

FISIKA TERAPAN

Prof. Dr. Ir. Ahmad Rifqi Asrib, M.T.



PT. GHANI PRESS GROUP

FISIKA TERAPAN

Penulis:

Prof. Dr. Ir. Ahmad Rifqi Asrib, M.T.

Desain Cover:

Umar Khasan

Layouter:

Linda Ayu Widayanti

Editor Naskah:

Mixghan Norman Antono

Anggota IKAPI: No. 468/JTI/2026

Diterbitkan oleh: PT GHANI PRESS GROUP

Perpustakaan Nasional RI: Katalog Dalam Terbitan
(KDT)

Asrib, Ahmad Rifqi

FISIKA TERAPAN 2026 /penulis, Ahmad Rifqi
Asrib, Lamongan: PT. Ghani Press Group, 2026.
V + 184 hlm; 14 x 21 cm

ISBN 978-634-97368-2-4

1. Fisika terapan

I. Judul

621 [23]

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

- a. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- b. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- c. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- d. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga buku ajar “FISIKA TERAPAN” ini dapat diselesaikan.

Fisika Terapan menjadi jembatan antara fisika yang dipelajari mahasiswa di jenjang menengah dengan mata kuliah rekayasa yang akan ditempuh pada semester berikutnya, seperti Mekanika Rekayasa, Mekanika Bahan, Struktur Beton Bertulang, dan Ilmu Bahan Bangunan.

Buku ajar ini disusun untuk menjawab satu persoalan yang sering dijumpai di kelas: mahasiswa mampu menghafal rumus, tetapi belum mampu melihat rumus tersebut bekerja di lapangan. Karena itu, setiap bab dalam buku ini dibuka dengan sebuah kasus keteknikan sipil yang nyata, kemudian teori dibangun sebagai alat untuk menyelesaikan kasus tersebut. Pendekatan ini sejalan dengan model pembelajaran *Case Method* yang ditetapkan dalam RPS mata kuliah.

Sistematika buku mengikuti secara ketat struktur capaian pembelajaran dalam RPS: lima Capaian Pembelajaran Mata Kuliah (CPMK) dijabarkan menjadi empat belas Sub-CPMK, dan setiap Sub-CPMK diwujudkan menjadi satu bab. Dengan demikian, dosen dapat menggunakan buku ini bab demi bab mengikuti urutan pertemuan, sementara mahasiswa memperoleh kepastian bahwa setiap bab yang dibacanya berkontribusi langsung pada penilaian yang akan diterimanya.

Akhir kata semoga buku ini bermanfaat dan menjadi ikhtiar yang dikerjakan dengan sebaik-baiknya.

Makassar, September 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
BAB I	
FISIKA SEBAGAI ILMU DASAR KETEKNIKAN	1
BAB II	
BESARAN, DIMENSI, DAN SATUAN	11
BAB III	
GERAK LURUS BERATURAN.....	25
BAB IV	
GERAK LURUS BERUBAH BERATURAN	33
BAB V	
HUKUM-HUKUM NEWTON TENTANG GERAK.....	43
BAB VI	
APLIKASI HUKUM NEWTON DAN DIAGRAM BENDA BEBAS.....	53
BAB VII	
GAYA DAN GERAK DALAM SISTEM MEKANIK	63
BAB VIII	
KONSEP USAHA, ENERGI, DAN DAYA.....	73
BAB IX	
HUKUM KEKEKALAN.....	83

BAB X

HUBUNGAN USAHA, PERUBAHAN ENERGI,
DAN KEKEKALAN ENERGI MEKANIK 93

BAB XI

MOMEN GAYA DAN KESETIMBANGAN BENDA
TEGAR..... 103

BAB XII

TITIK BERAT, JENIS KESETIMBANGAN, DAN
APLIKASI TORSI 113

BAB XIII

SIFAT MEKANIK ZAT, KEKUATAN BAHAN, DAN
MOMEN PUNTIR..... 127

BAB XIV

GAYA GESER DAN TEGANGAN GESER..... 141

EVALUASI AKHIR SEMESTER..... 153

KUNCI JAWABAN DAN PEMBAHASAN SOAL
TERPILIH 157

DAFTAR PUSTAKA 163

LAMPIRAN A KONSTANTA FISIKA DAN
FAKTOR KONVERSI 167

LAMPIRAN B SIFAT MEKANIK BAHAN
KONSTRUKSI..... 171

LAMPIRAN C RUBRIK PENILAIAN.....	175
GLOSARIUM	179
BIODATA PENULIS	183



PT GHANI PRESS GROUP

Email: ptghanipress@gmail.com

Website: <https://ghanipress.com/>

BAB I

FISIKA SEBAGAI ILMU DASAR KETEKNIKAN

➤ Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 1)

- a. Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:
- b. Menjelaskan hakikat, ruang lingkup, dan cabang-cabang ilmu fisika;
- c. Menjelaskan kedudukan fisika sebagai ilmu dasar dalam pengembangan ilmu teknik;
- d. Memberikan contoh penerapan prinsip fisika dalam beberapa bidang rekayasa, khususnya teknik sipil.

Peta konsep: Hakikat fisika → Cabang ilmu fisika → Metode ilmiah → Fisika dalam rekayasa → Etika keilmuan.

➤ Kasus Pembuka

Pada 15 November 1940, Jembatan Tacoma Narrows di Amerika Serikat runtuh. Yang mengejutkan bukan besarnya beban yang menyimpannya, melainkan justru sebaliknya: angin yang bertiup saat itu hanya sekitar 68 km/jam, jauh di bawah kecepatan angin rencana. Jembatan tersebut bergelombang naik-turun dan berpuntir hingga akhirnya lantainya patah.

Pertanyaan pemicu: mengapa beban yang kecil dapat merobohkan struktur besar? Prinsip fisika apa yang terlewat dari perhitungan perancangannya? Dan pelajaran apa yang dapat diambil oleh seorang calon insinyur sipil dari peristiwa ini?

➤ **Hakikat dan Ruang Lingkup Ilmu Fisika**

Fisika adalah ilmu yang mempelajari materi, energi, serta interaksi antara keduanya beserta gejala-gejala yang menyertainya. Kata "fisika" berasal dari bahasa Yunani *physis* yang berarti alam. Dari akar kata tersebut tampak bahwa objek kajian fisika adalah alam itu sendiri, bukan sekadar rumus tentang alam.

Fisika dibangun atas tiga tumpuan yang saling menguatkan. Pengamatan menyediakan fakta; eksperimen menguji fakta secara terkendali; dan pemodelan matematis merangkum keteraturan yang ditemukan menjadi pernyataan yang dapat diuji ulang. Sebuah rumus dalam fisika pada dasarnya adalah kalimat singkat tentang perilaku alam yang telah lulus uji berkali-kali.

Dua ciri fisika perlu dipahami sejak awal oleh mahasiswa teknik. Pertama, fisika bersifat kuantitatif: pernyataan "balok ini kuat" tidak bermakna dalam fisika sebelum diubah menjadi "balok ini mampu menahan tegangan lentur 24 MPa". Kedua, fisika bekerja dengan model yang disederhanakan. Titik materi, benda tegar sempurna, dan permukaan tanpa gesekan tidak pernah dijumpai di lapangan, tetapi model tersebut me-

mungkinkan kita memperoleh jawaban yang cukup teliti untuk keperluan praktis. Keterampilan penting seorang insinyur justru terletak pada kemampuan menilai kapan penyederhanaan masih aman digunakan dan kapan ia menjadi berbahaya.

➤ Cabang-Cabang Ilmu Fisika

Fisika lazim dibagi menjadi fisika klasik dan fisika modern. Fisika klasik berkembang hingga akhir abad ke-19 dan meliputi mekanika, termodinamika, gelombang dan bunyi, optika, serta listrik dan magnet. Fisika modern berkembang sejak awal abad ke-20 dan meliputi relativitas, fisika kuantum, fisika atom, fisika inti, serta fisika zat padat.

Bagi mahasiswa teknik sipil, cabang yang paling banyak digunakan adalah mekanika, yaitu cabang fisika yang mempelajari gerak dan gaya. Mekanika sendiri terbagi menjadi:

- a. Kinematika mempelajari gerak tanpa mempersoalkan penyebabnya (Bab 3 dan 4);
- b. Dinamika mempelajari gerak beserta gaya penyebabnya (Bab 5 sampai 7);
- c. Statika mempelajari benda dalam keadaan setimbang, yaitu keadaan yang paling diinginkan pada sebuah bangunan (Bab 11 dan 12);

Mekanika bahan mempelajari perubahan bentuk benda akibat pembebanan (Bab 13 dan 14).



Gambar 1. Kedudukan Cabang-Cabang Mekanika dan Kaitannya dengan Bab dalam Buku Ini

Tabel 1. Cabang Ilmu Fisika dan Penerapannya dalam Teknik Sipil

Cabang Fisika	Objek Kajian	Contoh Penerapan di Teknik Sipil
Mekanika	Gerak, gaya, kesetimbangan	Analisis rangka kuda-kuda, reaksi tumpuan
Mekanika fluida	Zat cair dan gas yang mengalir	Perencanaan drainase, saluran irigasi
Termodinamika	Kalor dan perpindahan energi	Insulasi termal bangunan, muai jembatan

Cabang Fisika	Objek Kajian	Contoh Penerapan di Teknik Sipil
Gelombang dan bunyi	Perambatan gangguan	Akustik ruang, rekayasa kegempaan
Optika	Cahaya dan penglihatan	Pencahayaan alami, alat ukur *total station*
Listrik dan magnet	Muatan dan medan	Instalasi bangunan, penangkal petir
Fisika zat padat	Struktur internal bahan	Rekayasa beton mutu tinggi, uji tanpa rusak

➤ Metode Ilmiah dan Pengukuran dalam Rekayasa

Metode ilmiah dalam fisika berjalan melalui rangkaian langkah: perumusan masalah, penyusunan hipotesis, perancangan eksperimen, pengambilan data, analisis, penarikan kesimpulan, dan pengujian ulang oleh pihak lain. Langkah terakhir sering diabaikan padahal justru merupakan pengaman utama ilmu pengetahuan: sebuah temuan baru dianggap sah apabila dapat diulang oleh orang lain dengan hasil yang sama.

Dalam praktik keteknikan, metode ilmiah muncul dalam bentuk yang sangat konkret, yaitu pengujian bahan. Ketika sebuah proyek mensyaratkan beton mutu K-250, kontraktor tidak cukup menyatakan bahwa

betonnya bagus. Ia harus mengambil benda uji silinder, merawatnya selama 28 hari, mengujinya dengan mesin tekan, dan menyerahkan laporan angka kuat tekannya. Inilah metode ilmiah dalam pakaian kerja lapangan.

➤ **Peran Fisika dalam Pengembangan Ilmu Teknik**

Hubungan fisika dan teknik dapat dinyatakan secara ringkas: fisika menjelaskan mengapa alam berperilaku demikian, sedangkan teknik memanfaatkan penjelasan tersebut untuk merancang sesuatu yang berguna dan aman bagi manusia. Tanpa fisika, perancangan hanya bersandar pada coba-coba dan kebiasaan; dengan fisika, perancangan dapat di-perhitungkan sebelum satu batu pun diletakkan.

Teknik Sipil

Seluruh perhitungan struktur berpijak pada hukum-hukum Newton dan syarat kesetimbangan. Ketika seorang perencana menghitung dimensi balok, yang sesungguhnya ia lakukan adalah memastikan bahwa jumlah gaya dan jumlah momen pada balok tersebut sama dengan nol, serta memastikan bahwa tegangan yang timbul masih di bawah kekuatan bahannya. Prinsip yang sama berlaku pada perencanaan pondasi, dinding penahan tanah, dan bendungan.

Teknik Mesin dan Teknik Elektro

Perancangan mesin memanfaatkan dinamika, termodinamika, dan mekanika bahan; efisiensi sebuah motor bakar dibatasi oleh hukum termodinamika, bukan

oleh keterampilan perancangannya. Teknik elektro berpijak pada teori listrik dan magnet; dari hukum induksi Faraday lahir generator dan transformator yang menyalakan kota.

Teknik Lingkungan dan Geoteknik

Perencanaan instalasi pengolahan air memanfaatkan hukum-hukum aliran fluida dan prinsip pengendapan partikel. Dalam geoteknik, analisis stabilitas lereng pada dasarnya adalah perbandingan momen yang menahan terhadap momen yang menggulingkan persis konsep yang akan dipelajari pada Bab 12.

➤ Contoh Studi Kasus: Kegagalan Struktur Ditinjau dari Prinsip Fisika

Kembali pada Jembatan Tacoma Narrows yang disebut pada Kasus Pembuka. Penjelasan fisisnya berkaitan dengan peristiwa resonansi dan ketidakstabilan aeroelastis. Setiap struktur memiliki frekuensi alami, yaitu frekuensi getaran yang paling mudah ia lakukan. Angin yang melewati lantai jembatan yang pipih dan kaku-torsional rendah membentuk pusaran berkala. Ketika frekuensi pusaran tersebut mendekati frekuensi alami puntir jembatan, setiap dorongan angin datang tepat pada saat jembatan sedang bergerak searah dorongan itu. Energi tidak lagi terbuang, melainkan terkumpul dari siklus ke siklus, sehingga simpangan tumbuh terus hingga bahannya gagal.

Pelajaran fisisnya jelas: kekuatan saja tidak menjamin keamanan. Sebuah struktur harus kuat, kaku, dan stabil sekaligus. Perhitungan beban statis tidak cukup apabila perilaku dinamis diabaikan. Kejadian ini mengubah praktik perencanaan jembatan di seluruh dunia; sejak itu uji terowongan angin menjadi bagian baku perencanaan jembatan bentang panjang.

Contoh serupa dalam skala yang lebih dekat dapat ditemukan pada keruntuhan perancah beton yang belum mengeras, pada tergulingnya *tower crane* karena beban di luar radius izin, dan pada penurunan tak seragam bangunan di atas tanah lunak. Ketiganya dapat dianalisis dengan konsep yang tersedia di dalam buku ini.

➤ Etika dan Tanggung Jawab Keilmuan

Fisika mengajarkan disiplin yang melampaui perhitungan. Ketelitian dalam mengukur, kejujuran dalam melaporkan data, dan kesediaan mengoreksi diri ketika data menunjukkan hal lain adalah sikap ilmiah sekaligus sikap profesional. Dalam dunia keteknik sipil, sikap tersebut berhubungan langsung dengan keselamatan orang banyak: satu laporan uji tekan yang dipalsukan dapat berujung pada bangunan yang runtuh dan nyawa yang hilang.

Karena itu, sejak mata kuliah pertama pada semester pertama, mahasiswa perlu memahami bahwa angka yang ia tulis dalam laporan bukan sekadar tugas untuk memperoleh nilai, melainkan latihan untuk memikul amanah keahlian yang kelak dipercayakan kepadanya.

➤ Rangkuman

- a. Fisika adalah ilmu tentang materi, energi, dan interaksinya, yang dibangun melalui pengamatan, eksperimen, dan pemodelan matematis.
- b. Cabang fisika yang paling berperan dalam teknik sipil adalah mekanika, yang terbagi menjadi kinematika, dinamika, statika, dan mekanika bahan.
- c. Fisika menjelaskan perilaku alam; teknik memanfaatkan penjelasan itu untuk merancang bangunan yang aman, kuat, dan ekonomis.
- d. Kasus Jembatan Tacoma Narrows menunjukkan bahwa kekuatan tanpa kekakuan dan kestabilan tidak menjamin keamanan struktur.
- e. Ketelitian dan kejujuran data merupakan bagian tak terpisahkan dari kompetensi keteknikan.

➤ Latihan Mandiri

1. Jelaskan perbedaan antara kinematika, dinamika, dan statika, serta berikan satu contoh persoalan teknik sipil untuk masing-masingnya.
2. Mengapa fisika perlu menggunakan model yang disederhanakan? Berikan satu contoh penyederhanaan yang aman dan satu contoh penyederhanaan yang dapat berbahaya dalam perencanaan struktur.
3. Sebutkan tiga cabang fisika selain mekanika, dan jelaskan penerapan masing-masing dalam perencanaan gedung bertingkat.
4. Uraikan secara singkat mengapa angin berkecepatan sedang dapat meruntuhkan jembatan besar.

5. Menurut Anda, apa akibat yang mungkin timbul apabila seorang pelaksana proyek melaporkan hasil uji kuat tekan beton yang tidak sesuai kenyataan? Tinjau dari sisi teknis dan sisi tanggung jawab profesi.

➤ **Tugas Case Method**

Secara berkelompok (3–4 orang), carilah satu kasus kegagalan konstruksi di Indonesia dari sumber berita atau laporan resmi. Susunlah analisis singkat 3–4 halaman yang memuat: (a) kronologi kejadian; (b) identifikasi prinsip fisika yang terkait; (c) dugaan penyebab teknis; (d) pelajaran bagi calon insinyur. Presentasikan hasilnya pada pertemuan berikutnya dalam waktu maksimal 10 menit per kelompok.

BAB II

BESARAN, DIMENSI, DAN SATUAN

➤ Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 2)

Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:

- a. Membedakan besaran pokok dan besaran turunan serta menuliskan satuannya dalam SI;
- b. Melakukan konversi satuan dan analisis dimensi untuk memeriksa kebenaran suatu persamaan;
- c. Menerapkan aturan angka penting dan menyatakan ketidakpastian hasil pengukuran;
- d. Membedakan besaran skalar dan vektor serta menghitung resultan vektor sederhana.

Peta konsep: Besaran pokok dan turunan → Satuan SI dan konversi → Dimensi → Angka penting dan ketidakpastian → Skalar dan vektor.

➤ Kasus Pembuka

Sebuah gambar kerja impor menuliskan mutu baja tulangan sebagai *60 ksi*, sementara spesifikasi proyek di Indonesia menyebut BjTS 420B. Seorang pelaksana lapangan meragukan apakah keduanya setara. Di berkas yang sama, kuat tekan beton dituliskan 4000 psi, padahal dokumen tender menyebut $f'_c = 25 \text{ MPa}$.

Pertanyaan pemicu: apakah mutu bahan pada kedua dokumen tersebut sepadan? Kesalahan apa yang dapat terjadi jika satuan tidak dikonversi dengan benar sebelum pekerjaan dimulai?

➤ **Besaran Pokok dan Besaran Turunan**

Besaran adalah segala sesuatu yang dapat diukur dan dinyatakan dengan angka beserta satuannya. Besaran dibedakan menjadi besaran pokok dan besaran turunan. Besaran pokok adalah besaran yang satuannya ditetapkan lebih dahulu dan tidak diturunkan dari besaran lain. Besaran turunan adalah besaran yang satuannya disusun dari satu atau lebih besaran pokok.

Tabel 2. Tujuh Besaran Pokok Beserta Satuan dan Lambang Dimensinya

Besaran Pokok	Satuan SI	Lambang Satuan	Lambang Dimensi
Panjang	meter	m	[L]
Massa	kilogram	kg	[M]
Waktu	sekon	s	[T]
Kuat arus listrik	ampere	A	[I]
Suhu termodinamika	kelvin	K	[θ]
Jumlah zat	mol	mol	[N]
Intensitas cahaya	kandela	cd	[J]

Besaran turunan yang paling banyak digunakan dalam teknik sipil disajikan pada tabel berikut. Perhatikan bahwa satuan tegangan, pascal, sesungguhnya hanyalah nama singkat bagi newton per meter persegi.

Tabel 3. Besaran Turunan yang Sering digunakan dalam Teknik Sipil

Besaran Turunan	Rumus	Satuan SI	Dimensi
Luas	panjang × lebar	m ²	[L] ²
Volume	panjang × lebar × tinggi	m ³	[L] ³
Massa jenis	massa / volume	kg/m ³	[M][L] ⁻³
Kecepatan	perpindahan / waktu	m/s	[L][T] ⁻¹
Percepatan	kecepatan / waktu	m/s ²	[L][T] ⁻²
Gaya	massa × percepatan	N	[M][L][T] ⁻²
Tegangan / tekanan	gaya / luas	Pa = N/m ²	[M][L] ⁻¹ [T] ⁻²
Usaha dan energi	gaya × perpindahan	J = N·m	[M][L] ² [T] ⁻²
Daya	usaha / waktu	W = J/s	[M][L] ² [T] ⁻³
Momen gaya	gaya × lengan	N·m	[M][L] ² [T] ⁻²

➤ Sistem Satuan Internasional dan Konversi Satuan

Sistem Internasional (SI) merupakan satuan resmi yang digunakan dalam dokumen teknis di Indonesia, termasuk dalam Standar Nasional Indonesia. Namun demikian, dokumen dari luar negeri dan katalog peralatan sering masih memakai satuan lain, sehingga keterampilan konversi tetap diperlukan.

Awalan Satuan

Tabel 4. Awalan Satuan dan Contoh Pemakaiannya

Awalan	Lambang	Faktor	Contoh Pemakaian
giga	G	10^9	Modulus elastisitas baja 200 GPa
mega	M	10^6	Kuat tekan beton 25 MPa
kilo	k	10^3	Beban titik 50 kN
senti	c	10^{-2}	Tebal pelat 12 cm
mili	m	10^{-3}	Diameter tulangan 16 mm
mikro	μ	10^{-6}	Regangan 2000 μ (mikroregangan)

Faktor Konversi yang Sering Dipakai

- Panjang: 1 inci = 25,4 mm; 1 kaki (*ft*) = 0,3048 m; 1 yard = 0,9144 m
- Massa dan gaya: 1 kgf = 9,80665 N; 1 ton-gaya = 9,80665 kN; 1 *pound-force* = 4,4482 N

- c. Tegangan: $1 \text{ psi} = 6894,76 \text{ Pa} \approx 0,006895 \text{ MPa}$; $1 \text{ ksi} = 6,895 \text{ MPa}$; $1 \text{ kg/cm}^2 = 0,0980665 \text{ MPa}$
- d. Kecepatan: $1 \text{ km/jam} = 1/3,6 \text{ m/s} \approx 0,2778 \text{ m/s}$

Contoh Soal 2.1 — Menyelesaikan Kasus Pembuka

Soal: Periksa apakah baja 60 ksi setara dengan BjTS 420, dan apakah beton 4000 psi setara dengan $f'c = 25 \text{ MPa}$.

Penyelesaian: Untuk baja, $60 \text{ ksi} \times 6,895 \text{ MPa/ksi} = 413,7 \text{ MPa}$. Nilai ini sangat dekat dengan tegangan luluh 420 MPa, sehingga keduanya praktis setara; BjTS 420 sedikit lebih tinggi.

Untuk beton, $4000 \text{ psi} \times 0,006895 \text{ MPa/psi} = 27,6 \text{ MPa}$. Nilai ini lebih tinggi daripada 25 MPa. Bila pelaksana menganggap keduanya sama dan memakai campuran 25 MPa, mutu yang dihasilkan berada di bawah gambar kerja sebesar sekitar 9%.

Kesimpulan: kesetaraan satuan harus dihitung, tidak boleh diduga. Dalam praktik, selisih semacam ini diselesaikan melalui persetujuan tertulis perencanaan, bukan keputusan sepihak di lapangan.

➤ Analisis Dimensi

Dimensi menyatakan cara sebuah besaran disusun dari besaran pokok. Analisis dimensi berguna untuk tiga hal: memeriksa kebenaran bentuk suatu persamaan, menurunkan satuan besaran baru, dan menduga

hubungan antarbesaran ketika rumusnya belum diketahui.

Aturan pokoknya sederhana: suku-suku yang dijumlahkan atau disamakan harus berdimensi sama. Jika dimensi ruas kiri tidak sama dengan dimensi ruas kanan, persamaan tersebut pasti salah.

Contoh Soal 2.2 — Pemeriksaan Persamaan

Soal: Periksa secara dimensional apakah persamaan $v^2 = v_0^2 + 2a s$ benar.

Penyelesaian: Dimensi ruas kiri adalah $([L][T]^{-1})^2 = [L]^2[T]^{-2}$. Suku pertama ruas kanan berdimensi sama. Suku kedua: $[L][T]^{-2} \times [L] = [L]^2[T]^{-2}$. Karena semua suku berdimensi $[L]^2[T]^{-2}$, persamaan tersebut konsisten secara dimensional.

Catatan penting: konsistensi dimensi tidak menjamin kebenaran angka. Persamaan $v^2 = v_0^2 + 5as$ juga konsisten dimensinya, tetapi salah nilainya. Analisis dimensi menyaring kesalahan bentuk, bukan kesalahan koefisien.

Contoh Soal 2.3 — Menurunkan Satuan

Soal: Tentukan dimensi dan satuan SI dari modulus elastisitas E , yang didefinisikan sebagai perbandingan tegangan terhadap regangan.

Penyelesaian: Tegangan berdimensi $[M][L]^{-1}[T]^{-2}$. Regangan adalah perbandingan dua panjang sehingga tidak berdimensi. Maka dimensi E sama dengan dimensi tegangan, yaitu $[M][L]^{-1}[T]^{-2}$, dengan satuan N/m^2 atau Pa. Karena nilainya besar, E biasa dinyatakan dalam GPa; misalnya baja memiliki $E \approx 200$ GPa.

➤ Angka Penting dan Ketidakpastian Pengukuran

Setiap alat ukur memiliki batas ketelitian. Menuliskan panjang balok sebagai 3,246178 m dari hasil pengukuran dengan meteran gulung adalah kekeliruan, sebab meteran tersebut tidak mampu memberikan ketelitian sampai mikrometer. Aturan angka penting menjaga agar hasil hitungan tidak terkesan lebih teliti daripada datanya.

Aturan Angka Penting

- Semua angka bukan nol adalah angka penting. Contoh: 24,5 memiliki tiga angka penting.
- Angka nol di antara angka bukan nol adalah penting. Contoh: 2,05 memiliki tiga angka penting.
- Angka nol di sebelah kiri angka bukan nol tidak penting. Contoh: 0,0025 memiliki dua angka penting.
- Angka nol di sebelah kanan pada bilangan berdesimal adalah penting. Contoh: 2,500 memiliki empat angka penting.

- e. Pada penjumlahan dan pengurangan, hasil dibulatkan sampai jumlah desimal terkecil dari data. Pada perkalian dan pembagian, hasil dibulatkan sampai jumlah angka penting terkecil dari data.

Ketidakpastian Pengukuran

Untuk pengukuran tunggal, ketidakpastian biasanya diambil setengah skala terkecil alat. Meteran dengan skala terkecil 1 mm memberikan $\Delta x = 0,5$ mm, sehingga hasil dituliskan $(3246,0 \pm 0,5)$ mm. Untuk pengukuran berulang sebanyak n kali, digunakan nilai rata-rata dan simpangan baku rata-rata:

$$\bar{x} = (\Sigma x_i) / n \quad \text{dan} \quad \Delta x = \sqrt{[\Sigma (x_i - \bar{x})^2 / (n(n-1))]}$$

Ketidakpastian relatif $\Delta x / \bar{x}$ menentukan jumlah angka penting yang layak dilaporkan. Ketidakpastian relatif sekitar 10% cukup dilaporkan dengan satu angka penting, sekitar 1% dengan dua angka penting, dan sekitar 0,1% dengan tiga angka penting.

➤ Besaran Skalar dan Besaran Vektor

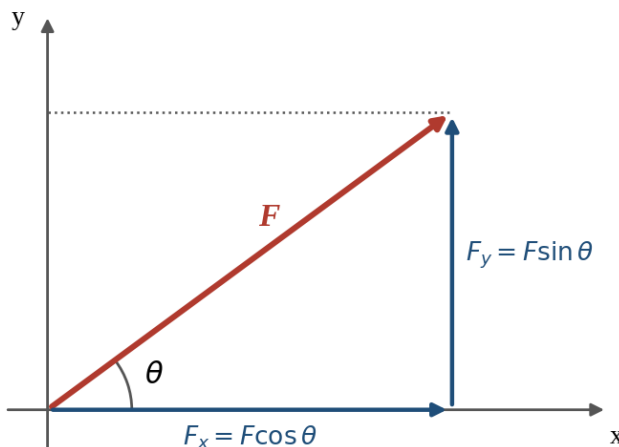
Besaran skalar cukup dinyatakan dengan besar dan satuan, misalnya massa, waktu, panjang, luas, volume, suhu, usaha, energi, dan daya. Besaran vektor memerlukan besar sekaligus arah, misalnya perpindahan, kecepatan, percepatan, gaya, momen gaya, dan momentum.

Perbedaan ini berdampak praktis. Dua gaya masing-masing 100 N yang bekerja pada sebuah titik dapat menghasilkan resultan 200 N bila searah, 0 N bila berlawanan arah, dan 141,4 N bila saling tegak lurus. Karena itu, gaya tidak boleh dijumlahkan seperti bilangan biasa.

