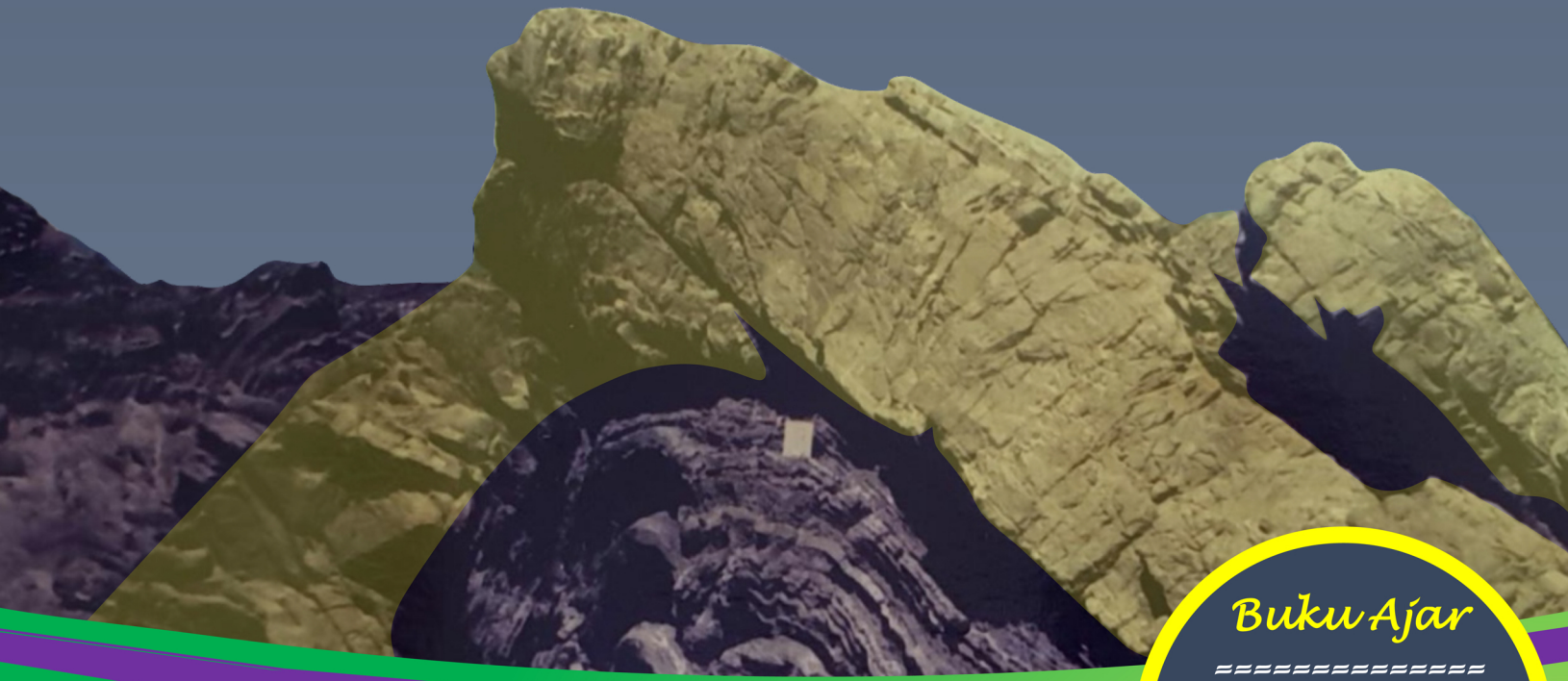


STRUKTUR TEKTONIK
PADA
SINGKAPAN BATUAN
Sesar Naik dan Lipatan



Buku Ajar

=====

*Teknik
Geologi
Universitas
Sriwijaya*

Prof. Ir. Edy Sutriyono, MSc PhD

STRUKTUR TEKTONIK PADA SINGKAPAN BATUAN

Sesar Naik dan Lipatan

Prof. Ir. Edy Sutriyono, MSc, PhD



**STRUKTUR TEKTONIK PADA SINGKAPAN BATUAN
Sesar Naik dan Lipatan**

Prof. Ir. Edy Sutriyono, MSc, PhD

UPT. Penerbit dan Percetakan

Universitas Sriwijaya 2023

Kampus Unsri Palembang

Jalan Srijaya Negara, Bukit Besar Palembang 30139

Telp. 0711-360969

email : unsri.press@yahoo.com, penerbitunsri@gmail.com

website : www.unsri.unsripress.ac.id

Anggota APPTI No. 005.140.1.6.2021

Anggota IKAPI No. 001/SMS/96

Gambar Sampul Depan :

Singkapan Struktur dari Cape Liptrap, SE Melbourne, Australia

142 halaman : 21,5 x 28 cm

Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Hak Terbit Pada Unsri Press



KATA PENGANTAR

Buku Ajar ini memberikan sebagian materi pembelajaran Geologi Struktur yang dilaksanakan pada semester III, dimana mahasiswa sudah diajarkan konsep teoritis mengenai struktur pada mata kuliah Geologi Dasar di semester I. Bahan perkuliahan dalam buku ini difokuskan pada sesar naik dan lipatan, namun demikian konsep fundamental yang berkaitan dengan pembelajaran kedua jenis struktur itu diberikan juga di bagian awal, agar mahasiswa dapat mengingat kembali materi yang pernah dipelajari di semester sebelumnya.

Sebagai materi ajar, buku ini di desain sedemikian rupa untuk memberikan mahasiswa lebih banyak peluang melakukan eksersais, mulai dari observasi, identifikasi, interpretasi, dan deskripsi dengan penulisan esai pendek. Diskusi kelas dalam kelompok (4-5 mahasiswa) untuk memecahkan masalah struktur yang sedang dipelajari dialokasikan waktu tersendiri. Kegiatan diskusi kelas bertujuan untuk membiasakan mahasiswa bekerja tim dalam rangka mencari solusi untuk suatu problem struktur. Evaluasi hasil belajar diberikan dengan fleksibilitas memadai, yaitu mahasiswa diberi peluang untuk memilih model konvensional Ujian Akhir Semester (UAS) ataupun metode non-konvensional dengan mengerjakan “proyek” yang dalam buku ini disebut sebagai Proyek Akhir Pembelajaran (PAP). Opsi PAP diberikan dengan maksud agar mahasiswa bekerja berdasarkan perencanaan waktu sendiri dan dengan tim kerja yang dikehendaki. Bahan proyek, penjelasan, dan tatacara pelaksanaan PAP dijelaskan dalam Bab 9 buku ini.

Mengutip peribahasa lama “tak ada gading yang tak retak”, demikian juga materi ajar ini, tentunya masih dijumpai “retak-retak” atau kekurangan di beberapa bagian. Sehubungan dengan hal itu, buku ini pada masa mendatang akan berevolusi menjadi edisi-edisi baru seiring dengan bertambahnya data singkapan struktur dari berbagai daerah, sehingga akan ada pembaruan atau pengkayaan materi ajar, khususnya untuk Bab 8 dan Bab 9. Sebagaimana ilmu pengetahuan Geologi Struktur yang berkembang dengan pesat, penerbitan buku ini juga bersifat dinamis, terutama dalam rangka memperkaya kajian studi kasus struktur pada singkapan batuan dengan mengikuti perkembangan konsep teoritis baru untuk mendukung interpretasi dan model arsitektur deformasi. Semoga ikhtiar untuk terus meningkatkan kualitas materi ajar bisa berkelanjutan, dan Prodi Teknik Geologi Unsri mampu mencetak lulusan dengan kompetensi yang sesuai dengan Standard Nasional Pendidikan Tinggi (SNPT) di Indonesia, insya Allah.

Palembang, 6 Mei 2023
Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis tak henti-hentinya bersyukur dan bersyukur kepada Allah SWT yang telah membimbing dan membangkitkan semangat berkarya untuk menulis, sehingga Buku Ajar ini dapat diselesaikan dengan baik, alhamdulillah. Penyusunan buku ini telah melewati pentahapan kegiatan yang melibatkan banyak pihak, mulai dari pengumpulan materi hingga diskusi informal atas interpretasi struktur tektonik pada singkapan batuan. Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terima kasih dan apresiasi kepada Prof. Kevin C. Hill dari La Trobe University (kemudian pindah ke Melbourne University) yang telah mengajak survei dan melakukan pengukuran elemen-elemen struktur di lapangan dua kali di Cape Liptrap, tenggara Melbourne, Australia. Fotograf singkapan-singkapan batuan yang menjadi pokok bahasan pada Bab 7 dan sebagian di Bab 9 semuanya berasal dari daerah tersebut. Interpretasi dan pembahasan struktur yang disajikan dalam buku ini pada prinsipnya dilakukan oleh penulis sendiri, sehingga kesalahan sekecil apapun dalam penafsiran konfigurasi deformasi tektonik pada singkapan batuan menjadi "*my own responsibility*" tanpa bermaksud mengecilkan makna pembelajaran yang diberikan oleh Prof. Kevin C. Hill selama penulis menempuh program Ph.D di La Trobe University, Melbourne, Australia.

Ucapan terima kasih disampaikan juga kepada alumni Prodi Teknik Geologi Unsri yang telah memberikan bantuan dalam berbagai bentuk, mulai dari kontribusi fotograf singkapan di daerah penelitian untuk Tugas Akhir (TA) hingga mendigitasi fotograf, diagram, dan ilustrasi skematik, serta mengatur format akhir yang digunakan buku ini. Shofy Nur Fajri (TG 13) memberikan sejumlah fotograf singkapan dari region Sumatera Selatan dan Bengkulu Selatan dan masukan-masukan terkait interpretasi singkapan struktur di daerah observasinya. Wahidin Zuhri (TG 13) membantu mengkonstruksi diagram skematik untuk sebagian struktur yang menjadi bahasan dalam materi kuliah. Ratna Savira Adrianda (TG 17), Mia Oktarina (TG 17), dan Risa Aprilia (TG 17) yang telah membantu digitasi semua fotograf, diagram, dan ilustrasi skematik yang digunakan dalam buku ini. Semoga kontribusi yang mereka berikan menjadi amalan yang manfaat, terutama bagi para pembaca buku ini, aamiin. *Last but not least*, penulis berharap agar penerbitan Buku Ajar ini menjadi motivasi dan penyemangat bagi para dosen muda untuk terus berkarya, menulis buku, dan mempublikasikan karya ilmiah demi kemajuan institusi yang kita cintai.

