressing equipment. The stressing equipment should be chosen to suit the tendon units being used. Corresponding clearance requirements and block-out dimensions are presented in section 6.2.

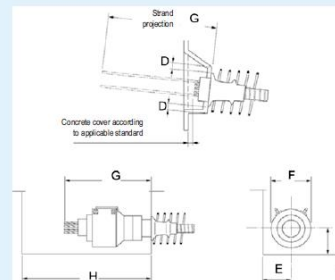
6.1 Stressing jack data



Designation	Max. Standard anchorage unit	Jack Capacity	Working Pressure	Testing Pressure	Home Area	Stroke	Center Hole	Weight (jack only)	Weight (with battery & oil)	Recommend. Pump	
	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[mm ²]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg]		
DKP-S	5.1	-	147	475	-	1,300	200	-	16	-	
DKP-S	5.1	(A31189)	-	-	-	-	-	30	-	PC 654200	
ZPE-214-F	5.1	6.1	230	480	-	6,710	200	23	110	EHPS-54 or EHPS-5	
ZPE-75	2.5	6.4	1,040	300	700	33,460	100	82	100	EHPS-54 or EHPS-5	
ZPE-121-S2	5-12	6.7	1,810	600	700	10,940	100	117	130	EHPS-5	
ZPE-18	-	6.3	1,810	600	700	10,940	100	130	130	EHPS-5	
ZPE-19	5-19	6.3	2,850	980	700	10,100	100	138	160	EHPS-54 or EHPS-5	
ZPE-480-P1	5-51	6.55	4,880	300	700	18,400	100	200	255	EHPS-54 or EHPS-5	
ZPE-680	5-51	6.55	6,000	980	700	18,400	200	300	400	EHPS-54 or EHPS-5	
ZPE-680	-	6-12, 6-18, 5-22	1,930	150	700	16,710	100	190	450	EHPS-54 or EHPS-5	
ZPE-750	5-37	6.31	7,500	931	700	14,470	100	200	880	1100	EHPS-54 or EHPS-5
RF 680	-	6.27, 6.51, 6.37	8,750	580	700	10,720	100	230	790	1140	EHPS-54 or EHPS-5
ZPE-1000	5-65	6.45	10,000	300	700	160,200	400	270	1,860	2,300	EHPS-54 or EHPS-5
ZPE-1200	5-65	6.55	12,000	377	700	246,500	500	270	1,280	1,730	EHPS-54 or EHPS-5
ZPE-1500	-	6.45, 6.55, 6.55	14,500	366	700	400,000	500	270	1,210	1,660	EHPS-54 or EHPS-5

The above values may be reduced, if absolutely required.
In such case, the local VSL representative office should be contacted.

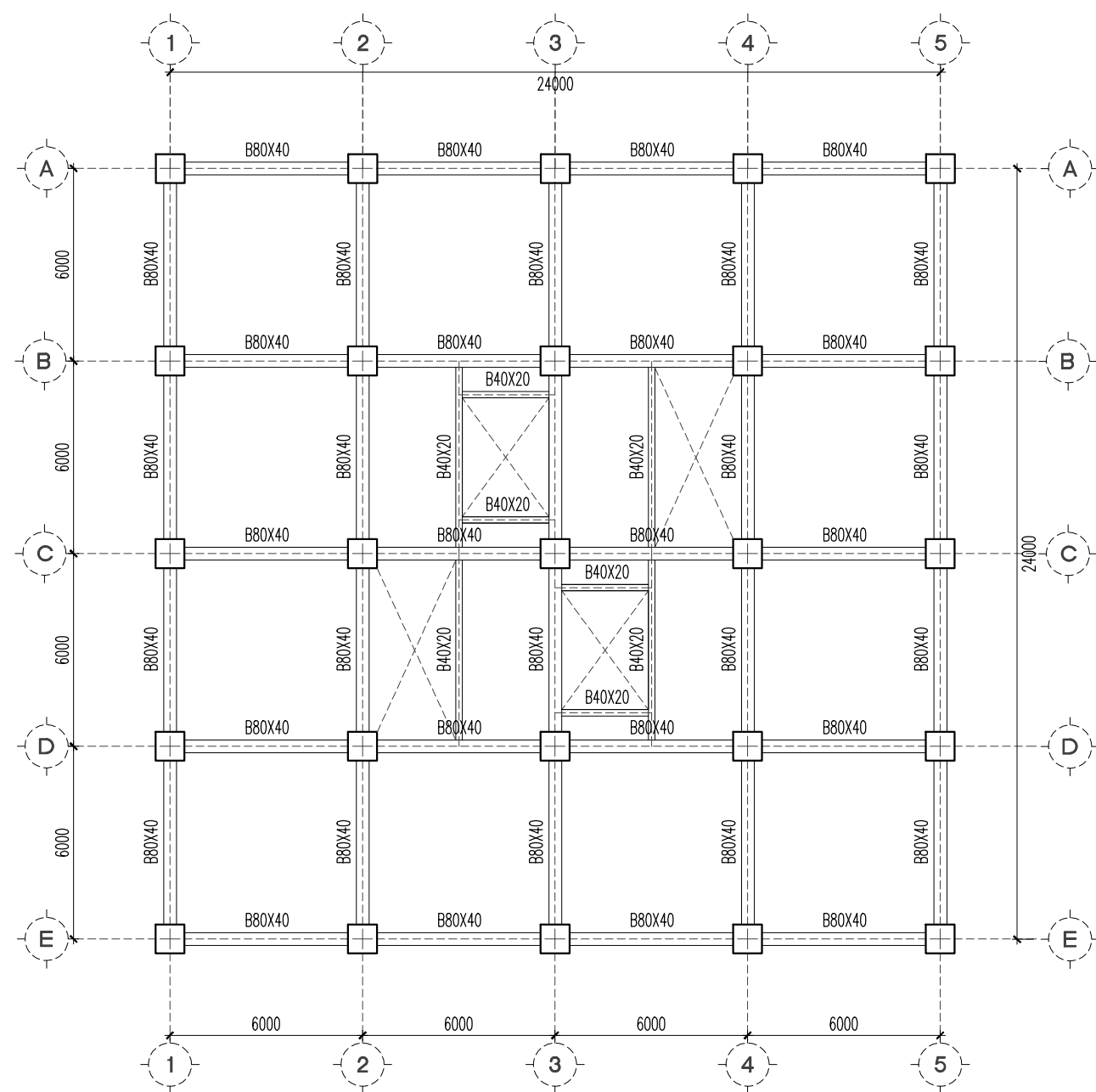
6.2 Block-out dimensions and clearance requirements



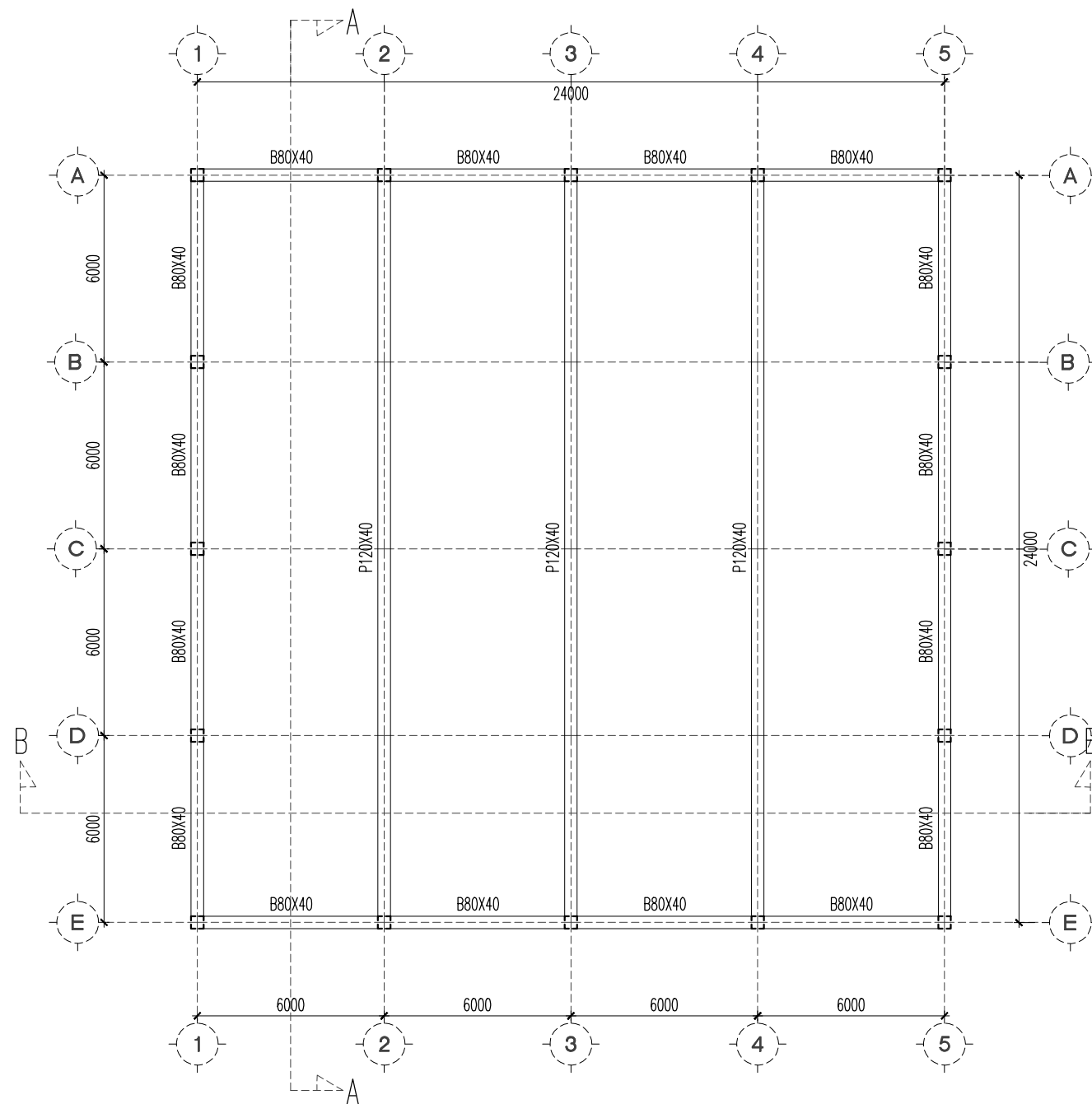
Block out dimension and clearance requirements

Designation	D min	E	F		G		H
			Width	Over length	Over length	Total length	
DKP-S	-	-	162	340	850		
DKP-S	-	-	240	480	1,000		
ZPE-25-F1	-	90	115	280	1,200		
ZPE-7A	30	200	280	650	1,400		
ZPE-12-S2	40	200	310	670	1,300		
ZPE-18S	50	180	300	620	1,220		
ZPE-19	50	200	390	690	1,500		
ZPE-480-P1	60	300	485	780	1,550		
ZPE-600	80	330	550	1,150	2,100		
ZPE-680	80	300	500	850	1,620		
ZPE-750	80	380	570	1,400	2,600		
ZPE-960	80	360	650	800	1,760		
ZPE-1000	80	420	780	1,300	2,400		
ZPE-1250	90	575	650	1,550	2,700		
ZPE-1450	90	420	770	1,010	1,850		

The above values may be reduced, if absolutely required.
In such case, contact VSL.