Penguraian Vektor menjadi Komponen

Sebuah vektor F yang membentuk sudut θ terhadap sumbu- x positif dapat diuraikan menjadi:

$$F_x = F \cos \theta \quad F_y = F \sin \theta$$



Gambar 2. Penguraian Sebuah Vektor Gaya Menjadi Komponen Mendatar dan Tegak

Sebaliknya, dari komponen-komponennya, besar dan arah vektor diperoleh melalui:

$$F = \sqrt{(F_x^2 + F_y^2)} \quad \tan \theta = F_y / F_x$$

Resultan Beberapa Vektor

Untuk vektor yang tidak saling tegak lurus, cara paling aman adalah metode analitis: uraikan setiap vektor menjadi komponen x dan y , jumlahkan komponen sejenis, lalu gabungkan kembali.

$$\begin{aligned}\Sigma F_x &= F_{1x} + F_{2x} + \dots & \Sigma F_y &= F_{1y} + F_{2y} + \dots \\ R &= \sqrt{(\Sigma F_x)^2 + (\Sigma F_y)^2}\end{aligned}$$

Untuk dua vektor yang membentuk sudut α , resultannya dapat pula dihitung dengan aturan kosinus:

$$R = \sqrt{(F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \alpha)}$$

Contoh Soal 2.4 — Resultan Gaya pada Titik Sambungan

Soal: Pada satu titik simpul rangka bekerja gaya $F_1 = 300$ N mendatar ke kanan dan $F_2 = 400$ N membentuk sudut 60° di atas arah mendatar ke kanan. Tentukan besar dan arah resultannya.

Penyelesaian: Uraikan setiap gaya.

$$F_{1x} = 300 \text{ N}; F_{1y} = 0.$$

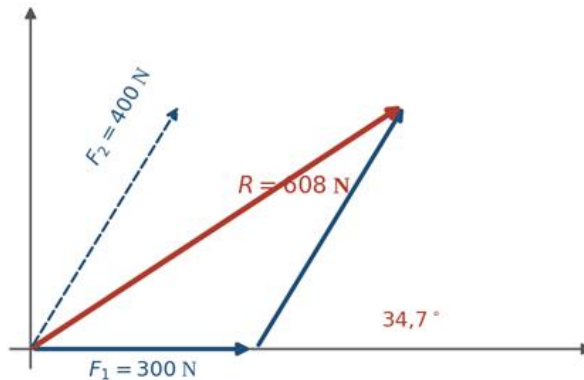
$$F_{2x} = 400 \cos 60^\circ = 200 \text{ N}; F_{2y} = 400 \sin 60^\circ = 346,4 \text{ N}.$$

$$\text{Jumlahkan komponen: } \Sigma F_x = 300 + 200 = 500 \text{ N}; \Sigma F_y = 0 + 346,4 = 346,4 \text{ N}.$$

$$\text{Resultan: } R = \sqrt{(500^2 + 346,4^2)} = \sqrt{(250000 + 119993)} = 608,3 \text{ N}.$$

Arah: $\tan \theta = 346,4/500 = 0,6928$ sehingga $\theta = 34,7^\circ$ di atas arah mendatar.

Jawaban: $R \approx 608$ N pada arah $34,7^\circ$ dari sumbu mendatar.



Gambar 3. Penjumlahan Vektor Gaya pada Contoh Soal 2.4

➤ Aplikasi dalam Teknik Sipil

Kemampuan membaca satuan secara benar merupakan keterampilan dasar yang dipakai setiap hari di lapangan. Beberapa contohnya:

- Spesifikasi beton dinyatakan dalam MPa (f'_c) atau kg/cm^2 (mutu K). Hubungan pendekatannya: K-250 setara dengan $f'_c \approx 20,75\text{ MPa}$ karena benda uji kubus dikonversi ke silinder dengan faktor sekitar 0,83.
- Kapasitas *tower crane* dinyatakan dalam ton pada radius tertentu; keliru membaca satuan atau radius berarti membebani lengan kran melampaui batasnya.
- Daya pompa dinyatakan dalam kW atau HP ($1\text{ HP} = 0,746\text{ kW}$); pemilihan pompa yang keliru satuan mengakibatkan debit air tidak tercapai.
- Beban rencana pelat lantai dinyatakan dalam kN/m^2 atau kg/m^2 ; $1\text{ kN/m}^2 \approx 102\text{ kg/m}^2$.

➤ Rangkuman

- a. Besaran pokok berjumlah tujuh dan menjadi dasar bagi semua besaran turunan.
- b. Dimensi menyatakan susunan sebuah besaran atas besaran pokok; suku-suku yang disamakan harus berdimensi sama.
- c. Analisis dimensi dapat menemukan kesalahan bentuk persamaan, tetapi tidak dapat menemukan kesalahan koefisien.
- d. Angka penting dan ketidakpastian menjaga agar hasil hitungan tidak melebihi ketelitian alat ukurnya.
- e. Besaran vektor harus dijumlahkan menurut aturan vektor, dengan metode penguraian komponen sebagai cara yang paling aman.

➤ Latihan Mandiri

1. Tentukan dimensi dan satuan SI dari: (a) momen gaya; (b) massa jenis; (c) tekanan; (d) daya.
2. Konversikan: (a) 30 MPa ke kg/cm²; (b) 2,5 ton-gaya ke kN; (c) 72 km/jam ke m/s; (d) 8 inci ke mm.
3. Periksa secara dimensional apakah persamaan $s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ konsisten.
4. Sebuah pelat diukur panjangnya 2,45 m dan lebarnya 1,2 m. Hitung luasnya dan tuliskan hasilnya dengan jumlah angka penting yang benar.
5. Hasil pengukuran diameter silinder beton lima kali berturut-turut: 150,2; 149,8; 150,1; 150,0; dan 149,9 mm. Hitung nilai rata-rata dan ketidakpastiannya.

6. Dua gaya 250 N dan 350 N bekerja pada satu titik dengan sudut 120° antara keduanya. Hitung besar resultannya.
7. Sebuah kabel penopang menarik dengan gaya 5 kN pada arah 40° terhadap bidang mendatar. Hitung komponen mendatar dan komponen vertikalnya.

➤ **Tugas *Case Method* (Instrumen Penilaian Tugas, Bobot 3%)**

Kumpulkan satu dokumen teknis nyata dapat berupa gambar kerja, spesifikasi teknis, katalog alat berat, atau lembar data material. Identifikasi seluruh satuan yang digunakan di dalamnya, konversikan ke satuan SI, dan susun tabel padanannya. Berikan catatan pada satuan yang menurut Anda paling berisiko menimbulkan salah tafsir di lapangan, beserta usulan cara mencegahnya. Laporan maksimal 4 halaman.

BAB III

GERAK LURUS BERATURAN

➤ Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 3, bagian pertama)

Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:

- a. Menjelaskan pengertian kerangka acuan, posisi, jarak, dan perpindahan;
- b. Membedakan kelajuan dan kecepatan serta menghitung keduanya;
- c. Menerapkan persamaan gerak lurus beraturan dan menafsirkan grafiknya;
- d. Menerapkan konsep GLB pada persoalan pergerakan alat di lokasi proyek.

Peta konsep: Kerangka acuan → Posisi, jarak, perpindahan → Kelajuan dan kecepatan → Persamaan GLB → Grafik $s-t$ dan $v-t$.

➤ Kasus Pembuka

Pada pekerjaan galian sebuah proyek gedung, satu unit *dump truck* mengangkut tanah dari lokasi galian ke tempat pembuangan yang berjarak 6 km. Truk berjalan dengan kelajuan tetap rata-rata 30 km/jam saat bermuatan dan 45 km/jam saat kosong. Waktu memuat 8 menit dan waktu membongkar 4 menit. Volume galian yang harus dipindahkan 900 m³, sedangkan kapasitas bak truk 6 m³.

Pertanyaan pemicu: berapa lama satu siklus angkut? Berapa unit truk yang diperlukan agar pekerjaan selesai dalam 6 hari kerja dengan 7 jam kerja efektif per hari?

➤ Kerangka Acuan, Posisi, Jarak, dan Perpindahan

Gerak selalu bersifat relatif terhadap sesuatu. Seorang pekerja yang duduk di dalam *dump truck* yang melaju dikatakan bergerak bila diamati dari pos jaga, tetapi dikatakan diam bila diamati oleh pengemudinya. Titik atau benda yang dijadikan patokan pengamatan disebut kerangka acuan. Setiap penyelesaian soal gerak harus dimulai dengan menetapkan kerangka acuan dan arah positifnya secara tegas.

Posisi menyatakan kedudukan benda terhadap titik acuan, biasanya diberi lambang x . Jarak adalah panjang seluruh lintasan yang ditempuh, bersifat skalar dan selalu bertanda positif. Perpindahan adalah perubahan posisi, bersifat vektor, dan hanya bergantung pada posisi awal serta posisi akhir:

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

Perbedaan keduanya penting. Sebuah *wheel loader* yang bergerak 40 m ke timur lalu 40 m kembali ke barat menempuh jarak 80 m, tetapi perpindahannya nol. Dalam perhitungan produktivitas alat, yang dipakai adalah jarak tempuh; dalam perhitungan pergeseran titik struktur, yang dipakai adalah perpindahan.

➤ Kelajuan dan Kecepatan

Kelajuan adalah jarak dibagi waktu, bersifat skalar. **Kecepatan** adalah perpindahan dibagi waktu, bersifat vektor. Keduanya bersatuan m/s dalam SI.

Kelajuan rata-rata: $\bar{v} = s / t$

Kecepatan rata-rata: $\bar{v} = \Delta x / \Delta t$

Kecepatan sesaat adalah kecepatan pada saat tertentu, yang secara matematis merupakan turunan posisi terhadap waktu:

$$v = dx/dt$$

Pada gerak lurus beraturan, kecepatan sesaat sama dengan kecepatan rata-rata karena nilainya tidak berubah sepanjang waktu.

➤ Persamaan Gerak Lurus Beraturan

Gerak lurus beraturan (GLB) adalah gerak pada lintasan lurus dengan kecepatan tetap, sehingga percepatannya nol. Benda menempuh jarak yang sama untuk selang waktu yang sama. Persamaannya:

$$s = v \cdot t \quad \text{atau} \quad x = x_0 + v t$$

Dengan x_0 posisi awal, v kecepatan tetap, dan t waktu. Bila v bernilai negatif, benda bergerak berlawanan dengan arah positif yang telah ditetapkan.

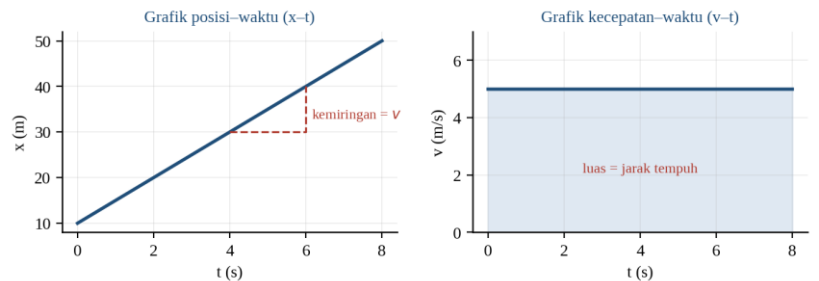
➤ Grafik Gerak Lurus Beraturan

Membaca grafik gerak sering lebih cepat daripada membaca rumusnya. Dua grafik pokok pada GLB adalah:

- a. Grafik posisi terhadap waktu ($x-t$) berupa garis lurus miring. Kemiringan (*gradien*) garis tersebut menyatakan kecepatan: semakin miring, semakin besar kecepatannya. Garis mendatar berarti benda diam.
- b. Grafik kecepatan terhadap waktu ($v-t$) berupa garis mendatar. Luas daerah di bawah grafik ini menyatakan jarak yang ditempuh. Untuk GLB, luas tersebut berbentuk persegi panjang, yaitu $v \times t$.

Tabel 5. Perbandingan Grafik X-T Dan V-T pada Gerak Lurus Beraturan

Ciri	Grafik $x-t$	Grafik $v-t$
Bentuk kurva	Garis lurus miring	Garis lurus mendatar
Arti kemiringan	Kecepatan benda	Percepatan (nol pada GLB)
Arti luas daerah	Tidak digunakan	Jarak yang ditempuh



Gambar 4. Grafik Posisi–Waktu dan Kecepatan–Waktu Pada Gerak Lurus Beraturan

Contoh Soal 3.1 — Kecepatan Rata-Rata Dua Tahap

Soal: Sebuah *dump truck* menempuh 6 km pertama dengan kelajuan 30 km/jam, kemudian 6 km berikutnya dengan kelajuan 45 km/jam. Tentukan kelajuan rata-rata sepanjang perjalanan.

Penyelesaian: Kelajuan rata-rata bukan rata-rata aritmetik dari kedua kelajuan, melainkan jarak total dibagi waktu total.

$t_1 = 6/30 = 0,200$ jam; $t_2 = 6/45 = 0,1333$ jam; $t_{\text{total}} = 0,3333$ jam.

$\bar{v} = 12 \text{ km} / 0,3333 \text{ jam} = 36 \text{ km/jam}$.

Catatan: rata-rata aritmetik memberikan 37,5 km/jam, yaitu lebih besar dari nilai sebenarnya. Kesalahan seperti ini akan melebihi-lebihkan produktivitas alat dalam perencanaan pekerjaan tanah.

Contoh Soal 3.2 — Menyelesaikan Kasus Pembuka

Soal: Hitung waktu siklus dan jumlah truk yang diperlukan sesuai data Kasus Pembuka.

Penyelesaian: Waktu angkut bermuatan = $6/30$ jam = 12 menit. Waktu kembali kosong = $6/45$ jam = 8 menit.

Waktu muat 8 menit dan bongkar 4 menit.

Waktu siklus $CT = 12 + 8 + 8 + 4 = 32$ menit.

Jumlah siklus per truk per hari = $(7 \times 60)/32 = 13,1 \rightarrow$ dibulatkan ke bawah menjadi 13 siklus.

Volume per truk per hari = $13 \times 6 \text{ m}^3 = 78 \text{ m}^3$.

Volume yang harus dipindahkan per hari = $900/6 = 150 \text{ m}^3$.

rambat yang rendah menandakan adanya rongga atau keretakan di dalam beton.

- d. Kecepatan aliran pada saluran. Debit dihitung sebagai $Q = A \times v$, di mana v diperoleh dari waktu tempuh pelampung menempuh panjang saluran tertentu.

➤ Rangkuman

- Gerak bersifat relatif sehingga kerangka acuan harus ditetapkan lebih dahulu.
- Jarak bersifat skalar dan selalu positif; perpindahan bersifat vektor dan dapat bernilai nol.
- Pada GLB kecepatan tetap dan percepatan nol, dengan persamaan pokok $s = v t$.
- Kemiringan grafik $x-t$ menyatakan kecepatan; luas di bawah grafik $v-t$ menyatakan jarak.
- Kelajuan rata-rata dihitung dari jarak total dibagi waktu total, bukan dari rata-rata aritmetik kelajuan.

➤ Latihan Mandiri

- Seorang surveyor berjalan 120 m ke utara, lalu 50 m ke selatan. Tentukan jarak dan perpindahannya.
- Sebuah *concrete mixer truck* menempuh jarak 18 km ke lokasi proyek dalam 30 menit. Hitung kelajuan rata-ratanya dalam km/jam dan m/s.
- Gambarkan grafik $x-t$ dan $v-t$ untuk benda yang bergerak dengan kecepatan tetap 5 m/s dari posisi awal 10 m selama 8 sekon.

4. Uji UPV pada dinding beton setebal 250 mm menghasilkan waktu tempuh gelombang 62 μ s. Hitung kecepatan rambatnya dalam m/s, lalu bandingkan dengan nilai beton bermutu baik yang berada di kisaran 4000–4500 m/s.
5. Sebuah truk menempuh sepertiga perjalanan dengan kelajuan 20 km/jam dan dua pertiga sisanya dengan 60 km/jam. Hitung kelajuan rata-rata seluruh perjalanan.
6. Waktu siklus *excavator* memuat satu bak truk adalah 6 menit. Jika tersedia satu *excavator* dan tiga truk dengan waktu siklus masing-masing 32 menit, apakah *excavator* akan menunggu truk atau sebaliknya? Jelaskan dengan perhitungan.

➤ Tugas Case Method

Amati satu pekerjaan pengangkutan material di sekitar kampus atau di proyek terdekat (dapat berupa pengangkutan tanah, batu, atau beton siap pakai). Catat jarak tempuh, kelajuan perkiraan, serta waktu muat dan bongkar. Hitung waktu siklus dan produktivitas hariannya, lalu bandingkan dengan pengamatan langsung jumlah ritase yang terjadi. Jelaskan penyebab selisih antara hitungan dan kenyataan.

BAB IV

GERAK LURUS BERUBAH BERATURAN

➤ Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 3, bagian kedua)

Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:

- a. Menjelaskan pengertian percepatan dan perlambatan;
- b. Menerapkan ketiga persamaan GLBB pada berbagai persoalan gerak;
- c. Menyelesaikan persoalan gerak jatuh bebas dan gerak vertikal;
- d. Membedakan secara tegas ciri GLB dan GLBB;
- e. Menghubungkan konsep GLBB dengan aspek keselamatan kerja di lokasi proyek.

Peta konsep: Percepatan → Tiga persamaan GLBB → Grafik GLBB → Gerak jatuh bebas dan gerak vertikal → Aplikasi K3.

➤ Kasus Pembuka

Sebuah kunci pas terjatuh dari tangan pekerja yang berada pada lantai ke-8 sebuah gedung, tepatnya dari ketinggian 24 m di atas permukaan tanah. Di bawahnya terdapat area lalu-lalang pekerja yang tidak diberi jaring pelindung.

Pertanyaan pemicu: berapa lama benda tersebut sampai ke tanah, dan berapa kecepatannya saat membentur tanah? Apakah helm keselamatan mampu melindungi pekerja dari benturan tersebut? Mengapa pemasangan jaring pelindung dan larangan lalu lintas di bawah area kerja bersifat wajib?

➤ Percepatan dan Perlambatan

Percepatan adalah laju perubahan kecepatan terhadap waktu:

$$\bar{a} = \Delta v / \Delta t = (v - v_0) / t \quad \text{dan} \quad a = dv/dt$$

Percepatan bersifat vektor dengan satuan m/s^2 . Bila percepatan searah dengan kecepatan, benda dipercepat; bila berlawanan arah, benda diperlambat. Istilah "perlambatan" sesungguhnya hanyalah percepatan yang bertanda berlawanan terhadap kecepatan; tidak ada besaran baru di sini.

Satu kekeliruan yang sering terjadi adalah menganggap benda yang percepatannya nol pasti diam. Yang benar: benda yang percepatannya nol bergerak dengan kecepatan tetap, dan kecepatan tetap itu boleh saja bukan nol. Sebaliknya, benda yang kecepatannya sesaat nol — misalnya bola pada titik tertinggi lemparan vertikal — tetap memiliki percepatan sebesar g .

➤ Persamaan Gerak Lurus Berubah Beraturan

Gerak lurus berubah beraturan (GLBB) adalah gerak pada lintasan lurus dengan percepatan tetap. Tiga persamaan pokoknya:

$$(1) \ v = v_0 + a \ t$$

$$(2) \ s = v_0 \ t + \frac{1}{2} a \ t^2$$

$$(3) \ v^2 = v_0^2 + 2 \ a \ s$$

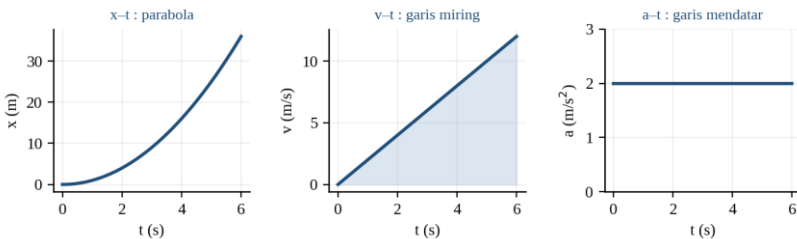
Ketiga persamaan tersebut tidak berdiri sendiri; persamaan (3) diperoleh dengan menghilangkan t dari persamaan (1) dan (2). Pemilihan persamaan bergantung pada besaran yang diketahui dan yang dicari, sebagaimana diringkas pada tabel berikut.

Tabel 6. Panduan Pemilihan Persamaan GLBB

yang diketahui	yang Dicari	Persamaan yang dipakai
v_0, a, t	v	Persamaan (1)
v_0, a, t	s	Persamaan (2)
v_0, a, s	v	Persamaan (3)
v_0, v, t	s	$s = \frac{1}{2}(v_0 + v)t$
v_0, v, a	t	Persamaan (1) dibalik

Grafik GLBB

- Grafik $x-t$ berbentuk parabola, karena posisi bergantung pada t^2 .
- Grafik $v-t$ berbentuk garis lurus miring; kemiringannya menyatakan percepatan dan luas di bawahnya menyatakan jarak tempuh.
- Grafik $a-t$ berbentuk garis mendatar, karena percepatannya tetap.



Gambar 6. Ketiga Grafik Gerak Lurus Berubah Beraturan

Contoh Soal 4.1 — Pengereman Alat Berat

Soal: Sebuah *dump truck* bermuatan bergerak dengan kelajuan 36 km/jam. Pengemudi mengerem dan truk berhenti setelah menempuh 20 m. Hitung perlambatannya dan waktu yang diperlukan sampai berhenti.

Penyelesaian: $v_0 = 36 \text{ km/jam} = 10 \text{ m/s}$; $v = 0$; $s = 20 \text{ m}$.
Gunakan persamaan (3): $0 = 10^2 + 2a(20) \rightarrow a = -100/40 = -2,5 \text{ m/s}^2$.

Gunakan persamaan (1): $0 = 10 + (-2,5)t \rightarrow t = 4 \text{ sekon}$.
Tafsiran: tanda negatif menunjukkan arah percepatan berlawanan dengan gerak. Jarak berhenti berbanding

lurus dengan kuadrat kecepatan awal; bila kelajuan digandakan menjadi 72 km/jam, jarak berhenti menjadi empat kali, yaitu 80 m. Inilah alasan pembatasan kecepatan pada jalan kerja proyek.

➤ Gerak Jatuh Bebas dan Gerak Vertikal

Gerak jatuh bebas adalah GLBB dengan percepatan sebesar percepatan gravitasi g dan kecepatan awal nol, dengan mengabaikan hambatan udara. Persamaannya diperoleh dengan mengganti a dengan g dan s dengan h :

$$v = g t \quad h = \frac{1}{2} g t^2 \quad v^2 = 2 g h$$

Untuk gerak vertikal ke atas, arah g berlawanan dengan arah gerak sehingga bertanda negatif. Benda mencapai titik tertinggi ketika $v = 0$, dengan tinggi maksimum dan waktu naik:

$$h_{\text{maks}} = v_0^2 / (2g) \quad t_{\text{naik}} = v_0 / g$$

Contoh Soal 4.2 — Menyelesaikan Kasus Pembuka

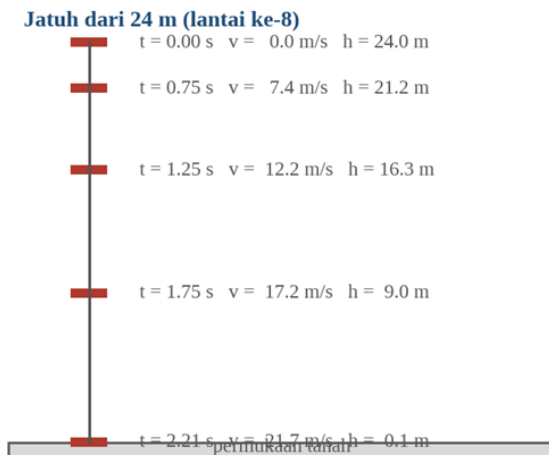
Soal: Kunci pas jatuh dari ketinggian 24 m. Hitung waktu jatuh dan kecepatan saat mencapai tanah. Ambil $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

Penyelesaian: Dari $h = \frac{1}{2} g t^2$: $24 = \frac{1}{2}(9,8)t^2 \rightarrow t^2 = 4,898 \rightarrow t = 2,21 \text{ sekon}$.

Dari $v^2 = 2gh$: $v^2 = 2(9,8)(24) = 470,4 \rightarrow v = 21,7 \text{ m/s} \approx 78 \text{ km/jam}$.

Tafsiran keselamatan: benda bermassa 0,5 kg yang bergerak 21,7 m/s memiliki energi kinetik $E_k = \frac{1}{2}(0,5)(21,7^2) \approx 118 \text{ J}$. Helm keselamatan standar diuji terhadap benturan pada tingkat energi yang jauh lebih rendah, umumnya di kisaran beberapa puluh joule untuk benda tumpul jatuh dari ketinggian terbatas. Karena itu, helm tidak dapat diandalkan sebagai pelindung terhadap benda yang jatuh dari lantai ke-8.

Kesimpulan: pengendalian bahaya harus dilakukan pada sumbernya, yaitu melalui jaring pelindung (*safety net*), *toe board* pada perancah, pengikatan alat kerja, dan penutupan area di bawah zona kerja. Alat pelindung diri merupakan lapisan pengaman terakhir, bukan yang pertama.



Gambar 7. Kedudukan dan Kecepatan Benda Jatuh dari Ketinggian 24 m

➤ Perbandingan GLB dan GLBB

Tabel 7. Perbandingan Ciri GLB dan GLBB

Aspek	GLB	GLBB
Kecepatan	Tetap	Berubah beraturan
Percepatan	Nol	Tetap dan tidak nol
Grafik $x-t$	Garis lurus miring	Parabola
Grafik $v-t$	Garis mendatar	Garis lurus miring
Persamaan jarak	$s = v t$	$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$
Contoh	Truk pada kelajuan tetap	Benda jatuh, truk mengerem

➤ Aplikasi dalam Teknik Sipil

- Keselamatan kerja pada ketinggian. Perhitungan kecepatan benda jatuh menjadi dasar penentuan tinggi *toe board*, kerapatan jaring pelindung, dan lebar zona larangan di bawah area kerja.
- Jarak pandang henti jalan. Perencanaan geometri jalan menghitung jarak henti sebagai jumlah jarak reaksi pengemudi (GLB) dan jarak pengereman (GLBB).
- Uji pantul dan uji tumbuk. Alat *Standard Penetration Test* menjatuhkan penumbuk 63,5 kg dari ketinggian 76

cm; energi tumbukannya dihitung dengan prinsip jatuh bebas.

- d. Sedimentasi partikel. Butiran yang jatuh dalam air mengalami percepatan awal sebelum mencapai kecepatan jatuh tetap, konsep yang dipakai dalam perencanaan bak pengendap.

➤ Rangkuman

- GLBB adalah gerak lurus dengan percepatan tetap, diatur oleh tiga persamaan pokok yang saling terkait.
- Kecepatan sesaat nol tidak berarti percepatan nol, sebagaimana pada benda di titik tertinggi lemparan vertikal.
- Gerak jatuh bebas merupakan GLBB dengan $v_0 = 0$ dan $a = g$.
- Jarak pengereman berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan awal.
- Analisis benda jatuh menunjukkan bahwa pengendalian bahaya pada sumbernya lebih efektif daripada mengandalkan alat pelindung diri.

➤ Latihan Mandiri

- Sebuah benda bergerak dari keadaan diam dengan percepatan 2 m/s^2 . Hitung kecepatan dan jarak tempuhnya setelah 6 sekon.
- Sebuah truk melaju 54 km/jam lalu diperlambat 3 m/s^2 . Hitung jarak yang ditempuh sampai berhenti.
- Batu dilepaskan dari perancah setinggi 12 m . Hitung waktu jatuh dan kecepatan saat menyentuh tanah.

4. Sebuah benda dilempar vertikal ke atas dengan kecepatan awal 20 m/s. Hitung tinggi maksimum dan waktu total sampai kembali ke titik lempar.
5. Alat *SPT* menjatuhkan penumbuk 63,5 kg dari ketinggian 0,76 m. Hitung kecepatan penumbuk saat menyentuh kepala batang dan energi yang dihasilkan tiap tumbukan.
6. Bandingkan jarak pengereman pada kelajuan 30 km/jam dan 60 km/jam untuk perlambatan yang sama 3 m/s^2 . Nyatakan perbandingannya dan tarik kesimpulan untuk aturan kecepatan di jalan kerja proyek.

➤ **Tugas Case Method**

Tinjau satu lokasi pekerjaan pada ketinggian di sekitar Anda, misalnya pekerjaan perancah, pemasangan plafon, atau pekerjaan pengecatan gedung. Hitung kecepatan dan energi benturan sebuah alat kerja bila terjatuh dari ketinggian tersebut. Bandingkan hasilnya dengan kemampuan lindung helm keselamatan, lalu susun rekomendasi pengendalian bahaya yang lebih tepat. Sertakan sketsa denah zona larangan yang Anda usulkan.

