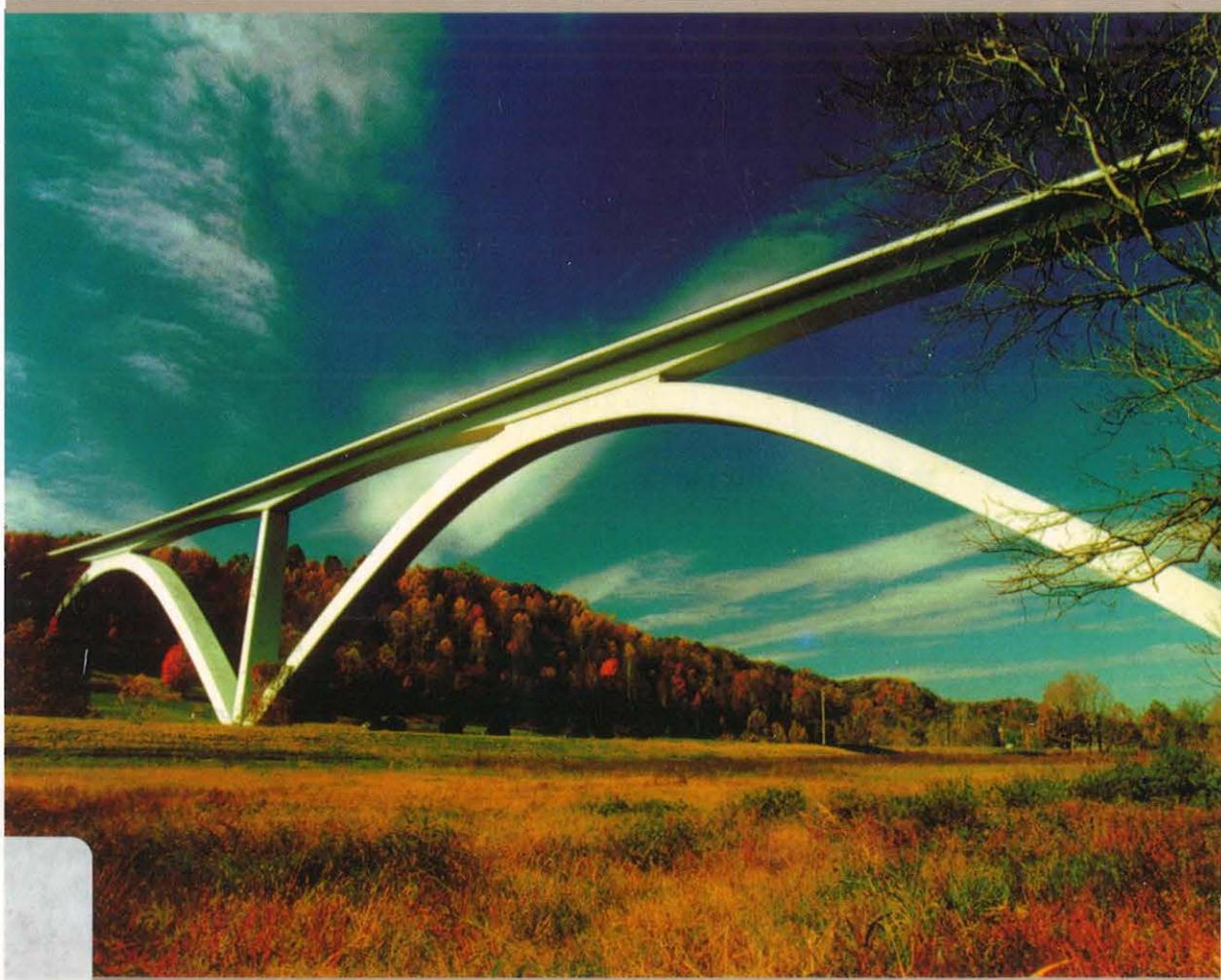


EDISI KETIGA  
JILID 1

# BETON PRATEGANG

SUATU PENDEKATAN MENDASAR



**EDWARD G. NAWY**

**BAMBANG SURYOATMONO**



No. Klass 624.183 412 NAW b  
No Induk 141439 Tgl 26.08.2016  
Hadiah/Beli  
Dari LPPM LINPAR

No. Klass 691.3 / Naw / LPPM / B  
No. 62 Tgl. 8 Maret '06  
Hadiah/Beli  
Dari Bambang Suryatmono

No. Klass 691.3  
No. 177 24/05/2002  
Hadiah/Beli  
Dari Bambang Suryatmono

$a$  = tinggi blok tegangan persegi panjang ekuivalen.  
 $A_{ep}$  = luas yang dicakup oleh keliling luar penampang beton.  
 $A_g$  = luas penampang bruto, in.<sup>2</sup>  
 $A_h$  = luas tulangan geser yang sejajar dengan tulangan tarik lentur, in.<sup>2</sup>  
 $A_j$  = luas penampang efektif dalam joint, in.<sup>2</sup>, dalam bidang yang sejajar dengan bidang tulangan yang memikul geser di joint. Tinggi joint harus sama dengan tinggi total kolom. Apabila suatu balok berhubungan dengan tumpuan yang mempunyai lebar lebih besar, maka lebar efektif joint tidak dapat melebihi yang terkecil di antara  
 (a) lebar balok ditambah tinggi joint  
 (b) dua kali jarak tegak lurus terkecil dari sumbu longitudinal balok ke sisi kolom.  
 $A_l$  = luas total tulangan longitudinal yang menahan torsi, in.<sup>2</sup>  
 $A_n$  = luas tulangan di breket atau korbel yang menahan gaya tarik  $N_{uc}$ , in.<sup>2</sup>  
 $A_o$  = luas penampang yang dicakup oleh alur gaya geser, in.<sup>2</sup>  
 $A_{oh}$  = luas bruto yang dicakup oleh garis tengah tulangan torsional transversal tertutup terluar, in.<sup>2</sup>  
 $A_{ps}$  = luas tulangan prategang di daerah tarik, in.<sup>2</sup>  
 $A_s$  = luas tulangan tarik nonprategang, in.<sup>2</sup>  
 $A'_s$  = luas tulangan tekan, in.<sup>2</sup>  
 $A_{sh}$  = luas penampang total tulangan transversal (termasuk tarik-silang) dalam jarak  $s$  dan tegak lurus dimensi  $h_o$ .  
 $A_t$  = luas satu kaki sengkang tertutup yang menahan torsi dalam jarak  $s$ , in.<sup>2</sup>  
 $A_{tr}$  = luas penampang total tulangan transversal dalam jarak  $s$  dan tegak lurus bidang tulangan yang disambung atau dikembangkan, in.<sup>2</sup>  
 $A_v$  = luas tulangan geser dalam jarak  $s$ , atau luas tulangan geser yang tegak lurus tulangan tarik lentur dalam jarak  $s$  untuk komponen struktur lentur tinggi, in.<sup>2</sup>  
 $A_{vf}$  = luas tulangan friksi-geser, in.<sup>2</sup>  
 $A_{vh}$  = luas tulangan geser yang sejajar tulangan tarik lentur dalam jarak  $s_2$ , in.<sup>2</sup>  
 $b$  = lebar muka tekan suatu komponen struktur, in.  
 $b_o$  = keliling penampang kritis untuk slab dan pondasi telapak, in.