Palembang, 6 Mei 2023
Penulis

DAFTAR ISI

Kata Pengantar.....	i
Ucapan Terima Kasih.....	ii
Daftar Isi	iii
Daftar Gambar	vi
Daftar Tabel.....	x

Bab 1

PENDAHULUAN.....	1
1.1. Anatomi Buku Ajar	1
1.2. Lingkup Pembelajaran	2
1.3. Evaluasi Akhir Hasil Pembelajaran	3
1.4. Tujuan Pembelajaran.....	4
1.5. Capaian Pembelajaran Mata Kuliah	5
1.6. Sub-CPMK	5

Bab 2

SISTEM TEGASAN DAN DEFORMASI BATUAN.....	10
2.1. Sistem Tegasan.....	10
2.2. Orientasi Tegasan	11
2.3. Pengertian Deformasi.....	15
2.4. Tipe Deformasi.....	19
2.5. Plastisitas Batuan	20

Bab 3

SESAR NAIK.....	23
3.1. Pola Tegasan dan Terminologi Terkait.....	23
3.2. Imbrikasi dan Dupleks.....	25
3.3. Konfigurasi 3D Sesar Naik	31

Bab 4

LIPATAN	33
4.1. Konfigurasi dan Komponen Struktur.....	33
4.2. Klasifikasi Lipatan	36
4.2.1. Sudut Antar Sayap.....	36
4.2.2. Sudut Bidang Sumbu.....	38
4.2.3. Penunjaman Bidang Sumbu	39
4.2.4. Simetri dan Asimetri.....	41
4.2.5. Orientasi Permukaan Sumbu dan Garis Lengkung	43

Bab 5

INTERAKSI SESAR NAIK DAN LIPATAN.....	45
5.1. Korelasi Pensesaran dan Perlipatan.....	45
5.1.1. <i>Fault-Bend Fold</i>	48
5.1.2. <i>Fault-Propagation Folds</i>	51
5.1.3. Lipatan Detasemen	54

Bab 6

PENAMPANG SEIMBANG DAN RESTORASI	58
6.1. Sayatan Geologi	58
6.1.1. Metode Panjang Konstan.....	59
6.1.2. Metode Area Konstan.....	59
6.1.3. Garis Referensi.....	61
6.1.4. Keterbatasan Metode.....	62
6.2. Program <i>Geosec</i> TM	63

Bab 7

SINGKAPAN STRUKTUR DAERAH CAPE LIPTRAP	65
7.1. Geologi	65
7.2. Identifikasi Struktur	66
7.2.1. Singkapan-1 Zona Lipatan dan <i>Transfer Fault</i>	67
7.2.2. Singkapan-2 Antiklin <i>Ramp</i> Independen.....	69

7.2.2.1. Antiklin <i>Ramp</i> Independen Segmen Timur	72
7.2.2.2. Antiklin <i>Ramp</i> Independen Segmen Barat	80
7.2.3. Singkapan-3 <i>Triple</i> Dupleks dan Lipatan Propagasi.....	86
7.2.4. Singkapan-4 Sinklin dan Sesar Naik Landai.....	89
7.2.5. Singkapan-5 Antiklin Asimetri dan Deformasi Internal.....	92
7.2.6. Singkapan-6 Lipatan <i>Kink Band</i> dan <i>Chevron</i>	95
7.2.7. Singkapan-7 Lipatan Disharmonik.....	97

Bab 8

SINGKAPAN STRUKTUR REGION SUMATERA.....	98
8.1. Sumatera Selatan dan Bengkulu Selatan.....	98
8.2. Singkapan Banjarsari.....	99
8.3. Singkapan Pulau Timun	103
8.4. Singkapan Air Tenam	106
8.5. Singkapan Kayu Ajaran	108
8.6. Singkapan Pino Pentaring	110

Bab 9

PROYEK AKHIR PERKULIAHAN	114
9.1. Penjelasan Umum.....	114
9.2. Proyek Evaluasi Struktur	115
Daftar Pustaka.....	121
Indeks.....	126

DAFTAR GAMBAR

Bab 2

Gambar 2.1. Ilustrasi tipe gaya yang menyebabkan deformasi	12
Gambar 2.2. Model <i>strain</i> elipsoidal memperlihatkan tipe struktur yang dihasilkan dari <i>wrenching deformation</i>	15

Bab 3

Gambar 3.1. Pola tegasan yang membentuk pensesaran naik pada tubuh batuan.....	23
Gambar 3.2. Pergerakan <i>hangingwall</i> relatif terhadap <i>footwall</i>	24
Gambar 3.3. Geometri imbrikasi dan ilustrasi perkembangan struktur	26
Gambar 3.4. Konfigurasi dupleks	27
Gambar 3.5. Model sikuensial pertumbuhan struktur dupleks	28
Gambar 3.6. Model antiklin <i>ramp</i> independen.....	29
Gambar 3.7. Model <i>hinterland sloping duplexes</i>	29
Gambar 3.8. Model <i>overlapping ramp anticlines</i>	30
Gambar 3.9. Model <i>antiformal stack</i>	30
Gambar 3.10. Sesar naik membentuk geometri <i>staircase trajectory</i>	31
Gambar 3.11. Ilustrasi diagramatik orientasi sesar miring <i>ramp</i> relatif terhadap arah transport tektonik.....	31

Bab 4

Gambar 4.1. Konfigurasi antiklin.....	33
Gambar 4.2. Konfigurasi sinklin.	34
Gambar 4.3. Ilustrasi skematik beberapa elemen struktur untuk deskripsi dan klasifikasi lipatan	35
Gambar 4.4. Profil lipatan simetri dan asimetri.....	41
Gambar 4.5. Profil lipatan simetri dan asimetri dengan <i>hinge</i> meruncing.	42
Gambar 4.6. Lipatan paralel dan similar.....	43

Bab 5

Gambar 5.1. Ilustrasi <i>fault-related fold</i>	47
Gambar 5.2. Ilustrasi skematik <i>fault-bend fold</i>	49
Gambar 5.3. Model kinematik <i>fault-bend fold</i> dengan pasangan antiklin-sinklin di <i>foreland</i> dan <i>hinterland</i>	50
Gambar 5.4. Geometri <i>fault-propagation fold</i>	51

Gambar 5.5. Perkembangan struktur akibat perlintasan sesar naik pada area <i>footwall</i>	54
Gambar 5.6. Geometri klasik lipatan detasemen.....	55

Bab 6

Gambar 6.1. Teknik sederhana untuk kalkulasi kedalaman bidang detasemen (Z) dan nilai pemendekan minimum (L0-L1) atau L0-L1/L0 (%).....	60
Gambar 6.2. Teknik konstruksi penampang geologi dengan aplikasi Geosec™	64

Bab 7

Gambar 7.1. Observasi struktur dari ketinggian (<i>bird view</i>) untuk mendapatkan cakupan pengamatan lebih luas	68
Gambar 7.2. Singkapan antiklin <i>ramp</i> independen.	70
Gambar 7.3. Model skematik pembentukan antiklin <i>ramp</i> independen.	71
Gambar 7.4. Konfigurasi 3D antiklin <i>ramp</i> independen	71
Gambar 7.5. Rekognisi elemen-elemen struktur sebelum interpretasi.	72
Gambar 7.6. Interpretasi deformasi batuan dilakukan dengan digitasi singkapan	74
Gambar 7.7. Ilustrasi skematik 2D unit batupasir terdeformasi getas..	78
Gambar 7.8. Visualisasi skematik 3D memberikan pemahaman kinematik deformasi dalam perspektif keruangan.	79
Gambar 7.9. Lapisan batupasir telah mengalami kontraksi ~8% akibat tektonik kompresional.....	80
Gambar 7.10. Singkapan batupasir menindih serpih abu-abu gelap berselang-seling dengan batupasir tipis telah terdeformasi.....	81
Gambar 7.11. Singkapan lapisan batupasir dilandasi oleh sikuen serpih abu-abu gelap berselang-seling dengan batupasir tipis	83
Gambar 7.12. Model skematik untuk mekanisme deformasi tektonik kompresional.	84
Gambar 7.13. Penampang deformasi dan restorasi sikuen batupasir dan serpih memperlihatkan estimasi kontraksi sekitar ~27%..	85
Gambar 7.14. Model diagramatik 3D untuk mengilustrasikan kinematika deformasi plastis. .	86
Gambar 7.15. Singkapan batuan dengan dua tipe deformasi berbeda	87
Gambar 7.16. Singkapan sinklin dengan lapisan batupasir tebal.	90
Gambar 7.17. Singkapan batupasir dengan ketebalan bervariasi dan berselang-seling dengan <i>mudstone</i> dan <i>sandstone</i> telah mengalami deformasi tipe plastis membentuk sinform.....	91
Gambar 7.18. Estimasi kontraksi sikuen batuan diukur dari lapisan batupasir diperoleh nilai minimal ~4,5 m atau ~45%	91

Gambar 7.19. Singkapan struktur hasil deformasi plastis dan getas membentuk antiklin.....	93
Gambar 7.20. Antiklin dibentuk oleh unit batupasir tebal dan rumpunan batulempung.....	94
Gambar 7.21. Singkapan batulempung berselang-seling batupasir membentuk lipatan <i>kink</i> asimetri.....	96
Gambar 7.22. Pengukuran komponen struktur untuk membuat klasifikasi masing-masing antiklin yang menyusun <i>kink band fold</i>	96
Gambar 7.23. Singkapan batuan dengan rekaman struktur berupa lipatan <i>kink</i> simetri atau <i>chevron</i>	97
Gambar 7.24. Singkapan struktur memperlihatkan sejumlah lipatan dengan beragam bentuk (<i>disharmonic folds</i>)	97