BAB V

HUKUM-HUKUM NEWTON

TENTANG GERAK

➤ Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 4 — bobot 7%)

Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:

- a. Menjelaskan konsep gaya, massa, dan inersia;
- b. Menyatakan dan menerapkan Hukum I, II, dan III Newton;
- c. Menghitung gaya-gaya yang bekerja pada suatu benda, Meliputi gaya berat, gaya normal, tegangan tali, dan gaya gesek;
- d. Menghitung reaksi tumpuan sederhana pada elemen struktur.

Peta konsep: Gaya dan inersia → Hukum I (kesetimbangan) → Hukum II ($\Sigma F = ma$) → Hukum III (aksi-reaksi) → Jenis-jenis gaya → Reaksi tumpuan.

➤ Kasus Pembuka

Sebuah *tower crane* mengangkat bak beton bermassa 1.500 kg. Kabel pengangkat yang digunakan memiliki beban kerja aman 18 kN. Operator memulai pengangkatan dengan percepatan $1,2 \text{ m/s}^2$ agar pekerjaan lebih cepat, kemudian pada akhir pengangkatan menghentikan bak dengan perlambatan $1,5 \text{ m/s}^2$.

Pertanyaan pemicu: berapa tegangan pada kabel saat bak diam, saat dipercepat naik, dan saat diperlambat? Apakah kabel tersebut masih aman digunakan? Mengapa pengangkatan yang terlalu cepat justru berbahaya walaupun massa bebannya tidak berubah?

➤ Gaya, Massa, dan Inersia

Gaya adalah tarikan atau dorongan yang dapat mengubah keadaan gerak, arah gerak, atau bentuk suatu benda. Gaya bersifat vektor dengan satuan newton (N), yaitu gaya yang menghasilkan percepatan 1 m/s^2 pada benda bermassa 1 kg .

Massa adalah ukuran banyaknya materi dan sekaligus ukuran inersia, yaitu kecenderungan benda mempertahankan keadaan geraknya. Massa bersifat skalar dan tidak berubah di mana pun benda berada. Berat berbeda dari massa: berat adalah gaya gravitasi yang bekerja pada benda, bersifat vektor, dan nilainya bergantung pada percepatan gravitasi setempat.

$$w = m g$$

Kekeliruan yang lazim di lapangan adalah menyebut "berat 50 kg ", padahal kilogram merupakan satuan massa. Berat benda bermassa 50 kg adalah $50 \times 9,8 = 490 \text{ N}$, atau kira-kira $0,49 \text{ kN}$.

➤ Hukum I Newton: Hukum Kelembaman

Hukum I Newton menyatakan bahwa benda akan tetap diam atau tetap bergerak lurus beraturan apabila resultan gaya yang bekerja padanya sama dengan nol.

$\Sigma F = 0 \rightarrow$ benda diam atau bergerak lurus beraturan

Bagi teknik sipil, hukum inilah yang paling sering digunakan, sebab bangunan dirancang justru agar tidak bergerak. Seluruh perhitungan statika struktur pada dasarnya merupakan penerapan Hukum I Newton dalam bentuk:

$$\Sigma F_x = 0 \quad \Sigma F_y = 0 \quad \Sigma M = 0$$

Dua persamaan pertama menjamin benda tidak bergeser, sedangkan persamaan ketiga yang akan dibahas pada Bab 11 menjamin benda tidak berputar.

➤ Hukum II Newton

Hukum II Newton menyatakan bahwa percepatan sebuah benda berbanding lurus dengan resultan gaya yang bekerja padanya dan berbanding balik dengan massanya.

$$\Sigma F = m a \quad \text{atau} \quad a = \Sigma F / m$$

Arah percepatan selalu searah dengan arah resultan gaya. Dalam penyelesaian soal, hukum ini diterapkan pada setiap arah secara terpisah: $\Sigma F_x = m a_x$ dan $\Sigma F_y = m a_y$.

Contoh Soal 5.1 — Menyelesaikan Kasus Pembuka

Soal: Bak beton bermassa 1.500 kg diangkat *tower crane*. Hitung tegangan kabel pada tiga keadaan: (a) bak diam atau bergerak dengan kecepatan tetap; (b) dipercepat naik $1,2 \text{ m/s}^2$; (c) diperlambat $1,5 \text{ m/s}^2$ saat masih bergerak naik. Ambil $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

Penyelesaian: Tetapkan arah ke atas sebagai positif. Gaya yang bekerja: tegangan kabel T ke atas dan berat $w = mg = 1.500 \times 9,8 = 14.700$ N ke bawah.

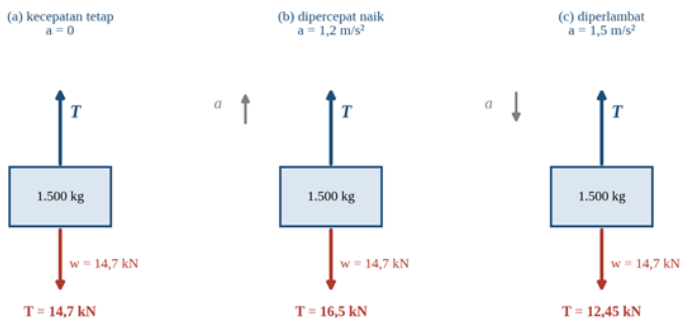
Keadaan tetap. $\Sigma F = 0 \rightarrow T - w = 0 \rightarrow T = 14,7$ kN.

Dipercepat naik. $\Sigma F = ma \rightarrow T - w = ma \rightarrow T = 1.500(9,8 + 1,2) = 16,5$ kN.

(Diperlambat saat naik. Percepatan berarah ke bawah $\rightarrow T = 1.500(9,8 - 1,5) = 12,45$ kN.

Analisis keamanan: beban kerja aman kabel 18 kN. Tegangan terbesar 16,5 kN masih di bawah 18 kN, tetapi angka keamanan tersisa hanya $18/16,5 = 1,09$. Bila operator mempercepat $2,5 \text{ m/s}^2$, tegangan menjadi $1.500(12,3) = 18,45$ kN dan melampaui batas.

Pelajaran: massa beban tidak berubah, tetapi gaya pada kabel berubah mengikuti percepatan. Inilah alasan prosedur pengangkatan mensyaratkan gerakan halus dan larangan menyentak (*shock loading*).



Gambar 8. Diagram Benda Bebas Bak Beton pada Tiga Keadaan Percepatan

➤ Hukum III Newton: Aksi dan Reaksi

Hukum III Newton menyatakan bahwa apabila benda A mengerjakan gaya pada benda B, maka benda B mengerjakan gaya pada benda A yang sama besar, berlawanan arah, dan terletak pada satu garis kerja.

$$F(\text{A pada B}) = - F(\text{B pada A})$$

Dua hal harus diperhatikan. Pertama, pasangan aksi–reaksi selalu bekerja pada dua benda berbeda, sehingga tidak pernah saling menghapus pada satu benda yang sama. Kedua, gaya normal dan gaya berat pada benda di atas meja bukan pasangan aksi–reaksi, karena keduanya bekerja pada benda yang sama.

Dalam teknik sipil, Hukum III Newton adalah dasar konsep reaksi tumpuan. Kolom menekan pondasi, dan pondasi menekan kolom kembali dengan gaya sama besar. Tanah menerima tekanan dari pondasi dan memberikan daya dukung sebagai reaksinya. Bila reaksi tanah lebih kecil daripada tekanan pondasi, terjadi penurunan.

➤ Jenis-Jenis Gaya dalam Sistem Mekanik

Gaya Berat

Gaya berat $w = mg$ selalu berarah vertikal ke bawah menuju pusat bumi, bekerja pada titik berat benda. Dalam perencanaan struktur, gaya berat sendiri elemen (beban mati) dihitung sebagai berat volume bahan dikalikan volumenya; beton bertulang lazim diambil 24 kN/m^3 dan baja $78,5 \text{ kN/m}^3$.

Gaya Normal

Gaya normal N adalah gaya yang dikerjakan permukaan pada benda, selalu tegak lurus permukaan. Pada bidang datar tanpa gaya vertikal lain, $N = mg$. Pada bidang miring bersudut θ , $N = mg \cos \theta$.

Tegangan Tali

Tegangan tali T adalah gaya tarik sepanjang tali, kabel, atau batang tarik. Pada tali ideal yang tak bermassa dan melalui katrol tanpa gesekan, tegangan bernilai sama di seluruh bagian tali.

Gaya Gesek

Gaya gesek muncul pada permukaan sentuh dua benda dan berarah melawan kecenderungan gerak relatif. Terdapat dua jenis:

$$f_s(\text{maks}) = \mu_s N \qquad f_k = \mu_k N$$

Dengan μ_s koefisien gesek statis dan μ_k koefisien gesek kinetis, dan berlaku $\mu_s > \mu_k$. Gaya gesek statis bersifat menyesuaikan diri: nilainya sama dengan gaya pendorong sampai batas maksimumnya terlampaui.

Contoh Soal 5.2 — Gaya Gesek pada Pergeseran Material

Soal: Peti berisi peralatan bermassa 80 kg diletakkan di atas lantai beton dengan $\mu_s = 0,45$ dan $\mu_k = 0,35$. Tentukan:

- Gaya mendatar minimum untuk mulai menggeser peti;

b. Percepatan peti apabila gaya dorong 400 N diberikan.
Penyelesaian: $N = mg = 80 \times 9,8 = 784 \text{ N}$.

$f_s(\text{maks}) = 0,45 \times 784 = 352,8 \text{ N}$. Gaya dorong harus melampaui nilai ini.

Setelah bergerak, $f_k = 0,35 \times 784 = 274,4 \text{ N}$. Maka $\Sigma F = 400 - 274,4 = 125,6 \text{ N}$, sehingga $a = 125,6/80 = 1,57 \text{ m/s}^2$.

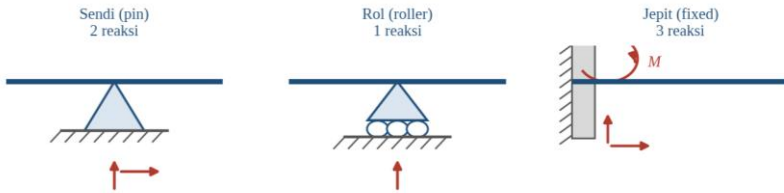
Catatan: peti yang sudah bergerak lebih mudah dipertahankan geraknya karena $\mu_k < \mu_s$. Inilah sebabnya mendorong benda berat terasa paling berat pada saat awal.

➤ Aplikasi: Reaksi Tumpuan Sederhana

Tumpuan pada struktur diklasifikasikan berdasarkan jumlah reaksi yang mampu diberikannya.

Tabel 8. Jenis Tumpuan dan Reaksi yang Mampu diberikannya

Jenis Tumpuan	Reaksi yang Diberikan	Jumlah	Contoh Nyata
Sendi (*pin*)	Reaksi vertikal dan horizontal	2	Perletakan rangka baja
Rol (*roller*)	Reaksi tegak lurus bidang tumpu	1	Perletakan jembatan pada landasan karet
Jepit (*fixed*)	Reaksi vertikal, horizontal, dan momen	3	Kolom terjepit pada pondasi



Gambar 9. Lambang dan Reaksi Ketiga Jenis Tumpuan

Contoh Soal 5.3 — Reaksi Tumpuan Balok Sederhana

Soal: Balok sederhana bentang 6 m dengan tumpuan sendi di A dan rol di B menerima beban titik 30 kN pada jarak 2 m dari A. Hitung reaksi di A dan B.

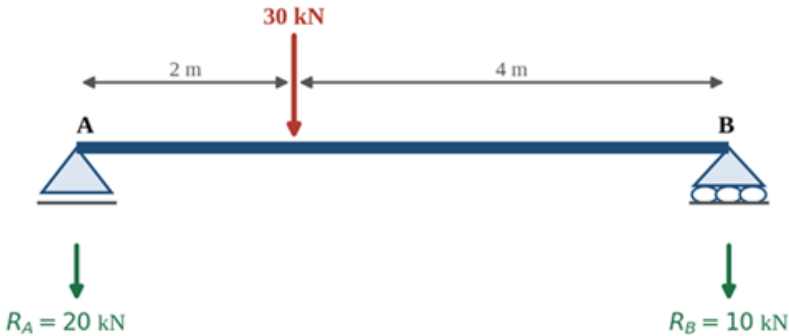
Penyelesaian: Gunakan syarat kesetimbangan. Ambil momen terhadap A (arah putar searah jarum jam positif):

$$\Sigma M_A = 0 \rightarrow 30(2) - R_B(6) = 0 \rightarrow R_B = 60/6 = 10 \text{ kN.}$$

$$\Sigma F_y = 0 \rightarrow R_A + R_B = 30 \rightarrow R_A = 30 - 10 = 20 \text{ kN.}$$

Pemeriksaan: $\Sigma M_B = R_A(6) - 30(4) = 120 - 120 = 0$. Hasil terbukti benar.

Tafsiran: tumpuan yang lebih dekat pada beban menerima reaksi lebih besar. Perhitungan sederhana ini merupakan langkah pertama dari seluruh analisis struktur, dan akan diperdalam pada mata kuliah Mekanika Rekayasa.



Gambar 10. Reaksi Tumpuan Balok Sederhana pada Contoh Soal 5.

➤ Rangkuman

- Massa adalah ukuran inersia dan bersifat tetap; berat adalah gaya gravitasi dan bergantung pada g .
- Hukum I Newton ($\Sigma F = 0$) merupakan dasar seluruh perhitungan statika struktur.
- Hukum II Newton ($\Sigma F = ma$) menunjukkan bahwa percepatan mengubah besar gaya pada kabel dan sambungan meskipun massa beban tetap.
- Hukum III Newton menjelaskan reaksi tumpuan; pasangan aksi–reaksi selalu bekerja pada dua benda berbeda.
- Gaya gesek statis maksimum selalu lebih besar daripada gaya gesek kinetis.

➤ Latihan Mandiri

- Sebuah benda bermassa 40 kg berada di atas lantai datar. Hitung berat dan gaya normalnya.

2. Lift bermassa total 800 kg bergerak naik dengan percepatan $1,5 \text{ m/s}^2$. Hitung tegangan kabel penggantungnya.
3. Lift yang sama bergerak turun dengan percepatan $1,5 \text{ m/s}^2$. Hitung tegangan kabelnya dan bandingkan dengan hasil soal sebelumnya.
4. Balok bermassa 25 kg berada pada bidang miring 30° . Hitung gaya normal dan komponen berat sejajar bidang.
5. Peti 120 kg didorong dengan gaya mendatar 500 N pada lantai dengan $\mu_k = 0,30$. Hitung percepatannya.
6. Balok sederhana bentang 8 m menerima dua beban titik: 20 kN pada 2 m dari A dan 40 kN pada 5 m dari A. Hitung reaksi kedua tumpuannya.
7. Jelaskan mengapa gaya berat dan gaya normal pada benda yang diam di atas meja bukan merupakan pasangan aksi–reaksi.

➤ **Tugas Case Method (instrumen penilaian Tugas, bobot 3%)**

Pilih satu pekerjaan pengangkatan beban dengan alat berat (*tower crane*, *mobile crane*, atau *hoist*) dari sumber lapangan, video, atau dokumen proyek. Identifikasi massa beban, alat yang digunakan, dan kapasitas kabel atau pengait. Hitung tegangan kabel pada keadaan diam, dipercepat, dan diperlambat dengan beberapa nilai percepatan. Tentukan percepatan maksimum yang masih aman, lalu susun tiga butir prosedur operasi yang Anda rekomendasikan berdasarkan hasil perhitungan tersebut.

BAB VI

APLIKASI HUKUM NEWTON DAN DIAGRAM BENDA BEBAS

➤ Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 5)

Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:

- a. Menyusun diagram benda bebas untuk berbagai sistem mekanik;
- b. Menyelesaikan persoalan benda dalam keadaan setimbang statis;
- c. Menyelesaikan persoalan benda dalam keadaan dinamik;
- d. Menganalisis sistem katrol, bidang datar, dan bidang miring;
- e. Menerapkan analisis gaya pada perancah dan sistem pengangkatan.

Peta konsep: Diagram benda bebas → Kesetimbangan statis → Keadaan dinamik → Sistem katrol dan bidang miring → Aplikasi perancah.

➤ Kasus Pembuka

Sebuah rambu lalu lintas proyek bermassa 30 kg digantung pada titik pertemuan dua kabel yang masing-masing membentuk sudut 35° terhadap bidang mendatar, satu ke kiri dan satu ke kanan. Pelaksana berpendapat bahwa karena bebannya hanya 30 kg, kabel berkekuatan 200 N sudah lebih dari cukup untuk masing-masing sisi.

Pertanyaan pemicu: apakah pendapat tersebut benar? Apa yang terjadi pada tegangan kabel apabila sudutnya dibuat semakin mendatar agar rambu terlihat lebih rapi?

➤ Diagram Benda Bebas

Diagram benda bebas (*free body diagram*, DBB) adalah sketsa yang menampilkan satu benda terpisah dari lingkungannya, lengkap dengan semua gaya luar yang bekerja padanya. DBB merupakan alat kerja paling penting dalam mekanika: sebagian besar kesalahan dalam menyelesaikan soal gaya berakar pada DBB yang tidak lengkap atau salah.

Langkah Penyusunan DBB

- Tentukan benda atau bagian sistem yang akan ditinjau, lalu "lepaskan" ia dari benda lain.
- Gambarkan benda tersebut sebagai bentuk sederhana, misalnya kotak atau titik.
- Gambarkan semua gaya luar yang bekerja pada benda: berat, gaya normal, tegangan tali, gaya gesek, gaya dorong, dan reaksi tumpuan.
- Jangan menggambarkan gaya yang dikerjakan **oleh** benda tersebut kepada benda lain.
- Tetapkan sumbu koordinat. Pada bidang miring, sumbu dimiringkan sejajar bidang agar perhitungan lebih sederhana.
- Uraikan setiap gaya menjadi komponen pada sumbu yang telah ditetapkan.

Kesalahan yang Sering Terjadi

- Lupa menggambarkan gaya berat, terutama pada soal bidang miring.
- Menggambarkan gaya reaksi yang sebenarnya bekerja pada benda lain.
- Menganggap gaya normal selalu sama dengan mg , padahal pada bidang miring $N = mg \cos \theta$.
- Menambahkan "gaya sentrifugal" atau gaya khayal lain pada kerangka acuan diam.

➤ Benda dalam Keadaan Setimbang Statis

Benda dikatakan setimbang statis apabila ia diam dan resultan gaya padanya nol. Untuk gaya-gaya sebidang yang bekerja pada satu titik, syaratnya:

$$\Sigma F_x = 0 \quad \Sigma F_y = 0$$

Contoh Soal 6.1 — Menyelesaikan Kasus Pembuka

Soal: Rambu bermassa 30 kg digantung pada titik pertemuan dua kabel bersudut 35° terhadap bidang mendatar. Hitung tegangan setiap kabel, lalu hitung ulang untuk sudut 15° dan 10° .

Penyelesaian: Berat rambu $w = 30 \times 9,8 = 294$ N. Karena kedua kabel simetris, tegangannya sama besar, sebut T .

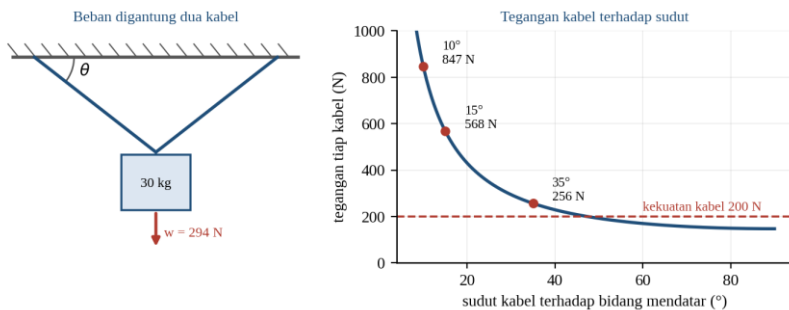
Arah vertikal: $2T \sin 35^\circ = 294 \rightarrow T = 294 / (2 \times 0,5736) = 256,3$ N.

Untuk $\theta = 15^\circ$: $T = 294 / (2 \times 0,2588) = 568,0$ N.

Untuk $\theta = 10^\circ$: $T = 294 / (2 \times 0,1736) = 846,8$ N.

Kesimpulan: pendapat pelaksana salah bahkan pada sudut 35° , sebab tegangan 256 N sudah melampaui kekuatan kabel 200 N. Semakin mendatar kabel, semakin besar tegangan yang timbul, dan pada sudut mendekati nol tegangan menuju tak terhingga.

Pelajaran praktis: kabel penggantung, kabel *bracing*, dan sling pengangkat tidak boleh dipasang terlalu mendatar. Dalam pekerjaan *rigging*, sudut sling minimum 45° terhadap bidang mendatar merupakan pedoman yang lazim dipakai.



Gambar 11. Tegangan Kabel Meningkat Tajam Ketika Sudut Pemasangan diperkecil

➤ Benda dalam Keadaan Dinamik

Apabila resultan gaya tidak nol, benda mengalami percepatan dan berlaku $\Sigma F = ma$ pada masing-masing arah. Prosedur penyelesaiannya sama seperti pada keadaan statis, hanya ruas kanan persamaannya tidak lagi nol.

Contoh Soal 6.2 — Dua Benda Terhubung Tali

Soal: Balok A bermassa 12 kg di atas meja licin dihubungkan dengan tali melalui katrol tanpa gesekan ke balok B bermassa 8 kg yang tergantung bebas. Hitung percepatan sistem dan tegangan tali. Ambil $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

Penyelesaian: Susun DBB untuk masing-masing balok.

Balok A (arah mendatar): $T = m_A a$.

Balok B (arah vertikal): $m_B g - T = m_B a$.

Jumlahkan kedua persamaan: $m_B g = (m_A + m_B)a \rightarrow a = (8 \times 9,8)/(12 + 8) = 78,4/20 = 3,92 \text{ m/s}^2$.

Tegangan tali: $T = 12 \times 3,92 = 47,04 \text{ N}$.

Pemeriksaan: T harus lebih kecil daripada berat B (78,4 N), sebab bila sama besar B tidak akan bergerak. Hasil 47,04 N memenuhi syarat ini.

➤ Sistem Katrol, Bidang Datar, dan Bidang Miring

Sistem Katrol

Katrol tetap tidak mengurangi besar gaya, hanya mengubah arahnya. Katrol bergerak dapat mengurangi gaya angkat menjadi setengahnya, dengan konsekuensi panjang tali yang harus ditarik menjadi dua kali. Prinsip inilah yang dipakai pada *chain block* dan sistem *reeving* pada kran.

Fangkat = w / n (n = jumlah tali penopang beban)

Bidang Miring

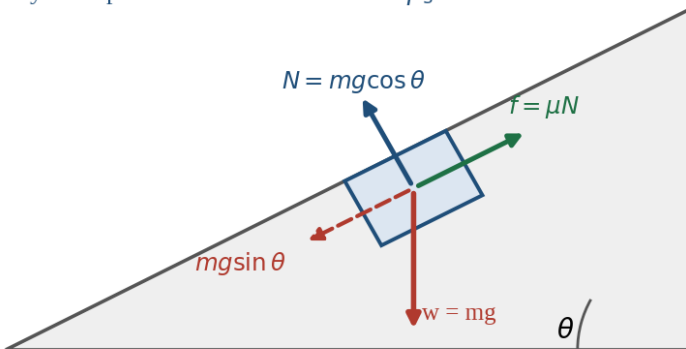
Pada bidang miring bersudut θ , berat benda diuraikan menjadi komponen sejajar bidang dan tegak lurus bidang:

$$w_{\parallel} = mg \sin \theta \quad w_{\perp} = mg \cos \theta \quad N = mg \cos \theta$$

Benda akan mulai meluncur ketika komponen sejajar bidang melampaui gaya gesek statis maksimum. Sudut pada saat tepat akan meluncur disebut sudut gesek atau *angle of repose*:

$$mg \sin \theta = \mu_s mg \cos \theta \rightarrow \tan \theta = \mu_s$$

Syarat tepat akan meluncur: $\tan \theta = \mu_s$



Gambar 12. Diagram Bebas Benda pada Bidang Miring

Konsep ini dipakai untuk menentukan kemiringan aman timbunan tanah, kemiringan tumpukan material, dan kemiringan talud galian.

Contoh Soal 6.3 — Sudut Lereng Aman Timbunan

Soal: Material timbunan pasir memiliki koefisien gesek internal setara $\mu = 0,58$. Tentukan sudut kemiringan maksimum tumpukan agar material tidak meluncur, dan hitung kemiringan yang dianjurkan bila digunakan angka keamanan 1,5.

Penyelesaian: $\tan \theta = 0,58 \rightarrow \theta = 30,1^\circ$.

Dengan angka keamanan 1,5, gesekan yang dimanfaatkan hanya $0,58/1,5 = 0,387$, sehingga $\tan \theta_{rencana} = 0,387 \rightarrow \theta_{rencana} = 21,2^\circ$, kira-kira setara kemiringan 1 : 2,6 (vertikal : horizontal).

Tafsiran: dalam praktik lapangan, talud pasir kering lazim dibuat 1 : 2 sampai 1 : 3. Hasil hitungan ini sejalan dengan kebiasaan tersebut, dan menunjukkan bahwa aturan praktis di lapangan sesungguhnya berpijak pada prinsip fisika.

➤ Aplikasi: Analisis Gaya pada Perancah dan Sistem Pengangkatan

Perancah (*scaffolding*) merupakan struktur sementara yang justru sering menjadi penyebab kecelakaan kerja, sebab perhitungannya kadang dianggap tidak sepenting struktur permanen. Analisis gaya pada perancah meliputi:

- a. Beban vertikal, terdiri atas berat sendiri perancah, berat pekerja, berat material, dan berat peralatan. Beban ini disalurkan melalui tiang tegak (standard) ke pelat landasan.

- b. Beban mendatar, berasal dari angin, dorongan pekerja, dan gaya saat penuangan beton. Beban ini ditahan oleh batang pengaku diagonal (bracing).
- c. Kestabilan terhadap guling, ditinjau dari perbandingan tinggi terhadap lebar dasar. Perancah yang terlalu tinggi tanpa pengikat ke struktur akan tidak stabil meskipun setiap batangnya kuat.

Pada sistem pengangkatan, gaya pada sling bergantung pada sudut sling. Untuk beban w yang diangkat dengan dua sling bersudut θ terhadap bidang mendatar, tegangan tiap sling adalah $w/(2 \sin \theta)$ — persis rumus yang diperoleh pada Contoh Soal 6.1. Tabel berikut menunjukkan betapa cepat tegangan meningkat ketika sudut diperkecil.

Tabel 9. Faktor Tegangan Sling terhadap Sudut Pemasangan

Sudut Sling terhadap Mendatar	Faktor Tegangan ($\times w/2$)	Keterangan
90°	1,00	Kondisi paling menguntungkan
60°	1,15	Aman dan lazim dipakai
45°	1,41	Batas minimum yang dianjurkan

Sudut Sling terhadap Mendatar	Faktor Tegangan ($\times w/2$)	Keterangan
30°	2,00	Tegangan dua kali; perlu perhatian khusus
15°	3,86	Sangat berbahaya

➤ Rangkuman

- Diagram benda bebas adalah alat kerja utama dalam analisis gaya; sebagian besar kesalahan berasal dari DBB yang tidak lengkap.
- Kesetimbangan gaya sebidang pada satu titik memerlukan $\Sigma F_x = 0$ dan $\Sigma F_y = 0$.
- Semakin mendatar kabel atau sling, semakin besar tegangan yang timbul pada beban yang sama.
- Pada bidang miring, $N = mg \cos \theta$ dan syarat mulai meluncur adalah $\tan \theta = \mu_s$.
- Kestabilan perancah bergantung tidak hanya pada kekuatan batang, tetapi juga pada pengaku diagonal dan perbandingan tinggi terhadap lebar dasar.

➤ Latihan Mandiri

- Gambarkan DBB untuk: (a) balok di atas dua tumpuan; (b) benda pada bidang miring dengan gesekan; (c) beban yang digantung dua kabel tak simetris.
- Sebuah lampu 15 kg digantung pada dua kabel bersudut 40° terhadap mendatar. Hitung tegangan setiap kabel.

3. Ulangi soal sebelumnya untuk sudut 20° , lalu hitung persentase kenaikan tegangannya.
4. Balok 15 kg di atas meja licin dihubungkan tali melalui katrol ke beban 10 kg yang menggantung. Hitung percepatan sistem dan tegangan tali.
5. Peti 60 kg berada pada bidang miring 25° dengan $\mu_s = 0,40$. Apakah peti akan meluncur? Buktikan dengan perhitungan.
6. Timbunan kerikil memiliki $\mu = 0,70$. Tentukan sudut lereng maksimum dan sudut lereng rencana dengan angka keamanan 1,5.
7. Sebuah beban 2 ton diangkat dengan dua sling bersudut 30° terhadap mendatar. Hitung tegangan setiap sling dan jelaskan mengapa sudut ini tidak dianjurkan.