DENAH BALOK LT.1-LT.11
SKALA 1:200



DENAH BALOK LT.12
SKALA 1:200

LANTAI	UKURAN KOLOM
1	900X900
2	900X900
3	900X900
4	900X900
5	800X800
6	800X800
7	800X800
8	800X800
9	700X700
10	700X700
11	700X700
12	450X450



INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN,
DAN KEBUMIHAN
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

JUDUL TUGAS AKHIR
STUDI KOMPARASI DESAIN BETON PRATEKAN
BERDASARKAN SNI 2847:2013 DAN EUROCODE
1992-1-1:2004 DENGAN TINJAUAN GEMPA

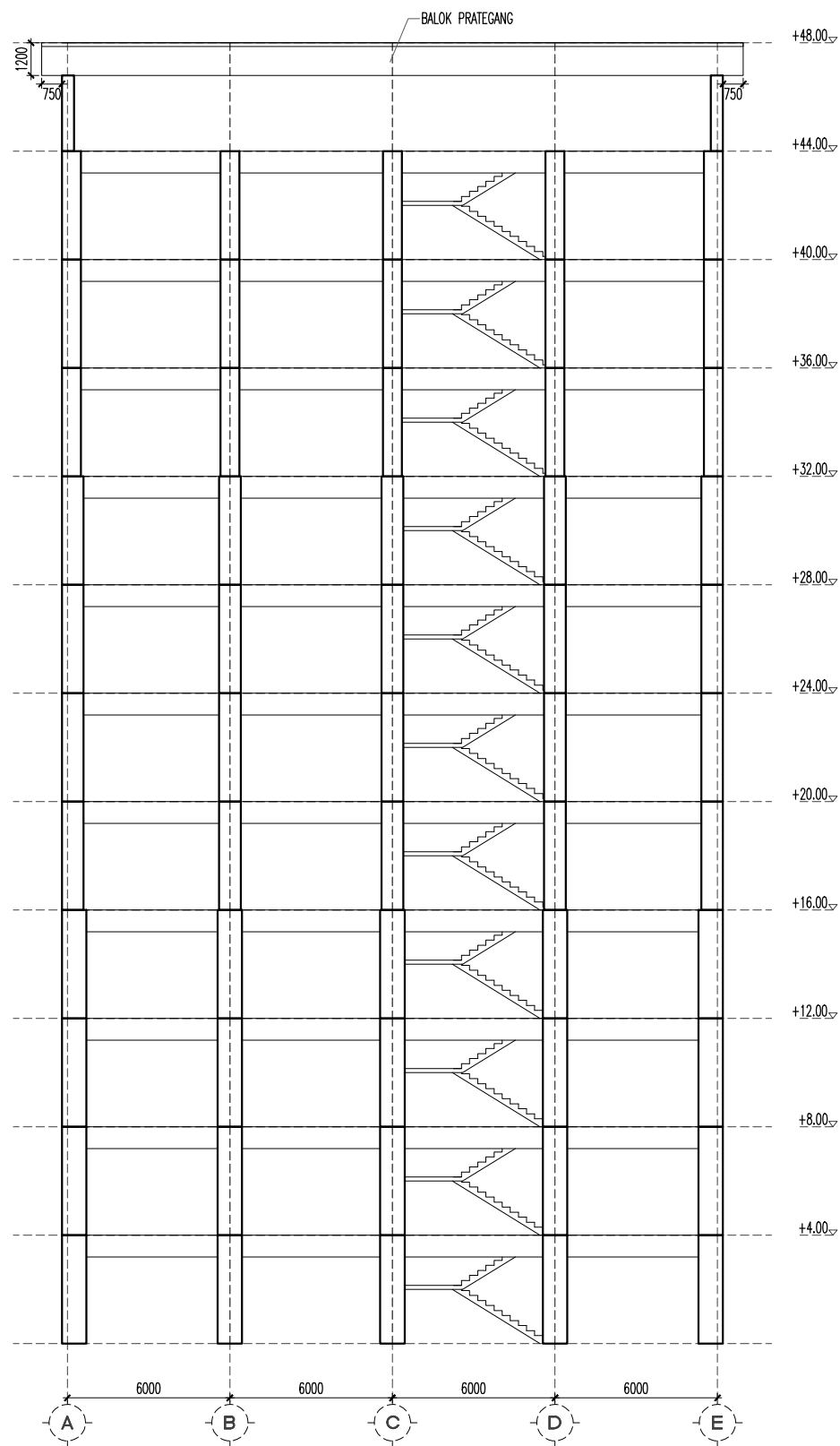
DOSEN PEMBIMBING
PROF. TAVIO, ST., MT., PHD
PROF. DR. IR. I GUSTI PUTU RAKA, DEA

NAMA MAHASISWA
CHRIST BILLY PRAKOSWA
NRP. 03111540000072

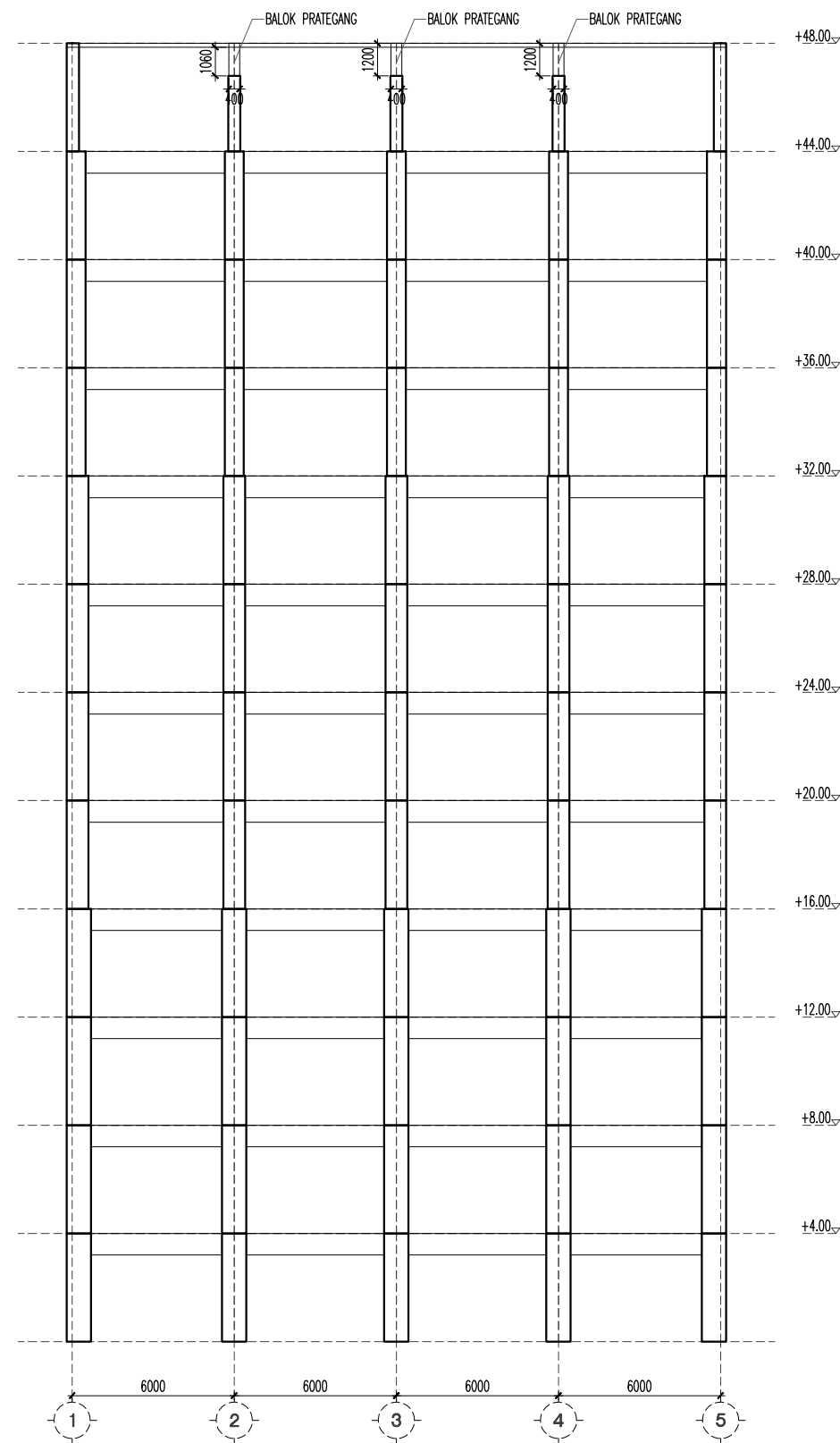
JUDUL GAMBAR
DENAH PEMBALOKAN

LEMBAR
1 14

CATATAN
f_{yp}=1770 MPa f_c'=40 MPa
f_y=390 MPa f_ci'=35 MPa



— POTONGAN MELINTANG A-A
STR STR REF SKALA 1:250



— POTONGAN MELINTANG B-B
STR STR REF SKALA 1:250



INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN,
DAN KEBUMIHAN
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