Bab 8

Gambar 8.1. Singkapan sesar <i>hinge</i> dengan pergerakan memutar searah jarum jam (<i>clockwise rotational slip</i>) dijumpai di lapisan batubara.....	100
Gambar 8.2. Singkapan sesar F1 dan F2 dilihat dari elevasi bawah menghadap ke arah titik <i>hinge</i> di atas, dimana displasemen nol.	100
Gambar 8.3. Sketsa lapangan untuk mengilustrasikan konfigurasi displasemen sesar F1 dan F2.....	101
Gambar 8.4. Penetapan garis lintasan yang memotong <i>strike</i> sesar	101
Gambar 8.5. Penampang melintang A-B mengilustrasikan mekanisme pensesaran F1 dan F2 pada lapisan batubara secara 2D	102
Gambar 8.6. Konfigurasi 3D mengilustrasikan mekanisme pensesaran lapisan batubara yang menghasilkan sesar kembar dampit.....	102
Gambar 8.7. Singkapan struktur lipatan (<i>steeply inclined fold</i> atau <i>overturned fold</i>) mengalami pensesaran naik ke arah <i>hinterland</i> (<i>back thrusting</i>) di area lengkungan (<i>hinge zone</i>)	104
Gambar 8.8. Ilustrasi skematik perkembangan struktur di Pulau Timun.	105
Gambar 8.9. Konfigurasi arsitektur singkapan di Pulau Timun	105
Gambar 8.10. Antiklin rebah tersingkap di sungai Manna, daerah Air Tenam.....	106
Gambar 8.11. Model kinematik struktur lipatan di daerah Pulau Timun, Tanjung Sakti, Sumatera Selatan	107
Gambar 8.12. Singkapan sikuen batuan di sungai Pino Poros	109
Gambar 8.13. Singkapan struktur lipatan di sungai Pino Pentaring	111

Gambar 8.14. Ilustrasi rumpunan batuan terdiri dari batulempung berselingan dengan batupasir dalam posisi planar atau sebelum terkena tegasan kompresional.....	113
---	-----

Bab 9

Gambar 9.1. Lokasi proyek 1	116
Gambar 9.2. Lokasi proyek 2	116
Gambar 9.3. Lokasi proyek 3	117
Gambar 9.4. Lokasi proyek 4	117
Gambar 9.5. Lokasi proyek 5	118
Gambar 9.6. Lokasi proyek 6	118
Gambar 9.7. Lokasi proyek 7	119
Gambar 9.8. Singkapan struktur sebelum diinterpretasikan untuk Proyek 7.....	120

DAFTAR TABEL

Bab 2

Tabel 2.1. Orientasi rezim gaya dan jenis pensesaran pada tubuh batuan.....	13
Tabel 2.2. Hubungan arah dislokasi batuan dan identifikasi displasemen.....	16
Tabel 2.3. Faktor penyebab deformasi dan tipe perubahan pada batuan.....	20

Bab 4

Tabel 4.1. Klasifikasi lipatan berdasarkan parameter sudut antar sayap.	36
Tabel 4.2. Klasifikasi lipatan berdasarkan parameter sudut kemiringan bidang sumbu	38
Tabel 4.3. Klasifikasi lipatan berdasarkan parameter sudut penunjaman bidang sumbu.....	39
Tabel 4.4. Penamaan lipatan berdasarkan orientasi bidang sumbu dan garis lengkung	44

Bab 7

Tabel 7.1. Hasil rekognisi, interpretasi, dan deskripsi struktur yang terekam pada lapisan kompeten batupasir.....	77
---	----

Bab 1

PENDAHULUAN

1.1. Anatomi Buku Ajar

Buku ajar ini terdiri dari beberapa bagian, yaitu sesi pendahuluan, inti bahasan, dan penutup. Sesi pendahuluan disampaikan dari Bab 1 hingga Bab 6, dimana ulasan konsep teoritis yang terkait dengan evaluasi struktur kompresional diberikan dalam beberapa bab. Ulasan mengenai sejumlah aspek umum terkait dengan lingkup pembelajaran, evaluasi akhir pembelajaran, tujuan pembelajaran, capaian pembelajaran mata kuliah (CPMK), dan sub-CPMK disampaikan pada Bab 1. Pada Bab 2 disampaikan landasan teori mengenai sistem tegasan dan deformasi kompresional yang membentuk struktur tektonik pada tubuh batuan.

Bab 3 menyampaikan konsep fundamental yang relevan dengan pensesaran naik pada sikuen batuan. Sesi ini memberikan pengertian mengenai pola tegasan, terminologi terkait dengan sesar naik, dan klasifikasi struktur. Teori dasar mengenai perlipatan disajikan pada Bab 4, diantaranya mencakup konfigurasi struktur, sejumlah terminologi penting mengenai lipatan, dan klasifikasi struktur. Bab 5 menyajikan mekanisme deformasi terkait dengan pensesaran dan perlipatan. Di bagian ini disampaikan konsep teoritis mengenai mekanisme perlipatan yang diakibatkan oleh pensesaran. Model interaksi sesar naik dan lipatan diulas juga pada sesi ini. Pada Bab 6 diberikan konsep dasar yang terkait dengan rekonstruksi penampang seimbang dan restorasi dengan sejumlah metode yang umum digunakan dalam kajian struktur.

Sesi inti pembahasan dari buku ini terdiri dari Bab 7 dan Bab 8 berdasarkan pada lokasi singkapan yang digunakan sebagai materi utama pembelajaran. Bab 7

memfokuskan pembelajaran struktur geologi berdasarkan pada singkapan batuan yang berasal dari daerah Cape Liptrap, tenggara Melbourne, Australia. Sedangkan Bab 8 memberikan materi pembelajaran berdasarkan pada singkapan struktur yang dijumpai di region Sumatera Selatan dan Bengkulu Selatan. Bab 9 sebagai penutup dari buku ini merupakan bahan ujian akhir pembelajaran yang dinamai “Proyek Akhir Pembelajaran (PAP)”. PAP bersifat opsional atau pilihan, artinya mahasiswa bisa memilih Ujian Akhir Semester (UAS) atau PAP sebagai salah satu komponen evaluasi hasil belajar di akhir semester.

1.2. Lingkup Pembelajaran

Materi pembelajaran yang dituangkan dalam buku ini pada prinsipnya merupakan bagian dari bahan ajar mata kuliah Geologi Struktur dengan bobot 3 sks dan diajarkan pada semester III untuk Kurikulum Merdeka tahun 2021 pada Program Studi Teknik Geologi (PSTG) Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Lingkup pembelajaran difokuskan pada struktur sesar naik dan lipatan, serta korelasi keduanya berdasarkan pada singkapan batuan dari beberapa lokasi. Materi ajar disampaikan dalam 5-6 kali pertemuan kelas dengan format tutorial, diskusi kelas dalam kelompok (4-5 mahasiswa), dan eksersais. Selain itu, mahasiswa diberikan tugas (*assignment*) untuk dikerjakan di luar jam kelas, dan dikumpulkan pada saat kuliah berikutnya.

Materi pembelajaran yang diberikan dalam buku ajar ini mencakup teori dasar atau konsep-konsep fundamental, pengamatan singkapan melalui fotograf, pengenalan dan identifikasi elemen-elemen struktur, klasifikasi tipe deformasi, dan rekonstruksi diagram skematik struktur. Dalam rangka mengkaji perkembangan deformasi batuan, materi ajar memberikan pembelajaran kepada mahasiswa untuk merekonstruksi diagram 2D dan atau 3D. Sesi pembelajaran ini dimaksudkan untuk mendalami evolusi struktur dari awal dimulainya rezim kompresi hingga tercapainya *strain* akhir batuan

sebelum tersingkap ke permukaan. Selain itu, pembelajaran ini mendorong mahasiswa agar mampu menggunakan program aplikasi dan menyajikan hasil kajian struktur tidak hanya dengan narasi rangkaian kata, tetapi juga dalam bentuk ilustrasi diagramatik.

Sedangkan materi lain dalam pembelajaran Geologi Struktur, misal kekar, sesar turun, dan sesar geser atau lateral diberikan dan disajikan dalam buku ajar tersendiri. Adapun pemisahan bahan ajar menjadi dua buku mengingat banyaknya pokok bahasan struktur yang harus diajarkan, sehingga ketebalan buku menjadi konsen utama untuk menyatukan semua materi ke dalam satu buku.

1.3. Evaluasi Akhir Hasil Pembelajaran

Evaluasi akhir hasil pembelajaran mata kuliah Geologi Struktur mengikuti aturan yang berlaku, yaitu menggunakan empat komponen penilaian akhir (*final assessment*) antara lain:

1. Jumlah kehadiran dalam perkuliahan (presensi) minimal 80%.
2. Nilai rerata tugas (*assignments*) yang diberikan oleh tim dosen pengampu.
3. Nilai ujian tengah semester (UTS) yang diselenggarakan pada minggu ke-8
4. Nilai ujian semester (UAS) yang dilaksanakan pada minggu ke-16.

Khusus untuk materi perkuliahan sesar naik dan lipatan memberikan pilihan sebagai pengganti UAS, yaitu Proyek Akhir Pembelajaran (PAP) sebagaimana disampaikan pada Bab 9 buku ini. Bagi mahasiswa yang memilih PAP sebagai pengganti UAS diberikan batasan waktu pengerjaan terhitung mulai dari akhir penyampaian materi perkuliahan ini (bukan akhir perkuliahan mata kuliah) sampai dengan tiga hari menjelang masa pengungkahan nilai akhir (DPNA) berakhir. Bagi mahasiswa yang memilih UAS, waktunya mengikuti kalender akademik Universitas Sriwijaya. Mahasiswa tidak diperbolehkan untuk memilih keduanya (UAS dan PAP), dalam artian satu pilihan (misal PAP) tidak digunakan untuk memperbaiki nilai pilihan yang lain

(misal UAS), demikian juga sebaliknya. Pemilihan PAP atau UAS dilakukan pada pertemuan akhir penyampaian materi ini, dan mahasiswa yang sudah menentukan pilihan pada saat itu tidak diperbolehkan untuk merubah pilihannya, karena untuk menjamin kepastian dan ketepatan waktu pelaksanaan evaluasi hasil belajar.