➤ **Tugas Case Method**

Amati satu instalasi perancah di lokasi proyek atau dari dokumentasi foto. Susun diagram benda bebas untuk satu tiang tegak perancah tersebut, taksir beban vertikal yang bekerja padanya, dan periksa kelengkapan pengaku diagonal serta pengikat ke struktur. Susun laporan berisi temuan Anda, potensi bahaya yang teridentifikasi, dan usulan perbaikan yang berdasar pada analisis gaya.

BAB VII

GAYA DAN GERAK DALAM SISTEM MEKANIK

➤ Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 6, bagian pertama)

Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:

- a. Mengklasifikasikan macam-macam gaya yang bekerja pada suatu benda;
- b. Menghitung resultan gaya sebidang dan gaya konkuren;
- c. Membedakan dan menghitung gaya gesek statis serta kinetis;
- d. Menganalisis kestabilan benda di atas permukaan.

Peta konsep: Klasifikasi gaya → Resultan gaya konkuren → Gaya gesek → Kestabilan benda → Gesekan pada tumpuan.

➤ Kasus Pembuka

Sebuah lemari peralatan bermassa 150 kg dengan tinggi 1,8 m, lebar 0,6 m, dan kedalaman 0,5 m akan digeser oleh dua pekerja. Pekerja pertama mendorong pada ketinggian 1,6 m dari lantai; pekerja kedua mendorong pada ketinggian 0,4 m. Koefisien gesek antara lemari dan lantai 0,40.

Pertanyaan pemicu: siapa di antara keduanya yang berisiko membuat lemari terguling, bukan bergeser? Pada ketinggian berapa dorongan sebaiknya diberikan?

➤ **Klasifikasi Gaya dalam Sistem Mekanik**

Gaya dapat digolongkan menurut beberapa dasar. Menurut cara kerjanya, gaya dibedakan menjadi gaya sentuh dan gaya tak sentuh. Gaya sentuh memerlukan kontak langsung, misalnya gaya normal, gaya gesek, tegangan tali, dan gaya dorong. Gaya tak sentuh bekerja dari jarak jauh, misalnya gaya gravitasi, gaya listrik, dan gaya magnet.

Menurut penyebarannya, gaya dalam struktur dibedakan menjadi:

Tabel 10. Jenis Gaya Menurut Penyebarannya pada Struktur Bangunan

Jenis Gaya	Ciri	Satuan	Contoh pada Bangunan
Beban titik	Bekerja pada satu titik	N atau kN	Kolom menumpu pada balok
Beban terbagi rata	Merata sepanjang bentang	N/m atau kN/m	Berat sendiri balok, dinding di atas balok

Jenis Gaya	Ciri	Satuan	Contoh pada Bangunan
Beban terbagi tidak rata	Berubah sepanjang bentang	N/m atau kN/m	Tekanan tanah pada dinding penahan
Beban momen	Berupa pasangan kopel	N·m	Kolom eksentris pada balok

Menurut sifat waktunya, gaya dibedakan menjadi beban statis (tetap atau berubah sangat lambat, seperti beban mati) dan beban dinamis (berubah cepat, seperti beban gempa, angin, dan getaran mesin).

➤ Resultan Gaya Sebidang dan Gaya Konkuren

Gaya-gaya disebut **konkuren** apabila garis kerjanya bertemu pada satu titik. Pada sistem gaya konkuren, resultan dapat dihitung langsung dengan penjumlahan komponen, sebagaimana telah dibahas pada Subbab 2.5. Titik simpul rangka batang merupakan contoh paling khas dari sistem gaya konkuren.

Bila garis kerja gaya-gaya tidak bertemu pada satu titik, penjumlahan komponen saja belum cukup, sebab sistem gaya tersebut dapat menghasilkan putaran. Persoalan semacam ini memerlukan konsep momen gaya yang akan dibahas pada Bab 11.

Contoh Soal 7.1 — Keseimbangan Titik Simpul Rangka

Soal: Pada titik simpul sebuah kuda-kuda bekerja beban vertikal 12 kN ke bawah. Titik tersebut ditahan oleh satu batang diagonal bersudut 40° terhadap bidang mendatar dan satu batang mendatar. Hitung gaya pada kedua batang dan tentukan apakah batang tersebut tertarik atau tertekan.

Penyelesaian: Andaikan gaya batang diagonal S dan gaya batang mendatar H , keduanya diasumsikan tarik (menjauhi simpul).

Arah vertikal: $S \sin 40^\circ - 12 = 0 \rightarrow S = 12/0,6428 = 18,67$ kN.

Arah mendatar: $H + S \cos 40^\circ = 0 \rightarrow H = -18,67 \times 0,766 = -14,30$ kN.

Tafsiran: S bertanda positif, jadi asumsi tarik benar untuk batang diagonal. H bertanda negatif, sehingga batang mendatar sesungguhnya tertekan sebesar 14,30 kN. Tanda hasil hitungan inilah yang menentukan apakah sebuah batang harus dirancang sebagai batang tarik atau batang tekan — perbedaan yang menentukan dimensi dan jenis sambungannya.

➤ Gaya Gesek Statis dan Kinetis

Gaya gesek sering dipandang semata sebagai penghambat, padahal dalam teknik sipil gesekan justru banyak dimanfaatkan. Daya dukung selimut tiang pancang berasal dari gesekan antara tiang dan tanah.

Stabilitas dinding penahan terhadap pergeseran bergantung pada gesekan antara dasar dinding dan tanah. Sambungan baut mutu tinggi tipe *friction* menyalurkan gaya melalui gesekan antarpelat, bukan melalui tumpu baut.

Tabel 11. Koefisien Gesek Perkiraan Berbagai Pasangan Permukaan

Pasangan Permukaan	μ_s (perkiraan)	μ_k (perkiraan)
Beton – beton (kasar)	0,60 – 0,70	0,50 – 0,60
Beton – tanah pasir	0,45 – 0,55	0,40 – 0,50
Baja – beton	0,45	0,35
Baja – baja (kering)	0,74	0,57
Kayu – beton	0,60	0,50
Karet – aspal (kering)	0,90	0,70

Nilai pada tabel bersifat perkiraan dan hanya untuk latihan; perencanaan sesungguhnya harus memakai data uji dan ketentuan dalam standar yang berlaku.

➤ Kestabilan Benda di Atas Permukaan

Sebuah benda yang didorong dapat memberi dua tanggapan yang berbeda: bergeser atau terguling. Yang terjadi lebih dahulu bergantung pada besar gaya, tinggi titik kerja gaya, dan geometri benda.

Benda mulai bergeser bila gaya dorong melampaui gesekan maksimum: $P > \mu_s mg$. Benda mulai terguling bila momen penggulingan melampaui momen penahan. Untuk benda balok berlebar b yang didorong pada ketinggian h , syarat mulai terguling adalah:

$$P \cdot h = mg \cdot (b/2) \quad \rightarrow \quad P_{\text{guling}} = mg \cdot b / (2h)$$

Contoh Soal 7.2 — Menyelesaikan Kasus Pembuka

Soal: Lemari 150 kg, lebar arah dorong 0,5 m, $\mu_s = 0,40$. Tentukan gaya penggeser dan gaya penggulingan untuk dorongan pada ketinggian 1,6 m dan 0,4 m.

Penyelesaian: Berat $mg = 150 \times 9,8 = 1.470$ N.

Gaya untuk mulai bergeser: $P_{\text{geser}} = 0,40 \times 1.470 = 588$ N (tidak bergantung tinggi dorongan).

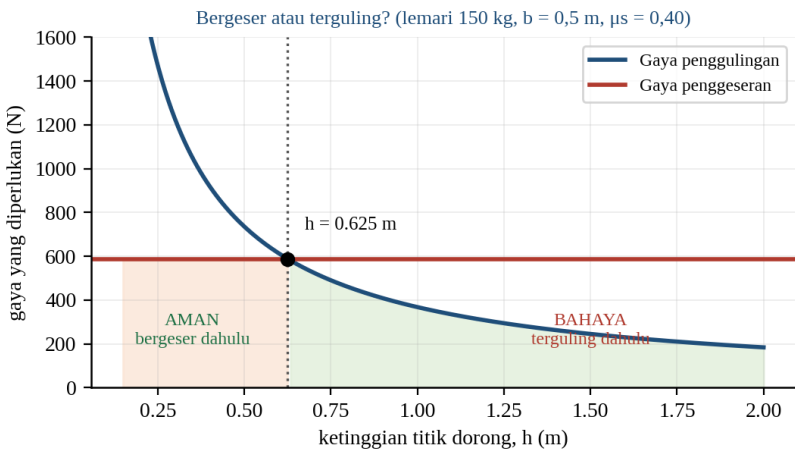
Gaya untuk mulai terguling pada $h = 1,6$ m: $P_{\text{guling}} = 1.470 \times 0,5 / (2 \times 1,6) = 229,7$ N.

Gaya untuk mulai terguling pada $h = 0,4$ m: $P_{\text{guling}} = 1.470 \times 0,5 / (2 \times 0,4) = 918,8$ N.

Kesimpulan: pada dorongan setinggi 1,6 m, gaya penggulingan (230 N) jauh lebih kecil daripada gaya penggeseran (588 N), sehingga lemari akan terguling lebih dahulu sebelum bergeser. Pekerja pertama berisiko.

Pada dorongan setinggi 0,4 m, gaya penggeseran (588 N) lebih kecil daripada gaya penggulingan (919 N), sehingga lemari akan bergeser dengan aman.

Ketinggian dorong aman maksimum diperoleh dari $P_{\text{guling}} = P_{\text{geser}}$: $h = b/(2\mu_s) = 0,5/(2 \times 0,40) = 0,625$ m. Dorongan sebaiknya diberikan di bawah ketinggian tersebut.



Gambar 13. Batas Antara Moda Bergeser dan Moda Terguling Menurut Ketinggian Dorongan

Prinsip yang sama berlaku dalam skala besar: dinding penahan tanah, tugu, dan *tower crane* semuanya harus diperiksa terhadap dua moda kegagalan tersebut geser dan guling. Pemeriksaan lengkapnya akan dibahas pada Bab 12.

➤ Aplikasi dalam Teknik Sipil

- a. Daya dukung tiang pancang. Kapasitas tiang merupakan jumlah tahanan ujung dan tahanan gesek selimut; pada tanah lunak yang tebal, tahanan gesek dapat menjadi bagian terbesar.
- b. Stabilitas dinding penahan. Pemeriksaan terhadap geser memakai koefisien gesek dasar, sedangkan pemeriksaan terhadap guling memakai perbandingan momen.
- c. Sambungan baut tipe friction. Gaya pratarik baut menimbulkan gesekan antarpelat yang menyalurkan gaya tanpa mengandalkan tumpu lubang.
- d. Perkerasan jalan. Kekesatan permukaan jalan (*skid resistance*) merupakan penerapan langsung konsep koefisien gesek dan menjadi parameter mutu perkerasan.

➤ Rangkuman

- a. Gaya dapat digolongkan menurut cara kerjanya, penyebarannya, dan sifat waktunya.
- b. Gaya konkuren dapat diselesaikan dengan penjumlahan komponen; gaya nonkonkuren memerlukan konsep momen.
- c. Tanda hasil hitungan menentukan apakah batang bekerja sebagai batang tarik atau batang tekan.
- d. Dalam teknik sipil, gesekan tidak hanya penghambat, tetapi juga sumber daya dukung dan kestabilan.

- e. Benda dapat gagal dengan bergeser atau terguling; ketinggian titik kerja gaya menentukan moda mana yang terjadi lebih dahulu.

➤ Latihan Mandiri

1. Kelompokkan gaya-gaya berikut menurut jenis penyebarannya: berat sendiri pelat lantai, kolom yang menumpu balok, tekanan tanah pada dinding basement, dan berat dinding pasangan di atas balok.
2. Pada satu titik simpul bekerja tiga gaya: 40 kN pada 0° , 30 kN pada 120° , dan 25 kN pada 240° . Hitung resultannya.
3. Titik simpul kuda-kuda menerima beban vertikal 18 kN, ditahan batang diagonal 35° dan batang mendatar. Hitung gaya kedua batang beserta sifatnya (tarik atau tekan).
4. Blok beton 500 kg berada di atas tanah pasir dengan $\mu_s = 0,50$. Hitung gaya mendatar minimum untuk menggesernya.
5. Sebuah kotak dengan lebar 0,4 m dan massa 80 kg didorong pada ketinggian 1,0 m. Jika $\mu_s = 0,35$, tentukan apakah kotak bergeser atau terguling lebih dahulu.
6. Tentukan ketinggian dorong maksimum agar kotak pada soal sebelumnya bergeser, bukan terguling.
7. Jelaskan mengapa peningkatan kekesatan permukaan jalan menurunkan jarak pengereman kendaraan. Kaitkan dengan hasil Bab 4.

➤ *Tugas Case Method*

Rancang sebuah prosedur kerja aman untuk pemindahan peralatan berat di dalam gedung tanpa alat angkat mekanis. Tentukan objek yang akan dipindahkan beserta taksiran dimensi dan massanya. Hitung gaya penggeseran, gaya penggulingan, dan ketinggian dorong aman maksimum. Susun prosedur menjadi lembar instruksi kerja satu halaman lengkap dengan sketsa, sehingga dapat langsung dibaca oleh pekerja di lapangan.

BAB VIII

KONSEP USAHA, ENERGI, DAN DAYA

➤ Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 6, bagian kedua)

Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:

- a. Menghitung usaha oleh gaya konstan maupun gaya bervariasi;
- b. Menerapkan teorema usaha–energi kinetik;
- c. Menghitung energi potensial gravitasi dan energi potensial elastis;
- d. Menghitung daya dan efisiensi mekanik suatu alat;
- e. Memformulasikan hubungan antara gaya, usaha, energi, dan daya dalam bentuk persamaan.

Peta konsep: Usaha → Energi kinetik → Energi potensial → Teorema usaha–energi → Daya dan efisiensi.

➤ Kasus Pembuka

Sebuah proyek gedung memerlukan pemompaan air sebanyak 45 m^3 per jam ke tangki penampung pada ketinggian 32 m. Kontraktor menawarkan dua pilihan pompa: pompa A berdaya 7,5 kW dengan efisiensi 62%, dan pompa B berdaya 5,5 kW dengan efisiensi 80%. Harga sewa pompa B lebih tinggi 15% daripada pompa A.

Pertanyaan pemicu: apakah kedua pompa mampu memenuhi kebutuhan? Pompa mana yang lebih menguntungkan dari sisi konsumsi energi? Bagaimana perhitungan fisika dapat menjadi dasar keputusan pengadaan?

➤ Usaha oleh Gaya Konstan

Usaha dalam pengertian fisika adalah hasil kali komponen gaya searah perpindahan dengan besar perpindahannya. Definisi ini berbeda dari pengertian sehari-hari: seorang pekerja yang berdiri memikul balok selama satu jam tanpa bergerak dikatakan tidak melakukan usaha secara fisis, meskipun ia jelas kelelahan.

$$W = F s \cos \theta$$

Dengan θ sudut antara arah gaya dan arah perpindahan. Satuan usaha adalah joule (J), yaitu N·m. Beberapa keadaan khusus perlu dicermati:

- $\theta = 0^\circ \rightarrow W = F s$, usaha bernilai maksimum dan positif;
- $\theta = 90^\circ \rightarrow W = 0$, gaya tidak melakukan usaha. Inilah sebabnya gaya normal dan gaya berat tidak melakukan usaha pada benda yang bergerak mendatar;
- $\theta = 180^\circ \rightarrow W = -F s$, usaha bernilai negatif. Gaya gesek selalu melakukan usaha negatif;
- Perpindahan nol $\rightarrow W = 0$, sekuat apa pun gaya yang diberikan.

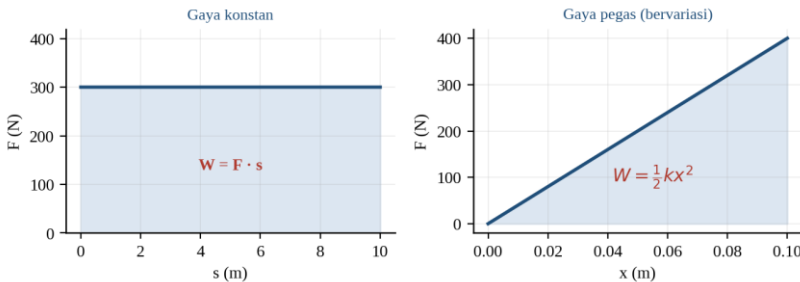
Usaha oleh Gaya Bervariasi

Apabila gaya berubah terhadap posisi, usaha dihitung sebagai luas daerah di bawah grafik F – s , atau secara matematis sebagai integral:

$$W = \int F \, dx$$

Contoh terpenting bagi teknik sipil adalah usaha untuk merenggangkan pegas atau batang elastis. Karena gaya pegas $F = k \cdot x$ meningkat berbanding lurus dengan simpangan, luas di bawah grafiknya berbentuk segitiga:

$$W = \frac{1}{2} k x^2$$



Gambar 14. Usaha Sebagai Luas Daerah di Bawah Grafik Gaya Perpindahan

➤ Energi Kinetik dan Teorema Usaha–Energi

Energi kinetik adalah energi yang dimiliki benda karena geraknya:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

Teorema usaha–energi menyatakan bahwa usaha total oleh semua gaya pada sebuah benda sama dengan perubahan energi kinetiknya:

$$W_{\text{total}} = \Delta E_k = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v_0^2$$

Teorema ini sangat berguna karena memungkinkan kita menghitung kecepatan akhir tanpa mengetahui percepatan dan waktu. Perhatikan bahwa energi kinetik bergantung pada kuadrat kecepatan: menggandakan kecepatan berarti melipatempatkan energi kinetiknya. Kenyataan inilah yang membuat batas kecepatan kendaraan proyek menjadi persoalan keselamatan yang serius.

Contoh Soal 8.1 — Usaha oleh Gaya Gesek

Soal: Peti bermassa 60 kg didorong sejauh 12 m dengan gaya mendatar 300 N pada lantai dengan $\mu_k = 0,25$. Hitung usaha oleh gaya dorong, usaha oleh gaya gesek, usaha total, dan kecepatan akhir peti bila mula-mula diam.

Penyelesaian: $N = 60 \times 9,8 = 588 \text{ N}$; $f_k = 0,25 \times 588 = 147 \text{ N}$.

Usaha gaya dorong: $W_F = 300 \times 12 = 3.600 \text{ J}$.

Usaha gaya gesek: $W_f = -147 \times 12 = -1.764 \text{ J}$.

Usaha total: $W = 3.600 - 1.764 = 1.836 \text{ J}$.

Dari teorema usaha–energi: $1.836 = \frac{1}{2}(60) v^2 \rightarrow v^2 = 61,2 \rightarrow v = 7,82 \text{ m/s}$.

Catatan: gaya berat dan gaya normal tidak melakukan usaha karena keduanya tegak lurus arah perpindahan.

➤ Energi Potensial

Energi Potensial Gravitasi

Energi potensial gravitasi adalah energi yang tersimpan karena kedudukan benda pada ketinggian tertentu:

$$E_p = m g h$$

Nilai h diukur dari bidang acuan yang dipilih bebas. Yang bermakna fisis bukanlah nilai E_p itu sendiri, melainkan perubahannya, $\Delta E_p = mg\Delta h$. Karena itu pemilihan bidang acuan tidak memengaruhi hasil akhir perhitungan.

Energi Potensial Elastis

Energi potensial elastis tersimpan pada benda yang berubah bentuk secara elastis:

$$E_p = \frac{1}{2} k x^2$$

Dengan k konstanta kekakuan (N/m) dan x simpangan dari kedudukan seimbang. Dalam teknik sipil, konsep ini menjadi dasar pemahaman perilaku struktur elastis, kerja pegas pada landasan jembatan, dan energi regangan yang tersimpan pada kabel prategang.

➤ Daya dan Efisiensi Mekanik

Daya adalah laju melakukan usaha, atau laju perpindahan energi:

$$P = W / t \quad \text{dan} \quad P = F v$$

Satuan daya adalah watt ($W = J/s$). Satuan lain yang masih dipakai pada katalog alat adalah daya kuda: $1 \text{ HP} = 745,7 \text{ W} \approx 0,746 \text{ kW}$.

Tidak ada mesin yang mengubah seluruh energi masukan menjadi kerja berguna. Efisiensi menyatakan perbandingan keduanya:

$$\eta = (P_{\text{keluaran}} / P_{\text{masukan}}) \times 100\%$$

Selisihnya berubah menjadi kalor, bunyi, dan getaran. Efisiensi motor listrik lazimnya 80–95%, pompa sentrifugal 60–85%, dan mesin diesel 30–45%.

Contoh Soal 8.2 — Menyelesaikan Kasus Pembuka

Soal: Air $45 \text{ m}^3/\text{jam}$ dipompa ke ketinggian 32 m . Bandingkan pompa A ($7,5 \text{ kW}$, $\eta = 62\%$) dan pompa B ($5,5 \text{ kW}$, $\eta = 80\%$). Massa jenis air 1.000 kg/m^3 .

Penyelesaian: Debit $Q = 45 \text{ m}^3/\text{jam} = 0,0125 \text{ m}^3/\text{s}$. Laju massa $= 0,0125 \times 1.000 = 12,5 \text{ kg/s}$.

Daya berguna yang dibutuhkan: $P_{\text{berguna}} = (\text{laju massa}) \times g \times h = 12,5 \times 9,8 \times 32 = 3.920 \text{ W} = 3,92 \text{ kW}$.

Daya masukan yang diperlukan pompa A: $3,92/0,62 = 6,32 \text{ kW} \rightarrow$ di bawah $7,5 \text{ kW}$, memenuhi.

Daya masukan yang diperlukan pompa B: $3,92/0,80 = 4,90 \text{ kW} \rightarrow$ di bawah $5,5 \text{ kW}$, memenuhi.

Perbandingan konsumsi energi: pompa A menyerap $6,32 \text{ kW}$, pompa B menyerap $4,90 \text{ kW}$. Selisihnya $1,42 \text{ kW}$ atau $22,5\%$ lebih hemat untuk pompa B.

Bila pompa bekerja 8 jam/hari selama 60 hari , penghematan energi $= 1,42 \text{ kW} \times 480 \text{ jam} = 681,6 \text{ kWh}$.

Kesimpulan: kedua pompa mampu bekerja, tetapi pompa B lebih hemat energi sebesar 22,5%. Keputusan akhir bergantung pada perbandingan antara selisih biaya sewa 15% dan nilai penghematan energi 681,6 kWh selama masa pakai. Inilah contoh perhitungan fisika yang langsung menjadi dasar keputusan pengadaan.

➤ Aplikasi dalam Teknik Sipil

- Pemilihan pompa. Daya pompa dihitung dari debit, tinggi angkat total (termasuk kerugian gesek pipa), dan efisiensi, sebagaimana pada contoh di atas.
- Produktivitas alat pemadat. Energi pemadatan per lapis bergantung pada berat alat, jumlah lintasan, dan kecepatan operasi. Uji Proktor pun menetapkan energi pemadatan baku per satuan volume.
- Daya kran dan hoist. Daya angkat dihitung dari $P = F v$, sehingga kecepatan angkat yang tinggi menuntut daya motor yang lebih besar untuk beban yang sama.
- Energi regangan struktur. Energi yang tersimpan pada elemen elastis merupakan dasar metode analisis struktur lanjut, seperti metode kerja virtual dan Castigliano.

➤ Rangkuman

- Usaha adalah hasil kali komponen gaya searah perpindahan dengan perpindahannya; gaya tegak lurus perpindahan tidak melakukan usaha.

- b. Usaha oleh gaya bervariasi sama dengan luas daerah di bawah grafik $F-s$.
- c. Teorema usaha–energi menghubungkan usaha total dengan perubahan energi kinetik.
- d. Energi kinetik bergantung pada kuadrat kecepatan, sehingga kecepatan berlipat berarti energi berlipat empat.
- e. Daya adalah laju usaha; efisiensi menyatakan bagian daya masukan yang benar-benar menjadi kerja berguna.

➤ Latihan Mandiri

1. Gaya 250 N menarik peti sejauh 15 m pada arah 30° terhadap mendatar. Hitung usaha yang dilakukan.
2. Peti 50 kg didorong sejauh 10 m dengan gaya 200 N pada lantai dengan $\mu_k = 0,20$. Hitung usaha total dan kecepatan akhirnya.
3. Sebuah bak beton bermassa 1.200 kg diangkat setinggi 25 m. Hitung usaha yang dilakukan terhadap gaya gravitasi.
4. Kran mengangkat beban 1,5 ton dengan kecepatan tetap 0,4 m/s. Hitung daya angkat yang dibutuhkan, lalu hitung daya motornya bila efisiensi sistem 75%.
5. Pompa memindahkan 30 m^3 air per jam ke ketinggian 20 m dengan efisiensi 70%. Hitung daya masukan yang diperlukan dalam kW dan HP.
6. Sebuah pegas berkonstanta 4.000 N/m ditekan 5 cm. Hitung energi potensial elastis yang tersimpan.
7. Bandingkan energi kinetik kendaraan proyek bermassa 8 ton pada kelajuan 20 km/jam dan 40 km/jam. Tarik

kesimpulan bagi penetapan batas kecepatan di jalan kerja.

➤ **Tugas Case Method**

Pilih satu peralatan bermotor yang digunakan pada pekerjaan konstruksi, misalnya pompa air, *concrete vibrator*, *stamper*, atau *hoist*. Kumpulkan data teknisnya dari pelat nama atau katalog. Hitung daya berguna yang sesungguhnya dihasilkan, taksir efisiensinya, dan hitung konsumsi energi harian beserta perkiraan biaya listriknya. Ajukan satu usulan penghematan energi yang dapat diterapkan, lengkap dengan perhitungan pendukungnya.

BAB IX

HUKUM KEKEKALAN

➤ **Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 7 — bobot 8%)**

Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:

- a. Membedakan gaya konservatif dan gaya nonkonservatif;
- b. Menerapkan hukum kekekalan energi mekanik pada berbagai sistem;
- c. Menerapkan hukum kekekalan momentum dan konsep impuls;
- d. Membedakan tumbukan lenting dan tidak lenting;
- e. Menjelaskan prinsip kerja alat pemancang tiang berdasarkan hukum kekekalan.

Peta konsep: Gaya konservatif → Kekekalan energi mekanik → Impuls dan momentum → Kekekalan momentum → Tumbukan → Aplikasi pemancangan.

➤ **Kasus Pembuka**

Sebuah *drop hammer* bermassa 3.000 kg dijatuhkan dari ketinggian 1,5 m untuk memancang tiang bermassa 1.200 kg. Pengawas mencatat bahwa pada sepuluh tumbukan terakhir, tiang hanya masuk 25 mm setiap tumbukan.

Pertanyaan pemicu: berapa kecepatan penumbuk saat menyentuh kepala tiang? Berapa kecepatan bersama penumbuk dan tiang setelah tumbukan? Ke mana perginya energi yang hilang saat tumbukan, dan bagaimana penetrasi 25 mm per tumbukan dapat dipakai untuk menaksir daya dukung tiang?

➤ Gaya Konservatif dan Nonkonservatif

Sebuah gaya disebut **konservatif** apabila usaha yang dilakukannya tidak bergantung pada bentuk lintasan, melainkan hanya pada posisi awal dan akhir. Akibatnya, usaha oleh gaya konservatif pada lintasan tertutup sama dengan nol. Contohnya gaya gravitasi dan gaya pegas. Setiap gaya konservatif dapat dikaitkan dengan sebuah energi potensial.

Gaya nonkonservatif menghasilkan usaha yang bergantung pada lintasan, dan tidak memiliki energi potensial yang bersesuaian. Contohnya gaya gesek dan gaya hambat udara. Usaha oleh gaya-gaya ini mengubah energi mekanik menjadi kalor, bunyi, atau perubahan bentuk tetap.

➤ Hukum Kekekalan Energi Mekanik

Energi mekanik adalah jumlah energi kinetik dan energi potensial. Apabila hanya gaya konservatif yang bekerja, energi mekanik sistem bersifat kekal:

$$E_{m1} = E_{m2} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{2} m v_1^2 + m g h_1 = \frac{1}{2} m v_2^2 + m g h_2$$

Apabila terdapat gaya nonkonservatif, persamaannya menjadi:

$$E_{m2} - E_{m1} = W_{\text{nonkonservatif}}$$

Hukum kekekalan energi yang lebih luas menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, hanya dapat berubah bentuk. Energi yang tampak "hilang" pada sistem mekanik sesungguhnya berpindah menjadi bentuk lain, terutama kalor.

Contoh Soal 9.1 — Kekekalan Energi pada Benda Jatuh

Soal: Benda bermassa 5 kg dilepaskan dari ketinggian 20 m. Hitung kecepatannya pada ketinggian 8 m dan saat mencapai tanah, dengan hukum kekekalan energi mekanik.