JUDUL TUGAS AKHIR

STUDI KOMPARASI DESAIN BETON PRATEKAN
BERDASARKAN SNI 2847:2013 DAN EUROCODE
1992-1-1:2004 DENGAN TINJAUAN GEMPA

DOSEN PEMBIMBING

PROF. TAVIO, ST., MT., PHD
PROF. DR. IR. I GUSTI PUTU RAKA, DEA

NAMA MAHASISWA

CHRIST BILLY PRAKOSWA
NRP. 03111540000072

JUDUL GAMBAR

POTONGAN MELINTANG

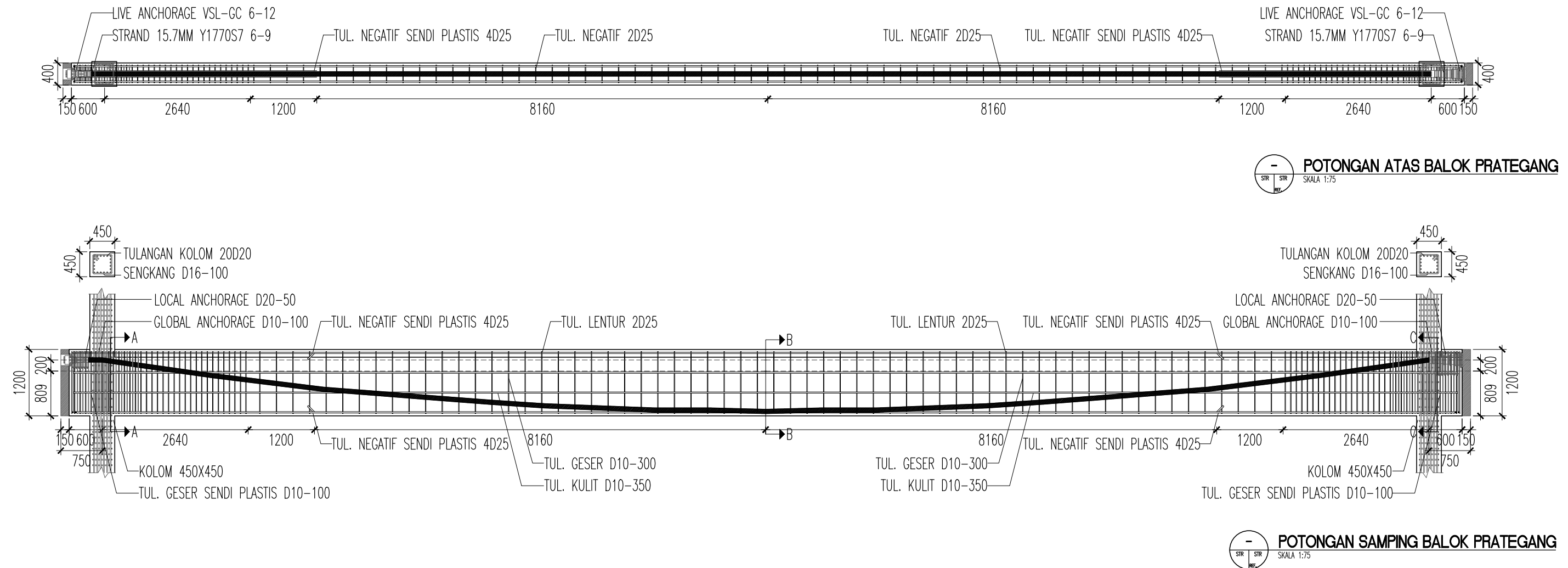
LEMBAR

2

14

CATATAN

$f_{yp}=1770 \text{ MPa}$ $f_{c'}=40 \text{ MPa}$
 $f_y=390 \text{ MPa}$ $f_{ci}=35 \text{ MPa}$



KOORDINAT TENDON

X(mm)	-600	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000	23000	24000	24600
Y(mm)	1009	1009	867	725	609	492	402	311	247	182	143	104	91	79	91	104	143	182	247	311	402	492	609	725	867	1009	1009
Z(mm)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200

DAERAH LIMIT KABEL

X(mm)	-600	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000	23000	24000	24600
Y1(mm)	2092	2092	1852	1613	1382	1152	973	793	668	543	468	393	366	340	366	393	468	543	668	793	973	1152	1382	1613	1852	2092	2092
Y2(mm)	322	322	166	9	-141	-291	-407	-524	-605	-687	-736	-785	-802	-819	-802	-785	-736	-687	-605	-524	-407	-291	-141	9	166	322	322

CATATAN

GAYA PRATEGANG	JUMLAH STRAND	UKURAN STRAND	MUTU STRAND	MUTU GROUT
1300 kN	9	15.7 mm	Y1770S7	Fc' 85 MPa



INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN,
DAN KEBUMIAH
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