$b_l$  = lebar bagian penampang yang mengandung sengkang tertutup yang menahan torsi.  
 $b_v$  = lebar penampang pada permukaan kontak yang sedang ditinjau untuk geser horizontal.  
 $b_w$  = lebar badan atau diameter penampang lingkaran, in.  
 $c$  = jarak dari serat tekan terluar ke sumbu netral, in.  
 $c_1$  = ukuran kolom, kepala kolom, atau breket persegi panjang atau persegi panjang ekuivalen yang diukur dalam arah bentang untuk mana momen ditentukan, in.  
 $c_2$  = ukuran kolom, kepala kolom, atau breket persegi panjang atau persegi panjang ekuivalen yang diukur transversal terhadap arah bentang untuk mana momen ditentukan, in.  
 $d$  = jarak dari serat tekan terluar ke pusat berat tulangan tarik, in.  
 $d'$  = jarak dari serat tekan terluar ke pusat berat tulangan tekan, in.  
 $d_b$  = diameter nominal batang, kawat, atau kabel prategang, in.  
 $d_c$  = tebal selimut beton yang diukur dari serat tarik terluar ke pusat tulangan atau kawat yang terdekat dengannya, in.  
 $d_p$  = jarak dari serat tekan terluar ke pusat berat tulangan prategang.  
 $e$  = eksentrisitas beban sejajar dengan sumbu komponen struktur yang diukur dari pusat berat penampang.  
 $E_c$  = modulus elastisitas beton, psi.  
 $E_s$  = modulus elastisitas batang tulangan, psi.  
 $E_{ps}$  = modulus elastisitas batang prategang.  
 $f'_c$  = kuat tekan beton yang ditetapkan, psi.  
 $f_{cr}$  = kuat tekan beton rata-rata yang akan digunakan sebagai dasar untuk penentuan proporsi beton, psi.  
 $f'_{cr}$  = kuat tekan beton rata-rata yang diperlukan sebagai dasar untuk penentuan proporsi beton, psi.  
 $f_c$  = akar dari kuat tekan beton yang ditetapkan, psi.  
 $f'_{ci}$  = kuat tekan beton pada saat prategang awal, psi.  
 $\sqrt{f'_{ci}}$  = akar dari kuat tekan beton pada saat prategang awal, psi.  
 $f_{ci}$  = kuat tarik belah rata-rata beton beragregat

- ringan, psi.
- $f_d$  = tegangan akibat beban mati tak terfaktor, pada serat terluar di mana tegangan tarik disebabkan oleh beban luar yang bekerja, psi.
- $f_{pc}$  = tegangan tekan beton akibat gaya prategang efektif saja (sesudah terjadinya semua kehilangan tegangan) di serat terluar penampang di mana terjadi tegangan tarik akibat beban luar yang bekerja, psi.
- $f_{ps}$  = tegangan di batang prategang pada kondisi kuat nominal.
- $f_{pu}$  = kuat tarik tendon prategang yang ditetapkan, psi.
- $f_{py}$  = kuat leleh tendon prategang yang ditetapkan, psi.
- $f_r$  = modulus raptur beton, psi.
- $f'_t$  = kuat tarik beton, psi.
- $f_y$  = kuat leleh tulangan nonprategang yang ditetapkan, psi.
- $f_{yh}$  = kuat leleh tulangan transversal yang ditetapkan, psi.
- $h$  = tebal total komponen struktur, in.
- $I$  = momen inersia penampang yang menahan beban luar terfaktor, in.<sup>4</sup>
- $J_b$  = momen inersia penampang bruto balok terhadap sumbu berat, in.<sup>4</sup>
- $I_{cr}$  = momen inersia penampang retak terttransformasi ke beton, in.<sup>4</sup>
- $I_e$  = momen inersia efektif untuk perhitungan defleksi, in.<sup>4</sup>
- $J_g$  = momen inersia penampang bruto terhadap sumbu berat, dengan mengabaikan tulangan, in.<sup>4</sup>
- $k$  = faktor panjang efektif untuk komponen struktur tekan
- $K_b$  = kekakuan lentur balok; momen per rotasi satuan.
- $K_c$  = kekakuan lentur kolom; momen per rotasi satuan.
- $K_{ec}$  = kekakuan lentur kolom ekuivalen; momen per rotasi satuan.
- $K_s$  = kekakuan lentur slab; momen per rotasi satuan.
- $K_t$  = kekakuan torsional komponen struktur torsional; momen per rotasi satuan.
- $l_{db}$  = panjang penyaluran dasar, in.
- $l_{dh}$  = panjang penyaluran kait standar dalam kondisi tarik, diukur dari penampang kritis ke ujung luar kait (panjang penanaman lurus di antara penampang kritis dan awal kait [titik singgung] ditambah radius bengkokan dan satu diameter batang), in.  
 $= l_{db} \times$  faktor-faktor modifikasi yang berlaku.
- $M_u$  = momen maksimum di komponen struktur pada saat defleksi dihitung.
- $M_c$  = momen terfaktor yang digunakan untuk desain komponen struktur tekan.
- $M_d$  = momen akibat beban mati.
- $M_{cr}$  = momen retak.
- $M_n$  = kuat momen nominal.
- $M_{m-}$  = momen terfaktor maksimum di penampang akibat beban luar yang bekerja.
- $M_u$  = momen terfaktor di penampang.
- $n$  = rasio modulus elastisitas =  $E_s/E_c$  atau  $E_{ps}/E_c$ .
- $N_u$  = beban aksial terfaktor yang tegak lurus penampang yang terjadi secara simultan dengan  $V_u$ ; diambil positif untuk tekan, negatif untuk tarik, dan meliputi efek tarik akibat rangkai dan susut.
- $N_{uw}$  = gaya tarik terfaktor yang bekerja di bagian atas breket atau konsol yang bekerja secara simultan dengan  $V_u$ , diambil positif untuk tarik.
- $P_b$  = kuat beban aksial nominal pada kondisi regangan seimbang.
- $P_c$  = beban tekuk kritis.
- $P_n$  = kuat beban aksial nominal pada eksentrisitas yang diketahui.
- $p_{cp}$  = keliling luar penampang beton  $A_{cp}$ , in.
- $p_h$  = keliling garis pusat tulangan torsional transversal tertutup yang terluar, in.
- $r$  = radius girasi penampang komponen struktur tekan.
- $s$  = jarak tulangan geser atau torsi yang diukur dalam arah sejajar tulangan longitudinal.
- $t$  = tebal dinding penampang berlubang, in.
- $T_u$  = momen torsional terfaktor di penampang.
- $V_c$  = kuat geser nominal yang diberikan oleh beton.
- $V_{ci}$  = kuat geser nominal yang diberikan oleh beton apabila retak diagonal ditimbulkan oleh gabungan geser dan momen.
- $V_{cw}$  = kuat geser nominal yang diberikan oleh beton apabila retak diagonal ditimbulkan oleh tegangan tarik berlebihan di badan.
- $V_d$  = gaya geser di penampang akibat beban mati terfaktor.
- $V_p$  = komponen vertikal gaya prategang efektif di penampang.
- $V_s$  = kuat geser nominal yang diberikan oleh tulangan geser.
- $V_u$  = gaya geser terfaktor di penampang.

*EDISI KETIGA*

**BETON PRATEGANG**  
**Suatu Pendekatan Mendasar**

JILID I

EDISI KETIGA

# BETON PRATEGANG

## Suatu Pendekatan Mendasar

RACHEL E. NAWY

JILID I

**Dr. Edward G. Nawy, P.E.**

*Distinguished Professor*

*Teknik Sipil dan Lingkungan*

*Rutgers University, The State University of New Jersey*



**PENERBIT ERLANGGA**

Jl. H. Baping Raya No. 100

Ciracas, Jakarta 13740

e-mail: mahameru@rad.net.id

(Anggota IKAPI)

**Nawy, Edward G.**

Beton Prategang: Suatu Pendekatan Mendasar/  
Edward G. Nawy; alih bahasa, Bambang Suryoatmono;  
editor, H. Wibi Hardani, --  
Ed. 3. -- Jakarta: Erlangga, 2001.  
.2 jil.; 17,5 x 25 cm.

Judul asli : Prestressed Concrete  
Termasuk bibliografi.

ISBN 979-688-274-4 (no. jil. lengkap)

ISBN 979-688-275-2 (jil. 1)

ISBN 979-688-276-0 (jil. 2)

1. Beton Prategang. I. Judul  
II. Suryoatmono, Bambang. III. Hardani, H. Wibi.

691.3

Buku ini diterbitkan atas kerja sama Penerbit Erlangga dan Pusat Perbukuan Depdiknas

**BETON PRATEGANG, Edisi Ketiga**  
**Edward G. Nawy**

Judul Asli:

**PRESTRESSED CONCRETE, Third Edition**  
**Edward G. Nawy**

*Foto sampul depan:*

*Busur Natchez Parkway, Nashville Tennessee, jembatan busur yang pertama dibangun di Amerika Serikat.  
(Seizin Figg Engineering Group, Tallahassee, Florida)*

Copyright © 2000 by Prentice-Hall, Inc. Translation Copyright © 2001 by **Penerbit Erlangga**.  
Hak cipta dalam Bahasa Inggris © 2000 pada Prentice-Hall, Inc. Hak terjemahan dalam  
Bahasa Indonesia pada **Penerbit Erlangga**, berdasarkan perjanjian pada 23 Oktober 2001.