Penyelesaian: Ambil tanah sebagai bidang acuan. Keadaan awal: $v_1 = 0$, $h_1 = 20$ m.

Pada $h_2 = 8$ m: $mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2$. Massa saling menghapus:

$$9,8(20) = \frac{1}{2}v_2^2 + 9,8(8) \rightarrow 196 = 0,5v_2^2 + 78,4 \rightarrow v_2^2 = 235,2 \rightarrow v_2 = 15,3 \text{ m/s.}$$

Saat mencapai tanah: $196 = \frac{1}{2}v_3^2 \rightarrow v_3^2 = 392 \rightarrow v_3 = 19,8 \text{ m/s.}$

Catatan: hasil ini sama dengan hasil persamaan GLBB pada Bab 4, tetapi diperoleh tanpa melibatkan waktu. Inilah keunggulan pendekatan energi.

➤ Impuls dan Momentum

Momentum adalah hasil kali massa dengan kecepatan, bersifat vektor:

$$p = m v$$

Impuls adalah hasil kali gaya dengan selang waktu bekerjanya gaya tersebut, dan besarnya sama dengan perubahan momentum:

$$I = F \Delta t = \Delta p = m v_2 - m v_1$$

Hubungan ini memiliki makna praktis yang besar dalam rekayasa keselamatan. Perubahan momentum yang sama dapat dicapai dengan gaya besar dalam waktu singkat atau gaya kecil dalam waktu lama. Karena itu, memperpanjang waktu benturan akan memperkecil gaya yang timbul. Prinsip inilah yang mendasari kerja bantalan karet pada landasan jembatan, lapisan peredam pada helm keselamatan, dan pagar pengaman jalan yang dirancang berubah bentuk saat ditabrak.

➤ Hukum Kekekalan Momentum

Pada sistem yang tidak dipengaruhi gaya luar, jumlah momentum sebelum dan sesudah interaksi bernilai sama:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

Perlu dicatat bahwa momentum selalu kekal pada tumbukan, sedangkan energi kinetik tidak selalu kekal. Inilah pembeda pokok antara kedua hukum kekekalan tersebut.

➤ Tumbukan

Tabel 12. Perbandingan Jenis Tumbukan

Jenis Tumbukan	Momentum	Energi Kinetik	Koefisien Restitusi e	Contoh
Lenting sempurna	Kekal	Kekal	$e = 1$	Tumbukan bola baja keras
Lenting sebagian	Kekal	Berkurang	$0 < e < 1$	Bola karet memantul di lantai
Tidak lenting sama sekali	Kekal	Berkurang paling banyak	$e = 0$	Penumbuk menyatu dengan tiang pancang

Koefisien restitusi didefinisikan sebagai perbandingan negatif kecepatan relatif setelah tumbukan terhadap kecepatan relatif sebelum tumbukan:

$$e = - (v_1' - v_2') / (v_1 - v_2)$$

Pada tumbukan tidak lenting sama sekali, kedua benda bergerak bersama setelah tumbukan, sehingga:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'$$

➤ Aplikasi: Prinsip Kerja Alat Pemancang Tiang

Contoh Soal 9.2 — Menyelesaikan Kasus Pembuka

Soal: Penumbuk 3.000 kg jatuh dari 1,5 m menumbuk tiang 1.200 kg. Hitung (a) kecepatan penumbuk saat menyentuh tiang; (b) kecepatan bersama setelah tumbukan bila tumbukan dianggap tidak lenting sama sekali; (c) energi yang hilang saat tumbukan; (d) taksiran daya dukung tiang bila penetrasi 25 mm per tumbukan.

Kecepatan penumbuk. Dari kekekalan energi: $v = \sqrt{(2gh)} = \sqrt{(2 \times 9,8 \times 1,5)} = 5,42 \text{ m/s}$.

Kecepatan bersama. Kekekalan momentum:

$$3.000(5,42) + 1.200(0) = 4.200 v'$$

$$v' = 16.260/4.200 = 3,87 \text{ m/s}$$

Energi yang hilang. Sebelum tumbukan: $E_k = \frac{1}{2}(3.000)(5,42^2) = 44.063 \text{ J}$. Sesudah tumbukan: $E_k = \frac{1}{2}(4.200)(3,87^2) = 31.451 \text{ J}$.

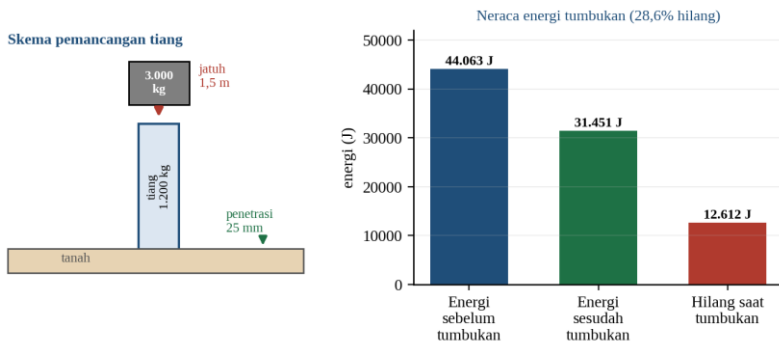
Energi yang hilang = $44.063 - 31.451 = 12.612 \text{ J}$, yaitu sekitar 28,6% dari energi semula. Energi ini berubah menjadi kalor, bunyi, getaran, serta perubahan bentuk kepala tiang dan bantalan penumbuk.

Taksiran daya dukung. Energi sesudah tumbukan dipakai untuk mendorong tiang masuk sejauh $s = 0,025 \text{ m}$ melawan tahanan tanah R_u :

$$R_u \times s = E_k \text{ sesudah} \rightarrow R_u = 31.451/0,025 = 1.258.040 \text{ N} \approx 1.258 \text{ kN}$$

Dengan angka keamanan 2,5, daya dukung izin $\approx 1.258/2,5 = 503 \text{ kN}$ per tiang.

Catatan penting: hitungan ini adalah penyederhanaan dari prinsip rumus dinamis pemancangan. Rumus baku dalam praktik, misalnya rumus Hiley atau *Engineering News Record*, memuat faktor koreksi tambahan untuk efisiensi penumbuk, elastisitas tiang, dan bantalan. Perencanaan sesungguhnya wajib memakai rumus baku beserta hasil uji pembebanan tiang.



Gambar 14. Skema Pemancangan Tiang dan Neraca Energi Tumbukannya

Dari analisis di atas dapat ditarik tiga pelajaran rekayasa. Pertama, sebagian besar energi jatuh penumbuk **tidak** dipakai untuk memancang, melainkan hilang saat tumbukan; karena itu efisiensi penumbuk menjadi parameter yang dicantumkan pada setiap alat pancang. Kedua, penetrasi per tumbukan yang semakin kecil menandakan tahanan tanah yang semakin besar, sehingga catatan pemancangan (*driving record*) merupakan data

teknis yang penting. Ketiga, perbandingan massa penumbuk terhadap massa tiang mempengaruhi efisiensi penyaluran energi; penumbuk yang terlalu ringan menghamburkan lebih banyak energi.

➤ **Rangkuman**

- a. Gaya konservatif menghasilkan usaha yang tidak bergantung lintasan dan memiliki energi potensial; gaya gesek tidak demikian.
- b. Energi mekanik kekal apabila hanya gaya konservatif yang bekerja.
- c. Impuls sama dengan perubahan momentum; memperpanjang waktu benturan memperkecil gaya yang timbul.
- d. Momentum selalu kekal pada tumbukan, sedangkan energi kinetik hanya kekal pada tumbukan lenting sempurna.
- e. Pada pemancangan tiang, sebagian besar energi tumbukan hilang, dan penetrasi per tumbukan dapat dipakai untuk menaksir tahanan tanah.

➤ **Latihan Mandiri**

1. Benda 8 kg dilepaskan dari ketinggian 15 m. Hitung kecepatannya pada ketinggian 5 m dengan hukum kekekalan energi.
2. Benda 2 kg meluncur menuruni bidang miring dari ketinggian 4 m dan mencapai dasar dengan kecepatan 7 m/s. Hitung energi yang hilang akibat gesekan.
3. Sebuah bola 0,5 kg bergerak 12 m/s menumbuk dinding dan memantul dengan kecepatan 9 m/s. Bila waktu

kontak 0,02 s, hitung impuls dan gaya rata-rata yang bekerja.

4. Jelaskan mengapa bantalan karet pada landasan jembatan dapat mengurangi gaya akibat beban kejut. Kaitkan dengan hubungan impuls–momentum.
5. Penumbuk 2.500 kg jatuh dari 1,2 m menumbuk tiang 1.000 kg secara tidak lenting sama sekali. Hitung kecepatan penumbuk sebelum tumbukan, kecepatan bersama sesudah tumbukan, dan energi yang hilang.
6. Bila penetrasi tiang pada soal sebelumnya 20 mm per tumbukan, taksir daya dukung batasnya dan daya dukung izinnya dengan angka keamanan 2,5.
7. Dua troli masing-masing 300 kg dan 200 kg bergerak berhadapan dengan kecepatan 3 m/s dan 2 m/s, lalu bertumbukan dan menyatu. Hitung kecepatan bersama sesudah tumbukan.

➤ **Tugas Case Method (instrumen penilaian Tugas, bobot 4%)**

Kumpulkan satu catatan pemancangan tiang (*driving record*) dari proyek nyata, dokumen tender, atau laporan yang dapat diakses. Bila data lapangan tidak tersedia, gunakan data hipotetis yang wajar dan sebutkan asumsinya. Hitung energi tumbukan, energi yang hilang, serta taksiran daya dukung batas tiang berdasarkan penetrasi akhir. Bandingkan hasil Anda dengan daya dukung rencana yang tercantum pada dokumen tersebut, lalu bahas kemungkinan penyebab perbedaannya. Susun laporan maksimal 5 halaman.

BAB X

HUBUNGAN USAHA, PERUBAHAN ENERGI, DAN KEKEKALAN ENERGI MEKANIK

➤ Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 8)

Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:

- a. Menganalisis perubahan energi pada sistem mekanik secara menyeluruh;
- b. Memperhitungkan pengaruh gaya gesek terhadap energi mekanik;
- c. Menyelesaikan persoalan gabungan usaha, energi, dan kekekalan energi;
- d. Menjelaskan penerapan konsep disipasi energi pada sistem struktur.

Peta konsep: Neraca energi sistem → Usaha gaya nonkonservatif → Persoalan gabungan → Disipasi energi pada struktur.

➤ Kasus Pembuka

Wilayah Sulawesi Selatan berada pada daerah dengan potensi gempa yang perlu diperhitungkan dalam perencanaan bangunan. Pada saat gempa, tanah menggetarkan bangunan dan memasukkan energi ke dalam strukturnya. Bangunan tidak dapat menolak energi

tersebut, sehingga energi itu harus disalurkan ke suatu tempat.

Pertanyaan pemicu: ke mana energi gempa yang masuk ke bangunan pergi? Mengapa bangunan yang dirancang tahan gempa justru dibiarkan mengalami kerusakan terkendali pada bagian tertentu? Bagaimana konsep usaha dan energi menjelaskan gagasan tersebut?

➤ Neraca Energi pada Sistem Mekanik

Analisis energi yang lengkap pada sebuah sistem mekanik dapat dituliskan sebagai neraca berikut:

$$Ek_1 + Ep_1 + W_{\text{luar}} = Ek_2 + Ep_2 + E_{\text{disipasi}}$$

Setiap suku memiliki makna yang jelas. Ek dan Ep merupakan energi yang tersimpan pada sistem; W_{luar} adalah energi yang dimasukkan dari luar, misalnya oleh mesin atau oleh gerakan tanah; dan E_{disipasi} adalah energi yang diubah menjadi bentuk tak berguna, terutama kalor akibat gesekan dan perubahan bentuk tetap.

Cara berpikir dengan neraca energi memiliki keunggulan praktis: ia memaksa kita menelusuri ke mana energi pergi. Pertanyaan ini sering menjadi kunci penyelesaian persoalan rekayasa yang rumit.

➤ Pengaruh Gaya Gesek terhadap Energi Mekanik

Gaya gesek selalu melakukan usaha negatif dan besarnya bergantung pada panjang lintasan:

$$W_{\text{gesek}} = - f_k \cdot s = - \mu_k N s$$

Karena bergantung pada lintasan, gaya gesek tidak memiliki energi potensial. Akibatnya, benda yang bergerak melalui lintasan panjang kehilangan lebih banyak energi mekanik walaupun titik awal dan titik akhirnya sama.

Contoh Soal 10.1 — Bidang Miring dengan Gesekan

Soal: Peti bermassa 40 kg meluncur menuruni bidang miring 30° sepanjang 10 m dari keadaan diam. Koefisien gesek kinetis 0,25. Hitung kecepatan peti di dasar bidang serta energi yang hilang akibat gesekan.

Penyelesaian: Ketinggian jatuh $h = 10 \sin 30^\circ = 5$ m.

Energi potensial yang dilepaskan: $E_p = 40 \times 9,8 \times 5 = 1.960$ J.

Gaya normal: $N = 40 \times 9,8 \times \cos 30^\circ = 339,5$ N. Gaya gesek: $f_k = 0,25 \times 339,5 = 84,9$ N.

Energi yang hilang: $W_{\text{gesek}} = 84,9 \times 10 = 849$ J (43,3% dari energi yang dilepaskan).

Energi kinetik di dasar: $1.960 - 849 = 1.111$ J $\rightarrow \frac{1}{2}(40)v^2 = 1.111 \rightarrow v = 7,45$ m/s.

Pembandingan: tanpa gesekan, kecepatannya menjadi $\sqrt{2 \times 9,8 \times 5} = 9,90$ m/s. Gesekan menurunkan kecepatan akhir sekitar 25%.

➤ Penyelesaian Persoalan Gabungan

Banyak persoalan rekayasa melibatkan beberapa tahap dengan sifat energi yang berbeda-beda. Prosedur penyelesaian yang dianjurkan:

- Tetapkan sistem yang ditinjau dan bidang acuan untuk energi potensial.
- Identifikasi keadaan awal dan keadaan akhir yang ditanyakan.
- Daftarkan semua bentuk energi pada kedua keadaan tersebut.
- Identifikasi gaya nonkonservatif yang bekerja dan hitung usahanya.
- Susun neraca energi, lalu selesaikan besaran yang dicari.
- Periksa kewajaran hasilnya, misalnya dengan memastikan energi disipasi bertanda positif dan tidak melebihi energi yang tersedia.

Contoh Soal 10.2 — Persoalan Tiga Tahap

Soal: Sebuah bak material bermassa 200 kg dilepaskan dari puncak landasan luncur miring 25° dengan panjang 8 m ($\mu_k = 0,20$), kemudian meluncur di atas lantai datar dengan $\mu_k = 0,35$, lalu akhirnya menekan pegas penahan berkonstanta 25.000 N/m. Bila bak berhenti setelah menempuh lantai datar 4 m dan menekan pegas, hitung simpangan pegas.

Penyelesaian: Hitung energi pada setiap tahap.

Tahap 1 (bidang miring). $h = 8 \sin 25^\circ = 3,381 \text{ m} \rightarrow E_p = 200 \times 9,8 \times 3,381 = 6.627 \text{ J}$.

$N_1 = 200 \times 9,8 \times \cos 25^\circ = 1.776 \text{ N}$; $f_1 = 0,20 \times 1.776 = 355,2 \text{ N}$; $W_1 = 355,2 \times 8 = 2.842 \text{ J}$.

Energi kinetik di dasar bidang miring = $6.627 - 2.842 = 3.785 \text{ J}$.

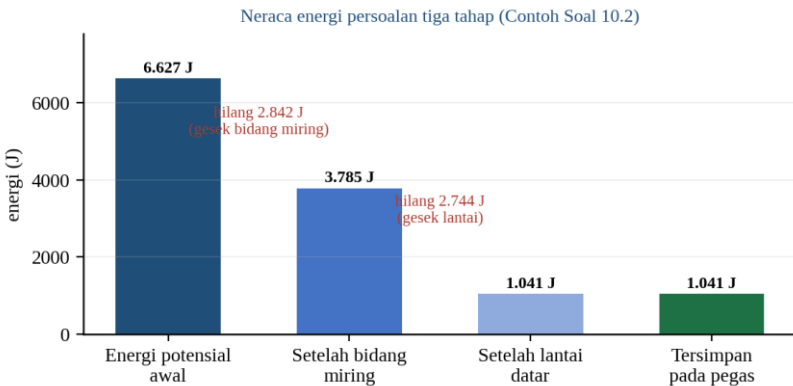
Tahap 2 (lantai datar). $N_2 = 200 \times 9,8 = 1.960 \text{ N}$; $f_2 = 0,35 \times 1.960 = 686 \text{ N}$; $W_2 = 686 \times 4 = 2.744 \text{ J}$.

Energi kinetik saat menyentuh pegas = $3.785 - 2.744 = 1.041 \text{ J}$.

Tahap 3 (pegas). Anggap gesekan selama penekanan pegas diabaikan karena simpangannya kecil.

$\frac{1}{2}(25.000) x^2 = 1.041 \rightarrow x^2 = 0,08328 \rightarrow x = 0,289 \text{ m} \approx 28,9 \text{ cm}$.

Pemeriksaan: energi total yang dilepaskan 6.627 J ; terdisipasi $2.842 + 2.744 = 5.586 \text{ J}$ (84,3%); tersimpan pada pegas 1.041 J (15,7%). Neraca energi tertutup.



Gambar 15. Neraca Energi Persoalan Tiga Tahap pada Contoh Soal 10.2

➤ Aplikasi: Disipasi Energi pada Sistem Struktur

Kasus Pembuka pada bab ini menyentuh salah satu gagasan terpenting dalam rekayasa kegempaan modern. Ketika gempa terjadi, energi masuk ke dalam bangunan. Neraca energinya dapat dituliskan sebagai:

$$\text{Emasukan} = E_{\text{kinetik}} + E_{\text{regangan elastis}} + E_{\text{redaman}} + E_{\text{histeretik}}$$

Dua suku pertama bersifat sementara: energi kinetik dan energi regangan elastis akan kembali dilepaskan ketika getaran mereda. Dua suku terakhir bersifat menghilangkan energi secara tetap. *Eredaman* adalah energi yang terserap oleh redaman alami bahan, dan *Ehisteretik* adalah energi yang terserap melalui perubahan bentuk tak elastis (plastis) pada elemen struktur.

Di sinilah letak gagasannya: apabila seluruh energi gempa harus ditanggung secara elastis, struktur perlu dibuat sangat besar dan sangat mahal. Karena itu, perencanaan tahan gempa modern sengaja merancang tempat tertentu untuk berubah bentuk plastis, yaitu daerah sendi plastis pada ujung balok. Energi gempa diserap di daerah tersebut melalui perubahan bentuk yang tetap.

Prinsip yang mengiringinya disebut kolom kuat-balok lemah (*strong column-weak beam*). Kerusakan diarahkan terjadi pada balok, bukan pada kolom, karena kegagalan balok bersifat setempat sedangkan kegagalan kolom dapat meruntuhkan seluruh bangunan. Dengan

demikian, kerusakan pada balok setelah gempa besar bukanlah tanda kegagalan perencanaan, melainkan bukti bahwa mekanisme penyerapan energi bekerja sebagaimana dirancang, dan penghuni memperoleh waktu untuk menyelamatkan diri.

Penerapan lain dari prinsip disipasi energi meliputi:

- a. Peredam tambahan (*damper*) berupa peredam viskos atau peredam gesekan yang dipasang pada portal bangunan untuk menambah Eredaman.
- b. Isolasi dasar (*base isolation*), yaitu pemasangan bantalan lunak antara bangunan dan pondasi untuk mengurangi energi yang masuk ke struktur.
- c. Kolam olak (*stilling basin*) pada bendungan, yang mendisipasi energi kinetik air limpasan agar tidak menggerus dasar sungai di hilir.
- d. Lapisan aus perkerasan jalan yang menyerap energi tumbukan roda kendaraan agar lapisan struktural di bawahnya terlindungi.

➤ Rangkuman

- a. Neraca energi memaksa kita menelusuri ke mana energi sistem pergi, dan sering menjadi kunci penyelesaian persoalan rekayasa.
- b. Usaha gaya gesek bergantung pada panjang lintasan dan selalu bertanda negatif.
- c. Persoalan gabungan diselesaikan tahap demi tahap dengan neraca energi yang harus tertutup.

- d. Energi gempa yang masuk ke bangunan disalurkan melalui energi kinetik, regangan elastis, redaman, dan perubahan bentuk plastis.
- e. Perencanaan tahan gempa mengarahkan kerusakan pada balok, bukan kolom, sesuai prinsip kolom kuat-balok lemah.

➤ Latihan Mandiri

1. Peti 30 kg meluncur menuruni bidang miring 20° sepanjang 12 m dengan $\mu_k = 0,30$. Hitung kecepatannya di dasar bidang dan energi yang hilang.
2. Sebuah benda 6 kg dilepaskan dari ketinggian 10 m dan mencapai tanah dengan kecepatan 12 m/s. Hitung energi yang hilang akibat hambatan udara.
3. Balok 25 kg meluncur pada lantai datar dengan kecepatan awal 8 m/s dan berhenti setelah 15 m. Hitung koefisien gesek kinetisnya.
4. Sebuah bak 150 kg meluncur dari bidang miring 30° sepanjang 6 m ($\mu_k = 0,25$), lalu menempuh lantai datar 3 m ($\mu_k = 0,40$), kemudian menekan pegas 20.000 N/m. Hitung simpangan pegasnya.
5. Jelaskan dengan konsep neraca energi mengapa kolam olak diperlukan pada bagian hilir pelimpah bendungan.
6. Uraikan mengapa prinsip kolom kuat-balok lemah dipilih dalam perencanaan bangunan tahan gempa. Tinjau dari sisi disipasi energi dan sisi keselamatan penghuni.

➤ *Tugas Case Method*

Pilih satu bangunan gedung bertingkat di Kota Makassar atau sekitarnya yang dapat Anda amati. Berdasarkan pengamatan luar dan informasi yang tersedia, identifikasi sistem penahan beban lateralnya (portal beton, dinding geser, atau kombinasi keduanya). Jelaskan bagaimana bangunan tersebut diperkirakan mendisipasi energi gempa, sebutkan lokasi yang diperkirakan menjadi daerah sendi plastis, dan berikan catatan mengenai hal-hal yang menurut Anda perlu diperhatikan. Sertakan sketsa denah dan potongan sederhana.

BAB XI

MOMEN GAYA DAN KESETIMBANGAN BENDA TEGAR

➤ Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 9)

Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:

- a. Menjelaskan pengertian momen gaya dan lengan momen;
- b. Menerapkan perjanjian tanda dan menghitung momen resultan;
- c. Menerapkan ketiga syarat kesetimbangan benda tegar;
- d. Menghitung reaksi tumpuan balok dengan berbagai jenis pembebanan;
- e. Menjelaskan hubungan antara titik berat dan titik tangkap gaya berat benda.

Peta konsep: Momen gaya → Lengan momen → Perjanjian tanda → Tiga syarat kesetimbangan → Reaksi tumpuan.

➤ Kasus Pembuka

Sebuah *tower crane* memiliki lengan (*jib*) sepanjang 45 m dengan beban penyeimbang (*counterweight*) 12 ton yang terpasang pada lengan belakang sejauh 12 m dari pusat menara. Operator akan mengangkat beban 3 ton.

Pertanyaan pemicu: pada jarak berapa dari menara beban 3 ton tersebut masih boleh diangkat agar momen penggulingan tidak melampaui momen penyeimbang? Mengapa kapasitas angkat kran selalu dicantumkan bersama radiusnya, tidak pernah sebagai angka tunggal?

➤ Pengertian Momen Gaya

Gaya tidak hanya dapat menggerakkan benda, tetapi juga dapat memutarnya. Kemampuan gaya untuk memutar benda terhadap suatu titik disebut momen gaya atau torsi, dengan lambang τ atau M .

$$M = F \times d \quad \text{atau} \quad M = F d \sin \theta$$

Dengan d jarak dari titik putar ke garis kerja gaya, diukur tegak lurus garis kerja tersebut. Jarak tegak lurus ini disebut lengan momen. Satuan momen adalah N·m; perhatikan bahwa satuan ini sama dengan satuan usaha, tetapi maknanya sama sekali berbeda.

Dua hal menentukan besar momen: besar gaya dan panjang lengan momennya. Kenyataan sederhana ini menjelaskan banyak hal di lapangan. Kunci pipa yang panjang memudahkan pengencangan baut karena lengan momennya panjang. Beban yang dipikul jauh dari badan terasa jauh lebih berat daripada beban sama yang dipeluk dekat badan. Dan *tower crane* memiliki kapasitas angkat yang menurun seiring bertambahnya radius.

Bila gaya bekerja melalui titik putar, lengan momennya nol sehingga momennya nol. Bila gaya sejajar dengan garis yang menghubungkan titik putar, momennya juga nol.



Gambar 16. Momen Gaya dan Lengan Momen terhadap Titik Putar O

➤ Perjanjian Tanda dan Momen Resultan

Karena momen memiliki arah putar, perlu ditetapkan perjanjian tanda. Perjanjian yang lazim dipakai dalam mekanika teknik: momen searah jarum jam bertanda positif dan momen berlawanan arah jarum jam bertanda negatif. Perjanjian sebaliknya juga sah, sepanjang digunakan secara taat asas dalam satu persoalan.

Momen resultan adalah jumlah aljabar semua momen terhadap titik yang sama:

$$\Sigma M = M_1 + M_2 + M_3 + \dots$$

Teorema Varignon, momen sebuah gaya terhadap suatu titik sama dengan jumlah momen komponen-komponen gaya tersebut terhadap titik yang sama.

Teorema ini sangat memudahkan perhitungan momen gaya yang miring: uraikan gaya menjadi komponen mendatar dan tegak, lalu hitung momen masing-masing komponen.

➤ Syarat Kesetimbangan Benda Tegar

Benda tegar dikatakan setimbang apabila ia tidak bergeser dan tidak berputar. Untuk sistem gaya sebidang, syaratnya terdiri atas tiga persamaan:

$$\Sigma F_x = 0 \quad \Sigma F_y = 0 \quad \Sigma M = 0$$

Ketiga persamaan tersebut memungkinkan penyelesaian sistem dengan paling banyak tiga besaran yang tidak diketahui. Struktur yang jumlah reaksinya sama dengan jumlah persamaan kesetimbangan disebut statis tertentu; bila lebih banyak, disebut statis tak tentu dan memerlukan tambahan persamaan perubahan bentuk yang akan dipelajari pada mata kuliah Analisis Struktur.

Strategi Pemilihan Titik Momen

Persamaan $\Sigma M = 0$ dapat diambil terhadap titik mana pun. Kebebasan ini merupakan alat yang sangat berguna: pilihlah titik yang dilalui oleh sebanyak mungkin gaya yang tidak diketahui, sebab gaya-gaya tersebut akan hilang dari persamaan. Dengan strategi ini, sebuah persoalan sering dapat diselesaikan langsung tanpa persamaan simultan.

Contoh Soal 11.1 — Balok dengan Beban Titik dan Beban Terbagi Rata

Soal: Balok sederhana bentang 8 m bertumpu sendi di A dan rol di B. Balok menerima beban terbagi rata 12 kN/m sepanjang seluruh bentang dan beban titik 40 kN pada jarak 3 m dari A. Hitung reaksi kedua tumpuan.

Penyelesaian: Beban terbagi rata digantikan resultannya, yaitu $W = 12 \times 8 = 96$ kN yang bekerja di tengah bentang, 4 m dari A.

$\Sigma M_A = 0$ (searah jarum jam positif):

$$40(3) + 96(4) - R_B(8) = 0 \rightarrow 120 + 384 = 8R_B \rightarrow R_B = 504/8 = 63 \text{ kN.}$$

$$\Sigma F_y = 0: R_A + 63 = 40 + 96 = 136 \rightarrow R_A = 73 \text{ kN.}$$

Pemeriksaan: $\Sigma M_B = R_A(8) - 40(5) - 96(4) = 584 - 200 - 384 = 0$. Terbukti benar.

Contoh Soal 11.2 — Menyelesaikan Kasus Pembuka

Soal: *Tower crane* dengan penyeimbang 12 ton pada jarak 12 m dari menara akan mengangkat beban 3 ton. Tentukan radius maksimum pengangkatan agar momen tetap setimbang.