JUDUL TUGAS AKHIR

STUDI KOMPARASI DESAIN BETON PRATEKAN
BERDASARKAN SNI 2847:2013 DAN EUROCODE
1992-1-1:2004 DENGAN TINJAUAN GEMPA

DOSEN PEMBIMBING

PROF. TAVIO, ST., MT., PHD
PROF. DR. IR. I GUSTI PUTU RAKA, DEA

NAMA MAHASISWA

CHRIST BILLY PRAKOSWA
NRP. 03111540000072

JUDUL GAMBAR

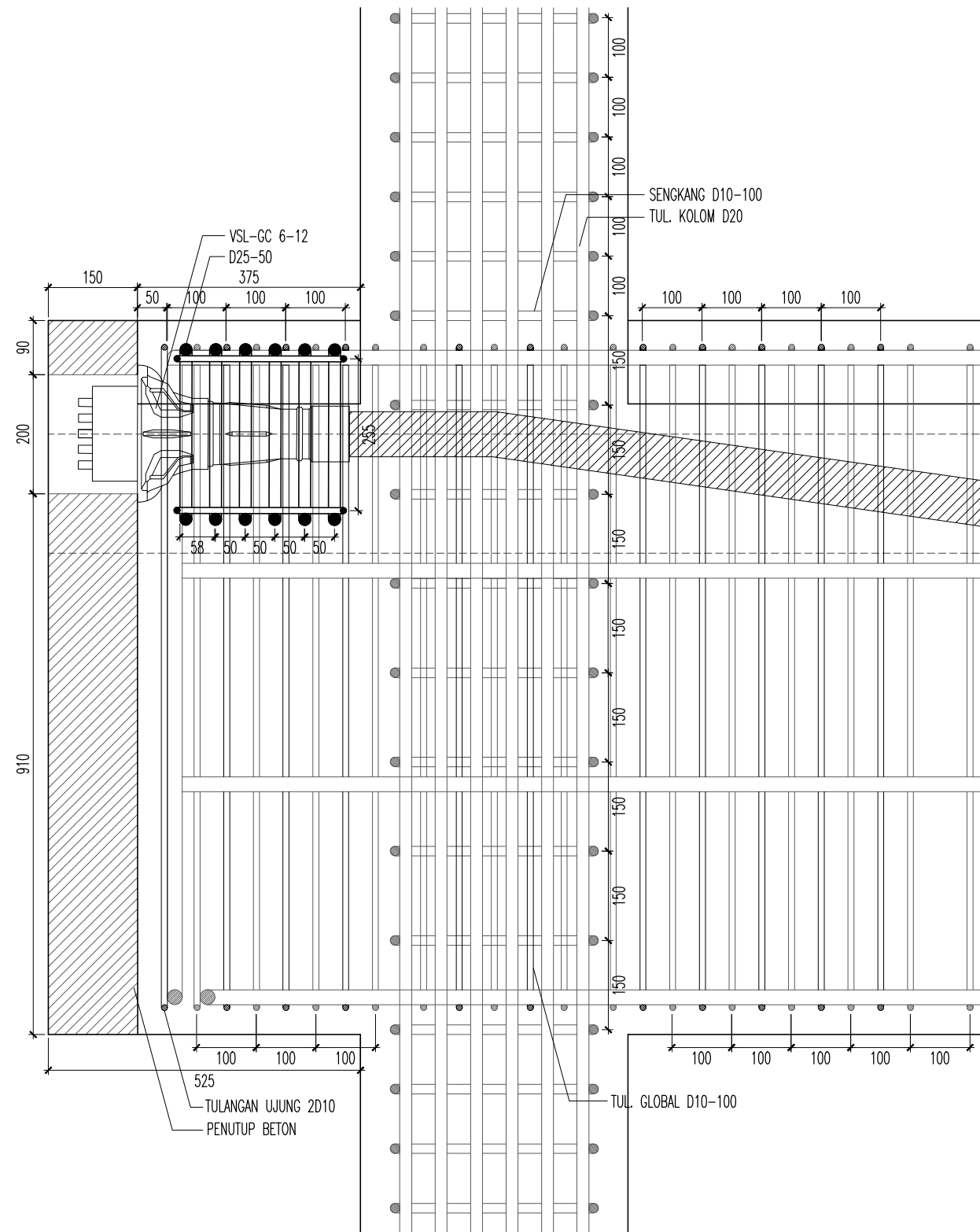
PRATEGANG SNI 2847:2013
KELAS U

LEMBAR

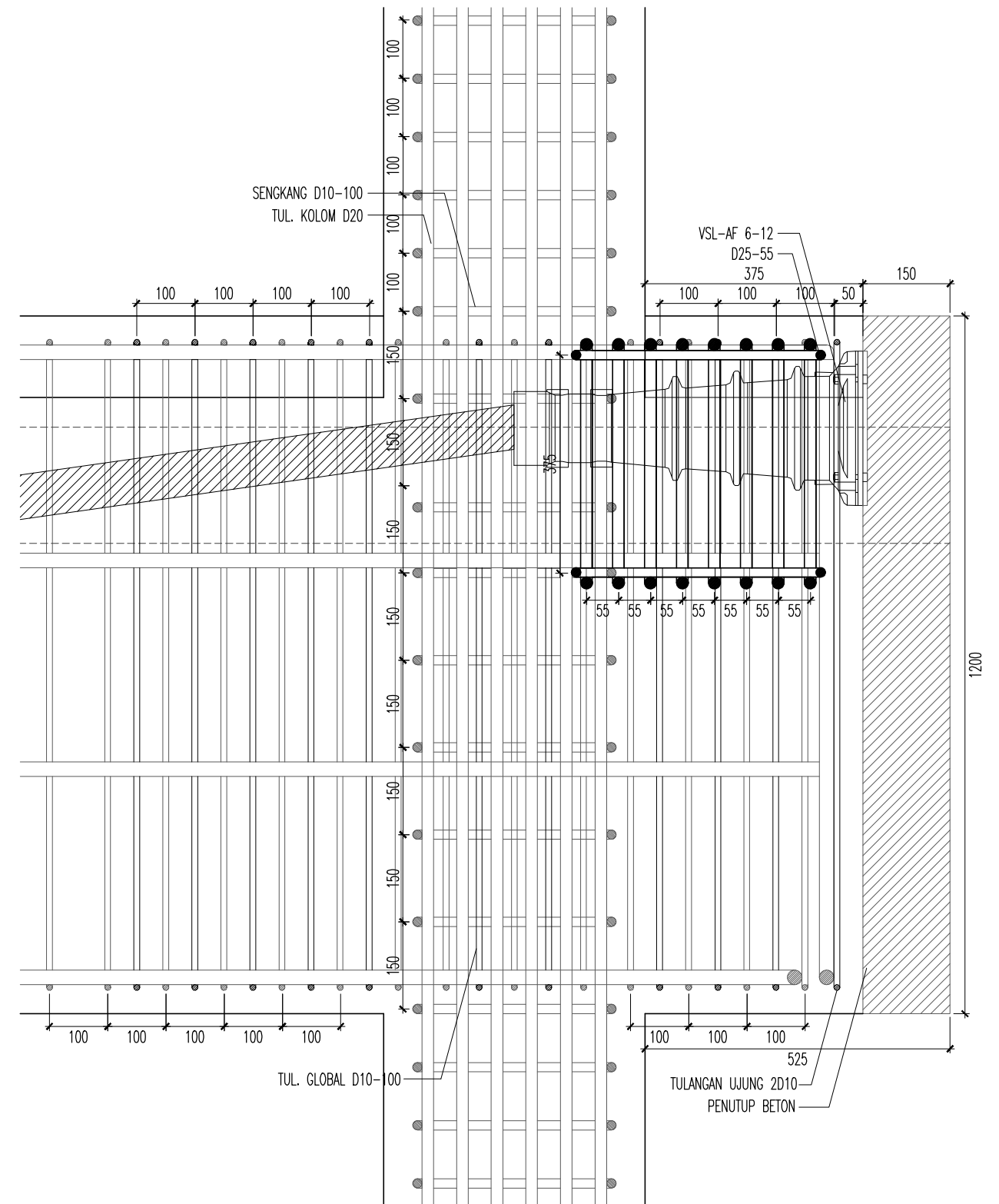
3 14

CATATAN

fyp=1770 MPa fc'=40 MPa
fy=390 MPa fci'=35 MPa



DETAIL TULANGAN ANGKUR HIDUP
SKALA 1:10



DETAIL TULANGAN ANGKUR MATI
SKALA 1:10



INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN,
DAN KEBUMIHAN
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

JUDUL TUGAS AKHIR
STUDI KOMPARASI DESAIN BETON PRATEKAN
BERDASARKAN SNI 2847:2013 DAN EUROCODE
1992-1-1:2004 DENGAN TINJAUAN GEMPA

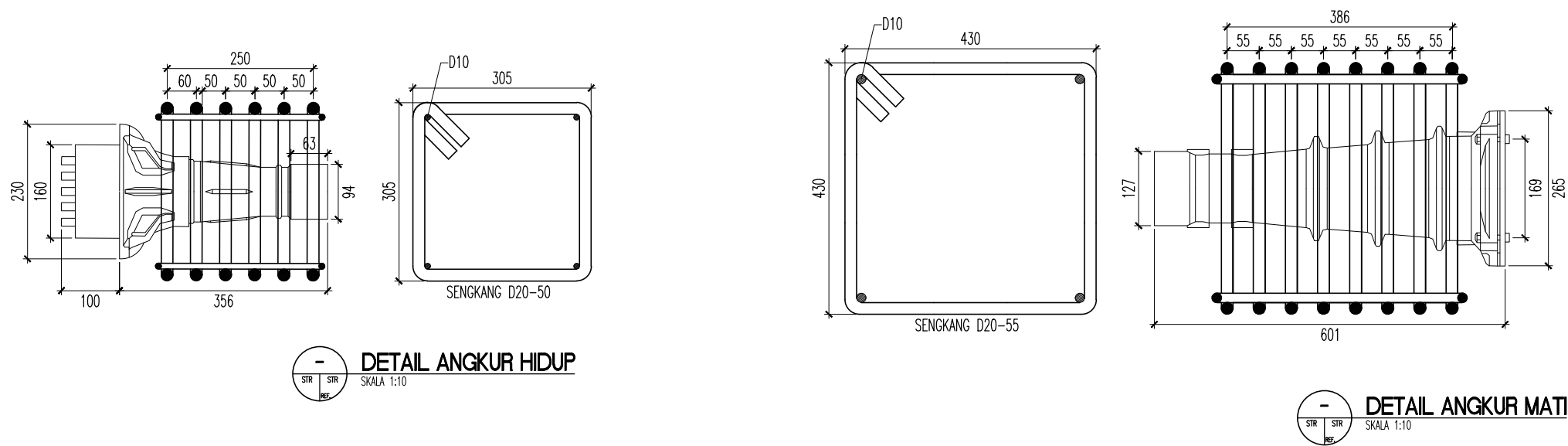
DOSEN PEMBIMBING
PROF. TAVIO, ST., MT., PHD
PROF. DR. IR. I GUSTI PUTU RAKA, DEA

NAMA MAHASISWA
CHRIST BILLY PRAKOSWA
NRP. 03111540000072

JUDUL GAMBAR
PRATEGANG SNI 2847:2013
KELAS U

LEMBAR
4 14

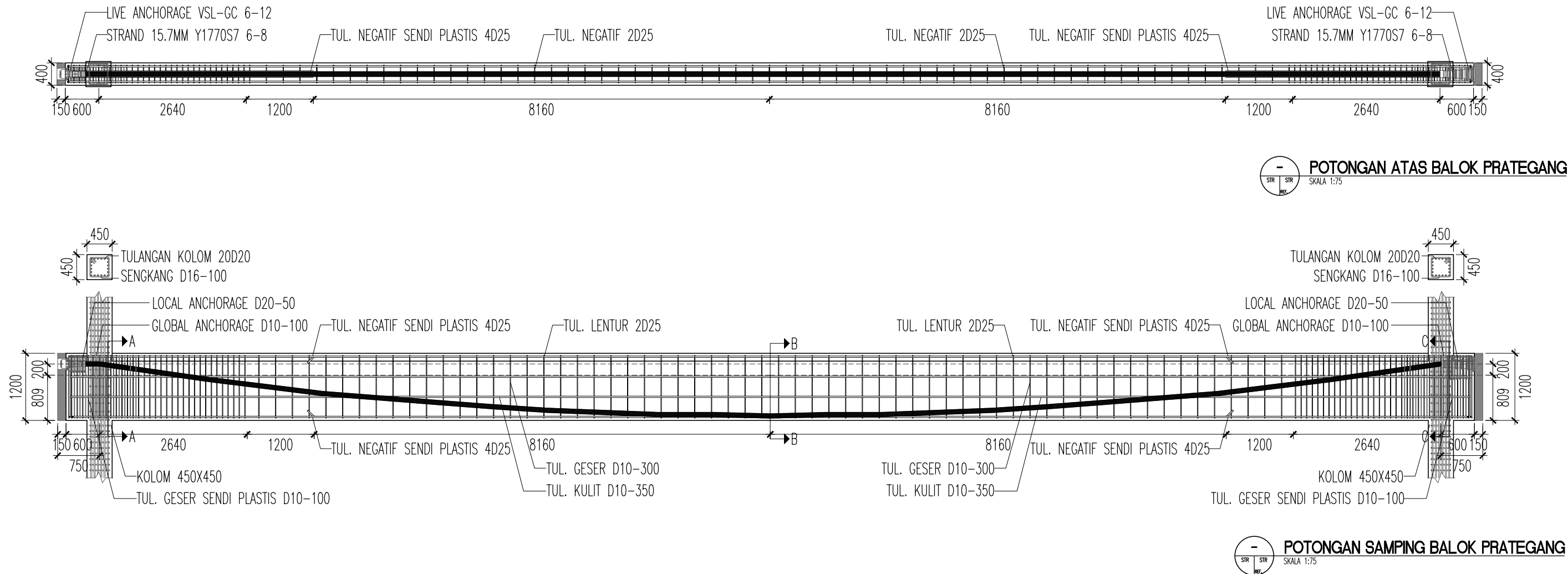
CATATAN
fyp=1770 MPa fc'=40 MPa
fy=390 MPa fci'=35 MPa



TIPE BALOK	PRATEKAN KELAS U		
LOKASI	TUMPUAN KIRI A-A	LAPANGAN B-B	TUMPUAN KANAN C-C
PENAMPANG			

DETAIL PENAMPANG





COORDINAT TENDON

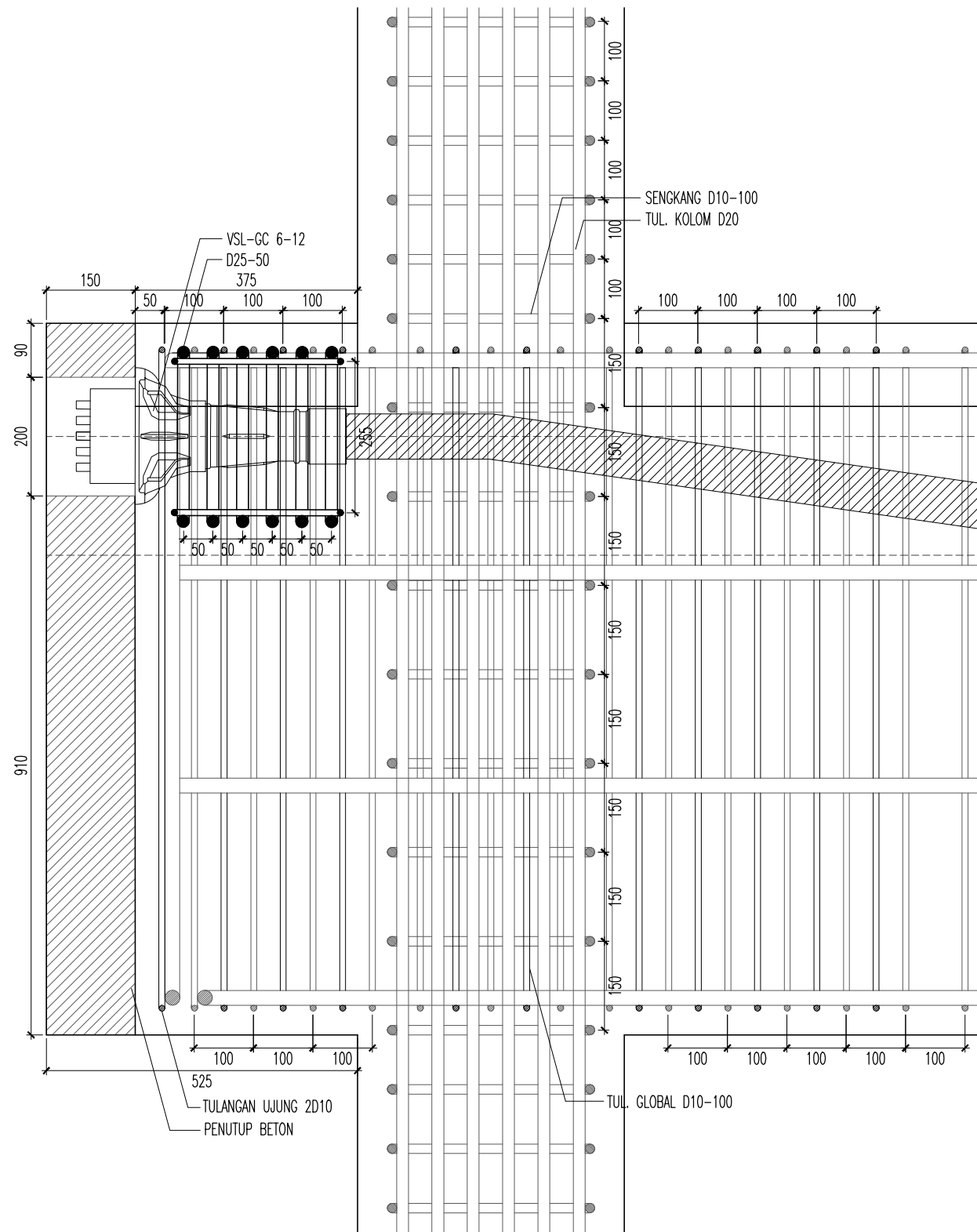
X(mm)	-600	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000	23000	24000	24600
Y(mm)	1009	1009	867	725	609	492	402	311	247	182	143	104	91	79	91	104	143	182	247	311	402	492	609	725	867	1009	1009
Z(mm)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200