1.4. Tujuan Pembelajaran

Penyusunan materi kuliah ini difokuskan pada pokok bahasan sesar naik dan lipatan yang terekam oleh singkapan batuan. Adapun rujukan yang digunakan dalam pembuatan materi ajar ini yaitu Permendikbud Nomor 3 tahun 2020 tentang Standard Nasional Pendidikan Tinggi (SNPT), terutama pada aspek rumusan keterampilan umum bagi lulusan. Oleh karena itu, proses pembelajaran yang disampaikan melalui perkuliahan dengan materi ini bertujuan untuk membentuk lulusan yang memiliki sikap umum sebagai berikut:

- mampu memahami dan mengimplementasikan secara mandiri konsep-konsep fundamental untuk mengenali tipe deformasi dan jenis struktur pada singkapan batuan.
- mampu membuat interpretasi dan klasifikasi konfigurasi arsitektur deformasi pada singkapan batuan.
- mampu memecahkan dan menyampaikan deskripsi solusi atas permasalahan pensesaran naik, perlipatan, dan interaksi kedua proses ini pada skala singkapan.
- mampu merekonstruksi dan menjelaskan secara oral model kinematika perkembangan struktur pada singkapan batuan yang dikaji.
- mampu mengembangkan ilmu pengetahuan dan keahliannya dalam rangka menghasilkan solusi untuk problem struktur regional yang lebih kompleks.

- mampu menyusun deskripsi saintifik hasil kajian dalam bentuk laporan dengan disertai model kinematika yang menjelaskan perkembangan deformasi sikuen batuan di studi area.

1.5. Capaian Pembelajaran Mata Kuliah

Materi perkuliahan yang disampaikan di sini memiliki rumusan capaian pembelajaran mata kuliah (CPMK) atau *Courses Learning Outcomes* yang mengacu kepada Permendikbud nomor 3 tahun 2020 tentang SNPT, sebagai berikut:

- mampu memahami teori dasar mengenai sistem gaya atau tegasan yang bertanggungjawab atas pensesaran naik, dan perlipatan pada unit batuan.
- mampu menerapkan secara mandiri konsep teoritis untuk menginterpretasikan dan mengklasifikasikan struktur tektonik kompresional pada singkapan batuan.
- mampu merekonstruksi dan menjelaskan secara oral atau lisan model kinematika perkembangan deformasi pada sikuen batuan.
- mampu mengembangkan pengetahuan dan keahliannya untuk memecahkan problematika struktur tektonik kompresional pada skala regional yang lebih kompleks.
- mampu menyusun deskripsi saintifik hasil kajian secara tertulis disertai dengan diagram skematik yang menerangkan perkembangan struktur pada rumpunan batuan.

1.6. Sub-CPMK

Rumusan sub-CPMK atau *Lesson Learning Outcomes* pada prinsipnya merupakan dimensi kemampuan akhir yang direncanakan pada setiap tahap pembelajaran. Dalam perkuliahan ini, mahasiswa memperoleh kemampuan akhir dan atau keahlian khusus dari materi pensesaran naik, perlipatan, dan interaksi kedua proses ini yang dijabarkan sebagai berikut:

Bab 1,

- mampu memahami lingkup dan tujuan pembelajaran, serta rumusan CPMK dan desain sub-CPMK dalam materi ajar.
- mampu memahami sistem evaluasi akhir hasil pembelajaran yang digunakan dalam perkuliahan.
- mampu memutuskan secara mandiri pilihan “Ujian Akhir Semester (UAS)” atau “Proyek Akhir Pembelajaran (PAP)” sebagai salah satu komponen dalam perhitungan nilai akhir mata kuliah.

Bab 2,

- mampu menelaah dan memahami konsep teoritis sistem gaya atau tegasan yang mengakibatkan deformasi tubuh batuan berupa sesar naik dan lipatan.
- mampu memahami dan menjelaskan secara oral tipe-tipe deformasi dan jenis-jenis tegasan yang membentuk struktur kompresional.
- mampu memahami dan menerangkan dengan detil faktor-faktor penyebab deformasi batuan dan struktur geologi yang dihasilkan.
- mampu menganalisis dan mempresentasikan sistem gaya secara diagramatik untuk setiap deformasi kompresional yang dipelajari.

Bab 3,

- mampu memahami dan menggunakan secara mandiri konsep fundamental mengenai sistem tegasan yang menyebabkan pensesaran naik.
- mampu mengidentifikasi, mendeskripsikan, dan mengukur elemen-elemen sesar naik pada singkapan batuan.
- mampu membuat interpretasi dan klasifikasi tipe sesar naik pada singkapan batuan, khususnya struktur imbrikasi dan dupleks.
- mampu merekonstruksi model skematik 2D atau 3D dan mempresentasikan secara oral konfigurasi sesar naik pada singkapan batuan.

Bab 4,

- mampu menerapkan secara mandiri konsep teoritis tentang perlipatan pada singkapan batuan.
- mampu mengidentifikasi, mendeskripsikan, dan mengukur komponen struktur lipatan pada singkapan batuan.
- mampu membuat interpretasi dan klasifikasi lipatan berdasarkan parameter-parameter struktur yang dipelajari dalam bab ini.
- mampu membuat diagram skematik 2D atau 3D dan menjelaskan secara oral model kinematika perkembangan struktur lipatan.

Bab 5,

- mampu memahami konsep teoritis mengenai interaksi sesar naik dan lipatan pada singkapan batuan.
- mampu memahami model konseptual tentang perkembangan struktur lipatan seiring dengan pensesaran naik.
- mampu mengaplikasikan secara mandiri konsep dasar tentang mekanisme perlipatan berbarengan dengan pensesaran pada singkapan batuan.
- mampu membuat interpretasi dan klasifikasi struktur akibat interaksi sesar naik dan lipatan.

Bab 6,

- mampu memahami dan menerapkan secara mandiri konsep dasar konstruksi penampang seimbang struktur geologi.
- mampu memahami dan menerapkan secara mandiri landasan teori pembuatan restorasi sikuen batuan terdeformasi.
- mampu menggunakan metode rekonstruksi penampang sikuen batuan terdeformasi (*deformed state*) dan restorasi (*restored state*), dan memahami asumsi-asumsi yang dipakai.

- mampu menggunakan metode perhitungan pemendekan atau kontraksi sikuen batuan terdeformasi.
- mampu mengoperasionalkan program aplikasi untuk merekonstruksi penampang geologi.

Bab 7,

- mampu melakukan observasi secara mandiri struktur tektonik kompresional pada singkapan batuan.
- mampu mengidentifikasi dan mengukur secara mandiri elemen-elemen struktur hasil pensesaran naik dan perlipatan pada singkapan batuan.
- mampu membuat interpretasi, klasifikasi, dan deskripsi struktur kompresional pada singkapan batuan.
- mampu membuat rekonstruksi 2D atau 3D dan menjelaskan secara oral perkembangan kinematika deformasi sikuen batuan.
- mampu mengembangkan pengetahuan dan keahliannya untuk memberikan solusi atas problematika geologi terkait dengan pensesaran naik dan perlipatan mulai dari skala singkapan hingga regional dalam kegiatan pemetaan geologi (*geological mapping*).
- mampu menyusun laporan tertulis yang dilengkapi dengan lampiran model kinematika perkembangan sesar naik dan lipatan pada rumpunan batuan.

Bab 8,

- mampu melakukan observasi secara mandiri struktur tektonik kompresional di lingkungan geologi yang berbeda dengan Bab 7.
- mampu mengidentifikasi dan mengukur setiap elemen struktur yang terlihat pada singkapan batuan.
- mampu membuat interpretasi, klasifikasi, dan deskripsi struktur yang terekam pada singkapan batuan.

- mampu membuat diagram skematik 2D atau 3D dan mempresentasikan secara lisan evolusi struktur pada rumpunan batuan.
- mampu mengimplementasikan secara mandiri pengetahuan dan keahliannya untuk memecahkan masalah struktur tektonik kompresional mulai dari skala singkapan batuan hingga regional dalam kegiatan pemetaan geologi.
- mampu membuat deskripsi saintifik secara tertulis disertai dengan lampiran model kinematika perkembangan struktur daerah kajian.

Bab 9,

- mampu memahami sistem evaluasi akhir hasil pembelajaran dalam perkuliahan.
- mampu melakukan penilaian secara mandiri (*self-assessment*) atas kelebihan dan kekurangan UAS atau PAP yang ditawarkan sebagai pilihan (opsi) untuk evaluasi akhir pembelajaran.
- mampu membuat keputusan secara mandiri untuk memilih salah satu komponen evaluasi mata kuliah UAS atau PAP.

Bab 2

SISTEM TEGASAN DAN DEFORMASI BATUAN

2.1. Sistem Tegasan

Batuan penyusun kulit bumi pada umumnya akan mengalami perubahan (deformasi) bentuk, volume, dan atau pergeseran (*displacement*) jika terkena gaya tektonik (*tectonic forces*). Bentuk tenaga geologi lain yang mampu merubah konfigurasi batuan yaitu pembebanan karena sedimentasi (*burial*) yang berlangsung dalam kurun waktu relatif lama atau jutaan tahun. Bentuk deformasi seperti lipatan (*fold*) dan sesar (*fault*) merupakan contoh struktur geologi yang terbentuk akibat gaya tektonik. Gravitasi dapat juga berperan pada setiap komponen batuan, namun demikian pada beberapa kasus gaya ini tidak menghasilkan deformasi yang signifikan jika berlangsung pada kurun waktu yang singkat.

Geologi Struktur merupakan bagian dari ilmu Geologi yang mempelajari perubahan batuan atau deformasi tubuh batuan karena merespon tegasan atau gaya tektonik. Hasil deformasi itu sendiri sangat beragam, karena berbagai faktor turut mengontrol perubahan tubuh batuan, termasuk diantaranya komposisi kimia dan mineral, serta sifat-sifat mekanika batuan. Komposisi kimia dan mineral mencerminkan kondisi awal batuan yang heterogen atau *inhomogeneities*, dan turut berpengaruh terhadap sifat mekanika batuan. Sedangkan kondisi lain yang berpengaruh terhadap karakteristik mekanika batuan yaitu suhu atau temperatur, tekanan (*pressure*), laju pembebanan (*loading rate*), tekanan hidrostatik, dan tekanan fluida dalam pori-pori batuan.