Penyelesaian: Momen penyeimbang terhadap pusat menara:

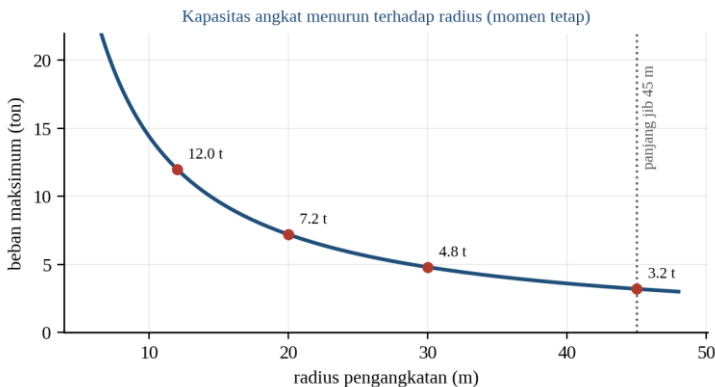
$$M_{\text{penyeimbang}} = 12.000 \times 9,8 \times 12 = 1.411.200 \text{ N}\cdot\text{m} = 1.411,2 \text{ kN}\cdot\text{m.}$$

Momen beban angkat pada radius r : $M_{\text{beban}} = 3.000 \times 9,8 \times r = 29.400r$.

Syarat setimbang: $29.400r = 1.411.200 \rightarrow r = 48 \text{ m}$.

Tafsiran: secara momen, beban 3 ton masih setimbang sampai radius 48 m. Namun lengan kran hanya 45 m, sehingga secara geometri radius maksimumnya 45 m. Pada radius tersebut, momen beban = $29.400 \times 45 = 1.323 \text{ kN}\cdot\text{m}$, yaitu 93,7% dari momen penyeimbang.

Catatan penting: hitungan ini merupakan penyederhanaan yang hanya memeriksa kesetimbangan momen terhadap satu titik. Kapasitas *tower crane* sesungguhnya juga dibatasi oleh kekuatan lentur lengan, kapasitas kabel, kekuatan menara, kestabilan pondasi, dan pengaruh angin. Karena itu, kapasitas angkat wajib dibaca dari tabel beban (*load chart*) yang diterbitkan pabrik, dan pembacaan tabel tersebut selalu berpasangan antara beban dan radius.



Gambar 17. Kapasitas Angkat Menurun terhadap Radius pada Momen Penyeimbang Tetap

➤ Titik Berat dan Titik Tangkap Gaya Berat

Setiap bagian kecil sebuah benda memiliki berat sendiri, sehingga gaya berat benda sesungguhnya merupakan sistem gaya sejajar yang terbagi ke seluruh volumenya. Sistem gaya sejajar tersebut dapat digantikan oleh satu gaya tunggal sebesar $W = mg$ yang bekerja pada satu titik tertentu, sedemikian sehingga momennya terhadap titik mana pun sama dengan jumlah momen seluruh bagian benda. Titik tersebut disebut titik berat.

$$\bar{x} = \Sigma(w_i x_i) / \Sigma w_i \quad \bar{y} = \Sigma(w_i y_i) / \Sigma w_i$$

Pengertian ini penting: titik berat bukan sekadar "titik tengah" benda, melainkan titik tangkap resultan gaya berat. Pembahasan lengkap mengenai cara menghitung titik berat benda gabungan diberikan pada Bab 12.

➤ Aplikasi dalam Teknik Sipil

- Perhitungan reaksi tumpuan. Semua analisis struktur dimulai dengan mencari reaksi tumpuan menggunakan tiga syarat kesetimbangan.
- Momen lentur balok. Momen lentur pada suatu potongan adalah jumlah momen semua gaya di salah satu sisi potongan tersebut, dan menjadi dasar penentuan kebutuhan tulangan lentur.
- Kapasitas alat angkat. Tabel beban kran, *excavator*, dan *forklift* semuanya berpijak pada kesetimbangan momen terhadap titik jungkit.
- Momen pada baut sambungan. Baut pengencang dipratarik dengan momen tertentu menggunakan

kunci momen; nilai momen inilah yang menjamin gaya jepit yang direncanakan.

➤ Rangkuman

- a. Momen gaya adalah hasil kali gaya dengan lengan momennya, yaitu jarak tegak lurus dari titik putar ke garis kerja gaya.
- b. Perjanjian tanda momen harus ditetapkan dan digunakan secara taat asas dalam satu persoalan.
- c. Keseimbangan benda tegar sebidang memerlukan $\Sigma F_x = 0$, $\Sigma F_y = 0$, dan $\Sigma M = 0$.
- d. Titik momen dapat dipilih bebas; pilihlah titik yang dilalui gaya-gaya tak diketahui agar persamaan menjadi sederhana.
- e. Kapasitas angkat alat berat selalu berpasangan dengan radiusnya, karena yang dibatasi sesungguhnya adalah momennya.

➤ Latihan Mandiri

1. Gaya 200 N bekerja pada ujung tuas sepanjang 0,8 m tegak lurus tuas. Hitung momennya terhadap titik putar.
2. Ulangi soal sebelumnya bila gaya membentuk sudut 55° terhadap tuas.
3. Balok sederhana bentang 6 m menerima beban titik 25 kN pada 2 m dari A dan 35 kN pada 4,5 m dari A. Hitung reaksi kedua tumpuannya.

4. Balok sederhana bentang 10 m menerima beban terbagi rata 8 kN/m pada seluruh bentang dan beban titik 50 kN di tengah bentang. Hitung reaksi tumpuannya.
5. Balok kantilever panjang 3 m terjepit di A menerima beban terbagi rata 10 kN/m. Hitung reaksi vertikal dan momen jepit di A.
6. Sebuah *tower crane* memiliki penyeimbang 15 ton pada jarak 10 m dari menara. Hitung beban maksimum yang boleh diangkat pada radius 40 m berdasarkan kesetimbangan momen.
7. Jelaskan mengapa persamaan $\Sigma M = 0$ dapat diambil terhadap titik mana pun, dan mengapa pemilihan titik yang tepat dapat menyederhanakan penyelesaian.

➤ Tugas Case Method

Dapatkan tabel beban (*load chart*) sebuah alat angkat, dapat berupa *mobile crane*, *tower crane*, atau *excavator*, dari katalog pabrikan. Pilih tiga pasangan beban–radius dari tabel tersebut dan hitung momennya masing-masing. Bandingkan ketiga nilai momen tersebut, lalu jelaskan mengapa nilainya tidak selalu tepat sama. Uraikan faktor-faktor lain di luar kesetimbangan momen yang turut membatasi kapasitas alat.

BAB XII

TITIK BERAT, JENIS KESETIMBANGAN, DAN APLIKASI TORSI

➤ **Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 10 & 11 – bobot 9%)**

Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:

- a. Menghitung titik berat benda homogen dan benda gabungan;
- b. Menghitung titik berat benda satu, dua, dan tiga dimensi;
- c. Membedakan kesetimbangan stabil, labil, dan indiferen;
- d. Menjelaskan momen kopel dan pengertian dasar momen inersia;
- e. Menerapkan konsep torsi pada poros dan elemen sambungan;
- f. Memeriksa kestabilan dinding penahan tanah terhadap guling dan geser.

Peta konsep: Titik berat → Benda gabungan → Jenis kesetimbangan → Kopel dan momen inersia → Torsi → Kestabilan dinding penahan.

➤ Kasus Pembuka

Sebuah dinding penahan tanah tipe gravitasi setinggi 4 m akan dibangun untuk menahan timbunan pada lereng belakang kampus. Perencana mengusulkan dinding beton berbentuk trapesium dengan lebar atas 0,8 m, lebar dasar 2,4 m, dan tinggi 4 m. Tekanan tanah aktif menghasilkan gaya mendatar total 68 kN per meter panjang dinding, yang bekerja pada ketinggian sepertiga tinggi dari dasar.

Pertanyaan pemicu: di mana titik berat dinding tersebut? Apakah dinding aman terhadap penggulingan dan penggeseran? Bila belum aman, bagian mana yang perlu diubah, dan mengapa memperlebar dasar lebih efektif daripada mempertinggi dinding?

➤ Titik Berat Benda Homogen

Untuk benda homogen dengan bentuk teratur, titik berat berada pada pusat simetrinya. Beberapa nilai yang perlu dihafal disajikan pada tabel berikut, dengan $\bar{y}$ diukur dari sisi dasar.

Tabel 13. Posisi Titik Berat Benda Homogen Berbentuk Teratur

Bentuk	Posisi Titik Berat	Luas atau Volume
Persegi panjang	$\bar{y} = h/2$ dari dasar	$A = b h$
Segitiga	$\bar{y} = h/3$ dari dasar	$A = \frac{1}{2} b h$

Bentuk	Posisi Titik Berat	Luas atau Volume
Setengah lingkaran	$\bar{y} = 4R/(3\pi)$ dari diameter	$A = \frac{1}{2} \pi R^2$
Seperempat lingkaran	$\bar{x} = \bar{y} = 4R/(3\pi)$	$A = \frac{1}{4} \pi R^2$
Kerucut padat	$\bar{y} = h/4$ dari dasar	$V = \frac{1}{3} \pi R^2 h$
Setengah bola padat	$\bar{y} = 3R/8$ dari dasar	$V = \frac{2}{3} \pi R^3$
Prisma atau silinder	$\bar{y} = h/2$ dari dasar	$V = A h$

➤ Titik Berat Benda Gabungan

Benda gabungan diselesaikan dengan membaginya menjadi bentuk-bentuk sederhana yang titik beratnya telah diketahui, kemudian menghitung rata-rata terbobot posisinya. Untuk benda homogen, berat dapat digantikan oleh luas (benda dua dimensi) atau volume (benda tiga dimensi):

$$\bar{x} = \Sigma(A_i x_i) / \Sigma A_i \quad \bar{y} = \Sigma(A_i y_i) / \Sigma A_i$$

Untuk benda berlubang, bagian yang berlubang dihitung dengan luas negatif. Cara ini jauh lebih cepat daripada membagi benda menjadi banyak potongan kecil.

Contoh Soal 12.1 — Titik Berat Dinding Trapesium

Soal: Hitung posisi titik berat penampang dinding trapesium pada Kasus Pembuka: lebar atas 0,8 m, lebar dasar 2,4 m, tinggi 4 m, dengan sisi muka (depan) vertikal.

Penyelesaian: Bagi penampang menjadi dua bagian dengan titik asal di sudut kiri bawah (sisi muka).

Bagian 1 — persegi panjang 0,8 m $\times$ 4 m: $A_1 = 3,2 \text{ m}^2$; $x_1 = 0,4 \text{ m}$; $y_1 = 2,0 \text{ m}$.

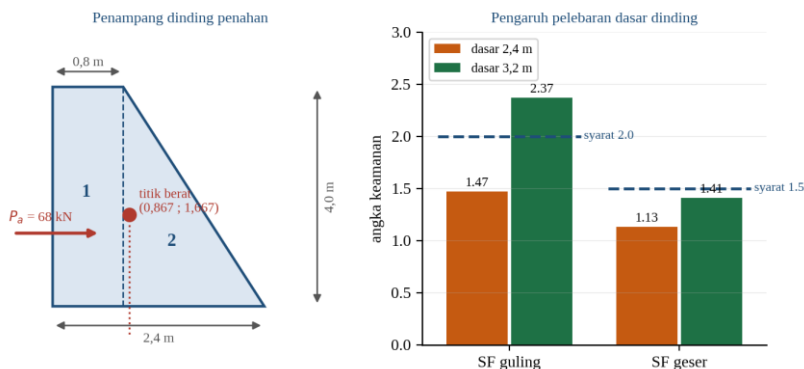
Bagian 2 — segitiga dengan lebar dasar $(2,4 - 0,8) = 1,6 \text{ m}$ dan tinggi 4 m: $A_2 = \frac{1}{2}(1,6)(4) = 3,2 \text{ m}^2$; $x_2 = 0,8 + 1,6/3 = 1,333 \text{ m}$; $y_2 = 4/3 = 1,333 \text{ m}$.

Luas total: $A = 3,2 + 3,2 = 6,4 \text{ m}^2$.

$\bar{x} = [3,2(0,4) + 3,2(1,333)]/6,4 = (1,28 + 4,267)/6,4 = 0,867 \text{ m}$ dari sisi muka.

$\bar{y} = [3,2(2,0) + 3,2(1,333)]/6,4 = (6,4 + 4,267)/6,4 = 1,667 \text{ m}$ dari dasar.

Berat dinding per meter panjang: dengan berat volume beton 24 kN/m^3 , $W = 6,4 \times 24 = 153,6 \text{ kN/m}$.



Gambar 18. Titik Berat Penampang Dinding Penahan dan Pengaruh Pelebaran Dasarnya

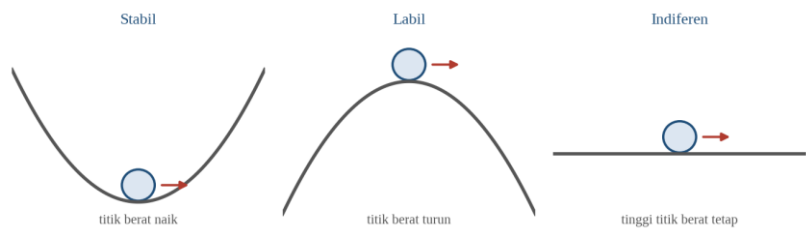
➤ Jenis-Jenis Kestimbangan

Ketika sebuah benda yang setimbang diberi gangguan kecil, ia dapat memberi tiga macam tanggapan.

Tabel 14. Jenis-jenis Kestimbangan dan Cirinya

Jenis	Perilaku setelah Diganggu	Kedudukan Titik Berat	Contoh
Stabil	Kembali ke kedudukan semula	Titik berat naik saat diganggu	Piramida, dinding penahan gravitasi
Labil	Semakin menjauh dari kedudukan semula	Titik berat turun saat diganggu	Batang tegak di atas ujungnya

Jenis	Perilaku setelah Diganggu	Kedudukan Titik Berat	Contoh
Indiferen	Tetap setimbang pada kedudukan baru	Titik berat tidak berubah tinggi	Bola di atas bidang datar



Gambar 19. Tiga Jenis Kestimbangan Ditinjau dari Perubahan Kedudukan Titik Berat

Kriteria praktis kestabilan sebuah benda terhadap penggulingan adalah letak garis kerja gaya berat: selama garis vertikal melalui titik berat masih jatuh di dalam bidang tumpu, benda tetap setimbang. Ketika garis tersebut jatuh di luar bidang tumpu, benda pasti terguling. Karena itu, memperlebar bidang tumpu dan menurunkan titik berat merupakan dua cara pokok meningkatkan kestabilan.

➤ Momen Kopel dan Pengertian Momen Inersia

Momen Kopel

Kopel adalah sepasang gaya sama besar, berlawanan arah, dan tidak berada pada satu garis kerja. Resultan gaya sebuah kopel sama dengan nol, sehingga kopel tidak menimbulkan pergeseran, hanya menimbulkan putaran.

$$M = F d \quad (d = \text{jarak antara kedua garis kerja gaya})$$

Ciri khas kopel adalah momennya bernilai sama terhadap titik mana pun. Kopel muncul pada beban momen di ujung balok, pada kolom yang menerima beban eksentris, dan pada kunci momen yang dipakai mengencangkan baut.

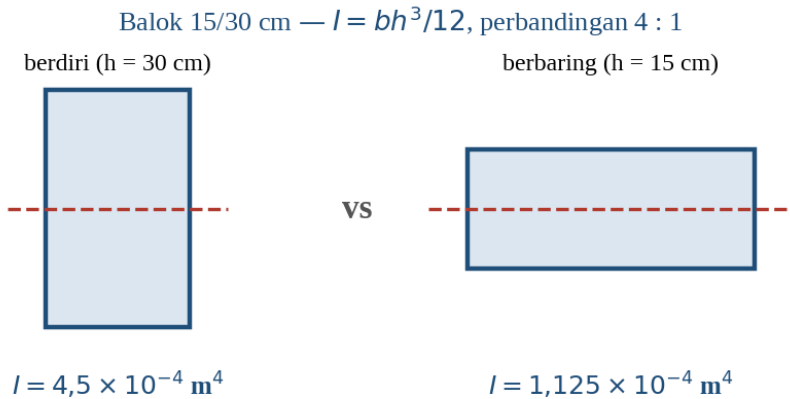
Momen Inersia

Dalam gerak rotasi, peran massa digantikan oleh momen inersia, yaitu ukuran sulitnya benda diputar. Momen inersia bergantung tidak hanya pada massa, tetapi juga pada penyebaran massa terhadap sumbu putarnya:

$$I = \sum m_i r_i^2 \quad \text{dan} \quad \sum \tau = I \alpha$$

Dalam mekanika bahan, dikenal pula momen inersia penampang yang bersatuan m^4 dan menyatakan kemampuan bentuk penampang menahan lentur:

$$I_{\text{persegi}} = b h^3 / 12 \quad I_{\text{lingkaran}} = \pi d^4 / 64$$



Gambar 20. Pengaruh Arah Pemasangan Balok terhadap Momen Inersia Penampang

Perhatikan bahwa tinggi penampang berpangkat tiga. Karena itu, balok berukuran 15/30 cm yang dipasang berdiri memiliki momen inersia empat kali lebih besar daripada balok sama yang dipasang berbaring. Kenyataan inilah yang menjelaskan mengapa balok kayu selalu dipasang dengan sisi panjangnya vertikal.

➤ Aplikasi Torsi pada Poros dan Sambungan

Torsi yang bekerja pada batang silindris menimbulkan tegangan geser puntir yang besarnya:

$$\tau = T r / J \quad \text{dengan } J = \pi d^4 / 32 \text{ untuk poros bulat masif}$$

Tegangan puntir maksimum terjadi pada permukaan terluar poros, sedangkan pada pusat poros tegangannya nol. Kenyataan ini menjelaskan mengapa

poros berlubang (*hollow shaft*) lebih efisien: bahan di pusat poros hampir tidak berperan menahan puntir, sehingga membuangnya menghemat berat tanpa banyak mengurangi kekuatan puntir.

Dalam teknik sipil, torsi muncul pada balok tepi yang memikul pelat kantilever pada satu sisinya, pada balok lengkung, pada kolom yang menerima beban eksentris, serta pada pengencangan baut mutu tinggi dengan kunci momen. Nilai momen pengencangan baut ditetapkan agar gaya pratarik yang timbul sesuai rencana, karena gaya pratarik itulah yang menghasilkan gesekan antarpelat pada sambungan tipe *friction*.

➤ Aplikasi: Kestabilan Dinding Penahan Tanah

Dinding penahan tanah tipe gravitasi harus diperiksa terhadap tiga moda kegagalan: penggulingan, penggeseran, dan keruntuhan daya dukung tanah dasar. Dua yang pertama merupakan penerapan langsung materi bab ini.

Contoh Soal 12.2 — Menyelesaikan Kasus Pembuka
Soal: Dinding trapesium pada Contoh Soal 12.1 ($W = 153,6 \text{ kN/m}$, $\bar{x} = 0,867 \text{ m}$ dari sisi muka, lebar dasar $2,4 \text{ m}$) menerima gaya tekanan tanah mendatar $P_a = 68 \text{ kN/m}$ yang bekerja pada ketinggian $h/3 = 1,333 \text{ m}$ dari dasar. Koefisien gesek dasar dinding terhadap tanah $\mu = 0,50$. Periksa keamanan terhadap guling dan geser.

Pemeriksaan terhadap guling. Ambil momen terhadap ujung kaki depan dinding (titik jungkit).

Momen penggulingan: $M_g = P_a \times 1,333 = 68 \times 1,333 = 90,7 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$.

Momen penahan: $M_p = W \times \bar{x} = 153,6 \times 0,867 = 133,2 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$.

Angka keamanan guling: $SF_{\text{guling}} = 133,2/90,7 = 1,47$.

Persyaratan yang lazim adalah $SF \geq 2,0$, sehingga dinding ini belum memenuhi syarat guling.

Pemeriksaan terhadap geser.

Gaya penahan geser: $F_p = \mu W = 0,50 \times 153,6 = 76,8 \text{ kN/m}$.

Angka keamanan geser: $SF_{\text{geser}} = 76,8/68 = 1,13$.

Persyaratan yang lazim adalah $SF \geq 1,5$, sehingga dinding belum memenuhi syarat geser.

Usulan perbaikan. Coba lebar dasar diperbesar dari 2,4 m menjadi 3,2 m dengan lebar atas tetap 0,8 m.

Segitiga baru: lebar dasar 2,4 m, $A_2 = \frac{1}{2}(2,4)(4) = 4,8 \text{ m}^2$;
 $x_2 = 0,8 + 2,4/3 = 1,6 \text{ m}$.

Luas total $= 3,2 + 4,8 = 8,0 \text{ m}^2 \rightarrow W = 8,0 \times 24 = 192 \text{ kN/m}$.

$\bar{x} = [3,2(0,4) + 4,8(1,6)]/8,0 = (1,28 + 7,68)/8,0 = 1,12 \text{ m}$.

$M_p = 192 \times 1,12 = 215,0 \text{ kN}\cdot\text{m/m} \rightarrow SF_{\text{guling}} = 215,0/90,7 = 2,37 \checkmark$

$F_p = 0,50 \times 192 = 96,0 \text{ kN/m} \rightarrow SF_{\text{geser}} = 96,0/68 = 1,41$, masih sedikit di bawah 1,5.

Untuk memenuhi syarat geser, dapat ditambahkan kunci geser (*shear key*) pada dasar dinding, atau dasar

dinding dimiringkan sedikit ke belakang sehingga sebagian gaya tanah tertahan oleh komponen berat.

Mengapa memperlebar dasar lebih efektif daripada mempertinggi dinding? Jawabannya terletak pada bagaimana kedua besaran itu masuk ke dalam perhitungan. Memperlebar dasar meningkatkan dua hal sekaligus: berat dinding dan lengan momen penahan x . Sebaliknya, mempertinggi dinding memang menambah berat, tetapi juga menambah tinggi timbunan yang ditahan, sehingga gaya tekanan tanah yang sebanding dengan kuadrat tinggi bertambah lebih cepat daripada tambahan momen penahannya. Inilah sebabnya dinding penahan gravitasi selalu berbentuk melebar ke bawah.

➤ Rangkuman

- Titik berat benda gabungan dihitung sebagai rata-rata terbobot posisi bagian-bagiannya, dengan bagian berlubang dihitung sebagai luas negatif.
- Benda tetap setimbang selama garis vertikal melalui titik beratnya jatuh di dalam bidang tumpu.
- Kesetimbangan stabil ditandai naiknya titik berat ketika benda diganggu.
- Kopel memiliki resultan gaya nol dan momen yang sama terhadap titik mana pun.
- Momen inersia penampang sebanding dengan pangkat tiga tinggi penampang, sehingga arah pemasangan balok sangat menentukan kekuatannya.

- f. Kestabilan dinding penahan diperiksa terhadap guling ($SF \geq 2,0$) dan geser ($SF \geq 1,5$); memperlebar dasar merupakan cara yang paling efektif.

➤ Latihan Mandiri

1. Hitung titik berat penampang berbentuk huruf L dengan lebar dasar 30 cm, tinggi total 40 cm, dan tebal kaki 10 cm pada kedua sisinya.
2. Hitung titik berat penampang T dengan pelat atas 40 cm × 10 cm dan badan 10 cm × 30 cm.
3. Sebuah pelat persegi 60 cm × 60 cm memiliki lubang lingkaran berdiameter 20 cm yang berpusat 15 cm dari sisi kiri dan 30 cm dari sisi bawah. Hitung titik berat pelat berlubang tersebut.
4. Jelaskan mengapa *tower crane* memerlukan pondasi yang lebar, ditinjau dari kriteria letak garis kerja gaya berat.
5. Hitung momen inersia penampang balok 20/40 cm terhadap sumbu mendatar melalui titik beratnya, kemudian hitung pula bila balok dipasang berbaring. Bandingkan keduanya.
6. Poros bulat masif berdiameter 60 mm menerima torsi 2,5 kN·m. Hitung tegangan puntir maksimumnya.
7. Dinding penahan gravitasi berbentuk trapesium dengan lebar atas 0,6 m, lebar dasar 2,0 m, dan tinggi 3,5 m menerima gaya tekanan tanah mendatar 50 kN/m pada ketinggian 1,17 m dari dasar. Berat volume beton 24 kN/m³ dan $\mu = 0,45$. Hitung angka keamanan

terhadap guling dan geser, lalu simpulkan apakah dinding tersebut aman.

8. Berdasarkan hasil soal sebelumnya, usulkan satu perubahan dimensi yang membuat dinding memenuhi kedua syarat keamanan, lengkap dengan perhitungannya.

➤ ***Tugas Case Method (instrumen penilaian Tugas, bobot 5%)***

Amati satu dinding penahan tanah nyata di sekitar tempat tinggal Anda atau di lingkungan kampus. Ukur atau taksir dimensinya, lalu gambarkan penampangnya. Hitung titik berat, berat sendiri, gaya tekanan tanah dengan asumsi yang Anda sebutkan secara jelas, serta angka keamanan terhadap guling dan geser. Berikan penilaian terhadap kondisi dinding tersebut, termasuk tanda-tanda visual seperti retak, kemiringan, atau penurunan, dan usulkan perbaikan bila diperlukan. Laporan dilengkapi foto, sketsa berskala, dan perhitungan lengkap, maksimal 6 halaman.

BAB XIII

SIFAT MEKANIK ZAT, KEKUATAN BAHAN, DAN MOMEN PUNTIR

➤ Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 12 & 13)

Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:

- a. Mengidentifikasi perbedaan sifat mekanik zat padat, cair, dan gas;
- b. Menjelaskan konsep tegangan, regangan, dan modulus elastisitas;
- c. Menafsirkan diagram tegangan–regangan bahan konstruksi;
- d. Membedakan sifat elastis, plastis, ulet, dan getas;
- e. Menjelaskan hubungan antara gaya dan momen puntir serta menghitung tegangan puntir.

Peta konsep: Sifat mekanik zat → Tegangan dan regangan → Hukum Hooke dan modulus elastisitas → Diagram tegangan–regangan → Momen puntir.

➤ Kasus Pembuka

Sebuah kolom beton bertulang berukuran 300 mm × 300 mm dengan tinggi 3,5 m memikul beban aksial tekan 900 kN. Kolom tersebut diberi tulangan 8 batang berdiameter 16 mm. Mutu beton $f'_c = 25$ MPa dengan $E_c \approx 23.500$ MPa, sedangkan baja memiliki tegangan luluh 420 MPa dengan $E_s = 200.000$ MPa.

Pertanyaan pemicu: berapa besar tegangan yang timbul pada beton dan pada baja? Mengapa keduanya tidak menerima tegangan yang sama besar, padahal berada dalam satu elemen dan memendek bersama? Berapa pemendekan kolom akibat beban tersebut?

➤ **Sifat Mekanik Zat Padat, Cair, dan Gas**

Ketiga wujud zat memberikan tanggapan yang berbeda terhadap gaya yang dikerjakan padanya. Perbedaan tersebut berakar pada jarak dan kekuatan ikatan antarpartikelnya.

Tabel 15. Perbandingan Sifat Mekanik Zat Padat, Cair, dan Gas

Sifat	Zat Padat	Zat Cair	Gas
Bentuk	Tetap	Mengikuti wadah	Mengikuti wadah
Volume	Tetap	Tetap	Berubah
Mampu menahan tarik	Ya	Hampir tidak	Tidak
Mampu menahan geser	Ya	Tidak dalam keadaan diam	Tidak
Kemampatan	Sangat kecil	Kecil	Besar
Contoh dalam konstruksi	Beton, baja, kayu	Air, beton segar	Udara, gas dalam rongga

Ketidakmampuan zat cair menahan tegangan geser dalam keadaan diam memiliki akibat praktis yang penting: beton segar berperilaku seperti zat cair kental sehingga menimbulkan tekanan lateral pada bekisting, dan tekanan tersebut bertambah dengan kedalaman. Karena itu, bekisting kolom di bagian bawah selalu memerlukan pengaku lebih rapat daripada di bagian atas.

➤ Tegangan dan Regangan

Tegangan

Tegangan (*stress*) adalah gaya per satuan luas penampang:

$$\sigma = F / A$$

Satuan tegangan adalah N/m² atau pascal (Pa); dalam praktik keteknikan digunakan MPa yang setara dengan N/mm². Berdasarkan arah gaya terhadap penampang, tegangan dibedakan menjadi tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser.

Regangan

Regangan (*strain*) adalah perbandingan perubahan panjang terhadap panjang mula-mula:

$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

Regangan tidak memiliki satuan karena merupakan perbandingan dua panjang. Nilainya sangat kecil, sehingga sering dinyatakan dalam mikroregangan (1 $\mu\varepsilon$ = 10⁻⁶). Baja luluh pada regangan sekitar 0,002 atau 2.000 $\mu\varepsilon$, sedangkan beton hancur pada regangan tekan sekitar 0,003.

➤ Hukum Hooke dan Modulus Elastisitas

Pada daerah elastis, tegangan berbanding lurus dengan regangan. Pernyataan ini disebut hukum Hooke:

$$\sigma = E \varepsilon \quad \rightarrow \quad E = \sigma / \varepsilon$$

E disebut modulus elastisitas atau modulus Young, dengan satuan sama seperti tegangan karena regangan tidak bersatuan. Modulus elastisitas menyatakan kekakuan bahan: semakin besar E , semakin kecil perubahan bentuk untuk tegangan yang sama.