DAERAH LIMIT KABEL

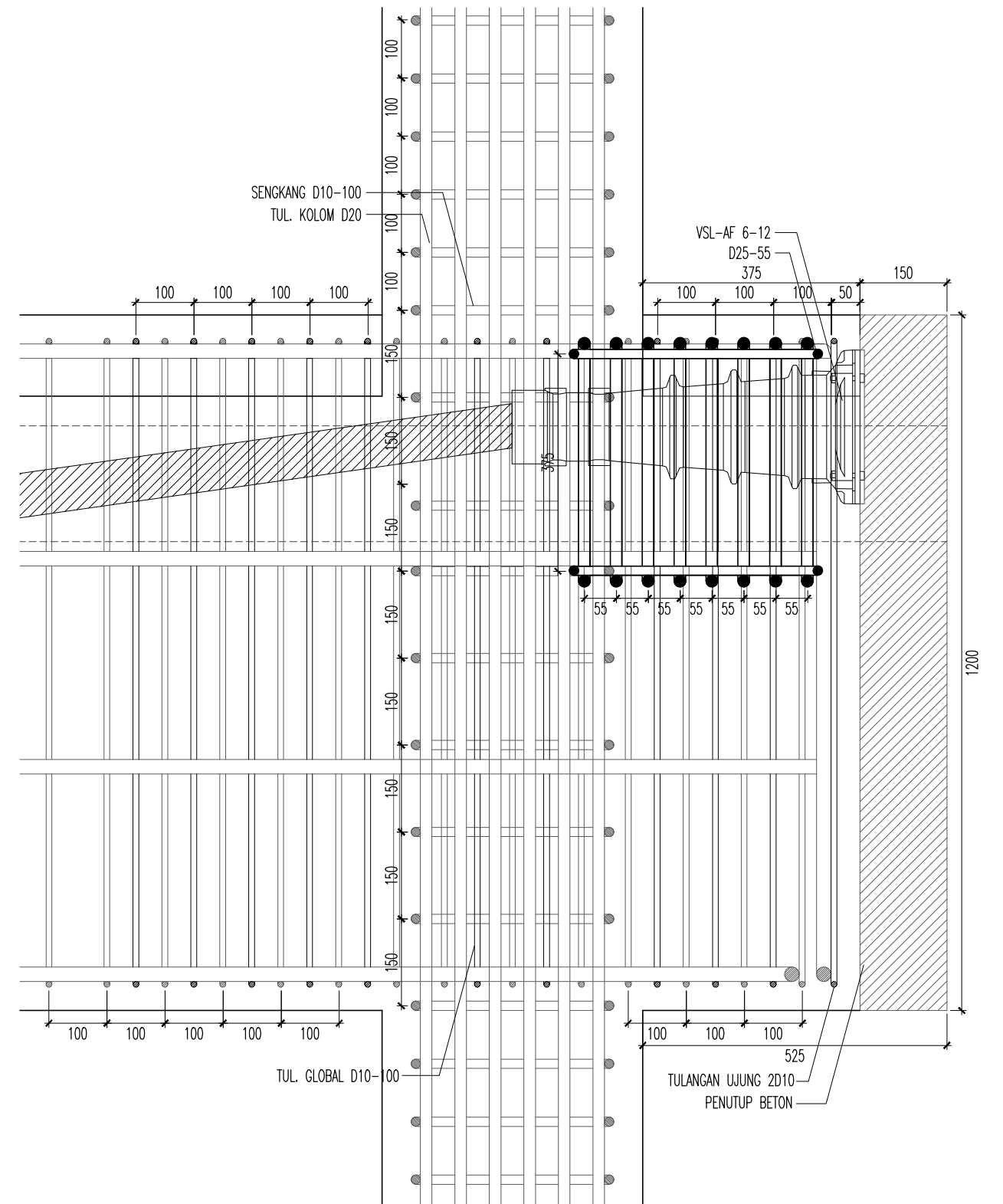
X(mm)	-600	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000	23000	24000	24600
Y1(mm)	3112	3112	2777	2442	2121	1799	1548	1298	1123	948	843	738	701	665	701	738	843	948	1123	1298	1548	1799	2121	2442	2777	3112	3112
Y2(mm)	-89	-89	-307	-525	-734	-943	-1105	-1268	-1381	-1495	-1563	-1631	-1655	-1679	-1655	-1631	-1563	-1495	-1381	-1268	-1105	-943	-734	-525	-307	-89	-89

CATATAN

GAYA PRATEGANG	JUMLAH STRAND	UKURAN STRAND	MUTU STRAND	MUTU GROUT
1180 kN	8	15.7 mm	Y1770S7	Fc' 85 MPa



DETAIL TULANGAN ANGKUR HIDUP
SKALA 1:10



DETAIL TULANGAN ANGKUR MATI
SKALA 1:10



INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN,
DAN KEBUMIHAN
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

JUDUL TUGAS AKHIR
STUDI KOMPARASI DESAIN BETON PRATEKAN
BERDASARKAN SNI 2847:2013 DAN EUROCODE
1992-1-1:2004 DENGAN TINJAUAN GEMPA

DOSEN PEMBIMBING
PROF. TAVIO, ST., MT., PHD
PROF. DR. IR. I GUSTI PUTU RAKA, DEA

NAMA MAHASISWA
CHRIST BILLY PRAKOSWA
NRP. 03111540000072

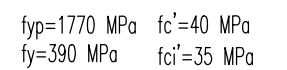
JUDUL GAMBAR
PRATEGANG SNI 2847:2013
KELAS T

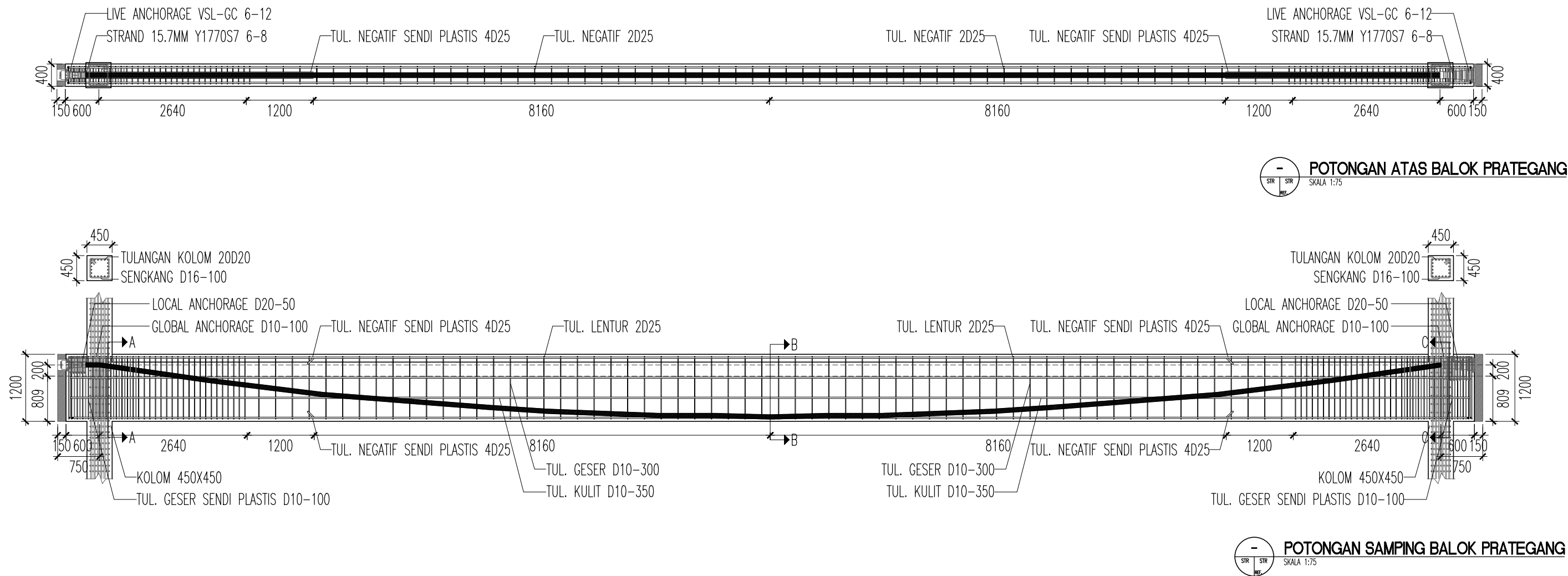
LEMBAR
7 14

CATATAN
 $f_{yp}=1770 \text{ MPa}$ $f_c'=40 \text{ MPa}$
 $f_y=390 \text{ MPa}$ $f_{ci}'=35 \text{ MPa}$