Alih Bahasa : **Ir. Bambang Suryoatmono, Ph.D.**  
*(Teknik Sipil, Universitas Parahyangan, Bandung)*

Editor : **H. Wibi Hardani, S.T.**

Buku ini diset dan dilayout oleh Bagian Produksi **Penerbit Erlangga** dengan Power Macintosh  
G4 (Times 10 pt)

■ Dicitak oleh : **PT Gelora Aksara Pratama**

07 06 05 04 03 02 7 6 5 4 3 2 1

*ALL RIGHTS RESERVED. No part of this book may be reproduced, stored in retrieval  
system, or transmitted, in any form or by any means—electronic or mechanical, photocopy-  
ing, recording, or otherwise—without prior written permission from the publisher.*

*Dilarang keras mengutip, menjiplak, memperbanyak, memfotokopi, baik sebagian maupun  
keseluruhan isi buku ini serta memperjualbelikannya tanpa izin tertulis dari **Penerbit Erlangga**.*

© **HAK CIPTA DILINDUNGI OLEH UNDANG-UNDANG**

Teruntuk  
RACHEL E. NAWY

untuk kesabarannya  
yang seolah tiada batas  
yang memungkinkan tersusunnya  
edisi demi edisi buku ini

# DAFTAR ISI

## PRAKATA

## UCAPAN TERIMA KASIH DAN PENGHARGAAN

## 1

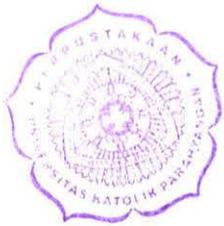
### KONSEP-KONSEP DASAR I

- 1.1 Pendahuluan 1**
  - 1.1.1 Perbandingan dengan Beton Bertulang 2
  - 1.1.2 Keuntungan Beton Prategang 4
- 1.2 Riwayat Perkembangan Pemberian Prategang 5**
- 1.3 Konsep-Konsep Dasar Pemberian Prategang 7**
  - 1.3.1 Pendahuluan 7
  - 1.3.2 Metode Konsep Dasar 10
  - 1.3.3 Metode Garis C 13
  - 1.3.4 Metode Penyeimbangan Beban 15
- 1.4 Perhitungan Tegangan Serat pada Balok Prategang 19**
- 1.5 Perhitungan Tegangan Serat dengan Metode Garis 21**
- 1.6 Perhitungan Tegangan Serat 22**
- 1.7 Konsep Tegangan Beban Kerja SI 24**
  - Referensi 27*
  - Soal-soal 27*

## 2

### MATERIAL DAN SISTEM UNTUK PEMBERIAN PRATEGANG 31

- 2.1 Beton 31**
  - 2.1.1 Pendahuluan 31
  - 2.1.2 Parameter-parameter yang Mempengaruhi Kualitas Beton 31
  - 2.1.3 Besaran-besaran Beton yang Telah Keras 32
- 2.2 Kurva Tegangan-Regangan Beton 36**
- 2.3 Modulus Elastisitas dan Perubahan Kekuatan Tekan terhadap Waktu 36**
  - 2.3.1 Beton Mutu Tinggi 38
  - 2.3.2 Modulus dan Kekuatan Tekan Awal 39
- 2.4 Rangkak 43**
  - 2.4.1 Efek Rangkak 45
  - 2.4.2 Model Rheologi 45
- 2.5 Susut 48**
- 2.6 Penulangan Nonprategang 50**
- 2.7 Baja Prategang 53**
  - 2.7.1 Jenis-jenis Baja Prategang 53
  - 2.7.2 Strands dan Kawat-kawat Berelaksasi Rendah 54
  - 2.7.3 Baja Prategang Berkekuatan Tarik Tinggi 55
  - 2.7.4 Relaksasi Baja 56
  - 2.7.5 Korosi dan Memburuknya Strands 58
- 2.8 Tegangan-Tegangan Izin Maksimum di Beton dan Tendon Menurut ACI 59**
  - 2.8.1 Tegangan Beton yang Mengalami Lentur 59
  - 2.8.2 Tegangan Baja Prategang 59
- 2.9 Tegangan Izin AASHTO di Beton dan Tendon 60**
  - 2.9.1 Tegangan Beton Sebelum Kehilangan Rangkak dan Susut 60
  - 2.9.2 Tegangan Beton pada Kondisi Beban Kerja Sesudah Terjadi Kehilangan 60
  - 2.9.3 Tegangan Baja Prategang 60
  - 2.9.4 Nilai-nilai Kelembaban Relatif 60



- 2.10 **Sistem Prategang dan Pengangkeran** 61
  - 2.10.1 Pemberian Pratarik 61
  - 2.10.2 Pemberian Pascatarik 62
  - 2.10.3 Sistem Pendongkrak 63
  - 2.10.4 Penyuntikan Tendon Pascatarik 64
- 2.11 **Pemberian Prategang Melingkar** 70
- 2.12 **Sepuluh Prinsip** 70
  - Referensi* 71

### 3

## KEHILANGAN SEBAGIAN PRATEGANG 73

- 3.1 **Pendahuluan** 73
- 3.2 **Perpendekan Elastis Beton (ES)** 75
  - 3.2.1 Elemen-elemen Pratarik 76
  - 3.2.2 Elemen-elemen Pascatarik 78
- 3.3 **Relaksasi Tegangan Baja (R)** 78
  - 3.3.1 Perhitungan Kehilangan yang Diakibatkan Relaksasi 80
- 3.4 **Kehilangan yang Diakibatkan oleh Rangkak (CR)** 80
  - 3.4.1 Perhitungan Kehilangan yang Diakibatkan Rangkak 82
- 3.5 **Kehilangan yang Diakibatkan oleh Susut (SH)** 83
  - 3.5.1 Perhitungan Kehilangan Karena Susut 84
- 3.6 **Kehilangan yang Diakibatkan Friksi (F)** 85
  - 3.6.1 Efek Kelengkungan 85
  - 3.6.2 Efek Wobble 86
  - 3.6.3 Perhitungan Kehilangan karena Gesekan 87
- 3.7 **Kehilangan Karena Dudukan Angker (A)** 88
  - 3.7.1 Perhitungan Kehilangan yang Diakibatkan Dudukan Angker 89
- 3.8 **Perubahan Prategang Akibat Lentur pada Suatu Komponen Struktur** 90
- 3.9 **Perhitungan Langkah demi Langkah Semua Kehilangan yang Bergantung pada Waktu pada Balok Pratarik** 90
- 3.10 **Perhitungan Langkah demi Langkah Semua Kehilangan yang Bergantung pada Waktu pada Balok Pascatarik** 96
- 3.11 **Perhitungan Kehilangan Prategang yang Bergantung pada Waktu dengan Cara LUMP-SUM** 99
- 3.12 **Rumus-rumus Kehilangan Prategang SI** 100
  - Referensi* 104
  - Soal-soal* 104

### 4

## DESAIN LENTUR PADA ELEMEN BETON PRATEGANG 106

- 4.1 **Pendahuluan** 106
- 4.2 **Penentuan Besaran Geometris Komponen Penampang** 108
  - 4.2.1 Petunjuk umum 108
  - 4.2.2 Modulus Penampang Minimum 108
- 4.3 **Contoh-contoh Desain Beban Kerja** 115
  - 4.3.1 Eksentrisitas Tendon Variabel 115
  - 4.3.2 Eksentrisitas Tendon yang Bervariasi tanpa Adanya Pembatasan Tinggi 122
  - 4.3.3 Eksentrisitas Tendon Konstan 126
- 4.4 **Pemilihan Penampang dan Besarannya yang Layak untuk Balok** 128
  - 4.4.1 Petunjuk Umum 128
  - 4.4.2 Luas Bruto, Penampang Tertransformasi, dan Adanya Saluran 130
  - 4.4.3 Selubung untuk Meletakkan Tendon 130
  - 4.4.4 Keuntungan Penggunaan Tendon Berbentuk *Draped* dan *Harped* 131
  - 4.4.5 Selubung Eksentrisitas yang Membatasi 132
  - 4.4.6 Selubung Tendon Prategang 136
  - 4.4.7 Reduksi Gaya Prategang di Dekat Tumpuan 138
- 4.5 **Blok Ujung di Daerah Angker di Tumpuan** 139