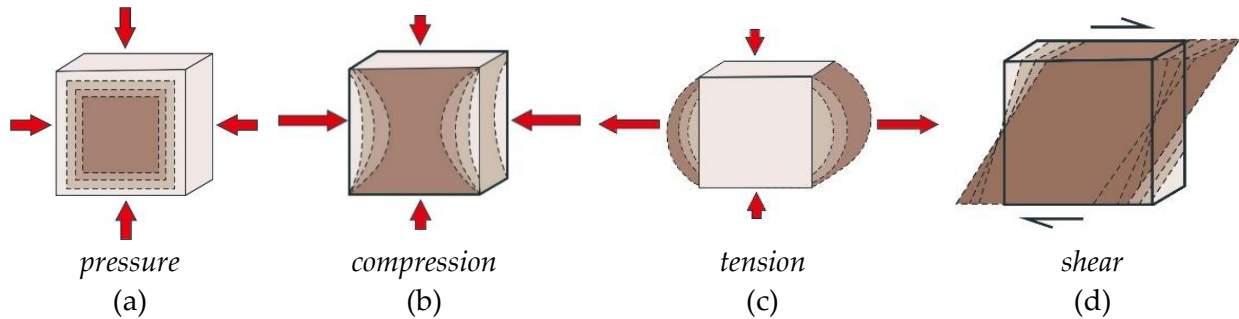
Sistem tegasan dan sifat mekanika batuan akan menentukan laju deformasi, yaitu pergerakan relatif dari bagian tubuh batuan. Seiring dengan progres gaya, tubuh batuan mengalami peningkatan deformasi (*increment of deformation*), sehingga terbentuk kondisi baru yang ditunjukkan oleh *strain*, displasemen, dan ragam rotasi dari titik ke titik di dalam batuan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap sistem tegasan merupakan bagian krusial dalam rangka mempelajari kinematika perkembangan deformasi batuan. Pada bagian ini akan disampaikan komponen tegasan yang berperan terhadap pembentukan struktur pada tubuh batuan.

2.2. Orientasi Tegasan

Tegasan tektonik yang bekerja pada batuan akan menimbulkan medan gaya (*stress field*), dan setiap komponen gaya pada umumnya memiliki orientasi berbeda. Sistem tegasan yang mengakibatkan perubahan atau deformasi tubuh batuan biasanya dibedakan menjadi tiga komponen yang orthogonal atau tegak lurus, yaitu satu gaya normal terhadap permukaan dan dua yang lain paralel dengan permukaan. Gaya itu sendiri dikategori sebagai tegasan maksimum (σ_1), menengah atau intermediat (σ_2), dan minimum (σ_3).

Tipe deformasi tidak hanya ditentukan oleh orientasi tegasan, tetapi juga besarnya gaya yang bekerja, area permukaan, dan luas tubuh batuan. Gambar 2.1 memberikan empat ilustrasi perbedaan tegasan yang mengenai permukaan kubus dan kecenderungan perubahan yang terjadi, yaitu tekanan (*pressure*), kompresional (*compression*), tensional (*tension*), dan geser (*shear*). Berdasarkan ilustrasi tersebut dapat dinyatakan bahwa apabila gaya tekan yang sama besar mengenai semua sisi kubus, maka material ini akan merespon dengan cara memendek di semua sisinya secara tegak lurus terhadap tegasan. Gaya kompresional mengakibatkan kubus mengalami pemendekan atau kontraksi pada sisi yang terkena gaya maksimum. Tegasan tensional menghasilkan

kubus memanjang atau meluas searah dengan gaya tarikan. Sedangkan gaya geser menyebabkan kubus bergeser atau *shearing* atau *transform* mengikuti tegasan utama. Berdasarkan ilustrasi ini, mahasiswa harus mengerti bahwa fenomena yang serupa ditunjukkan juga oleh tubuh batuan dalam merespon gaya tektonik yang bekerja pada unit tersebut.



Gambar 2.1. Ilustrasi tipe gaya yang menyebabkan deformasi. Gaya sama besar menekan semua sisi kubus mengakibatkan deformasi terjadi pada setiap sisi secara tegak lurus (a); gaya maksimum lateral bersifat kompresional menyebabkan perubahan kubus memendek atau kontraksi searah tegasan utama (b); gaya maksimum lateral berupa tarikan mengakibatkan perubahan kubus memanjang atau meluas (c); dan gaya utama saling begeser satu dengan yang lain membentuk perubahan kubus bergeser atau *shearing* (d).

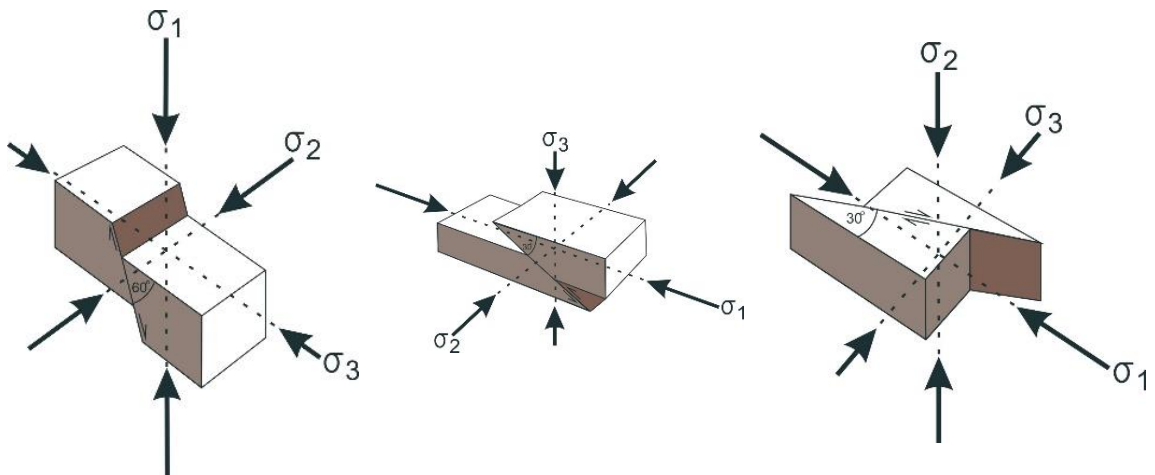
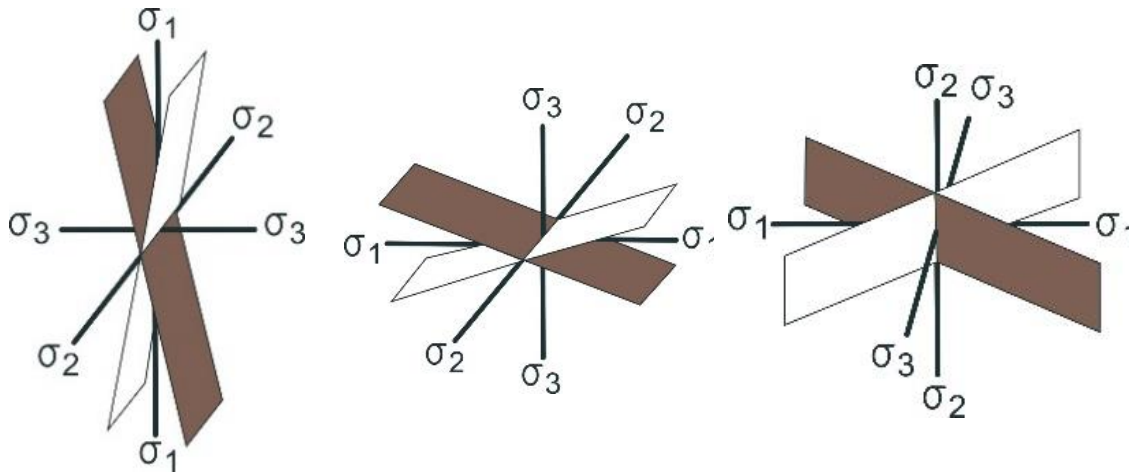
Little Experimental Work

- ✚ Get a piece of paper and put it on a table, afterward use your hands to apply those stresses to demonstrate deformation.
- ✚ Take some photographs on the deformed paper, then draw a number of schematic diagrams to illustrate the generated strain.

Pada Tabel 2.1 disajikan beberapa ilustrasi mengenai orientasi rezim gaya dan jenis pensesaran pada unit batuan. Pensesaran pada batuan bergerak searah dengan tegasan maksimum, dan diawali dari pembentukan pola rekahan bersilangan dengan sudut lancip di gaya maksimum. Apabila gaya maksimum (σ_1) vertikal dan dua lainnya lateral, maka batuan akan tersesarkan normal, sedangkan pensesaran naik pada tubuh batuan akan terjadi jika gaya minimum (σ_3) vertikal dan dua lainnya horizontal. Sesar geser terbentuk oleh gaya menengah (σ_2) vertikal dan dua lainnya lateral.

Tabel 2.1. Orientasi rezim gaya dan jenis pensesaran pada tubuh batuan.