Dari kedua persamaan di atas dapat diturunkan rumus pemendekan atau perpanjangan batang akibat gaya aksial, yang sangat sering dipakai dalam praktik:

$$\Delta L = F L_0 / (A E)$$

Tabel 16. Modulus Elastisitas dan Kekuatan Bahan Konstruksi

Bahan	E (GPa)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tarik (MPa)
Baja tulangan	200	≈ 420 (luluh)	≈ 420 (luluh)
Beton f'_c 25 MPa	$\approx 23,5$	25	$\approx 2,5$ (10% kuat tekan)
Kayu (sejajar serat)	10 – 15	20 – 40	40 – 80

Bahan	E (GPa)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tarik (MPa)
Aluminium	70	≈ 200	≈ 200
Bata pasangan	5 – 15	3 – 10	Sangat kecil

Nilai pada tabel bersifat perkiraan dan hanya untuk latihan. Perhatikan satu hal penting: kuat tarik beton hanya sekitar sepersepuluh kuat tekannya. Kenyataan inilah yang menjadi seluruh alasan keberadaan beton bertulang tulangan baja dipasang tepat pada daerah yang mengalami tarik, karena beton sendiri hampir tidak mampu menahannya.

Contoh Soal 13.1 — Menyelesaikan Kasus Pembuka

Soal: Kolom 300×300 mm dengan 8 tulangan $\varnothing 16$ mm memikul beban tekan 900 kN. $E_c = 23.500$ MPa, $E_s = 200.000$ MPa, tinggi kolom 3.500 mm. Hitung tegangan pada beton dan baja serta pemendekan kolom.

Penyelesaian: Karena beton dan baja terikat sempurna, keduanya mengalami regangan yang sama ($\epsilon_c = \epsilon_s$). Inilah prinsip keserasian regangan.

Luas baja: $A_s = 8 \times \frac{1}{4}\pi(16^2) = 8 \times 201,06 = 1.608,5$ mm².

Luas bruto: $A_g = 300 \times 300 = 90.000$ mm². Luas beton neto: $A_c = 90.000 - 1.608,5 = 88.391,5$ mm².

Karena regangannya sama, $\sigma_s/E_s = \sigma_c/E_c$, sehingga $\sigma_s = \sigma_c \times (200.000/23.500) = 8,511 \sigma_c$.

Kesetimbangan gaya: $P = \sigma_c A_c + \sigma_s A_s$

$$900.000 = \sigma_c(88.391,5) + 8,511\sigma_c(1.608,5) = \sigma_c(88.391,5 + 13.692,3) = \sigma_c(102.083,8)$$

$$\sigma_c = 900.000/102.083,8 = 8,82 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s = 8,511 \times 8,82 = 75,1 \text{ MPa}$$

$$\text{Pemendekan kolom: } \varepsilon = \sigma_c/E_c = 8,82/23.500 = 3,753 \times 10^{-4}.$$

$$\Delta L = \varepsilon L = 3,753 \times 10^{-4} \times 3.500 = 1,31 \text{ mm}.$$

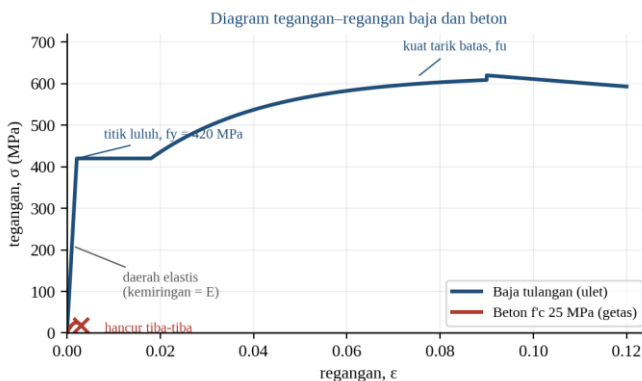
Mengapa tegangannya berbeda? Karena keduanya memendek bersama tetapi kekakuannya berbeda. Baja delapan setengah kali lebih kaku daripada beton, sehingga untuk regangan yang sama ia menerima tegangan delapan setengah kali lebih besar. Bahan yang lebih kaku selalu "menarik" bagian beban yang lebih besar kepada dirinya.

Pemeriksaan keamanan: $\sigma_c = 8,82 \text{ MPa}$ jauh di bawah $f'_c = 25 \text{ MPa}$, dan $\sigma_s = 75,1 \text{ MPa}$ jauh di bawah 420 MPa . Kolom aman terhadap beban tersebut. Perencanaan sesungguhnya masih harus memeriksa kelangsingan kolom dan pengaruh momen.

➤ Diagram Tegangan–Regangan

Diagram tegangan–regangan diperoleh dari uji tarik dan merupakan "sidik jari" sebuah bahan. Pada baja tulangan, diagram tersebut memperlihatkan beberapa daerah yang jelas.

- Daerah elastis linear. Tegangan berbanding lurus dengan regangan dan bahan kembali ke bentuk semula bila beban dilepas. Batas atasnya disebut batas proporsional. Kemiringan garis pada daerah ini adalah E .
- Batas elastis. Tegangan tertinggi yang masih memungkinkan bahan kembali sepenuhnya ke bentuk asal.
- Titik luluh (*yield point*). Bahan mulai berubah bentuk secara tetap tanpa penambahan tegangan yang berarti. Tegangan pada titik ini, f_y , merupakan dasar perencanaan struktur baja.
- Daerah pengerasan regangan (*strain hardening*). Tegangan naik lagi seiring regangan sampai mencapai nilai tertinggi, yaitu kuat tarik batas (f_u).
- Daerah pengecilan setempat (*necking*) hingga putus. Penampang mengecil pada satu tempat dan bahan akhirnya patah.



Gambar 20. Diagram Tegangan–Regangan Baja Tulangan (Ulet) dan Beton (Getas)

Beton memberikan diagram yang sangat berbeda: hubungannya hampir tidak pernah lurus, tidak memiliki titik luluh yang jelas, dan hancur pada regangan tekan sekitar 0,003 tanpa tahap perubahan bentuk plastis yang panjang.

Sifat Elastis, Plastis, Ulet, dan Getas

- a. Elastis — bahan kembali ke bentuk semula setelah beban dilepas.
- b. Plastis — bahan mengalami perubahan bentuk tetap setelah beban dilepas.
- c. Ulet (*ductile*) — bahan mampu berubah bentuk besar sebelum patah; baja adalah contohnya. Keuletan sangat berharga karena memberi peringatan sebelum kegagalan dan memungkinkan penyerapan energi gempa.
- d. Getas (*brittle*) — bahan patah tiba-tiba dengan sedikit perubahan bentuk; beton tanpa tulangan, kaca, dan bata adalah contohnya. Kegagalan getas berbahaya justru karena tidak memberi peringatan.

Perbedaan inilah yang menjadi dasar filosofi perencanaan struktur: struktur dirancang agar kegagalan yang mungkin terjadi bersifat ulet, bukan getas. Pada balok beton bertulang, hal ini diwujudkan dengan membatasi jumlah tulangan agar tulangan baja meluluh lebih dahulu sebelum beton hancur, sehingga balok memberi tanda berupa lendutan besar dan retak sebelum runtuh.

➤ Momen Puntir

Momen puntir atau torsi adalah momen yang bekerja pada bidang tegak lurus sumbu batang, sehingga menimbulkan putaran penampang terhadap sumbu tersebut. Torsi menimbulkan tegangan geser puntir yang besarnya:

$$\tau = T r / J$$

Dengan T momen puntir (N·mm), r jarak dari pusat penampang (mm), dan J momen inersia polar (mm⁴). Untuk penampang bulat:

$$J_{\text{masif}} = \pi d^4 / 32 \quad J_{\text{berlubang}} = \pi (d_2^4 - d_1^4) / 32$$

Tegangan puntir terbesar terjadi pada permukaan terluar, yaitu pada $r = d/2$:

$$\tau_{\text{maks}} = 16 T / (\pi d^3)$$

Sudut puntir yang terjadi sepanjang batang dihitung dengan:

$$\theta = T L / (J G)$$

Dengan G modulus geser bahan, yang akan dibahas pada Bab 14.

Contoh Soal 13.2 — Tegangan Puntir pada Poros

Soal: Poros bulat masif berdiameter 50 mm dan panjang 1,2 m menerima momen puntir 1,8 kN·m. Bahan poros memiliki $G = 80$ GPa. Hitung tegangan puntir maksimum dan sudut puntirnya.

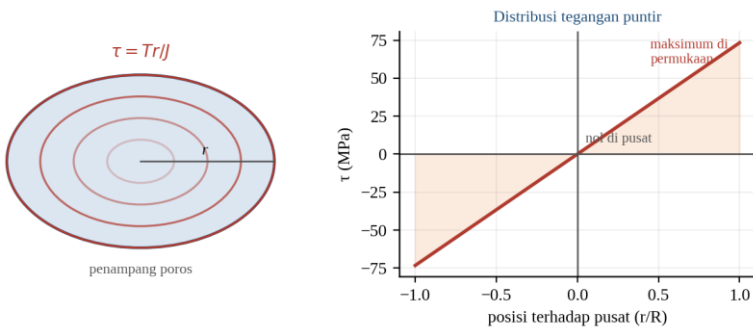
Penyelesaian: $T = 1,8 \text{ kN} \cdot \text{m} = 1,8 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$.

$$J = \pi(50^4)/32 = \pi(6.250.000)/32 = 613.592 \text{ mm}^4.$$

$$\tau_{\text{maks}} = T r/J = (1,8 \times 10^6 \times 25)/613.592 = 73,3 \text{ MPa}.$$

$$\text{Sudut puntir: } \theta = T L/(J G) = (1,8 \times 10^6 \times 1.200)/(613.592 \times 80.000) = 0,044 \text{ rad} = 2,52^\circ.$$

Catatan: bila poros dibuat berlubang dengan diameter luar 50 mm dan diameter dalam 30 mm, $J = \pi(50^4 - 30^4)/32 = 534.071 \text{ mm}^4$ — hanya berkurang 13% — sedangkan luas penampangnya berkurang 36%. Inilah bukti efisiensi poros berlubang dalam menahan puntir.



Gambar 21. Distribusi Tegangan Puntir pada Penampang Poros Bulat

➤ Aplikasi dalam Teknik Sipil

- Pemilihan mutu bahan. Nilai f'_c beton dan f_y baja yang tercantum pada gambar kerja adalah hasil langsung dari uji tegangan-regangan.

- b. Perhitungan lendutan dan pemendekan. Rumus $\Delta L = FL/(AE)$ dipakai untuk menghitung pemendekan kolom, perpanjangan batang tarik rangka, dan pemuluran kabel prategang.
- c. Perencanaan sambungan las dan baut. Kapasitas sambungan ditetapkan berdasarkan tegangan izin bahan.
- d. Torsi pada balok tepi. Balok tepi yang memikul pelat kantilever pada satu sisi menerima torsi dan memerlukan tulangan sengkang tertutup.
- e. Prategang. Kabel prategang ditarik hingga mendekati batas elastisnya untuk memberikan tegangan tekan awal pada beton, sehingga kelemahan beton terhadap tarik dapat diatasi.

➤ Rangkuman

- a. Zat padat mampu menahan tarik dan geser; zat cair tidak mampu menahan geser dalam keadaan diam.
- b. Tegangan adalah gaya per satuan luas; regangan adalah perbandingan perubahan panjang terhadap panjang awal dan tidak bersatuan.
- c. Hukum Hooke $\sigma = E\varepsilon$ berlaku pada daerah elastis; E menyatakan kekakuan bahan.
- d. Pada elemen komposit, bahan yang lebih kaku menerima bagian tegangan yang lebih besar karena regangannya sama.
- e. Kuat tarik beton hanya sekitar sepersepuluh kuat tekannya, dan inilah alasan pokok penggunaan tulangan baja.

- f. Bahan ulet memberi peringatan sebelum gagal; struktur dirancang agar kegagalannya bersifat ulet, bukan getas. Tegangan puntir terbesar terjadi pada permukaan terluar penampang, sehingga poros berlubang lebih efisien.

➤ Latihan Mandiri

1. Batang baja berdiameter 20 mm dan panjang 2 m menerima gaya tarik 60 kN. Hitung tegangan, regangan, dan perpanjangannya bila $E = 200$ GPa.
2. Kolom beton 250×250 mm memikul beban tekan 500 kN. Hitung tegangan tekan yang timbul dan bandingkan dengan $f'_c = 25$ MPa.
3. Sebuah kabel baja berdiameter 12 mm dan panjang 15 m memanjang 9 mm saat dibebani. Hitung gaya tarik yang bekerja bila $E = 200$ GPa.
4. Kolom beton bertulang 350×350 mm dengan 6 tulangan $\varnothing 19$ mm memikul beban 1.100 kN. Dengan $E_c = 23.500$ MPa dan $E_s = 200.000$ MPa, hitung tegangan pada beton dan baja.
5. Jelaskan mengapa beton bertulang menempatkan tulangan pada daerah tarik balok, bukan pada daerah tekan.
6. Gambarkan secara skematis diagram tegangan-regangan baja tulangan dan tandai batas proporsional, titik luluh, serta kuat tarik batasnya.
7. Poros bulat masif berdiameter 40 mm menerima torsi 1,2 kN·m. Hitung tegangan puntir maksimumnya.

8. Bandingkan momen inersia polar poros masif berdiameter 60 mm dengan poros berlubang berdiameter luar 60 mm dan diameter dalam 40 mm. Hitung persentase pengurangan J dan pengurangan luas penampangnya, lalu simpulkan.

➤ **Tugas Case Method**

Kunjungi laboratorium bahan atau kumpulkan satu laporan hasil uji bahan (uji tarik baja tulangan atau uji tekan beton). Berdasarkan data tersebut, hitung tegangan dan regangan pada beberapa tingkat pembebanan, gambarkan diagram tegangan–regangannya, dan tentukan modulus elastisitas dari kemiringan daerah elastisnya. Bandingkan hasil Anda dengan nilai baku bahan tersebut, dan bahas kemungkinan penyebab perbedaannya.

BAB XIV

GAYA GESER DAN TEGANGAN GESER

➤ Capaian Pembelajaran Bab (Sub-CPMK 14)

- a. Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa mampu:
- b. Menjelaskan konsep gaya geser secara konseptual dan matematis;
- c. Menghitung tegangan geser dan regangan geser;
- d. Menjelaskan hubungan antara tegangan geser, regangan geser, dan modulus geser;
- e. Membedakan geser murni, geser langsung, dan geser tumpu;
- f. Menerapkan konsep geser pada perencanaan sambungan baut dan las serta pada balok beton.

Peta konsep: Gaya geser → Tegangan dan regangan geser → Modulus geser → Jenis-jenis geser → Sambungan dan geser balok.

➤ Kasus Pembuka

Sebuah sambungan pelat baja menyalurkan gaya tarik 240 kN. Sambungan menggunakan baut mutu tinggi berdiameter 20 mm dengan tegangan geser izin 160 MPa. Pelat yang disambung memiliki ketebalan 12 mm dengan tegangan tumpu izin 300 MPa.

Pertanyaan pemicu: berapa jumlah baut yang diperlukan? Apakah jumlahnya sama bila sambungan dibuat berpenampang geser tunggal dan berpenampang geser ganda? Moda kegagalan manakah yang menentukan jumlah baut — geser baut atau tumpu pelat?

➤ Konsep Gaya Geser

Gaya geser adalah gaya yang bekerja sejajar atau menyinggung permukaan penampang, sehingga cenderung menggeser satu bagian benda terhadap bagian lainnya. Bandingkan dengan gaya aksial yang bekerja tegak lurus penampang.

Gambaran paling mudah untuk memahami geser adalah gunting. Kedua bilah gunting mengerjakan gaya berlawanan arah yang sangat dekat garis kerjanya, sehingga bahan di antaranya terpotong dengan cara tergeser. Istilah bahasa Inggris *shear* memang berarti menggunting.

Dalam struktur bangunan, gaya geser muncul pada hampir setiap elemen: pada balok akibat beban melintang, pada kolom akibat beban gempa, pada baut sambungan, pada pelat lantai di sekitar kolom (geser pons), dan pada dasar dinding penahan tanah.

➤ Tegangan Geser dan Regangan Geser

Tegangan Geser

Tegangan geser adalah gaya geser per satuan luas bidang geser:

$$\tau = V / A$$

Dengan V gaya geser dan A luas bidang yang tergeser. Perhatikan perbedaan penting dengan tegangan normal: pada tegangan normal, luas A adalah bidang yang tegak lurus gaya; pada tegangan geser, luas A adalah bidang yang sejajar gaya.

Regangan Geser

Regangan geser adalah perubahan sudut yang dialami elemen akibat tegangan geser:

$$\gamma = \Delta x / h \approx \tan \varphi \approx \varphi \text{ (untuk sudut kecil, dalam radian)}$$

Berbeda dari regangan normal yang menyatakan perubahan panjang, regangan geser menyatakan perubahan bentuk sudut: elemen berbentuk persegi berubah menjadi jajar genjang tanpa perubahan panjang sisinya.

➤ Modulus Geser dan Hubungan Antarmodulus

Pada daerah elastis, tegangan geser berbanding lurus dengan regangan geser. Hubungan ini merupakan hukum Hooke untuk geser:

$$\tau = G \gamma \quad \rightarrow \quad G = \tau / \gamma$$

G disebut modulus geser atau modulus kekakuan, bersatuan sama dengan tegangan. Modulus geser menyatakan kekakuan bahan terhadap perubahan bentuk geser.

Modulus geser tidak berdiri sendiri, melainkan berkaitan dengan modulus elastisitas melalui angka Poisson ν :

$$G = E / [2(1 + \nu)]$$

Angka Poisson adalah perbandingan negatif regangan melintang terhadap regangan memanjang, yang menyatakan seberapa besar sebuah bahan mengecil ke arah samping ketika ditarik memanjang:

$$\nu = - \epsilon_{\text{melintang}} / \epsilon_{\text{memanjang}}$$

Tabel 17. Modulus Elastisitas, Angka Poisson, dan Modulus Geser Bahan

Bahan	E (GPa)	ν	G (GPa)
Baja	200	0,30	76,9
Beton	23,5	0,20	9,8
Aluminium	70	0,33	26,3
Kayu (sejajar serat)	12	$\approx 0,35$	$\approx 0,7 - 1,0$
Karet	0,01 – 0,1	$\approx 0,50$	Sangat kecil

Nilai G kayu tidak mengikuti rumus di atas karena kayu bersifat anisotropis, yaitu sifatnya berbeda menurut arah seratnya. Karet memiliki angka Poisson mendekati 0,5, yang berarti volumenya hampir tidak berubah saat berubah bentuk; sifat inilah yang dimanfaatkan pada bantalan karet landasan jembatan.

Contoh Soal 14.1 — Bantalan Karet Landasan Jembatan

Soal: Bantalan karet berukuran $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ dengan ketebalan 40 mm menerima gaya geser mendatar 18 kN akibat pemuaian gelagar. Modulus geser karet $1,2 \text{ MPa}$. Hitung tegangan geser dan simpangan mendatar bantalan.

Penyelesaian: $A = 300 \times 300 = 90.000 \text{ mm}^2$.

$\tau = V/A = 18.000/90.000 = 0,20 \text{ MPa}$.

$\gamma = \tau/G = 0,20/1,2 = 0,1667 \text{ rad}$.

Simpangan: $\Delta x = \gamma h = 0,1667 \times 40 = 6,67 \text{ mm}$.

Tafsiran: simpangan $6,67 \text{ mm}$ ini memungkinkan gelagar memuai dan menyusut akibat perubahan suhu tanpa menimbulkan gaya mendatar besar pada kepala jembatan. Inilah fungsi utama bantalan karet: bahan bermodulus geser rendah dengan sengaja dipilih agar mampu berubah bentuk. Persyaratan yang lazim membatasi γ pada nilai tertentu agar bantalan tidak rusak, sehingga tebal bantalan harus direncanakan sesuai simpangan yang diperkirakan.

➤ Geser Murni, Geser Langsung, dan Geser Tumpu

Tabel 18. Jenis Geser dan Bidang Kritisnya

Jenis	Ciri	Bidang Kritis	Contoh
Geser murni	Hanya tegangan geser, tanpa tegangan normal	Bidang sejajar gaya	Puntiran poros bulat

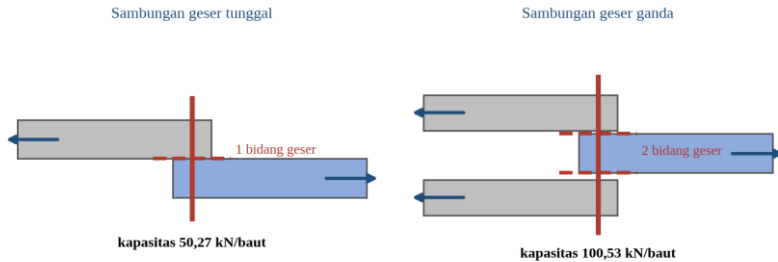
Jenis	Ciri	Bidang Kritis	Contoh
Geser langsung	Gaya menggeser penampang secara langsung	Penampang baut atau las	Baut sambungan pelat
Geser tumpu	Pelat tertekan setempat oleh baut	Bidang kontak baut–pelat	Lubang baut yang terkoyak
Geser pons	Kolom menembus pelat lantai	Bidang keliling di sekitar kolom	Pelat datar tanpa balok

Pada sambungan baut, terdapat dua kemungkinan bidang geser. Geser tunggal (*single shear*) terjadi bila baut hanya melintasi satu bidang geser, seperti pada dua pelat yang ditumpangkan. Geser ganda (*double shear*) terjadi bila baut melintasi dua bidang geser, misalnya pada sambungan dengan dua pelat penyambung di kedua sisi. Kapasitas geser baut pada geser ganda adalah dua kali kapasitas geser tunggal.

$$V_{\text{baut}} = \tau_{\text{izin}} \times \left(\frac{1}{4} \pi d^2\right) \times n \quad \text{dengan } n = \text{jumlah bidang geser}$$

Kapasitas tumpu pelat dihitung dari luas proyeksi baut pada pelat:

$$V_{\text{tumpu}} = \sigma_{\text{tumpu}} \text{ izin} \times d \times t$$



Gambar 22. Perbandingan Sambungan Geser Tunggal dan Geser Ganda

Contoh Soal 14.2 — Menyelesaikan Kasus Pembuka
Soal: Gaya 240 kN disalurkan melalui baut $\varnothing 20$ mm ($\tau_{\text{izin}} = 160$ MPa) pada pelat setebal 12 mm ($\sigma_{\text{tumpu}} = 300$ MPa). Hitung jumlah baut untuk geser tunggal dan geser ganda.

Penyelesaian: Luas satu baut: $A_b = \frac{1}{4}\pi(20^2) = 314,16$ mm².

Kapasitas geser satu baut (geser tunggal): $160 \times 314,16 = 50.265$ N = 50,27 kN.

Kapasitas geser satu baut (geser ganda): $2 \times 50,27 = 100,53$ kN.

Kapasitas tumpu satu baut: $300 \times 20 \times 12 = 72.000$ N = 72,0 kN.

Kasus geser tunggal. Kapasitas terkecil adalah geser baut (50,27 kN < 72,0 kN), sehingga geser baut yang menentukan.

Jumlah baut = $240/50,27 = 4,77 \rightarrow 5$ baut.

Kasus geser ganda. Kapasitas geser baut menjadi 100,53 kN, sedangkan tumpu pelat tetap 72,0 kN. Kini

kapasitas terkecil adalah tumpu pelat, sehingga tumpu pelat yang menentukan.

Jumlah baut = $240/72,0 = 3,33 \rightarrow 4$ baut.

Kesimpulan: sambungan geser ganda menghemat satu baut. Yang lebih penting, contoh ini menunjukkan bahwa moda kegagalan penentu dapat berpindah ketika susunan sambungan diubah. Dalam perencanaan sambungan, semua moda kegagalan geser baut, tumpu pelat, tarik pelat neto, dan koyak tepi harus diperiksa, dan yang berkapasitas terkecil itulah yang menentukan.

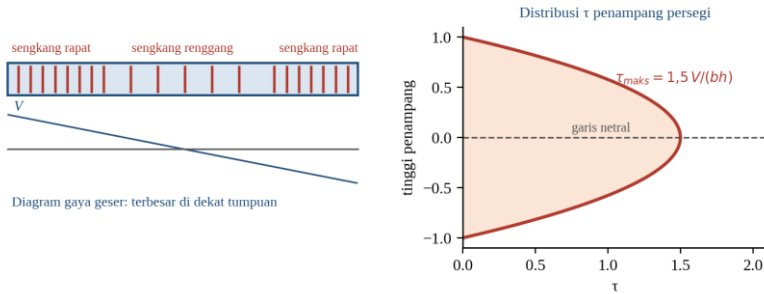
➤ Geser pada Balok

Pada balok yang menerima beban melintang, gaya geser dalam bervariasi sepanjang bentang dan bernilai terbesar di dekat tumpuan. Distribusi tegangan geser pada penampang tidak merata; untuk penampang persegi, tegangan geser terbesar terjadi pada garis netral dan bernilai nol pada sisi atas serta sisi bawah:

$$\tau_{\text{maks}} = 1,5 V / (b h) \quad \text{untuk penampang persegi}$$

Pada balok beton bertulang, geser menimbulkan retak diagonal yang khas dekat tumpuan dengan kemiringan sekitar 45° . Retak ini bersifat getas dan dapat berkembang cepat, sehingga sangat berbahaya. Untuk menahannya dipasang tulangan sengkang (stirrup), yaitu tulangan melintang yang dipasang lebih rapat di dekat tumpuan tempat gaya geser terbesar berada.

Pola pemasangan sengkang yang merapat di dekat tumpuan dan melebar di tengah bentang sesuatu yang mudah diamati pada setiap pekerjaan penulangan balok di lapangan sesungguhnya merupakan gambaran langsung dari diagram gaya geser balok tersebut.



Gambar 23. Diagram Gaya Geser Balok, Pola Sengkang, dan Distribusi Tegangan Geser

➤ Aplikasi dalam Teknik Sipil

- Sambungan baut dan las. Perencanaan seluruh sambungan struktur baja berpijak pada perhitungan kapasitas geser.
- Tulangan sengkang balok. Jarak dan diameter sengkang ditentukan oleh besarnya gaya geser sepanjang bentang.
- Geser pons pada pelat. Pada sistem pelat datar tanpa balok, kolom berpotensi menembus pelat; dicegah dengan penebalan setempat (*drop panel*) atau tulangan geser khusus.

- d. Kuat geser tanah. Parameter kohesi dan sudut geser dalam merupakan dasar analisis daya dukung pondasi dan stabilitas lereng.
- e. Bantalan karet jembatan. Dipilih justru karena modulus gesernya rendah, sehingga mampu mengakomodasi pergerakan gelagar.

➤ Rangkuman

- a. Gaya geser bekerja sejajar penampang dan cenderung menggeser satu bagian benda terhadap bagian lain.
- b. Tegangan geser dihitung pada bidang yang sejajar gaya, berbeda dari tegangan normal.
- c. Regangan geser menyatakan perubahan sudut, bukan perubahan panjang.
- d. Modulus geser berkaitan dengan modulus elastisitas melalui angka Poisson: $G = E/[2(1 + \nu)]$.
- e. Sambungan geser ganda memiliki kapasitas geser dua kali geser tunggal, tetapi moda penentu dapat berpindah ke tumpu pelat.
- f. Pada balok, gaya geser terbesar berada di dekat tumpuan, sehingga sengkang dipasang lebih rapat di daerah tersebut.

➤ Latihan Mandiri

1. Sebuah baut berdiameter 16 mm menerima gaya geser tunggal 30 kN. Hitung tegangan geser yang timbul.
2. Bantalan karet 250 mm × 250 mm setebal 30 mm dengan $G = 1,0$ MPa menerima gaya geser 12 kN. Hitung tegangan geser, regangan geser, dan simpangannya.

3. Hitung modulus geser baja bila $E = 200 \text{ GPa}$ dan $\nu = 0,30$.
4. Gaya tarik 180 kN disalurkan melalui baut $\varnothing 16 \text{ mm}$ dengan τ izin 150 MPa pada pelat setebal 10 mm dengan σ tumpu izin 280 MPa . Hitung jumlah baut yang diperlukan untuk geser tunggal dan untuk geser ganda.
5. Balok persegi $200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ menerima gaya geser 90 kN . Hitung tegangan geser maksimumnya.
6. Jelaskan mengapa retak akibat geser pada balok beton bertulang berbentuk diagonal, bukan tegak lurus sumbu balok.
7. Jelaskan mengapa tulangan sengkang dipasang lebih rapat di dekat tumpuan balok. Kaitkan dengan bentuk diagram gaya geser.
8. Sebuah bantalan karet direncanakan agar regangan gesernya tidak melampaui $0,50$. Bila simpangan yang diperkirakan 20 mm , tentukan ketebalan minimum bantalan tersebut.