- 4.5.1 Distribusi Tegangan 139
- 4.5.2 Panjang Transfer dan Penyaluran pada Komponen Struktur Pratarik dan Desain Penulangan Angkernya 141
- 4.5.3 Daerah Angker Pascatarik: Teori Tekan-dan-Tarik dan Teori Elastis Linier 144
- 4.5.4 Desain Penulangan Angker Ujung untuk Balok Pascatarik 153
- 4.6 Desain Lentur Balok Komposit 158**
  - 4.6.1 Kasus Slab yang Tak Ditumpu Sementara (Unshored) 158
  - 4.6.2 Kasus Slab yang Ditumpu Sementara Secara Penuh 160
  - 4.6.3 Lebar Sayap Efektif 161
- 4.7 Rangkuman Prosedur Coba-coba dan Penyesuaian 162**
- 4.8 Desain Penampang Prategang Pascatarik Komposit yang ditumpu Sederhana 165**
- 4.9 Desain Lentur dengan Kekuatan Ultimit 178**
  - 4.9.1 Momen Akibat Beban yang Meretakkan 178
  - 4.9.2 Pemberian Prategang Parsial 179
  - 4.9.3 Penentuan Momen Retak 180
- 4.10 Faktor Kekuatan dan Faktor Beban 181**
  - 4.10.1 Reliabilitas dan Keamanan Struktural pada Komponen Beton 181
  - 4.10.2 Faktor Beban ACI dan Batas Keamanan 185
  - 4.10.3 Kuat Desain Versus Kuat Nominal: Faktor Reduksi Kekuatan  $\phi$  186
  - 4.10.4 Faktor Reduksi Kekuatan AASHTO 187
  - 4.10.5 Faktor Reduksi Kekuatan dan Faktor Beban ANSI 187
- 4.11 Kondisi Batas Lentur pada Beban Ultimit pada Komponen Struktur Terlekat: Dekompresi pada Beban Ultimit 188**
  - 4.11.1 Pendahuluan 188
  - 4.11.2 Blok Persegi Panjang Ekuivalen dan Kekuatan Momen Nominal 189
- 4.12 Desain Beban Ultimit Prarencana 200**
- 4.13 Rangkuman Prosedur Langkah demi Langkah untuk Desain Kondisi-Batas-Gagal Komponen Struktur Prategang 201**
- 4.14 Desain Kuat Ultimit Balok yang Ditumpu dengan Cara Keserasian Regangan 207**
- 4.15 Desain Kekuatan Balok Prategang Terlekat dengan Menggunakan Prosedur Pendekatan 210**
- 4.16 Penggunaan Faktor Reduksi Kekuatan dan Faktor Beban ANSI dalam Contoh 4.10 214**
- 4.17 Rumus-rumus Desain Lentur dalam Satuan SI 214**
  - 4.17.1 Desain Lentur Balok Prategang dalam Satuan 216
  - Referensi 218*
  - Soal-soal 220*

## 5

### DESAIN KEKUATAN GESER DAN TORSIONAL 222

- 5.1 Pendahuluan 222**
- 5.2 Perilaku Balok Homogen yang Mengalami Geser 223**
- 5.3 Perilaku Balok Beton sebagai Penampang Nonhomogen 226**
- 5.4 Balok Beton Tanpa Penulangan Tarik Diagonal 227**
  - 5.4.1 Ragam Kegagalan Balok Tanpa Penulangan Tarik 228
  - 5.4.2 Kegagalan Lentur (Flexural Failure, F) 228
  - 5.4.3 Kegagalan Tarik Diagonal (Flexure Shear, FS) 228
  - 5.4.4 Kegagalan Tekan Geser (Web Shear, WS) 230
- 5.5 Tegangan Utama dan Tegangan Geser di Balok Prategang 231**
  - 5.5.1 Kekuatan Geser Lentur ( $V_{ci}$ ) 232
  - 5.5.2 Kuat Geser-Badan ( $V_{cw}$ ) 235
  - 5.5.3 Mengontrol Nilai  $V_{ci}$  dan  $V_{cw}$  untuk Menentukan Kuat Beton Badan  $V_c$  236
- 5.6 Penulangan Geser Badan 237**
  - 5.6.1 Analogi Rangka Batang Bidang untuk Baja Badan 237
  - 5.6.2 Tahanan Tulangan Badan 237

5.6.3	Pembatasan Mengenai Ukuran dan Jarak Sengkang	240
5.7	<b>Kuat Geser Horizontal pada Konstruksi Komposit</b>	<b>241</b>
5.7.1	Taraf Beban Kerja	241
5.7.2	Taraf Beban Ultimit	242
5.7.3	Desain Penulangan Pasak untuk Aksi Komposit	244
5.8	<b>Prosedur Desain Penulangan Badan Terhadap Geser</b>	<b>245</b>
5.9	<b>Tegangan Tarik Utama di Penampang Bersayap dan Desain Tulangan Vertikal untuk Aksi Pasak pada Penampang Komposit</b>	<b>248</b>
5.10	<b>Desain Baja Pasak untuk Aksi Komposit</b>	<b>250</b>
5.11	<b>Desain Penulangan Pasak untuk Aksi Komposit</b>	<b>251</b>
5.12	<b>Kuat Geser dan Desain Baja Geser-Badan pada Balok Prategang</b>	<b>253</b>
5.13	<b>Desain Tulangan Geser-Badan dengan Prosedur Rinci</b>	<b>255</b>
5.14	<b>Desain Penulangan Badan untuk Balok T Ganda</b>	<b>258</b>
5.15	<b>Breket dan Korbel</b>	<b>263</b>
5.15.1	Hipotesis Gesek Geser untuk Transfer Geser	263
5.15.2	Efek Gaya Eksternal Horizontal	265
5.15.3	Urutan Langkah Desain Korbel	268
5.15.4	Desain Breket atau Korbel	269
5.15.5	Rumus-rumus SI untuk Geser pada Balok Beton	272
5.15.6	Desain Geser Balok Prategang dengan Satuan SI	273
5.16	<b>Kekuatan dan Perilaku Torsional</b>	<b>277</b>
5.16.1	Pendahuluan	277
5.16.2	Torsi Murni pada Elemen Beton Polos	278
5.17	<b>Torsi pada Elemen Beton Bertulang dan Beton Prategang</b>	<b>284</b>
5.17.1	Teori Lentur Miring	284
5.17.2	Teori Analogi Rangka Batang Ruang	286
5.17.3	Teori Medan Tekan	288
5.17.4	Teori Rangka Batang Keseimbangan Plastisitas	292
5.17.5	Desain Balok Beton Prategang yang Mengalami Gabungan Torsi, Geser, dan Lentur Menurut Standar ACI 318-99	297
5.17.6	Rumus-rumus Metrik SI untuk Persamaan Torsi	302
5.18	<b>Prosedur Desain untuk Gabungan Torsi dan Geser</b>	<b>303</b>
5.19	<b>Desain Tulangan Badan untuk Gabungan Torsi dan Geser pada Balok Prategang</b>	<b>307</b>
5.20	<b>Desain Gabungan Torsi dan Geser Balok Prategang dengan Satuan SI</b>	<b>316</b>
	<i>Referensi</i>	319
	<i>Soal-soal</i>	320

## 6

### STRUKTUR BETON PRATEGANG STATIS TAK TENTU 323

6.1	<b>Pendahuluan</b>	<b>323</b>
6.2	<b>Kerugian Kontinuitas pada Beton Prategang</b>	<b>324</b>
6.3	<b>Pola Tendon untuk Balok Menerus</b>	<b>324</b>
6.4	<b>Analisis Elastis untuk Kontinuitas Prategang</b>	<b>327</b>
6.4.1	Pendahuluan	327
6.4.2	Metode Peralihan Tumpuan	327
6.5	<b>Contoh Mengenai Kontinuitas</b>	<b>330</b>
6.5.1	Efek Kontinuitas Terhadap Transformasi Garis C untuk Tendon Berprofil <i>Draped</i>	330
6.5.2	Efek Kontinuitas Terhadap Transformasi Garis C untuk Tendon Berprofil <i>Harped</i>	335
6.6	<b>Transformasi Linier dan Keselarasan Tendon</b>	<b>337</b>
6.6.2	Hipotesis Keselarasan	341
6.7	<b>Kekuatan Ultimit dan Kondisi Batas Gagal pada Balok Menerus</b>	<b>341</b>
6.8	<b>Selubung Profil Tendon dan Modifikasinya</b>	<b>345</b>
6.9	<b>Lokasi Garis dan Tendon di Balok Menerus</b>	<b>346</b>
6.10	<b>Transformasi Tendon untuk Memanfaatkan Keuntungan Kontinuitas</b>	<b>356</b>