 **DETAIL PENAMPANG**
SKALA 1:20





COORDINAT TENDON

X(mm)	-600	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000	23000	24000	24600
Y(mm)	1009	1009	867	725	609	492	402	311	247	182	143	104	91	79	91	104	143	182	247	311	402	492	609	725	867	1009	1009
Z(mm)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200

DAERAH LIMIT KABEL

X(mm)	-600	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000	23000	24000	24600
Y1(mm)	3606	3606	3183	2760	2353	1946	1629	1313	1092	871	738	605	559	512	559	605	738	871	1092	1313	1629	1946	2353	2760	3183	3606	3606
Y2(mm)	-249	-249	-515	-781	-1036	-1291	-1489	-1687	-1825	-1964	-2047	-2131	-2159	-2188	-2159	-2131	-2047	-1964	-1825	-1687	-1489	-1291	-1036	-781	-515	-249	-249

CATATAN

GAYA PRATEGANG	JUMLAH STRAND	UKURAN STRAND	MUTU STRAND	MUTU GROUT
970 kN	8	15.7 mm	Y1770S7	Fc' 85 MPa



INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN,
DAN KEBUMIHAN
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

JUDUL TUGAS AKHIR

STUDI KOMPARASI DESAIN BETON PRATEKAN
BERDASARKAN SNI 2847:2013 DAN EUROCODE
1992-1-1:2004 DENGAN TINJAUAN GEMPA

DOSEN PEMBIMBING

PROF. TAVIO, ST., MT., PHD
PROF. DR. IR. I GUSTI PUTU RAKA, DEA

NAMA MAHASISWA

CHRIST BILLY PRAKOSWA
NRP. 03111540000072

JUDUL GAMBAR

PRATEGANG SNI 2847:2013
KELAS C

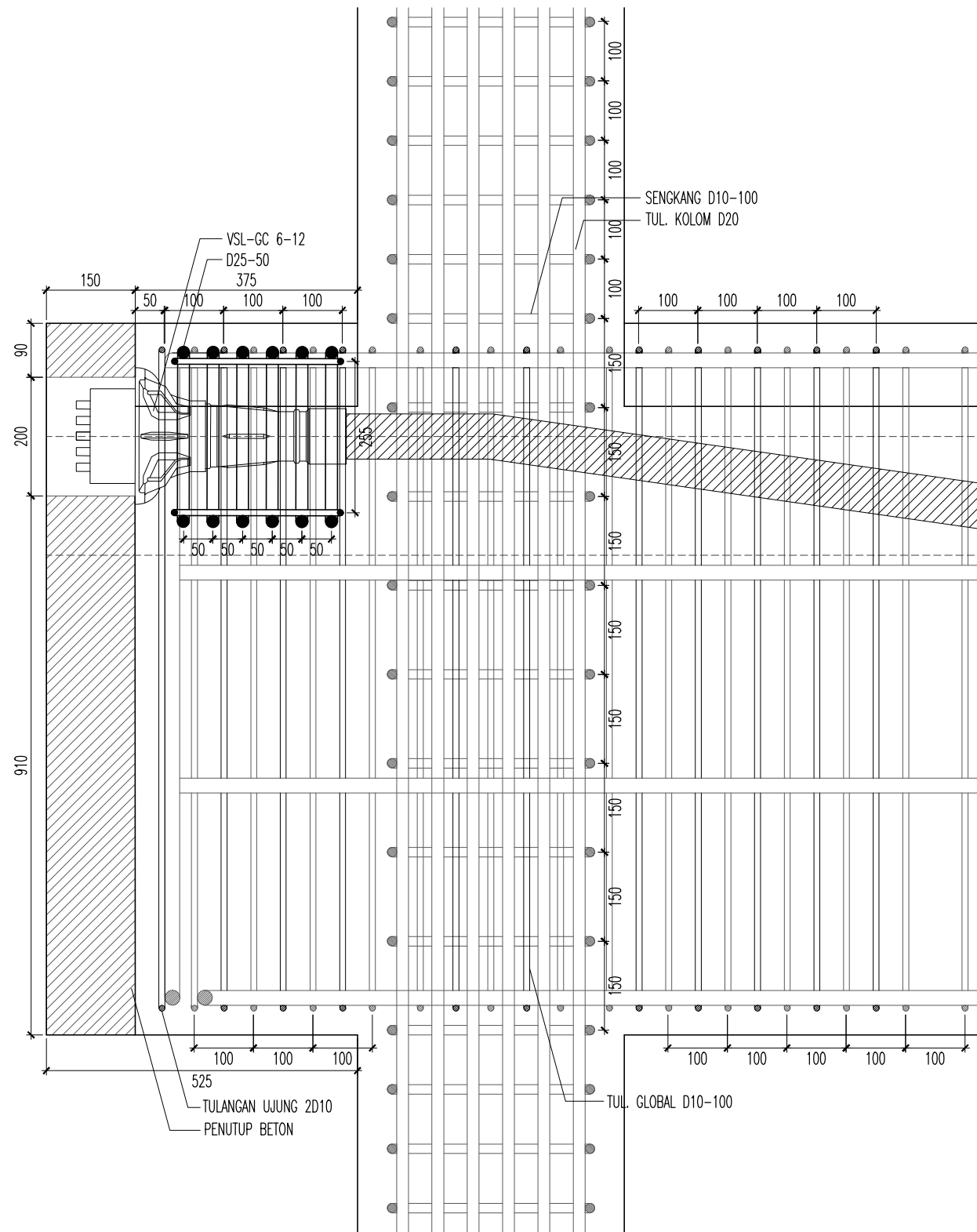
LEMBAR

9

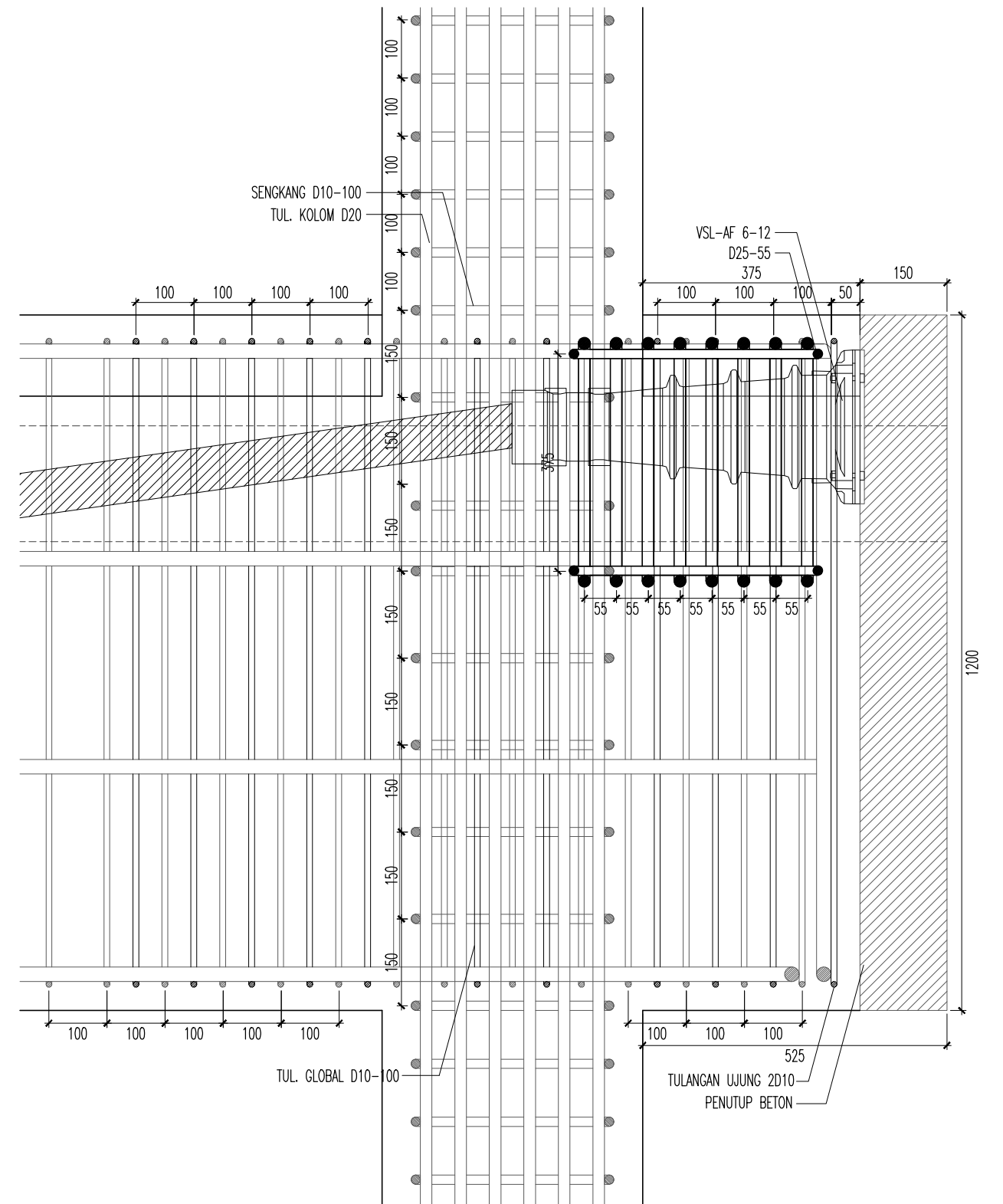
14

CATATAN

fyp=1770 MPa fc'=40 MPa
fy=390 MPa fci'=35 MPa



DETAIL TULANGAN ANGKUR HIDUP
SKALA 1:10



DETAIL TULANGAN ANGKUR MATI
SKALA 1:10



INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN,
DAN KEBUMIHAN
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

JUDUL TUGAS AKHIR
STUDI KOMPARASI DESAIN BETON PRATEKAN
BERDASARKAN SNI 2847:2013 DAN EUROCODE
1992-1-1:2004 DENGAN TINJAUAN GEMPA