Orientasi Rezim Gaya	Janis Pensesaran		
	Normal (*)	Reverse	Strike-slip (*)
Vertikal	σ_1	σ_3	σ_2
Horizontal	σ_2	σ_1	σ_1
	σ_3	σ_2	σ_3



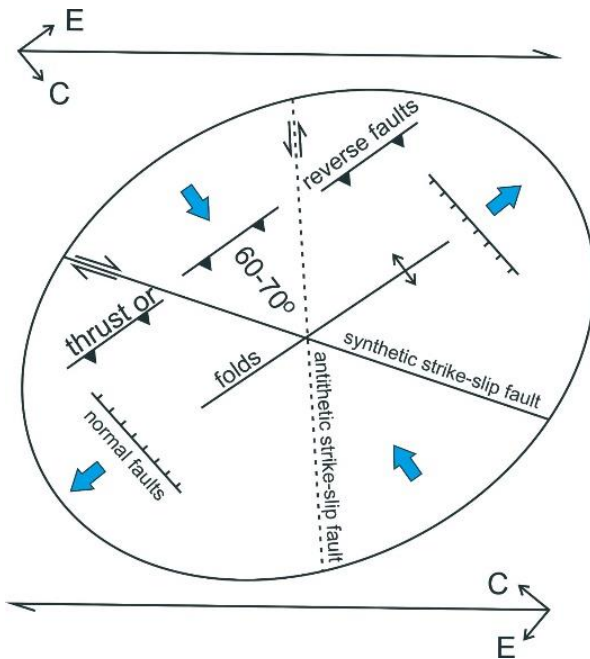
(*) sesar normal dan *strike-slip* dibahas lebih lanjut dalam buku ajar tersendiri.

Hubungan sistem tegasan dan tipe deformasi sikuen batuan telah diilustrasikan pula ke dalam model *strain* elipsoidal (*strain ellipse model*). Konsep elipsoidal merupakan salah satu metode yang sering digunakan untuk menggambarkan tegasan dalam bentuk

grafis. Arah dan besar vektor radius dari suatu tegasan elipsoidal merupakan gambaran gaya yang melalui suatu bidang secara konjugasi. Pola gaya seperti ini bisa memiliki bentuk bervariasi tergantung dari besarnya tegasan utama. Pada prinsipnya, *strain* elipsoidal merupakan konsep yang dapat diaplikasikan untuk semua deformasi pada suatu material dan tidak tergantung pada besarnya atau *magnitude*. Oleh karena itu, konsep ini tidak terbatas pada perubahan bentuk dengan ukuran kecil pada masa yang elastis seperti yang telah banyak dibahas di beberapa literatur geologi, bahkan model klasik ini seringkali digunakan untuk evaluasi struktur pada tatanan regional.

Gambar 2.2 memperlihatkan model *strain* elipsoidal dan komponen struktur sebagai respon terhadap gaya yang bekerja. Struktur sesar geser berkembang dari pola rekahan yang terbentuk sebagai respon langsung terhadap sistem tegasan geser lateral (*wrench system*). Salah satu rekahan berkembang membentuk sesar geser mengangan (*dextral fault*), dan pola *strain* elipsoidal menunjukkan struktur ini sebagai *synthetic strike-slip fault*, sedangkan satu zona rekahan lagi berpotensi untuk menjadi sesar geser mengiri (*sinistral fault*) atau *antithetic strike-slip fault*. Struktur lipatan dan sesar naik pada model itu merupakan hasil deformasi batuan akibat gaya kompresional, sedangkan konfigurasi deformasi ekstensional berkembang bersamaan atau setelah gaya kompresional menurun atau berkurang.

Sutriyono (1999) telah menggunakan model *strain* elipsoidal untuk mengidentifikasi tipe struktur dan originnya di Pegunungan Lipatan Lengguru, Papua Barat. Berdasarkan konsep itu, sesar naik pada jalur deformasi tersebut diinterpretasikan sebagai bentuk respon langsung terhadap gaya maksimum berarah NNE-SSW (054° - 234°), sedangkan sesar normal terbentuk oleh gaya minimum yang berkembang bersamaan atau setelah tegasan kompresional menurun. Sesar geser di region ini diduga terbentuk oleh gaya sekunder yang berkembang bersamaan dengan awal perlipatan Lengguru pada Miosen atau Pliosen.



Gambar 2.2. Model *strain* elipsoidal memperlihatkan tipe struktur yang dihasilkan dari *wrenching deformation*, diawali dengan pembentukan sistem rekahan (*fractures*) yang bersilangan dengan sudut lancip, salah satunya berkembang menjadi *dextral fault* atau *synthetic strike-slip fault* dan satu lagi berpotensi membentuk *sinistral fault* atau *antithetic strike-slip fault*. Sistem tegasan *wrenching* menghasilkan vektor gaya kompresional (C) dan ekstensional (E). Sesar naik atau *reverse fault* dan lipatan berkembang searah dengan gaya kompresional, sedangkan sesar normal terbentuk oleh gaya tarikan (ekstensional) yang berkembang bersamaan atau setelah gaya kompresional menurun (*releasing compressive forces*).

2.3. Pengertian Deformasi


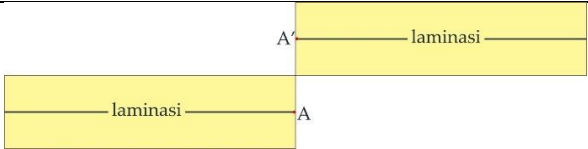
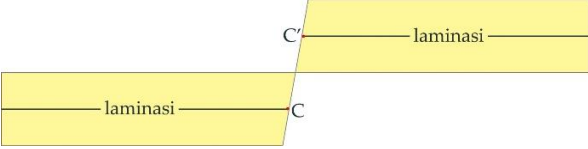
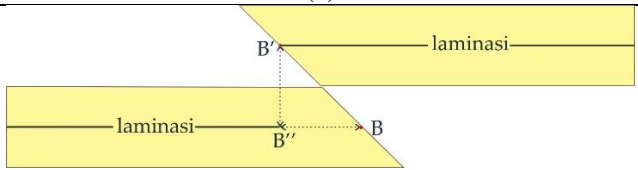
Apabila tubuh batuan mengalami tekanan maka setiap partikel penyusun batuan bergeser ke posisi baru. Beberapa bagian dari pergerakan partikel kemungkinan membentuk perubahan secara keseluruhan tubuh batuan, tetapi sebagian lagi menyebabkan terjadinya distorsi dan rotasi lokal. Pergerakan suatu material karena gaya akan menerus sampai masa tersebut mencapai konfigurasi pada kondisi keseimbangan (*equilibrium*). Selama pergerakan, jejak yang ditinggalkan oleh partikel material kemungkinan sangat komplek, namun masih mungkin untuk merekonstruksi vektor yang mencerminkan pergeseran elemen dari posisi semula ke posisi terdeformasi.

Setiap titik material pada batuan tak terdeformasi kemungkinan dihubungkan oleh titik material yang sama pada batuan terdeformasi dengan rangkaian vektor pergeseran atau vektor displasemen. Rangkaian vektor pergeseran ini dikenal sebagai bidang pergeseran atau bidang displasemen yang dikenal sebagai deformasi. Oleh karena itu, ilmu yang mempelajari tentang deformasi merupakan bagian dari studi geometri, artinya perubahan suatu tubuh batuan semata-mata merupakan perbandingan

antara kondisi tak terubah (*undeformed state*) dan kondisi terubah (*deformed state*), dan tidak tergantung pada sejarah pergerakan partikel material penyusun batuan. Beberapa peneliti telah mendeskripsikan bidang pergeseeran dengan persamaan matematis atau transformasi (misal Ramsay, 1967; Jaeger, 1969; Ramsay dan Graham, 1970; Hobbs, 1971; dan Hobbs dkk, 1976).

Pada batuan yang telah mengalami dislokasi, besaran displasemen dapat dengan mudah diidentifikasi jika didapatkan penanda (*marker*) sebagai titik referensi, misal bidang diskontinyu lapisan laminasi di dalam unit batupasir, atau bidang kontak antar unit batuan berbeda umur atau level stratigrafi. Pergeseran laminasi akan memberikan penanda terjadinya dislokasi pada lapisan batupasir. Tabel 2.2 memberikan ilustrasi arah displasemen yang diidentifikasi dari dislokasi struktur internal laminasi secara vertikal, lateral, dan menyerong. Vektor displasemen pada batuan yang mengalami dislokasi menyerong merupakan wujud dari kombinasi pergerakan ke arah vertikal dan lateral.

Tabel 2.2. Hubungan arah dislokasi batuan dan identifikasi displasemen

.Arah Dislokasi	Displasemen	Ilustrasi Skematik
vertikal	vertikal	 <p>(a)</p>
		 <p>(b)</p>
horizontal	horizontal	 <p>(c)</p>
		 <p>(d)</p> <p>B-B' vektor displasemen; B-B'' komponen displasemen horizontal (<i>heave</i>); B'-B'' komponen displasemen vertikal (<i>throw</i>).</p>

(a) lapisan planar sebelum dislokasi; (b) displasemen vertikal A-A'; (c) displasemen lateral C-C'; (d) displasemen menyerong atau miring B-B'.

Remark

- ✚ It is important to note that transformation of a rock body due to a tectonic event is by definition different from recrystallization processes during deformation.
- ✚ Tectonic deformation leads to a number of consequences such as local translation, distortion, and rotation.

Dalam situasi dimana vektor displasemen bervariasi dari satu titik ke titik yang lain dalam suatu bodi disebut sebagai perbedaan pergeseran (*displacement gradient*). Jika gradien perpindahan konstan di seluruh masa terdeformasi maka perubahan tersebut homogen, dan sebaliknya jika besaran displasemen tidak konstan maka deformasinya tidak homogen. Pada deformasi homogen, komponen translasi dapat bervariasi dari satu titik ke titik lainnya, tetapi komponen distorsi dan rotasinya sama dari titik satu ke titik lainnya, dan garis yang semula lurus tetap lurus setelah terjadi deformasi.

Deformasi homogen pada kondisi volume konstan dapat melibatkan beberapa tipe *strain*, antara lain:

1. *Axially symmetric extension*

Tipe *strain* ini melibatkan tarikan pada satu arah utama (tarikan simetri), dan pemendekan yang sama pada semua arah secara tegak lurus. Bentuk simetri dari *strain* ditunjukkan oleh sumbu simetri. *Strain* elipsoidal merupakan "*prolate spheroid*".

2. *Axially symmetric shortening*

Tipe *strain* ini mencakup pemendekan pada satu arah utama (pemendekan simetri), dan tarikan yang sama ke segala arah secara tegak lurus. *Strain* elipsoidal merupakan "*spheroid oblate*".