- 6.11 Desain untuk Kontinuitas dengan Menggunakan Baja Nonprategang di Tumpuan 361
- 6.12 Portal dan Rangka Statis Tak Tentu 362
  - 6.12.1 Sifat Umum 362
  - 6.12.2 Gaya-gaya dan Momen di Rangka 365
  - 6.12.3 Penerapan pada Rangka Beton Prategang 369
  - 6.12.4 Desain Rangka Terlekat Beton Prategang 372
- 6.13 Desain (Analisis) Limit pada Rangka dan Balok Statis Tak Tentu 384
  - 6.13.1 Metode Penetapan Rotasi 385
  - 6.13.2 Penentuan Rotasi Sendi Plastis pada Balok Menerus 388
  - 6.13.3 Kapasitas Rotasi Sendi Plastis 391
  - 6.13.4 Perhitungan Kapasitas Rotasi yang Tersedia 394
  - 6.13.5 Pengecekan Daya Layan Rotasi Plastis 395
  - 6.13.6 Tulangan Pengekang Transversal untuk Desain Gempa 396
  - 6.13.7 Pemilihan Tulangan Pengekang 397
  - Referensi 399
  - Soal-soal 400

## LAMPIRAN

- Lampiran A Program Komputer Q-BASIC 401
- Lampiran B Konversi Satuan, Informasi Desain 415
- Lampiran C Standar Tipikal Pilihan 436

## INDEKS

# Daftar Isi Ringkas Jilid 2

- Bab 7** KONTROL RETAK, DEFLEKSI, DAN LAWAN LENDUT
- Bab 8** KOMPONEN STRUKTUR TARIK DAN TEKAN PRATEGANG
- Bab 9** SISTEM LANTAI BETON PRATEGANG DUA ARAH
- Bab 10** SAMBUNGAN UNTUK ELEMEN-ELEMEN BETON PRATEGANG
- Bab 11** ATAP KUBAH DAN TANGKI LINGKARAN BETON PRATEGANG
- Bab 12** DESAIN JEMBATAN MENURUT STANDAR AASHTO DAN LRFD
- Bab 13** DESAIN SEISMIK STRUKTUR BETON PRATEGANG

# PRAKATA

Beton prategang adalah material yang sangat banyak digunakan dalam konstruksi. Dengan demikian, lulusan dari setiap program teknik sipil harus mempunyai, sebagai persyaratan minimum, pemahaman mengenai dasar-dasar beton prategang melingkar dan linier. Kemajuan teknologi tinggi di dalam ilmu bahan telah memungkinkan pelaksanaan dan perakitan sistem dengan bentang besar seperti jembatan *cable-stayed*, jembatan segmental, cerobong reaktor nuklir dan anjungan pengeboran minyak lepas pantai—yang sebelumnya tidak mungkin dilaksanakan.

Kuat tarik beton bertulang terbatas, sedangkan kuat tekannya sangat tinggi. Dengan demikian, pemberian prategang menjadi penting di dalam banyak penerapan agar dapat secara penuh memanfaatkan kuat tekan dan, melalui desain yang benar, dapat menghilangkan atau mengontrol retak dan defleksi. Selain itu, desain komponen dari suatu struktur total dapat dicapai dengan baik hanya dengan coba-coba dan penyesuaian: mengasumsikan suatu penampang untuk kemudian menganalisisnya. Dengan demikian, desain dan analisis digabungkan di dalam buku ini untuk memudahkan mahasiswa mengenal pokok bahasan mengenai desain beton prategang.

Edisi ketiga buku ini secara mendalam merevisi edisi sebelumnya agar sesuai dengan *ACI 318-99* yang baru dan *International Building Code, IBC 2000*, untuk desain tahan gempa. Buku ini merupakan hasil dari catatan kuliah penulis yang dikembangkan di dalam pengajaran di Rutgers University selama 40 tahun terakhir dan pengalaman selama bertahun-tahun dalam pengajaran dan penelitian dalam bidang beton bertulang dan beton prategang, termasuk pada tingkat Ph.D. Bahan tersebut disajikan sedemikian hingga mahasiswa terbiasa mengenal besaran-besaran beton polos, baik yang berkekuatan normal atau tinggi, dan komponen-komponennya sebelum mulai mempelajari perilaku struktural. Buku ini berbeda dengan buku teks lain untuk mata kuliah beton prategang dalam topik-topik mengenai perilaku bahan, kehilangan prategang, lentur, geser dan torsi yang dibahas dengan lengkap dan dapat dipelajari dalam satu semester di tahun terakhir program sarjana dan pada tingkat pascasarjana. Pembahasan mendalam mengenai topik-topik tersebut memungkinkan mahasiswa program sarjana dan pascasarjana lanjut, selain juga perencana, untuk hanya dengan sedikit upaya dapat mengembangkan pemahaman dasar-dasar perilaku dan kinerja struktural beton prategang.

Pembahasan ringkas di Bab 1 sampai 3 mengenai prinsip-prinsip dasar, perkembangan riwayat beton prategang, besaran-besaran material pembentuknya, perilaku material jangka panjang dan evaluasi kehilangan prategang memberikan pengantar yang cukup memadai untuk beton prategang. Semua itu dibutuhkan dalam mengembangkan dasar-dasar pengetahuan mengenai keandalan kinerja struktur prategang, suatu konsep yang harus dimiliki oleh setiap mahasiswa teknik dewasa ini.

Bab 4 dan 5 mengenai lentur, geser dan torsi, dengan logika langkah demi langkah mengenai coba-coba dan penyesuaian selain juga bagan alir yang ditunjukkan, memberikan mahasiswa dan insinyur pengetahuan dasar mengenai beban kerja dan kondisi batas beban pada saat gagal, sehingga menghasilkan pemahaman mengenai kekuatan cadangan dan faktor-faktor keamanan yang terkandung di dalam desain. Bab 4 di dalam edisi ini mengandung prosedur desain mutakhir dengan contoh-contoh numerik untuk desain penjangkaran ujung komponen struktur pascatarik sebagaimana disyaratkan oleh *ACI* dan *AASHTO* yang terakhir, termasuk metode “tarik dan tekan” pada desain pengangkeran ujung. Semua contoh yang menggunakan

T tunggal diganti dengan T ganda karena T tunggal sudah tidak digunakan lagi. Bab 5 menyajikan, dengan contoh-contoh desain, ketentuan mengenai torsi yang dikombinasikan dengan geser dan lentur, yang meliputi pendekatan terpadu mengenai topik torsi pada komponen struktur beton bertulang dan beton prategang. Contoh-contoh dalam satuan SI terdapat pada buku di samping pencantuman konversi SI untuk langkah-langkah utama di dalam contoh-contoh. Selain itu, pembahasan teoretis secara rinci disajikan mengenai mekanisme geser dan torsi, berbagai pendekatan mengenai persoalan torsi dan konsep-konsep plastis pada teori dan interaksi keseimbangan geser dan keseimbangan torsi.

Lebih lanjut lagi, pada edisi ini terdapat contoh-contoh desain baru dalam satuan SI serta daftar persamaan yang relevan dalam format SI sehingga buku ini pun dapat digunakan untuk keperluan profesi yang lebih luas. Dengan demikian, mahasiswa dan insinyur dapat menggunakan sistem lb-in (PI) atau sistem internasional (SI).

Bab 6 yang membahas struktur beton prategang tak tentu meliputi secara rinci balok prategang menerus dan struktur rangka. Banyak contoh rinci disajikan untuk mengilustrasikan penggunaan metode konsep-konsep dasar, metode garis C dan metode penyeimbangan beban yang disajikan di dalam Bab 1. Bab 7 telah diperbarui dan semua contoh telah diubah dengan menggunakan T ganda untuk perhitungan defleksi untuk komponen struktur nonkomposit dan komposit. Bab ini membahas secara rinci desain lawan lendut, defleksi dan kontrol retak dengan meninjau efek jangka pendek dan panjang dengan menggunakan tiga pendekatan yang berbeda: metode pengali PCI, metode langkah waktu inkremental yang rinci dan metode langkah waktu pendekatan. Uraian terkini, yang didasarkan atas pengalaman penulis, mengenai evaluasi dan kontrol retak lentur pada balok prategang parsial juga disajikan. Beberapa contoh desain termasuk di dalam pembahasan. Bab 8 mencakup penentuan proporsi komponen struktur tarik dan tekan prategang, termasuk desain dan perilaku tekuk tiang dan kolom prategang dan efek  $P-\Delta$  di dalam desain kolom langsing. Satu subbab telah ditambahkan, yaitu mengenai metode timbal balik termodifikasi yang lebih mudah untuk desain lentur biaksial pada kolom.