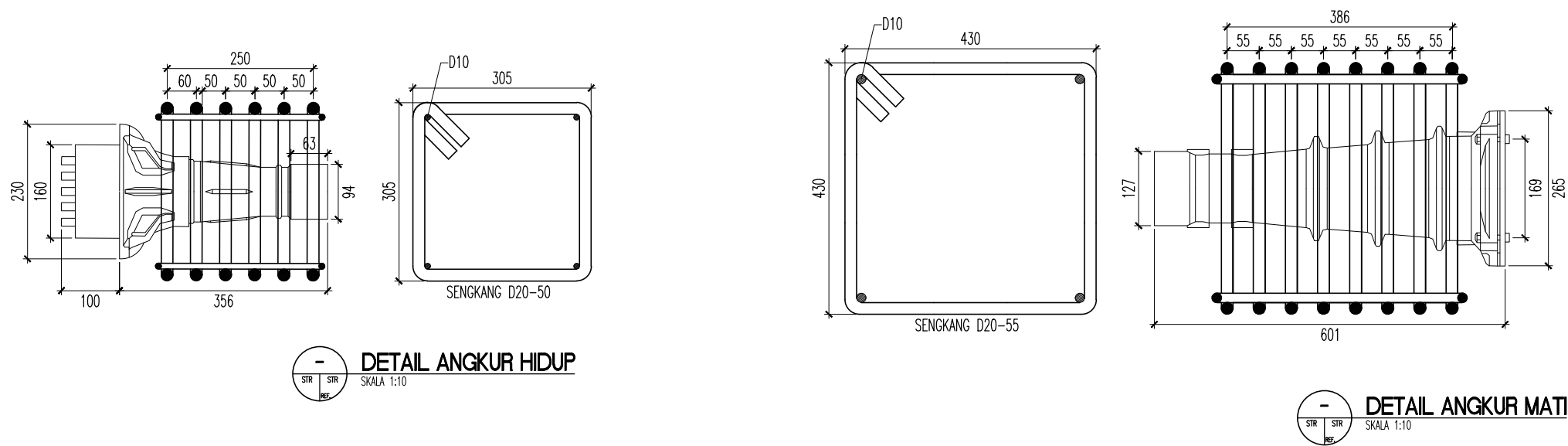
DOSEN PEMBIMBING
PROF. TAVIO, ST., MT., PHD
PROF. DR. IR. I GUSTI PUTU RAKA, DEA

NAMA MAHASISWA
CHRIST BILLY PRAKOSWA
NRP. 03111540000072

JUDUL GAMBAR
PRATEGANG SNI 2847:2013
KELAS C

LEMBAR
10 14

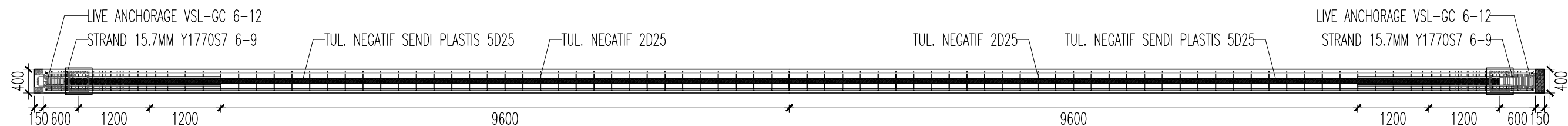
CATATAN
 $f_{yp}=1770 \text{ MPa}$ $f_c'=40 \text{ MPa}$
 $f_y=390 \text{ MPa}$ $f_{ci}'=35 \text{ MPa}$



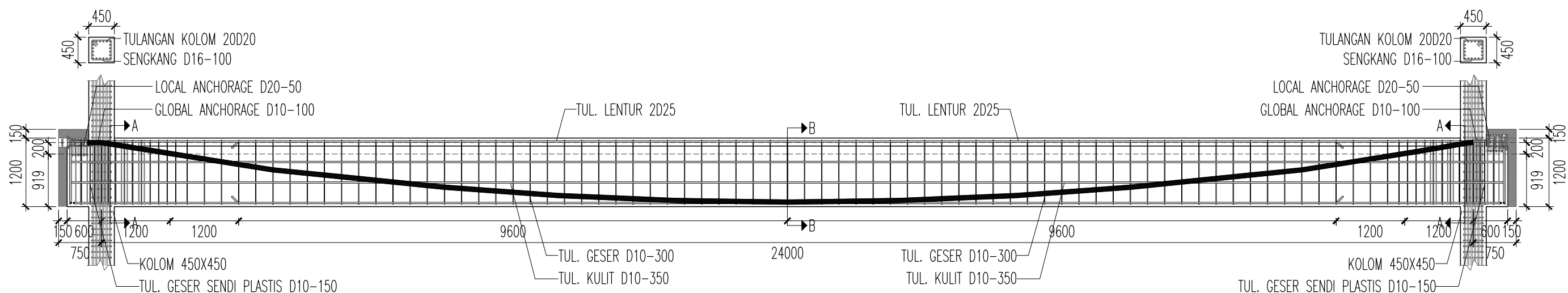
TIPE BALOK	PRATEKAN KELAS C			
LOKASI	TUMPUAN KIRI A-A	LAPANGAN B-B	TUMPUAN KANAN C-C	
PENAMPANG				
	ATAS	4D25	2D25	4D25
	BAWAH	4D25	2D25	4D25
	SENGKANG	D10-100	D10-300	D10-100
	TUL. ANGKUR	D10-100	-	D10-100

DETAIL PENAMPANG
SKALA 1:20





POTONGAN ATAS BALOK PRATEGANG
SKALA 1:75



POTONGAN SAMPING BALOK PRATEGANG
SKALA 1:75

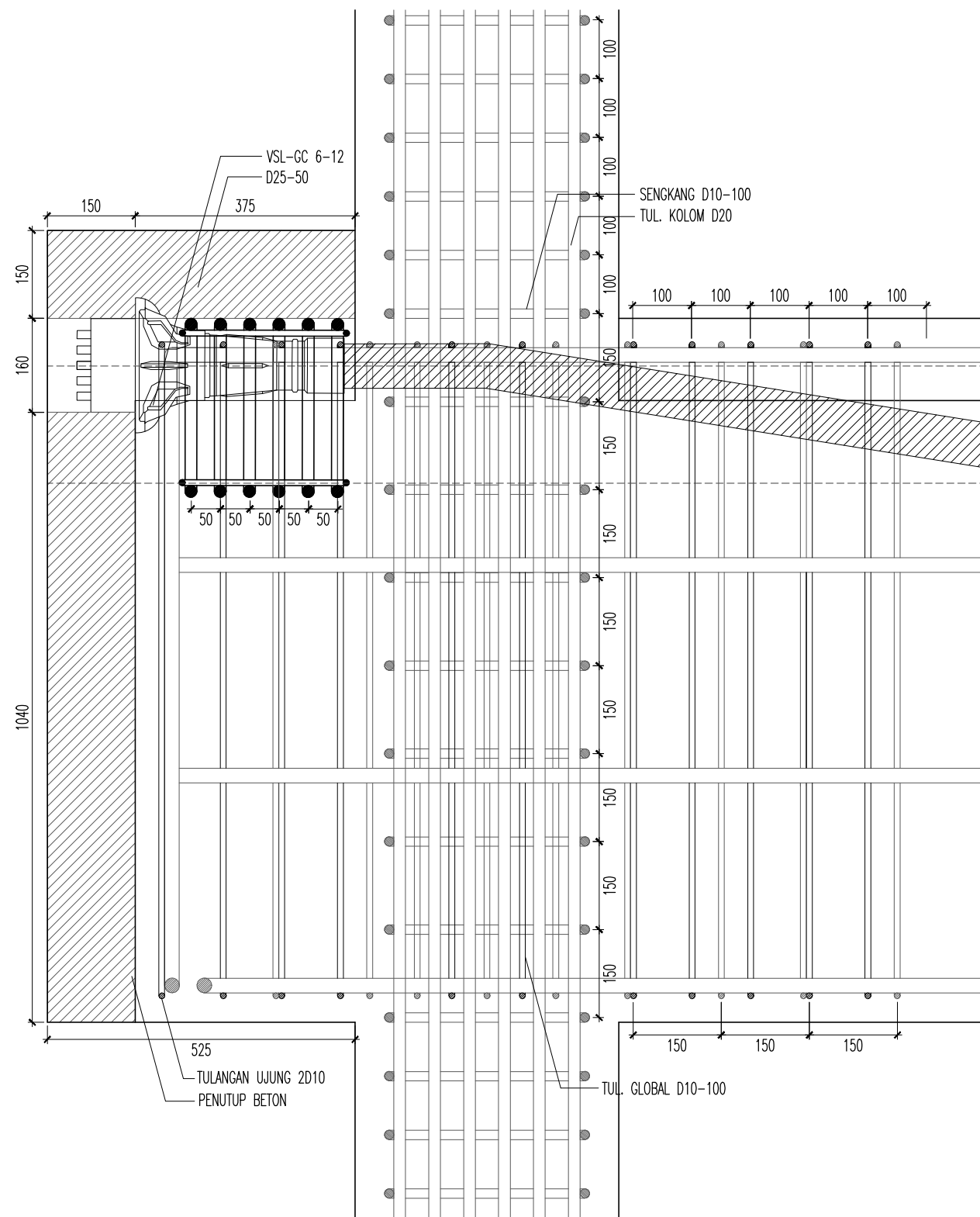
KOORDINAT TENDON

X(mm)	-600	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000	23000	24000	24600
Y(mm)	1119	1119	960	801	671	541	440	339	266	194	151	107	93	79	93	107	151	194	266	339	440	541	671	801	960	1119	1119
Z(mm)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200