3. *Plane strain*

Pada tipe ini, sumbu utama intermediat dari *strain* elipsoidal memiliki panjang yang sama dengan diameter lingkaran awal sebelum deformasi (*undeformed*). Pemendekan dan tarikan terjadi paralel dengan dua arah utama yang lainnya. *Strain* elipsoidal di

sini merupakan *triaxial ellipsoid*, dan ditunjukkan oleh tiga sumbu utama dari elipsoid dengan panjang berbeda.

4. *General Strain*

Tipe *strain* ini meliputi tarikan atau pemendekan pada setiap arah utama *strain*, dan peregangan elipsoidnya triaksial.

Kebanyakan deformasi terjadi secara tak homogen (*inhomogeneous deformation*), dan fenomena deformasi ditunjukkan oleh perubahan garis lurus menjadi kurva. Pada beberapa deformasi tak homogen sangat jelas terlihat bahwa bidang ketidakhomogenan kurang lebih hampir menyerupai bidang homogen. Situasi seperti ini biasanya terlihat pada tubuh batuan berukuran besar yang terlipat pada skala kecil, tetapi lapisan terlipat itu masih dianggap sebagai lapisan mendatar. Pada fenomena ini, tubuh batuan secara keseluruhan dianggap mengalami deformasi homogen, dan *strain* elipsoidal dapat digambarkan untuk masa batuan terdeformasi. Model semacam ini pada umumnya disebut sebagai "*mean strain ellipsoid*". Pada beberapa batuan yang mempunyai belahan berlembar (*slaty cleavage*) yang baik atau perlapisan akibat diferensiasi metamorfik dapat terjadi perubahan lokal volume sehubungan dengan konsentrasi mineral pada zona bidang datar. Pada keadaan seperti ini, dilatasi terjadi pada kondisi tak homogen dan merepresentasikan tipe deformasi tak homogen.

Dalam konteks sejarah deformasi, siklus batuan kemungkinan mengalami perubahan secara progresif, sehingga terjadi evolusi *strain* mulai dari awal hingga akhir peristiwa tektonik tersebut. Selama proses deformasi batuan, suatu garis peninjauan material mengalami perbedaan *strain* pada tahapan yang berbeda sepanjang sejarah deformasi, misal lapisan awal lurus (*planar*) berubah menjadi lipatan yang ketat atau rapat (*tight fold*). Pada tahap awal deformasi, lapisan mengalami penebalan (*thickening*), karena terjadi pergeseran sejajar bidang perlapisan, dan pada tahap selanjutnya unit

batuan membentuk struktur lipatan konsentris setelah tubuh batuan mengalami kontraksi ~31%. Lipatan ini secara perlahan mengalami pertumbuhan seiring dengan progres deformasi, dan struktur lipatan rapat terbentuk setelah batuan memendek ~60%. Apabila tegasan kompresional terus berlangsung, struktur berubah menjadi lipatan rebah atau *overturned fold*. Melalui proses deformasi seperti ini maka kecil kemungkinan terjadi tarikan ke arah tegak lurus atau paralel dengan sumbu lipatan, sehingga *strain* itu mendekati bidang datar (*plane*).

Remark

- ✦ *Folding of rock sequence due to compressive tectonics occurs at a progressive manner, rather than a sudden fashion.*
- ✦ *Tight fold is likely to have resulted from the evolution of structuring from a planar layer since the onset of compression.*
- ✦ *At the earliest stage of deformation, the rock unit thickened due to shearing parallel to bedding, subsequently shortened as a concentric fold generated, eventually the fold tightened or even overturned as compression proceeded.*

2.4. Tipe Deformasi

Para peneliti telah lama mengenali dua tipe deformasi pada batuan, yaitu *brittle* (getas) dan *ductile* (plastis). Tipe getas didefinisikan sebagai perubahan yang ditandai dengan perkembangan bidang diskontinuitas sebagai pemutus kohesivitas batuan, misal mikrostruktur rekahan, sesar, atau breksi tektonik. Sedangkan deformasi plastis terbentuk melalui pendistribusian *strain* secara bervariasi pada masa terdeformasi, misal perlipatan. Diantara kedua jenis deformasi dikenal juga *brittle-ductile deformation* atau tipe transisi yang merupakan fungsi tekanan hidrostatik, temperatur, dan *strain rate*. Besar kecilnya parameter tersebut mengontrol kecenderungan deformasi pada batuan. Ilustrasi skematik perubahan dari *brittle* ke *brittle-ductile transition* hingga *ductile behavior* dapat dilihat dalam Hobbs dkk. (1976, hal. 62). Tabel 2.3 memperlihatkan faktor-faktor yang mempengaruhi perubahan unit batuan.

Tabel 2.3. Faktor penyebab deformasi dan tipe perubahan pada batuan.

Faktor	Level	Tipe Deformasi	
Temperatur (*)	tinggi (<i>warm</i>)		plastis
	rendah (<i>cold</i>)	getas	
Tekanan (**)	tinggi (<i>high</i>)		plastis
	rendah (<i>low</i>)	getas	
Laju Deformasi (*)	lambat (<i>slow</i>)		plastis
	cepat (<i>sudden</i>)	getas	
Komposisi Batuan	lunak (<i>soft</i>)		plastis
	keras (<i>hard</i>)	getas	

(*) temperatur dan penurunan laju deformasi bertanggungjawab atas *crystal slip* dan *atomic diffusion*

(**) tekanan bertanggungjawab atas *cracking* dan *fracturing*

Tipe getas dan plastis keduanya dapat terjadi pada batuan yang sama, tergantung kondisi deformasi, apakah cepat atautkah lambat

2.5. Plastisitas Batuan

Dalam percobaan laboratorium, plastisitas batuan merupakan fungsi dari temperatur dan tingkat perubahan (*strain rate*). Hadirnya sejumlah unsur pengotor (*impurities*) seperti OH pada struktur kristal silika mempunyai efek yang sangat besar terhadap sifat mekanik (Griggs, 1967). Eksperimen laboratorium biasanya dilakukan pada dua kondisi awal tekanan hidrostatis yang memadai untuk memastikan plastisitas. Pertama, pengujian dilaksanakan dengan tingkat perubahan konstan, dimana specimen diberi pembebanan sedemikian rupa untuk memastikan laju perubahan terjadi secara konstan, dan tegangan dikondisikan bervariasi untuk menjaga tingkat perubahan tetap konstan. Kedua, percobaan dilakukan dengan tegangan konstan (*creep*), dimana gaya dijaga konstan, sedangkan laju perubahan dibiarkan berubah-ubah dalam rangka menjaga tegangan tetap konstan seperti semula. Apabila dalam eksperimen dijumpai percontohan material mulai mengalami deformasi pada laju perubahan dan tegangan yang keduanya

konstan, maka kondisi ini dikategorikan stabil (*steady*). Batuan penyusun kerak bumi bisa saja mengalami deformasi dalam keadaan stabil untuk periode waktu yang panjang, tetapi tegasan dan laju perubahan keduanya akan berubah, sebagai contoh lapisan planar berubah menjadi lipatan.

Ketika perconto material berubah pada tegasan konstan, maka deformasi dimulai pada laju perubahan relatif tinggi, kemudian menurun secara perlahan sampai menjadi konstan. Setelah periode waktu yang panjang, laju *strain* ini akan meningkat kembali. Jika *strain* diplot terhadap fungsi waktu maka akan terlihat pembagian kurva ke dalam tiga region. Area pertama, dimana tingkat *strain* meningkat disebut *primary* atau *transient creep*, bagian kedua dengan tingkat *strain* konstan disebut *secondary* atau *steady-state creep*, sedangkan region ketiga disebut *tertiary* atau *accelerating creep*. Tahap ketiga dari kurva tegasan konstan pada umumnya berasosiasi dengan rekahan specimen, meskipun pada beberapa contoh struktur itu berkembang karena rekristalisasi dari material selama deformasi berlangsung.

Sebagian besar material kristalin pada temperatur moderat, atau setengah dari titik lebur kristal, memperlihatkan perubahan yang stabil, dan cenderung dikontrol oleh pergerakan dislokasi. Weertman (1970) telah menyampaikan variasi mekanisme deformasi batuan. Dua terminologi yang sering digunakan dalam pembahasan transformasi batuan akibat gaya tektonik yaitu kompetensi dan plastisitas (*ductility*). Istilah kompeten untuk menunjukkan kontras dalam kekuatan. Sebagai contoh, sikuen batuan yang terdiri dari beberapa lapisan dengan perbedaan kompetensi, misal *quartzite* dan *schist*, keduanya akan terdeformasi dengan cara berbeda. *Quartzite* sebagai batuan kompeten cenderung membentuk lipatan paralel dengan banyak rekahan dan sesar, sedangkan *schist* yang relatif kurang kompeten cenderung berperilaku plastis dan mengalir mengisi ruang antar lapisan *quartzite*. Berdasarkan pada ilustrasi tersebut, *quartzite* dikategorikan sebagai unit kompeten yang kuat dan mengontrol deformasi, sebaliknya *schist* dianggap batuan inkompeten yang lebih lemah.

Batuan sedimen yang bersifat kompeten biasanya berbutir kasar, misal batupasir, breksi, dan konglomerat, sedangkan yang bersifat inkompeten pada umumnya berbutir halus seperti batulempung, serpih, dan batulanau. Oleh sebab itu, perselingan antara batupasir dan batulempung merupakan sikuen dengan kontras kompetensi, sehingga konfigurasi deformasi rumpunan batuan cenderung semakin kompleks. Studi kasus struktur tektonik untuk perselingan unit kompeten dan inkompeten disajikan dan dibahas secara mendalam pada Bab 7 dan Bab 8 dari buku ini.