Bab 9 membahas analisis menyeluruh pada perilaku beban kerja dan perilaku garis leleh plat dan slab prategang dua arah. Perilaku beban kerja menggunakan, dengan banyak contoh, metode portal ekuivalen untuk desain (analisis) lentur dan evaluasi defleksi. Uraian rinci diberikan mengenai transfer momen-geser dan mengenai plat dua arah dengan contoh-contoh perhitungan. Cakupan mendalam juga diberikan mengenai mekanisme kegagalan geser leleh pada semua kombinasi biasa pada beban di lantai dan kondisi tepinya, termasuk rumus-rumus desain untuk berbagai kondisi tersebut. Bab 10 tentang sambungan untuk elemen beton prategang mencakup desain sambungan untuk balok berujung *dapped*, balok *ledge* dan landasan, sebagai tambahan dari desain balok dan korbel yang disajikan di Bab 5 mengenai geser dan torsi.

Buku ini juga unik, dalam arti bahwa Bab 11 memberikan analisis dan desain tangki beton prategang dan atap kubahnya. Yang disajikan adalah dasar-dasar teori lentur dan membran cangkang silindris untuk digunakan dalam desain tangki prategang untuk berbagai kondisi tepi dinding jepit, semijepit, sendi, dan dasar dinding bergerak, selain juga pemberian prategang vertikal. Bab 11 juga membahas teori cangkang asimetris dan kubah yang digunakan dalam desain atap kubah untuk tangki lingkaran.

Bab 12 yang baru dan mendalam ditambahkan dengan menggunakan spesifikasi Standar AASHTO dan LRFD terakhir untuk desain balok jembatan prategang terhadap lentur, geser, torsi dan kemampuan layan, termasuk desain blok penjangkaran ujung. Beberapa contoh mendalam diberikan dengan menggunakan penampang T *bulb* dan boks girder. Bab ini juga mencakup persyaratan AASHTO untuk pembebanan lajur dan truk dan kombinasi pembebanan sebagaimana ditetapkan baik oleh LRFD maupun dalam Standar.

Bab 13 yang baru dan mendalam ditambahkan. Bab ini membahas desain struktur pracetak prategang tahan gempa di zona berisiko gempa tinggi berdasarkan ACI 318-99 terakhir dan *International Building Code*, IBC 2000, mengenai desain tahan gempa pada struktur beton bertulang dan beton prategang. Bab ini mengandung beberapa contoh desain dan pembahasan rinci mengenai sambungan penahan momen daktil pada gedung bertingkat tinggi dan gedung parkir di zona berisiko gempa tinggi dan pendekatan unik untuk desain sambungan daktil pada joint kolom-balok pracetak. Bab ini juga mengandung contoh-contoh desain sambungan hibrida dan dinding geser, semuanya didasarkan atas perkembangan mutakhir di bidang tersebut.

Perlu ditekankan bahwa di dalam bidang ini, penggunaan komputer adalah keharusan. Adanya akses ke komputer pribadi memungkinkan hampir setiap mahasiswa dan insinyur diperlengkapi dengan piranti tersebut. Lampiran A-1 menyajikan program komputer tipikal dalam bahasa Q-BASIC untuk komputer pribadi, untuk evaluasi kehilangan prategang yang bergantung pada waktu. Program-program lain yang disebutkan di dalam lampiran dapat dibeli dari N.C.SOFTWARE, Box 161, East Brunswick, New Jersey, 08816. Sejumlah bagan alir di dalam buku ini dan pembahasan mengenai logika yang terkandung di dalamnya memungkinkan pembaca mengembangkan atau menggunakan program seperti itu tanpa kesulitan.

Foto-foto yang meliputi berbagai bidang mengenai perilaku struktur elemen beton pada kondisi gagal terdapat di semua bab. Foto-foto tersebut diambil dari penelitian-penelitian yang dilakukan penulis dengan banyak mahasiswa MS dan Ph.D. di Rutgers University selama empat dekade yang lalu. Selain itu, foto-foto struktur "*landmark*" dari beton prategang juga disajikan dalam buku ini untuk mengilustrasikan luasnya desain beton prategang pratarik dan pascatarik. Lampiran-lampiran juga disajikan, dengan banyak nomogram dan tabel mengenai besaran-besaran standar, penampang balok dan bagan-bagan mengenai evaluasi lentur dan geser penampang, di samping tabel-tabel untuk pemilihan penampang seperti  $T$  ganda PCI,  $T$  bulb PCI/AASHTO, girder boks dan penampang standar AASHTO untuk dek jembatan. Konversi ke satuan metrik SI juga termasuk di dalam contoh-contoh di hampir semua bab dalam buku ini.

Topik-topik di dalam buku ini telah disajikan ringkas mungkin, tanpa menghilangkan detail instruksional. Sebagian besar dari buku ini dapat digunakan tanpa kesulitan di dalam kuliah tingkat terakhir dan pasca sarjana bagi setiap mahasiswa yang telah mengikuti kuliah mengenai beton bertulang. Isi buku ini juga berfungsi sebagai petunjuk yang berguna untuk praktisi yang harus terus mengikuti perkembangan beton prategang dan standar mutakhir *ACI 318-99 Building Code* dan *International Building Code (IBC 2000)*, selain juga perencana yang mempelajari dasar prategang melingkar dan linier.

## UCAPAN TERIMA KASIH DAN PENGHARGAAN

Penghargaan disampaikan pada American Concrete Institute, Prestressed Concrete, Institute, dan Post-Tensioning Institute untuk dukungan yang berharga dalam mengizinkan penggunaan kutipan-kutipan dari ACI 318 dan Standar serta Laporan lainnya, juga sejumlah ilustrasi dan tabel dari publikasi PCI dan PTI. Penulis memberikan penghargaan khusus bagi pembimbing awal, Professor A. L. L. Baker (almarhum) dari London University's Imperial College of Science, Technology, and Medicine, yang memberikan penulis inspirasi mengenai sistem beton bertulang dan beton prategang. Penulis juga menyampaikan penghargaan bagi mahasiswa-mahasiswa yang tak terhitung banyaknya, baik tingkat sarjana maupun pasca sarjana, yang telah memberikan banyak kontribusi dalam penulisan buku ini dan pada banyak pihak yang membantu penelitian-penelitian penulis selama empat puluh tahun yang lalu.

Penghargaan juga disampaikan kepada semua pihak yang telah menelaah draft edisi pertama termasuk Professor Carl E. Ekberg, Thomas T.C. Hsu, A. Fattah Shaikh, P.N. Balaguru, Daniel P. Jenny dari PCI, Clifford L. Freyrmuth dari PTI dan Ib Falk Jorgensen, Presiden, Jorgensen, Hendrikson dan Close, Denver. Ucapan terima kasih secara khusus disampaikan pada Professor Thomas Hsu yang menelaah kembali bagian revisi tentang teori torsi dan contoh-contoh di edisi kedua dan bagian geser LRFD untuk edisi sekarang. Terima kasih juga untuk Professor Alex Aswad dari Pennsylvania State University di Harrisburg atas masukan yang berharga tentang dinding geser pracetak pada daerah gempa, untuk George Nasser, Kepala Editor, dan Paul Johal, Direktur Penelitian, keduanya dari Precast/Prestressed Concrete Institute, dan untuk Dr. Basile Rabbat, Director of Codes and Standards, Portland Cement Association, atas saran dan dukungannya. Terima kasih juga disampaikan pada Mr. Khalid Shawwaf, Vice president-Engineering, Dywidag System International, atas saran dan kerja samanya. Terima kasih khusus disampaikan pada Dr. Robert E. Englekirk, President, Englekirk Consulting Engineers, dan Visiting Professor di University of California, Los Angeles dan San Diego, atas semua masukan, diskusi dan saran mengenai sambungan rangka penahan momen di zona berisiko gempa tinggi.