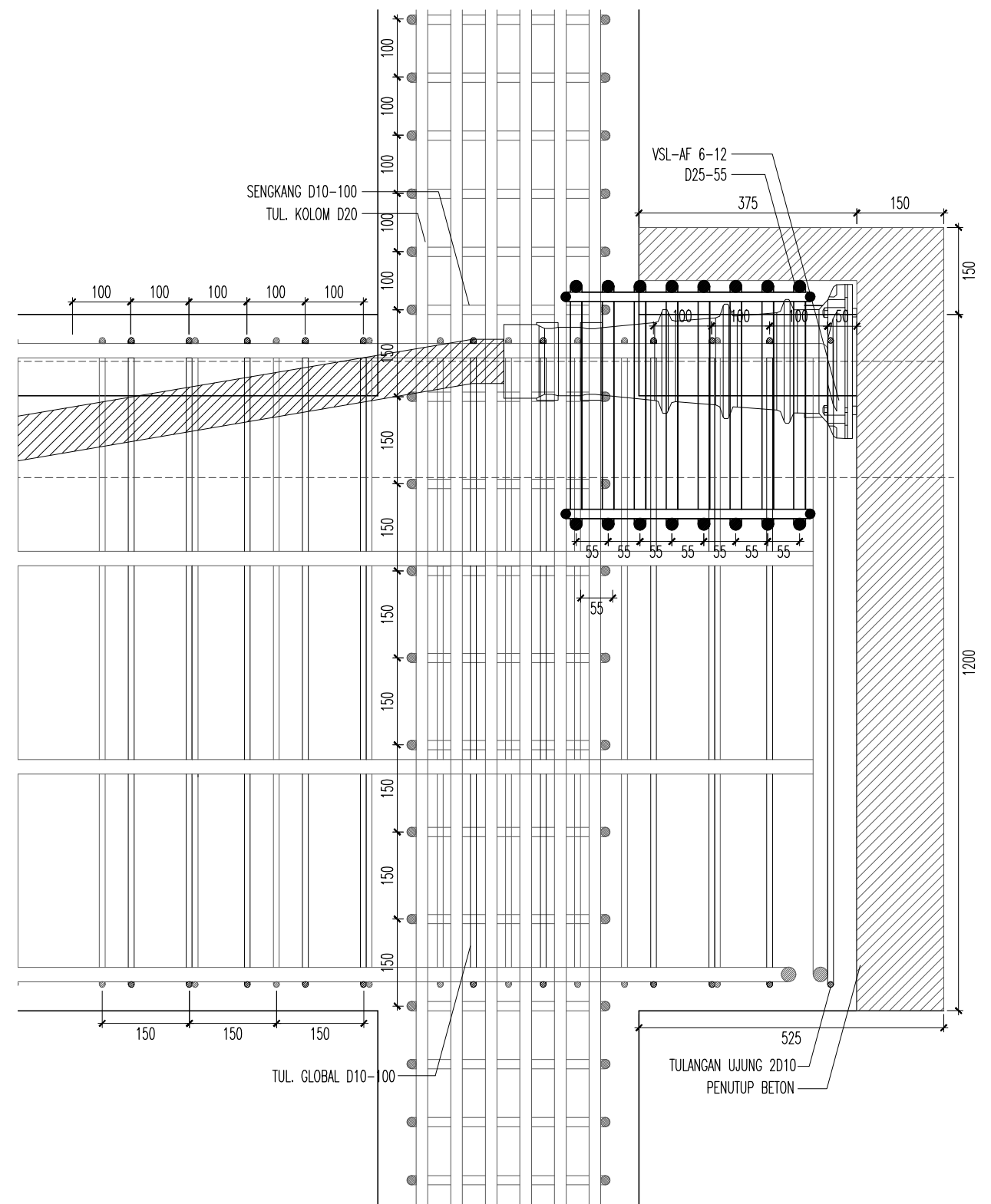
DAERAH LIMIT KABEL

X(mm)	-600	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000	23000	24000	24600
Y1(mm)	1936	1936	1683	1430	1187	944	754	565	433	301	221	141	114	86	114	141	221	301	433	565	754	944	1187	1430	1683	1936	1936
Y2(mm)	933	933	735	538	348	158	11	-136	-239	-342	-404	-466	-487	-509	-487	-466	-404	-342	-239	-136	11	158	348	538	735	933	933

GAYA PRATEGANG	JUMLAH STRAND	UKURAN STRAND	MUTU STRAND	MUTU GROUT
1454 kN	9	15.7 mm	Y1770S7	Fc' 85 MPa



DETAIL TULANGAN ANGKUR HIDUP
SKALA 1:10



DETAIL TULANGAN ANGKUR MATI
SKALA 1:10



INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN,
DAN KEBUMIHAN
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

JUDUL TUGAS AKHIR
STUDI KOMPARASI DESAIN BETON PRATEKAN
BERDASARKAN SNI 2847:2013 DAN EUROCODE
1992-1-1:2004 DENGAN TINJAUAN GEMPA

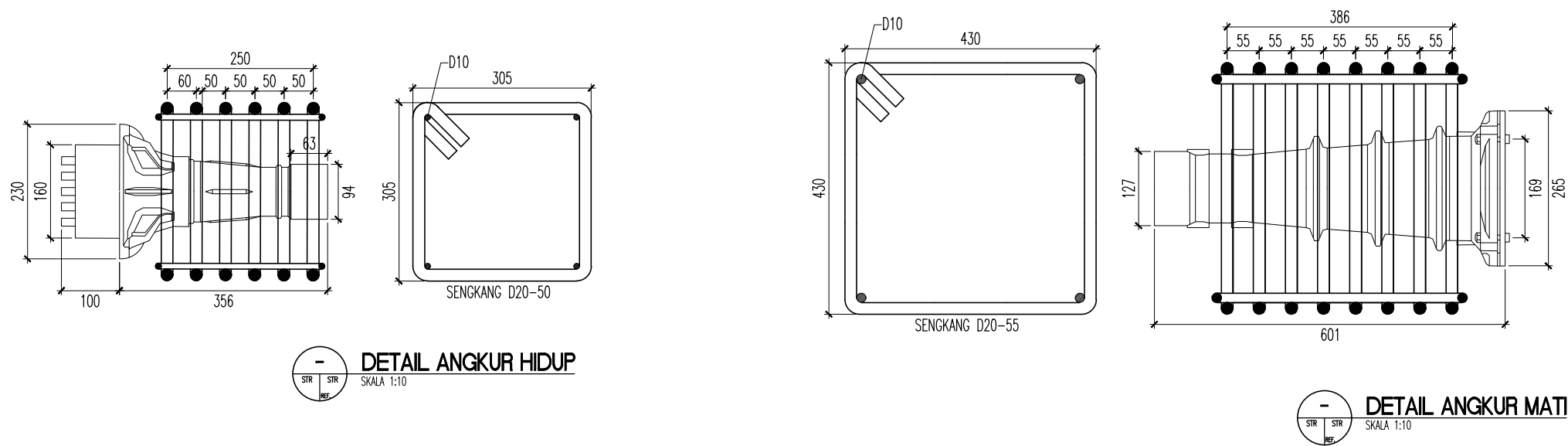
DOSEN PEMBIMBING
PROF. TAVIO, ST., MT., PHD
PROF. DR. IR. I GUSTI PUTU RAKA, DEA

NAMA MAHASISWA
CHRIST BILLY PRAKOSWA
NRP. 03111540000072

JUDUL GAMBAR
PRATEGANG EN1992-1-1:2004

LEMBAR
13 14

CATATAN
fyp=1770 MPa fc'=40 MPa
fy=390 MPa fci'=35 MPa



DETAIL ANGKUR HIDUP
SKALA 1:10

DETAIL ANGKUR MATI
SKALA 1:10

TIPE BALOK	PRATEKAN EUROCODE		
LOKASI	TUMPUAN KIRI A-A	LAPANGAN B-B	TUMPUAN KANAN C-C
PENAMPANG			
ATAS	5D25	2D25	5D25
BAWAH	5D25	2D25	5D25
SENGKANG	D10-150	D10-300	D10-150
TUL. ANGKUR	D10-100	-	D10-100

DETAIL PENAMPANG
SKALA 1:20





Form AK/TA-04
rev01

PROGRAM STUDI S-1 JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - ITS
LEMBAR KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR (WAJIB DIISI)

Jurusan Teknik Sipil It.2, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

Telp.031-5946094, Fax.031-5947284



NAMA PEMBIMBING	PROF. TAVIO, ST, MT, PhD.
NAMA MAHASISWA	CHRIST BILLY PRAKOSWA
NRP	05111590000672
JUDUL TUGAS AKHIR	STUDI KOMPARASI DESAIN BETON PRATEKAN BERDASARKAN SNI 2897:2013 DAN EN1992-1-1:2009 DENGAN TINJAUAN GEMPA.
TANGGAL PROPOSAL	29 AGUSTUS 2018
NO. SP-MMTA	06591/IT2.M.9.1/PP.W.02.00/2018

NO	TANGGAL	KEGIATAN		PARAF ASISTEN
		REALISASI	RENCANA MINGGU DEPAN	
1.	20/11	Modelling SNI 2897:2013.		
2.	23/11	Kontrol ETABS. Penentuan Tijin.		
3.	27/11	Perhitungan momen nominal		
4.	30/11	Gambar letak tendon Gempa Eurocode :		
5.	4/12	Spectrum EN1998-1-1:2004		
6.	7/12	Modelling EN1992-1-1:2009 Kehilangan F_o .		
7.	11/12	Kontrol momen nominal dan M _{cr}		
8.	10/12	Gambar penempatan tendon.		



Form AK/TA-04
rev01

PROGRAM STUDI S-1 JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - ITS
LEMBAR KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR (WAJIB DIISI)
Jurusan Teknik Sipil It.2, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp.031-5946094, Fax.031-5947284



NAMA PEMBIMBING I	: PROF. DR. IR. I. GWITI PUTU KAKA, DEA	17/3 - 14/3
NAMA MAHASISWA	: CHRIST BILLY PRAKOSWA	
NRP	: 03111590000072	
JUDUL TUGAS AKHIR	: STUDI KOMPARASI DESAIN BETON PRATEKAN BERDASARKAN SNI 2847:2013 DAN EUROCODE 1992-1-1:2004 DG. TINJAUAN GEMPA.	
TANGGAL PROPOSAL	: 29 AGUSTUS 2018	
NO. SP-MMTA	: 065951 / IT2.VI.9.1 / PP.05.02.00 / 2018	

NO	TANGGAL	KEGIATAN		PARAF ASISTEN
		REALISASI	RENCANA MINGGU DEPAN	
1.	3/12	- Modelling OK. (SNI 2847) - Ijin kelas U.T.C • PPR optimal 40-60%.	- Perhitungan pratekan SNI ok.	P ₁
2.	7/12	- perhitungan SNI selesai		P ₂
3.	14/12	- EN 1992-1-1:2004. Teg. ijin sesuai referensi		P ₃

BIODATA PENULIS

Penulis yang bernama lengkap Christ Billy Prakoswa ini dilahirkan di Surabaya pada tanggal 9 Febuari 1997. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Kr. Petra 7 Surabaya, SMP Kr. Petra 3 Surabaya, dan SMA Kr. Petra 2 Surabaya. Lulus dari SMA, penulis kemudian melanjutkan pendidikan program sarjana (S1) di Jurusan Teknik Sipil ITS pada tahun 2015 melalui jalur SNMPTN Undangan dan terdaftar dengan NRP 3115100072. Gelar Sarjana Teknik diperoleh penulis pada tahun 2019 dengan judul Tugas Akhir “*Studi Komparasi Desain Beton Pratekan Berdasarkan SNI 2847:2013 dan Eurocode EN 1992-1-1:2004 Dengan Tinjauan Gempa*”. Penulis berharap agar studi ini dapat bermanfaat bagi setiap pembacanya dan bagi perkembangan pembangunan di Indonesia.