➤ Tugas Case Method

Amati satu detail sambungan struktur baja, dapat berupa sambungan rangka kuda-kuda, sambungan kolom–balok, atau sambungan rangka jembatan. Ukur atau taksir diameter baut, jumlah baut, dan ketebalan pelatnya. Hitung kapasitas sambungan tersebut berdasarkan geser baut dan tumpu pelat, lalu tentukan moda kegagalan yang menentukan. Bandingkan kapasitas hasil hitungan Anda dengan taksiran gaya yang bekerja, dan berikan penilaian atas kecukupan sambungan tersebut. Sertakan foto dan sketsa detail berskala.

EVALUASI AKHIR SEMESTER

Ujian Akhir Semester mencakup materi Bab 8 sampai Bab 14 dengan bobot 20% dari nilai akhir, sesuai ketentuan pada RPS pertemuan ke-16.

➤ **Kisi-Kisi Ujian Akhir Semester**

Tabel 19. Kisi-kisi Ujian Akhir Semester

No.	Materi	Bab	Bentuk Soal	Bobot
1	Usaha, energi, daya, dan efisiensi	Bab 8	Hitungan terapan	15%
2	Kekekalan energi dan momentum	Bab 9	Hitungan	15%
3	Aplikasi pemancangan tiang	Bab 9	Hitungan terapan	10%
4	Neraca energi dan disipasi	Bab 10	Analisis dan hitungan	10%
5	Momen gaya dan reaksi tumpuan	Bab 11	Hitungan	15%
6	Titik berat dan kestabilan dinding penahan	Bab 12	Hitungan terapan	15%

No.	Materi	Bab	Bentuk Soal	Bobot
7	Tegangan, regangan, dan modulus elastisitas	Bab 13	Hitungan	10%
8	Geser dan sambungan baut	Bab 14	Hitungan terapan	10%

➤ Contoh Soal Ujian Akhir Semester

- Sebuah pompa harus memindahkan 60 m^3 air per jam ke ketinggian 28 m. (a) Hitung daya berguna yang diperlukan. (b) Bila efisiensi pompa 72%, hitung daya masukan dalam kW dan HP. (c) Hitung konsumsi energi selama 200 jam operasi. (15 poin)
- Benda bermassa 10 kg meluncur menuruni bidang miring 30° sepanjang 12 m dengan $\mu_k = 0,20$. (a) Hitung kecepatannya di dasar bidang dengan neraca energi. (b) Hitung energi yang hilang akibat gesekan dan nyatakan persentasenya. (15 poin)
- Penumbuk 3.500 kg jatuh dari ketinggian 1,8 m menumbuk tiang bermassa 1.500 kg secara tidak lenting sama sekali. (a) Hitung kecepatan penumbuk sebelum tumbukan. (b) Hitung kecepatan bersama sesudah tumbukan. (c) Hitung energi yang hilang. (d) Bila penetrasi akhir 20 mm per tumbukan, taksir daya dukung batas tiang dan daya dukung izinnya dengan angka keamanan 2,5. (10 poin)

4. Jelaskan dengan konsep neraca energi bagaimana bangunan tahan gempa mendisipasi energi gempa. Uraikan mengapa prinsip kolom kuat–balok lemah dipilih dalam perencanaan. (10 poin)
5. Balok sederhana bentang 9 m bertumpu sendi di A dan rol di B. Balok menerima beban terbagi rata 15 kN/m sepanjang seluruh bentang dan beban titik 60 kN pada 3,5 m dari A. Hitung reaksi kedua tumpuannya dan periksa hasilnya. (15 poin)
6. Dinding penahan gravitasi berbentuk trapesium dengan lebar atas 0,7 m, lebar dasar 2,8 m, dan tinggi 4,5 m. Berat volume beton 24 kN/m³ dan μ dasar 0,50. Tekanan tanah aktif menghasilkan gaya mendatar 82 kN/m yang bekerja pada ketinggian 1,5 m dari dasar. (a) Hitung titik berat penampang dan berat dinding per meter panjang. (b) Hitung angka keamanan terhadap guling dan geser. (c) Simpulkan apakah dinding aman, dan bila belum, usulkan perbaikannya. (15 poin)
7. Kolom beton bertulang 300 × 400 mm dengan 8 tulangan Ø19 mm memikul beban tekan aksial 1.400 kN. Dengan $E_c = 23.500$ MPa dan $E_s = 200.000$ MPa, (a) hitung tegangan pada beton dan pada baja; (b) hitung pemendekan kolom bila tingginya 3,2 m; (c) jelaskan mengapa tegangan pada baja lebih besar daripada pada beton. (10 poin)
8. Gaya tarik 300 kN disalurkan melalui baut Ø22 mm dengan τ_{izin} 160 MPa pada pelat setebal 14 mm dengan σ_{tumpu} izin 300 MPa. (a) Hitung jumlah baut yang diperlukan untuk sambungan geser tunggal. (b) Hitung

untuk sambungan geser ganda. (c) Tentukan moda kegagalan yang menentukan pada masing-masing kasus. (10 poin)

KUNCI JAWABAN DAN PEMBAHASAN SOAL TERPILIH

Bagian ini memuat kunci jawaban untuk soal-soal terpilih yang bersifat hitungan. Kunci ini digunakan untuk memeriksa hasil kerja sendiri, bukan untuk disalin. Soal-soal uraian dan analisis tidak diberi kunci karena jawabannya bergantung pada penalaran masing-masing mahasiswa.

➤ Bab 2

1. Soal 1: (a) $[M][L]^2[T]^{-2}$, N·m; (b) $[M][L]^{-3}$, kg/m³; (c) $[M][L]^{-1}[T]^{-2}$, Pa; (d) $[M][L]^2[T]^{-3}$, W.
2. Soal 2: (a) 305,9 kg/cm²; (b) 24,52 kN; (c) 20 m/s; (d) 203,2 mm.
3. Soal 3: Konsisten. Semua suku berdimensi [L].
4. Soal 4: 2,9 m² (dua angka penting, mengikuti data 1,2 m).
5. Soal 5: $\bar{x} = 150,0$ mm; $\Delta x \approx 0,07$ mm $\rightarrow (150,00 \pm 0,07)$ mm.
6. Soal 6: $R = 304,1$ N.
7. Soal 7: Komponen mendatar 3,83 kN; komponen vertikal 3,21 kN.

➤ Bab 3

1. Soal 1: jarak 170 m; perpindahan 70 m ke utara.
2. Soal 2: $36 \text{ km/jam} = 10 \text{ m/s}$.
3. Soal 4: $v = 0,250/62 \times 10^6 = 4.032 \text{ m/s}$; termasuk kisaran beton bermutu baik.
4. Soal 5: 36 km/jam .
5. Soal 6: *Excavator* membutuhkan 6 menit per bak; tiga truk menyediakan satu bak tiap $32/3 \approx 10,7$ menit, sehingga *excavator* menunggu truk.

➤ Bab 4

1. Soal 1: $v = 12 \text{ m/s}$; $s = 36 \text{ m}$.
2. Soal 2: $s = 37,5 \text{ m}$.
3. Soal 3: $t = 1,56 \text{ s}$; $v = 15,3 \text{ m/s}$.
4. Soal 4: $h_{\text{maks}} = 20,4 \text{ m}$; waktu total 4,08 s.
5. Soal 5: $v = 3,86 \text{ m/s}$; $E = 473,3 \text{ J}$.
6. Soal 6: perbandingan jarak 1 : 4 (11,6 m dan 46,3 m).

➤ Bab 5

1. Soal 1: $w = 392 \text{ N}$; $N = 392 \text{ N}$.
2. Soal 2: $T = 9,04 \text{ kN}$.
3. Soal 3: $T = 6,64 \text{ kN}$; lebih kecil karena percepatan berarah ke bawah.
4. Soal 4: $N = 212,2 \text{ N}$; $w_{\parallel} = 122,5 \text{ N}$.
5. Soal 5: $a = 1,23 \text{ m/s}^2$.
6. Soal 6: $RA = 32,5 \text{ kN}$; $RB = 27,5 \text{ kN}$.
- 7.

➤ Bab 6

1. Soal 2: $T = 114,3$ N tiap kabel.
2. Soal 3: $T = 214,9$ N; kenaikan sekitar 88%.
3. Soal 4: $a = 3,92$ m/s²; $T = 58,8$ N.
4. Soal 5: $w_{\parallel} = 62,1$ N; $f_s(\text{maks}) = 213,3$ N $\rightarrow$ peti tidak meluncur.
5. Soal 6: $\theta_{\text{maks}} = 34,99^\circ$; $\theta_{\text{rencana}} = 25,0^\circ$.
6. Soal 7: $T = 19,6$ kN tiap sling (dua kali berat total dibagi dua).

➤ Bab 7

1. Soal 2: $R = 13,2$ kN pada arah sekitar 79° (hasil bergantung ketelitian pembulatan).
2. Soal 3: $S = 31,4$ kN (tarik); $H = 25,7$ kN (tekan).
3. Soal 4: $P = 2.450$ N.
4. Soal 5: $P_{\text{geser}} = 274,4$ N; $P_{\text{guling}} = 156,8$ N $\rightarrow$ terguling lebih dahulu.
5. Soal 6: $h_{\text{maks}} = 0,571$ m.

➤ Bab 8

1. Soal 1: $W = 3.248$ J.
2. Soal 2: $W_{\text{total}} = 1.020$ J; $v = 6,39$ m/s.
3. Soal 3: $W = 294$ kJ.
4. Soal 4: $P_{\text{berguna}} = 5,88$ kW; $P_{\text{motor}} = 7,84$ kW.
5. Soal 5: $P_{\text{masuk}} = 2,33$ kW = 3,13 HP.
6. Soal 6: $E_p = 5$ J.
7. Soal 7: 123,5 kJ dan 493,8 kJ; berbanding 1 : 4.

➤ Bab 9

1. Soal 1: $v = 14,0$ m/s.
2. Soal 2: energi hilang 29,4 J.
3. Soal 3: impuls 10,5 N·s; gaya rata-rata 525 N.
4. Soal 5: $v = 4,85$ m/s; $v' = 3,46$ m/s; energi hilang 8.404 J.
5. Soal 6: $R_u \approx 1.047$ kN; $R_{izin} \approx 419$ kN.
6. Soal 7: $v' = 1,0$ m/s pada arah troli yang lebih berat.

➤ Bab 10

1. Soal 1: $v = 6,53$ m/s; energi hilang 831 J.
2. Soal 2: energi hilang 156,0 J.
3. Soal 3: $\mu_k = 0,218$.
4. Soal 4: $x \approx 0,258$ m.

➤ Bab 11

1. Soal 1: $M = 160$ N·m.
2. Soal 2: $M = 131,1$ N·m.
3. Soal 3: $R_A = 32,1$ kN; $R_B = 27,9$ kN.
4. Soal 4: $R_A = R_B = 65$ kN.
5. Soal 5: $R_A = 30$ kN; $M_A = 45$ kN·m.
6. Soal 6: beban maksimum 3,75 ton.

➤ Bab 12

1. Soal 2: $\bar{y} = 27,86$ cm dari dasar badan (untuk susunan pelat atas di sisi atas).
2. Soal 5: $I_{berdiri} = 1,067 \times 10^9$ mm⁴; $I_{berbaring} = 2,667 \times 10^8$ mm⁴; perbandingan 4 : 1.
3. Soal 6: $\tau_{maks} = 58,9$ MPa.

4. Soal 7: $W = 109,2 \text{ kN/m}$; $\bar{x} = 0,731 \text{ m}$; $SF_{\text{guling}} = 1,36$; $SF_{\text{geser}} = 0,98 \rightarrow$ tidak aman terhadap keduanya.

➤ Bab 13

1. Soal 1: $\sigma = 191,0 \text{ MPa}$; $\varepsilon = 9,55 \times 10^{-4}$; $\Delta L = 1,91 \text{ mm}$.
2. Soal 2: $\sigma = 8,0 \text{ MPa}$; aman terhadap $f'_c = 25 \text{ MPa}$.
3. Soal 3: $F = 13,57 \text{ kN}$.
4. Soal 4: $\sigma_c \approx 8,00 \text{ MPa}$; $\sigma_s \approx 68,1 \text{ MPa}$.
5. Soal 7: $\tau_{\text{maks}} = 95,5 \text{ MPa}$.
6. Soal 8: J berkurang 19,8%; luas berkurang 44,4%.

➤ Bab 14

1. Soal 1: $\tau = 149,2 \text{ MPa}$.
2. Soal 2: $\tau = 0,192 \text{ MPa}$; $\gamma = 0,192$; $\Delta x = 5,76 \text{ mm}$.
3. Soal 3: $G = 76,9 \text{ GPa}$.
4. Soal 4: geser tunggal 7 baut; geser ganda 5 baut (tumpu pelat menentukan).
5. Soal 5: $\tau_{\text{maks}} = 1,69 \text{ MPa}$.
6. Soal 8: tebal minimum 40 mm.

DAFTAR PUSTAKA

➤ Pustaka Utama

- Dasar-Dasar Fisika Universitas, Jilid 1.* Jakarta: Erlangga.
- Giancoli, D. C. (1991). *Physics: Principles with Applications*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Halliday, D., & Resnick, R. (1979). *Physics, Parts I and II* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Kane, J. W., & Sternheim, M. (1992). *Physics*. New York: John Wiley & Sons.
- Resnick, R., & Halliday, D. (1983). *Fisika*. Jakarta: Erlangga.

➤ Pustaka Pendukung

- Ahmad, I. A., Atika, F., & Asrib, A. R. (2022). Characteristics of bricks with rice husk ash from brick production waste. *Indonesian Journal of Multidisciplinary Science*, 1(9), 1031–1036. <https://doi.org/10.55324/ijoms.v1i9.170>
- Asrib, A. R. (2022). *Waduk dan Pengendalian Sedimen*. Yogyakarta: Deepublish.
- Asrib, A. R. (2023). *Mengenal Sistem Irigasi dan Bangunan Air*. Sukoharjo: Tahta Media.
- Asrib, A. R., Arfandi, A., Dirawan, G. D., & Haryadi, F. (2019). Analysis test of fine aggregates at the upstream of Jeneberang River. *Journal of Physics: Conference Series*, 1244 (1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1244/1/012039>

- Asrib, A. R., & Arjoansyah. (2019). Pembangunan struktur bangunan air menggunakan limbah slag nikel sebagai agregat kasar. Dalam Prosiding Seminar Nasional LP2M Universitas Negeri Makassar. Makassar: LP2M UNM.
- Asrib, A. R., Hasrul, M. R., & Asnur, M. K. (2025). Evaluasi karakteristik fisik lapisan tanah menggunakan metode geolistrik. *Teknosains: Media Informasi Sains dan Teknologi*, 18 (3), 403–411. <https://doi.org/10.24252/teknosains.v18i3.48935>
- Asrib, A. R., Rahman, M. J., & Hasrul, M. R. (2026). Experimental investigation of the stress-strain behavior of lightweight concrete incorporating crushed candlenut shell as a coarse aggregate. *Civil Engineering and Architecture*, 14 (4), 2883–2894. <https://doi.org/10.13189/cea.2026.140412>
- Badan Standardisasi Nasional. *SNI 1726: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. *SNI 1727: Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. *SNI 1729: Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. *SNI 2847: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., Mazurek, D. F., & Cornwell, P. J. *Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics*. New York: McGraw-Hill.

Bowles, J. E. *Foundation Analysis and Design*. New York: McGraw-Hill.

Gere, J. M., & Goodno, B. J. *Mechanics of Materials*. Boston: Cengage Learning.

Hibbeler, R. C. *Engineering Mechanics: Statics*. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.

Hibbeler, R. C. *Mechanics of Materials*. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.

Rochmanhadi. *Alat-Alat Berat dan Penggunaannya*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.

Catatan: rujukan standar SNI disebutkan tanpa tahun edisi karena edisi yang berlaku dapat berubah. Mahasiswa dianjurkan selalu memeriksa edisi terbaru sebelum menggunakannya dalam tugas perencanaan.

LAMPIRAN A KONSTANTA FISIKA DAN FAKTOR KONVERSI

➤ Konstanta yang Sering Dipakai

Tabel 20. Konstanta Fisika yang Sering dipakai

Konstanta	Lambang	Nilai
Percepatan gravitasi bumi (baku)	g	9,80665 m/s^2
Percepatan gravitasi untuk perhitungan	g	9,8 atau 10 m/s^2
Massa jenis air (4 °C)	ρ	1.000 kg/m^3
Berat volume air	γ	9,81 kN/m^3
Berat volume beton bertulang	γ	24 kN/m^3
Berat volume beton tanpa tulangan	γ	22 kN/m^3
Berat volume baja	γ	78,5 kN/m^3
Berat volume pasangan bata	γ	17 kN/m^3

Konstanta	Lambang	Nilai
Massa jenis udara (25 °C)	ρ	1,184 kg/m ³
Bilangan pi	π	3,14159265

➤ Faktor Konversi Satuan

Tabel 21. Faktor Konversi Satuan

Besaran	Konversi
Panjang	1 inci = 25,4 mm; 1 ft = 0,3048 m; 1 yard = 0,9144 m; 1 mil = 1,609 km
Luas	1 in ² = 645,16 mm ² ; 1 ft ² = 0,0929 m ²
Volume	1 liter = 0,001 m ³ ; 1 ft ³ = 0,02832 m ³ ; 1 galon AS = 3,785 liter
Massa	1 ton = 1.000 kg; 1 lb = 0,4536 kg
Gaya	1 kgf = 9,80665 N; 1 tonf = 9,80665 kN; 1 lbf = 4,4482 N; 1 kip = 4,4482 kN
Tegangan	1 psi = 0,006895 MPa; 1 ksi = 6,895 MPa; 1 kg/cm ² = 0,0980665 MPa
Momen	1 kgf·m = 9,80665 N·m; 1 lbf·ft = 1,3558 N·m
Energi	1 kalori = 4,186 J; 1 kWh = 3,6 × 10 ⁶ J
Daya	1 HP = 745,7 W; 1 PS = 735,5 W

Besaran	Konversi
Kecepatan	1 km/jam = 0,2778 m/s; 1 mph = 1,609 km/jam
Tekanan	1 atm = 101,325 kPa; 1 bar = 100 kPa; 1 mmHg = 133,3 Pa

LAMPIRAN B SIFAT MEKANIK BAHAN KONSTRUKSI

Nilai-nilai berikut merupakan angka perkiraan yang disediakan untuk keperluan latihan. Perencanaan sesungguhnya wajib memakai data hasil uji bahan dan ketentuan dalam standar yang berlaku.

➤ Sifat Elastis dan Kekuatan

Tabel 22. Sifat Elastis dan Kekuatan Bahan Konstruksi

Bahan	E (GPa)	G (GPa)	ν	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tarik (MPa)
Baja tulangan BjTS 420	200	76,9	0,30	420 (fy)	420 (fy)
Baja profil BJ 37	200	76,9	0,30	240 (fy)	370 (fu)
Beton f'_c 20 MPa	21,0	8,8	0,20	20	$\approx 2,0$
Beton f'_c 25 MPa	23,5	9,8	0,20	25	$\approx 2,5$
Beton f'_c 30 MPa	25,7	10,7	0,20	30	$\approx 2,8$

Bahan	E (GPa)	G (GPa)	ν	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tarik (MPa)
Kayu kelas kuat II	10 – 12	$\approx 0,8$	$\approx 0,35$	≈ 25	≈ 60
Aluminium paduan	70	26,3	0,33	≈ 200	≈ 200
Pasangan bata merah	5 – 15	—	—	3 – 10	Sangat kecil
Karet bantalan jembatan	0,01 – 0,1	0,8 – 1,5 MPa	$\approx 0,50$	—	—

➤ Koefisien Gesek Perkiraan

Tabel 23. Koefisien Gesek Perkiraan

Pasangan Permukaan	μ_s	μ_k
Beton – beton (kasar)	0,60 – 0,70	0,50 – 0,60
Beton – tanah pasir	0,45 – 0,55	0,40 – 0,50
Beton – tanah lempung	0,30 – 0,40	0,25 – 0,35
Baja – beton	0,45	0,35

Pasangan Permukaan	μ_s	μ_k
Baja – baja (kering)	0,74	0,57
Kayu – beton	0,60	0,50
Karet – aspal (kering)	0,90	0,70
Karet – aspal (basah)	0,50	0,40

➤ Angka Keamanan yang Lazim Dipakai

Tabel 24. Angka Keamanan yang Lazim Dipakai

Pemeriksaan	Angka Keamanan Minimum
Guling dinding penahan tanah	2,0
Geser dinding penahan tanah	1,5
Daya dukung pondasi dangkal	2,5 – 3,0
Daya dukung tiang (rumus dinamis)	2,5 – 3,0
Stabilitas lereng	1,25 – 1,50
Sudut sling pengangkatan minimum	45° terhadap bidang mendatar

LAMPIRAN C RUBRIK PENILAIAN

Rubrik berikut disusun mengikuti rekapitulasi persentase evaluasi pada RPS: Aktivitas Partisipatif 50%, Tugas 15%, Ujian Tengah Semester 15%, dan Ujian Akhir Semester 20%.

➤ Rubrik Tugas *Case Method* (15%)

Tabel 26. Rubrik Penilaian Tugas *Case Method*

Aspek	Bobot	Kriteria Penilaian
Ketepatan identifikasi masalah	15%	Kasus dirumuskan jelas dan relevan dengan materi bab
Ketepatan perhitungan	30%	Rumus tepat, satuan konsisten, hasil benar, langkah terlihat
Kedalaman analisis	25%	Hasil hitungan ditafsirkan, bukan hanya disajikan
Kualitas rekomendasi	15%	Usulan bersifat teknis, dapat dilaksanakan, dan berdasar hitungan
Penyajian laporan	15%	Sistematis, gambar dan sketsa jelas, rujukan dicantumkan

➤ **Rubrik Aktivitas Partisipatif (50%)**

Tabel 25. Rubrik Aktivitas Partisipatif (50%)

Aspek	Sangat Baik (86–100)	Baik (71–85)	Cukup (56–70)	Kurang (< 56)
Kehadiran dan kesiapan	Hadir penuh dan selalu telah membaca materi	Hadir dan umumnya siap	Hadir tetapi jarang siap	Sering tidak hadir
Keaktifan diskusi kasus	Mengajukan gagasan yang berdasar dan menanggapi teman	Aktif menyampaikan pendapat	Berpendapat bila ditanya	Pasif sepanjang diskusi

Aspek	Sangat Baik (86–100)	Baik (71–85)	Cukup (56–70)	Kurang (< 56)
Ketepatan penalaran	Penalaran tepat dan disertai perhitungan	Penalaran umumnya tepat	Penalaran sebagian tepat	Penalaran tidak tepat
Kerja sama kelompok	Berperan besar dan membantu anggota lain	Bekerja sama dengan baik	Bekerja bila diarahkan	Tidak berkontribusi

➤ Rubrik Penilaian Ujian

Tabel 27. Rubrik Penilaian Ujian

Aspek yang Dinilai	Bobot dalam Tiap Soal
Ketepatan penulisan besaran yang diketahui dan dicari	10%
Ketepatan pemilihan rumus dan konsep	25%
Ketepatan langkah perhitungan	35%
Ketepatan satuan dan angka penting	15%
Penafsiran dan kesimpulan	15%

➤ Rekapitulasi Bobot Penilaian Akhir

Tabel 28. Rekapitulasi Bobot Penilaian Akhir

Komponen	Jumlah Pertemuan	Bobot
Aktivitas Partisipatif	14 pertemuan	50%
Tugas (pertemuan 2, 5, 10, 13)	4 tugas	15%
Ujian Tengah Semester	1 kali	15%
Ujian Akhir Semester	1 kali	20%
Total	—	100%

GLOSARIUM

Angka Poisson (ν) — perbandingan negatif regangan melintang terhadap regangan memanjang.

Benda tegar — benda yang bentuk dan ukurannya dianggap tidak berubah akibat pembebanan.

Daya (P) — laju melakukan usaha atau laju perpindahan energi, bersatuan watt.

Diagram benda bebas — sketsa benda yang dilepaskan dari lingkungannya, lengkap dengan semua gaya luar yang bekerja padanya.

Disipasi energi — perubahan energi mekanik menjadi bentuk tak berguna, terutama kalor.

Efisiensi (η) — perbandingan daya keluaran berguna terhadap daya masukan.

Gaya konservatif — gaya yang usahanya tidak bergantung pada bentuk lintasan.

Geser ganda — susunan sambungan di mana baut melintasi dua bidang geser.

Geser pons — moda kegagalan geser berupa penembusan kolom terhadap pelat lantai.

Getas (brittle) — sifat bahan yang patah tiba-tiba dengan sedikit perubahan bentuk.

Impuls (I) — hasil kali gaya dengan selang waktu bekerjanya, sama dengan perubahan momentum.

Inersia — kecenderungan benda mempertahankan keadaan geraknya.

Kesetimbangan stabil — keadaan setimbang di mana benda kembali ke kedudukan semula setelah diganggu.

Kopel — sepasang gaya sama besar, berlawanan arah, dan tidak segaris kerja, yang hanya menimbulkan putaran.

Lengan momen — jarak tegak lurus dari titik putar ke garis kerja gaya.

Modulus elastisitas (E) — perbandingan tegangan terhadap regangan pada daerah elastis; ukuran kekakuan bahan.

Modulus geser (G) — perbandingan tegangan geser terhadap regangan geser.

Momen gaya (M) — hasil kali gaya dengan lengan momennya; ukuran kemampuan gaya memutar benda.

Momen inersia penampang (I) — ukuran kemampuan bentuk penampang menahan lentur, bersatuan m^4 .

Momen puntir (T) — momen yang bekerja pada bidang tegak lurus sumbu batang.

Momentum (p) — hasil kali massa dengan kecepatan.

Regangan (ϵ) — perbandingan perubahan panjang terhadap panjang mula-mula; tidak bersatuan.

Sendi plastis — daerah pada elemen struktur yang dirancang berubah bentuk plastis untuk menyerap energi gempa.

Statis tertentu — struktur yang jumlah reaksinya sama dengan jumlah persamaan kesetimbangan.

Tegangan (σ) — gaya per satuan luas penampang, bersatuan pascal.

Tegangan geser (τ) — gaya geser per satuan luas bidang yang sejajar gaya.

Titik berat — titik tangkap resultan gaya berat sebuah benda.

Titik luluh (f_y) — tegangan pada saat bahan mulai berubah bentuk tetap secara nyata.

Tumbukan tidak lenting sama sekali — tumbukan di mana kedua benda bergerak bersama setelah bertumbukan.

Ulet (ductile) — sifat bahan yang mampu berubah bentuk besar sebelum patah.

Usaha (W) — hasil kali komponen gaya searah perpindahan dengan besar perpindahannya.

BIODATA PENULIS



Prof. Dr. Ir. Ahmad Rifqi Asrib, M.T.

Penulis adalah seorang tenaga pengajar dan juga peneliti di Program Studi Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan, Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar, yang dilahirkan di Yogyakarta, 19 September 1963. Penulis menyelesaikan studi S1 pada Jurusan Teknik Sipil Universitas Hasanuddin tahun 1990 dan mendapatkan gelar Ir. Selanjutnya, pada tahun 1997 mendapatkan gelar MT pada program studi Teknik Sipil Pantai di Universitas Gadjahmada. Terakhir, menyelesaikan studi doktoral di IPB pada tahun 2013 pada bidang Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan. Sejumlah penelitian telah dilakukan termasuk yang berkaitan dengan Pengelolaan Sumberdaya Air. Penelitian tersebut adalah Analisis model sistem klasifikasi Neraca Aliran Sedimen, Efektifitas Model Penyaringan dalam Meningkatkan Kualitas Air Sungai, Pengembangan *Smart Eco-Irrigation Photovoltaic System*: Sistem Cerdas Irigasi Ramah Lingkungan, dan Analisis Hasil Pengujian Geolistrik untuk Penentuan Karakteristik Fisik Lapisan Tanah. Kemudian, telah menerbitkan beberapa artikel pada jurnal internasional bereputasi diantaranya adalah

Analysis test of Fine Aggregates at the Upstream of Jeneberang River, dan Effectiveness of Screening Models in Improving the Quality of Cenrana River Water as a Drinking Water. Beberapa buku telah ditulis termasuk buku Waduk dan Sedimen (2022), Mengenal Sistem Irigasi dan Bangunan Air (2023) dan Konservasi Tanah dan Air (2025). Selain sebagai dosen banyak orang mengenalnya juga sebagai seorang konsultan proyek pada berbagai pekerjaan fisik Keairan.