Terima kasih juga disampaikan pada Professor A. Samer Ezeldin dari Stevens Institute of Technology dan pada Robert M. Nawy, BS, BA, MBA, Rutgers Engineering angkatan tahun 1983 yang membantu pembuatan edisi pertama buku ini. Penghargaan yang tinggi disampaikan pada pimpinan dan staf Prentice Hall, pada Marcia Horton, kepala editor dan wakil presiden, editor Alice Dworkin, Vincent O'Brien, Senior Executive Production Editor, yang telah memberikan dukungan terus menerus, dan Dolores Mars, asisten teknis, dan pada Patty Donovan, Senior Project Coordinator, Pine Tree Composition, atas upaya berharga dalam menghasilkan edisi ketiga ini. Terima kasih juga disampaikan kepada editor format Barbara Taylor-Laino atas kerjanya dalam cetak ulang tambahan edisi ini. Tidak lupa, penulis sangat menghargai mantan mahasiswanya, Ms. Moria Treacy, MS, Princeton University, Ryan Laub dan Anand Bhatt, keduanya MS, Rutgers University, atas pemrosesan dan penelaahan pada banyak perubahan serta penambahan yang berkaitan dengan edisi ketiga buku ini.

*Edward G. Nawy  
Rutgers University  
The State University of New Jersey  
New Brunswick, New Jersey*



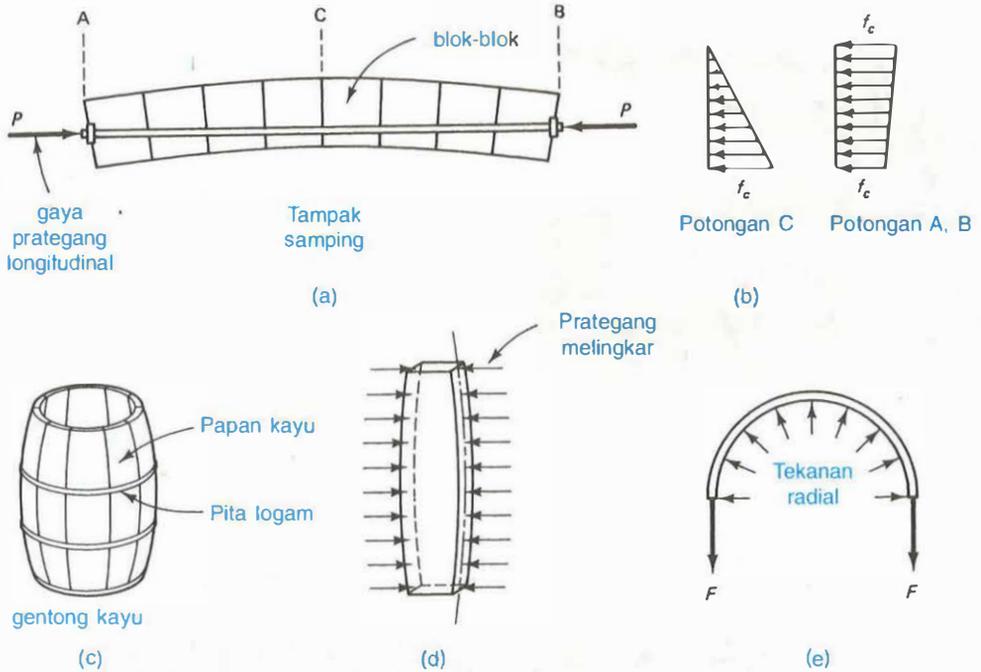
# 1

## KONSEP-KONSEP DASAR

### 1.1 PENDAHULUAN

Beton adalah material yang kuat dalam kondisi tekan, tetapi lemah dalam kondisi tarik: kuat tariknya bervariasi dari 8 sampai 14 persen dari kuat tekannya. Karena rendahnya kapasitas tarik tersebut, maka retak lentur terjadi pada taraf pembebanan yang masih rendah. Untuk mengurangi atau mencegah berkembangnya retak tersebut, gaya konsentris atau eksentris diberikan dalam arah longitudinal elemen struktural. Gaya ini mencegah berkembangnya retak dengan cara mengeliminasi atau sangat mengurangi tegangan tarik di bagian tumpuan dan daerah kritis pada kondisi beban kerja, sehingga dapat meningkatkan kapasitas lentur, geser, dan torsional penampang tersebut. Penampang dapat berperilaku elastis, dan hampir semua kapasitas beton dalam memikul tekan dapat secara efektif dimanfaatkan di seluruh tinggi penampang beton pada saat semua beban bekerja di struktur tersebut.

Gaya longitudinal yang diterapkan seperti di atas disebut gaya prategang, yaitu gaya tekan yang memberikan prategangan pada penampang di sepanjang bentang suatu elemen struktural sebelum bekerjanya beban mati dan beban hidup transversal atau beban hidup horisontal transien. Jenis pemberian gaya prategang, bersama besarnya, ditentukan terutama berdasarkan jenis sistem yang dilaksanakan dan panjang bentang serta kelangsingan yang dikehendaki. Karena gaya prategang diberikan secara



**Gambar 1.1** Prinsip-prinsip prategang pada prategang linier dan melingkar. (a) Pemberian prategang linier pada sederetan blok untuk membentuk balok. (b) Tegangan tekan di penampang tengah bentang C dan penampang A atau B. (c) Pemberian prategang melingkar pada genteng kayu dengan pemberian tarik pada pita logam. (d) Prategang melingkar pada satu papan kayu. (e) Gaya tarik F pada setengah pita logam akibat tekanan internal, yang harus diimbangi oleh prategang melingkar.

longitudinal di sepanjang atau sejajar dengan sumbu komponen struktur, maka prinsip-prinsip prategang dikenal sebagai pemberian prategang *linier*.

Pemberian tegangan *melingkar*, yang digunakan dalam cerobong reaktor nuklir, pipa dan tangki cairan, pada dasarnya mengikuti prinsip-prinsip dasar yang sama dengan pemberian prategang linier. Tegangan melingkar pada struktur silindris atau kubah menetralkan tegangan tarik di serat terluar dari permukaan kurvilinier yang disebabkan oleh tekanan kandungan internal.

Gambar 1.1 mengilustrasikan, dengan cara mendasar, aksi pemberian prategang pada kedua jenis sistem struktural dan respons tegangan yang dihasilkan. Pada bagian (a), blok-blok beton bekerja bersama sebagai sebuah balok akibat pemberian gaya prategang tekan  $P$  yang besar. Meskipun mungkin blok-blok tersebut tergelincir dan dalam arah vertikal mensimulasikan kegagalan gelincir geser, pada kenyataannya tidak demikian karena adanya gaya longitudinal  $P$ . Dengan cara sama, papan-papan kayu di dalam bagian (c) kelihatannya dapat terpisah satu sama lain sebagai akibat dari adanya tekanan radial internal yang bekerja padanya. Akan tetapi, sekali lagi, karena adanya prategang tekan yang diberikan oleh pita logam sebagai bentuk dari pemberian prategang melingkar, papan-papan tersebut tetap menyatu.

### 1.1.1 Perbandingan dengan Beton Bertulang

Dari pembahasan sebelum ini, jelaslah bahwa tegangan permanen di komponen struktur prategang diberikan sebelum seluruh beban mati dan beban hidup bekerja, agar tegangan tarik netto yang ditimbulkan oleh beban-beban tersebut dapat dieliminasi atau sangat dikurangi. Pada beton bertulang, diasumsikan bahwa kuat tarik beton

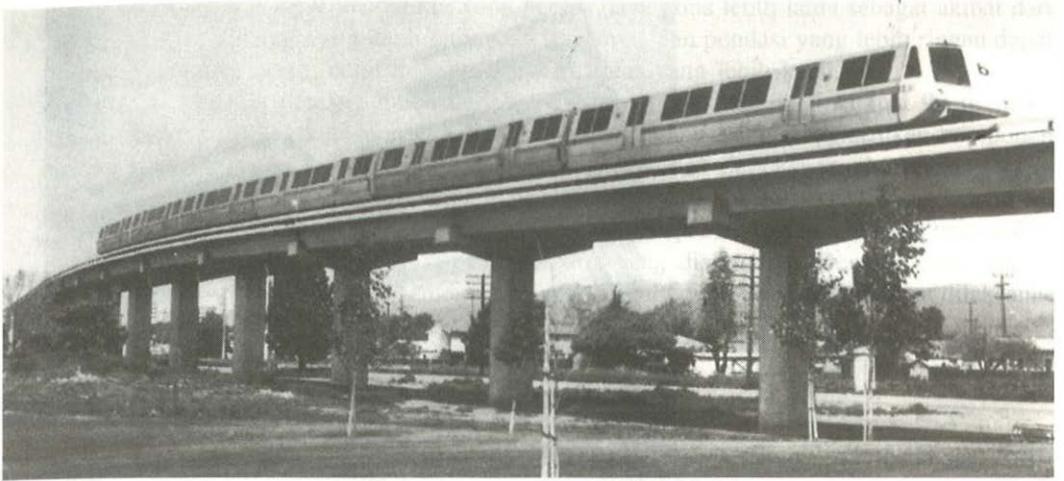


Foto 1.1 Bay Area Rapid Transit (BART), San Fransisco dan Oakland, California. Jalan penuntun terdiri atas girder boks pracetak prategang yang ditumpu sederhana dengan panjang 70 ft dan lebar 11 ft. (Atas izin, Bay Area Rapid Transit District, Oakland, California.)

dapat diabaikan. Hal ini disebabkan gaya tarik yang berasal dari momen lentur ditahan oleh lekatan yang terjadi antara tulangan dan beton. Dengan demikian, retak dan defleksi pada dasarnya tidak dapat kembali di dalam beton bertulang apabila komponen struktur tersebut telah mencapai kondisi batas pada saat mengalami beban kerja.

Tulangan di dalam komponen struktur beton bertulang tidak memberikan gaya dari dirinya pada komponen struktur tersebut, suatu hal yang berlawanan dengan aksi baja prategang. Baja yang dibutuhkan untuk menghasilkan gaya prategang di dalam komponen struktur prategang secara aktif memberi beban awal pada komponen struktur, sehingga memungkinkan terjadinya pemulihan retak dan defleksi. Apabila



Foto 1.2 Jembatan Chaco-Corrientes, Argentina, jembatan girder boks *cable-stayed* beton prategang pracetak terpanjang di Amerika Selatan (Atas izin Ammann & Whitney.)



Foto 1.3 Gedung Parkir, Tulsa, Oklahoma. (Atas izin Prestressed Concrete Institute.)

kuat tarik lentur beton dilampaui, komponen struktur prategang mulai beraksi seperti elemen beton bertulang.

Dengan mengontrol besarnya prategang, suatu sistem struktur dapat dibuat fleksibel atau kaku tanpa mempengaruhi kekuatannya. Pada beton bertulang, perilaku yang fleksibel seperti ini sangat sulit dicapai apabila pertimbangan ekonomi perlu dimasukkan dalam desain. Struktur fleksibel seperti tiang fender di dermaga harus mampu menyerap banyak energi, dan beton prategang dapat memenuhi kebutuhan tersebut. Struktur yang didesain untuk menahan getaran besar, seperti pondasi mesin, dapat dengan mudah dibuat kaku dengan memberikan kontribusi gaya prategang pada pengurangan deformasi.

### 1.1.2 Keuntungan Beton Prategang

Komponen struktur prategang mempunyai tinggi lebih kecil dibandingkan beton bertulang untuk kondisi bentang dan beban yang sama. Pada umumnya, tinggi komponen struktur beton prategang berkisar antara 65 sampai 80 persen dari tinggi komponen struktur beton bertulang. Dengan demikian, komponen struktur prategang membutuhkan lebih sedikit beton, dan sekitar 20 sampai 35 persen banyaknya tulangan. Sayangnya, penghematan pada berat material ini harus dibayar dengan tingginya harga material bermutu tinggi yang dibutuhkan dalam pemberian prategang. Juga, bagaimanapun sistem yang digunakan, operasi pemberian prategang itu sendiri menimbulkan tambahan harga. Cetakan untuk beton prategang menjadi lebih kompleks, karena geometri penampang prategang biasanya terdiri atas penampang bersayap dengan beberapa badan yang tipis.

Tanpa memperhatikan tambahan harga tersebut, apabila komponen struktur yang cukup besar dari unit-unit pracetak dibuat, perbedaan antara sedikitnya harga awal sistem beton prategang dan beton bertulang biasanya tidak terlalu besar. Selain itu, penghematan jangka panjang secara tidak langsung cukup besar, karena dibutuhkan

perawatan yang lebih sedikit, yang berarti daya guna lebih lama sebagai akibat dari kontrol kualitas yang lebih baik pada betonnya, dan pondasi yang lebih ringan dapat digunakan akibat berat kumulatif struktur atas yang lebih kecil.

Apabila bentang balok dari beton bertulang melebihi 70 sampai 90 ft, maka beban mati balok tersebut menjadi sangat berlebihan, yang menghasilkan komponen struktur yang lebih berat dan, akibatnya, retak dan defleksi jangka panjang yang lebih besar. Jadi, untuk bentang panjang, beton prategang merupakan keharusan karena pembuatan pelengkung mahal dan tidak dapat berperilaku dengan baik akibat adanya rangkak dan susut jangka panjang yang dialaminya. Bentang yang sangat besar, seperti jembatan segmental atau jembatan *cable-stayed* hanya dapat dilaksanakan dengan menggunakan beton prategang.

## 1.2 RIWAYAT PERKEMBANGAN PEMBERIAN PRATEGANG

Beton prategang bukan merupakan konsep baru, pada tahun 1872, pada saat P. H. Jackson, seorang insinyur dari California, mendapatkan paten untuk sistem struktural yang menggunakan *tie rod* untuk membuat balok atau pelengkung dari blok-blok. [Lihat Gambar 1.1(a).] Pada tahun 1888, C. W. Doehring dari Jerman memperoleh paten untuk pemberian prategang pada slab dengan kawat-kawat metal. Akan tetapi, upaya awal untuk pemberian tegangan tersebut tidak benar-benar sukses karena hilangnya prategang dengan berjalannya waktu. J. Lud dari Norwegia dan G. R. Steiner dari Amerika Serikat telah berupaya untuk memecahkan masalah ini pada abad kedua puluh, namun tidak berhasil.

Sesudah selang waktu yang sangat panjang, pada saat hanya ada sedikit kemajuan karena sulitnya mendapatkan baja berkekuatan tinggi untuk mengatasi masalah kehilangan prategang, R. E. Dill dari Alexandria, Nebraska, mengetahui adanya pengaruh susut dan rangkak (aliran material transversal) pada beton terhadap hilangnya prategang. Selanjutnya, ia mengembangkan ide bahwa pemberian pascatarik batang berpenampang bulat *tumpa lekatan* secara berturut-turut dapat mengganti kehilangan

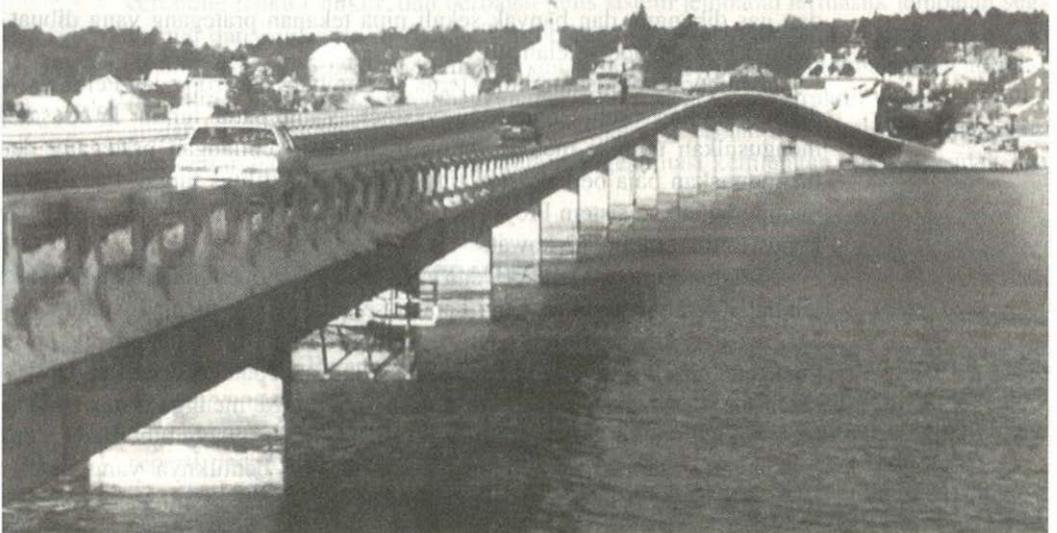


Foto 1.4 Jembatan Wiscasset, Maine. (Atas izin Post-Tensioning Institute.)