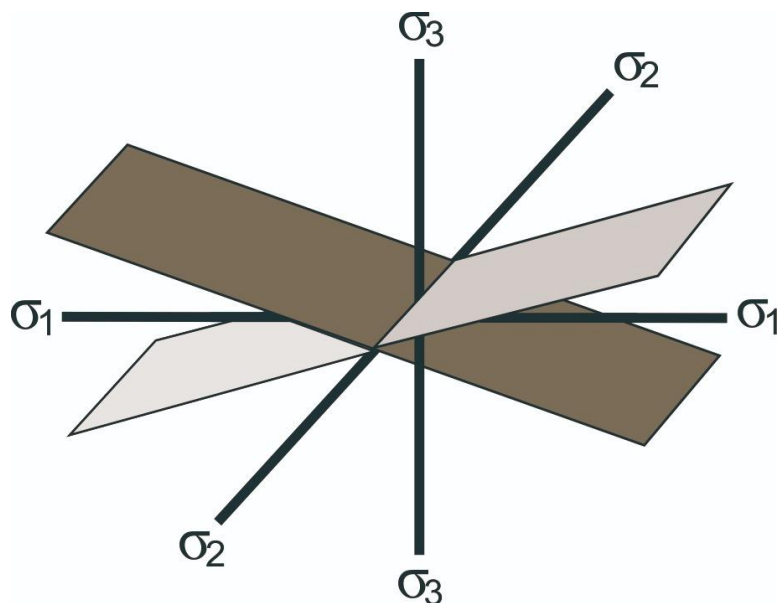
Terminologi *ductility* digunakan dalam dua kondisi yang berbeda dan tidak tergantung pada kekuatan batuan. Suatu batuan dikategorikan lebih plastis dari pada yang lain jika batuan tersebut dapat terdeformasi pada *strain* lebih tinggi dari pada batuan lain sebelum terjadinya rekahan. Griggs dan Handin (1960) dan Heard (1960) mengemukakan bahwa plastisitas merupakan dimensi besaran *strain* sebelum terjadi perilaku getas pada batuan. Batuan yang memiliki plastisitas tinggi mampu merespon tegasan tinggi tanpa berperilaku getas, artinya deformasi terjadi melalui *flexural slip* dengan membengkok (*bending*) ataupun melengkung (*buckling*) tanpa adanya perekahan (*fracturing*).

Bab 3

SESAR NAIK

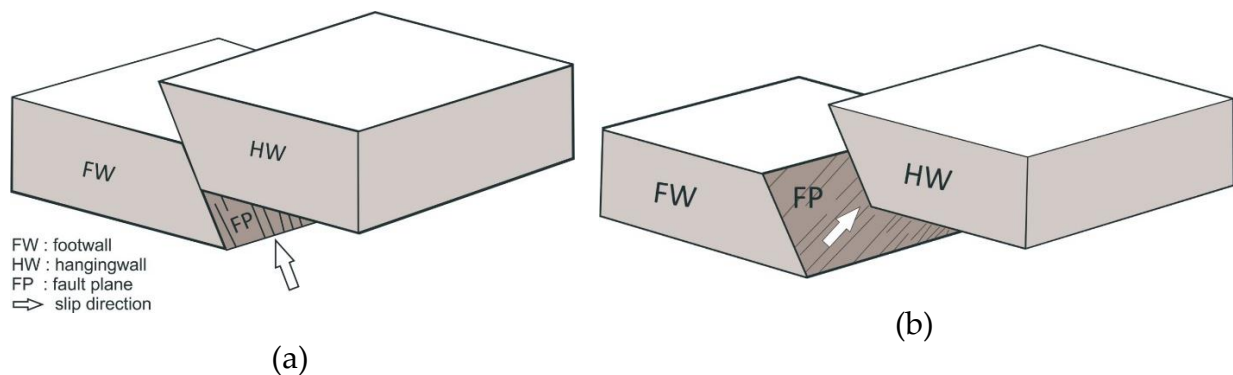
3.1. Pola Tegasan dan Terminologi Terkait

Pensesaran tipe ini dicirikan oleh sikuen berumur lebih tua di *hangingwall* bergerak naik dan menindih rumpunan batuan yang lebih muda di *footwall*, sehingga rumpunan batuan di area deformasi mengalami penebalan (*thickening*), akibat adanya pengulangan (*repetition*) perlapisan batuan. Deformasi terjadi apabila tubuh batuan terkena tegasan maksimum (σ_1) dan intermediat (σ_2) dengan orientasi relatif horizontal, dan tegasan minimum (σ_3) dengan arah vertikal (Gambar 3.1). Orientasi tegasan seperti itu mengindikasikan rezim gaya kompresional, dan menyebabkan tubuh batuan mengalami deformasi dengan cara memendek (*shortening*) atau kontraksi.



Gambar 3.1. Pola tegasan yang membentuk pensesaran naik pada tubuh batuan dengan orientasi σ_1 dan σ_2 lateral, dan σ_3 vertikal, dimana σ_1 merupakan tegasan maksimum, σ_2 tegasan intermediat, dan σ_3 tegasan minimum.

Pensesaran naik secara umum diklasifikasikan berdasarkan pada arah pergeseran blok *hangingwall* terhadap *footwall*, apakah paralel terhadap *footwall* atau searah kemiringan bidang sesar (*dip slip*), ataukah menyerong terhadap *footwall* atau bidang sesar (*oblique slip*). Gambar 3.2 mengilustrasikan arah pergerakan *hangingwall* relatif terhadap *footwall* atau kedudukan bidang sesar. Blok batuan yang bergerak searah dip bidang sesar hanya memiliki komponen pergeseran vertikal, sedangkan pergerakan menyerong mengindikasikan kombinasi perpindahan secara lateral dan vertikal. Dalam rangka menginterpretasikan arah pergerakan relatif sesar diperlukan data elemen struktur, salah satu yang paling krusial yaitu cermin sesar atau gores garis (*slickensides*) yang terekam di bidang sesar. Komponen struktur ini mengindikasikan pergerakan relatif terakhir (*the latest movement*) dari blok batuan yang tersesarkan.



Gambar 3.2. Pergerakan *hangingwall* relatif terhadap *footwall*. Bergerak paralel disebut sebagai *dip-slip thrust fault* (a), dan bergeser menyerong dikenal sebagai *oblique-slip thrust fault* (b).

Beberapa terminologi seringkali digunakan oleh para peneliti untuk penamaan sesar naik, diantaranya adalah:

1. *Thrust fault*, pada umumnya memiliki bidang sesar relatif landai ($<45^\circ$).
2. *Reverse fault*, biasanya memperlihatkan bidang sesar lebih curam ($>45^\circ$), sehingga seringkali diinterpretasikan sebagai sesar normal yang terkena gaya kompresi, akibatnya *hangingwall* bergerak naik relatif terhadap *footwall*, artinya daerah tersebut pada awalnya

dikontrol oleh gaya tensional yang menghasilkan sesar normal, berikutnya muncul rezim kompresional yang mengaktifkan sesar normal menjadi sesar naik. Meskipun demikian, pada jalur pegunungan lipatan sering dijumpai *reverse fault* dengan bidang sesar sangat curam dan bahkan hampir tegak, karena struktur turut terlipat pada fase akhir deformasi.

3. *Contraction fault*, mengimplikasikan batuan memendek (*shortening*) selama deformasi.

4. *Compression fault*, menunjukkan rezim tektonik kompresional yang menyebabkan deformasi batuan.

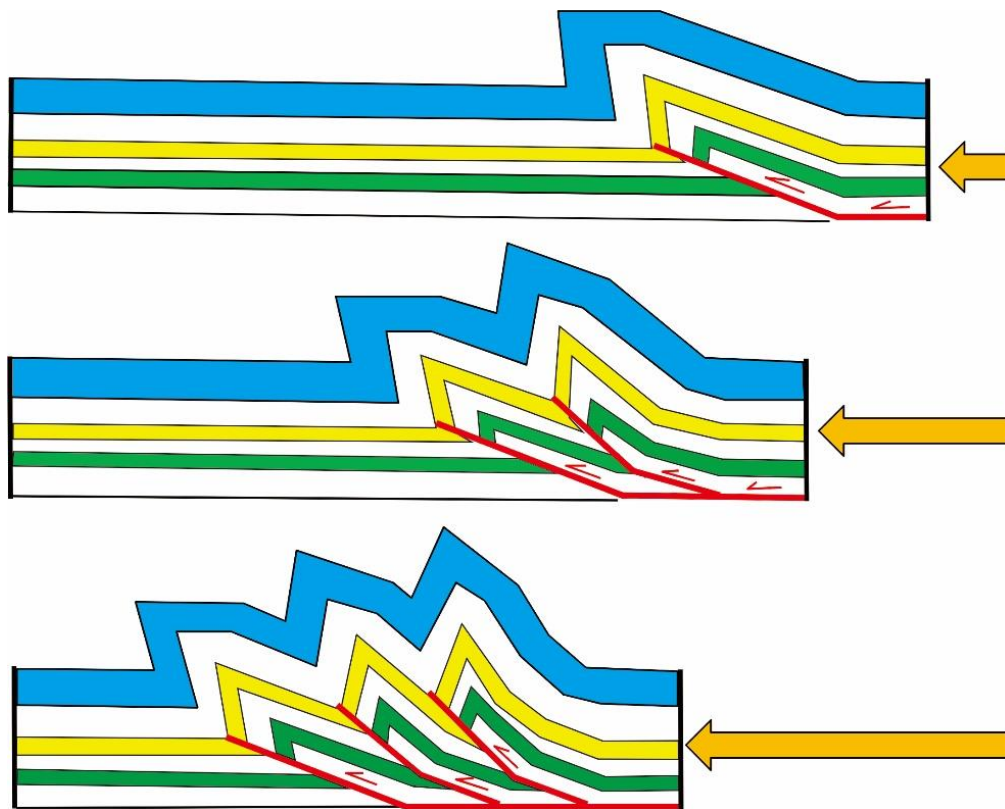
Remark

- ✚ *Understanding the thrust concept prior to the field session is absolutely essential, hence you should bear in your mind, as you have to implement it once encountering the thrust rock sequence in the field area.*
- ✚ *Every single structural element recorded within the deformed rock always provides invaluable information that allows us to better understand on the mechanism of deformation, thus never miss it once in the field, bring it back home with you for sure.*

3.2. Imbrikasi dan Dupleks

Beberapa hasil penelitian yang dipublikasikan telah membedakan sistem sesar naik menjadi dua klasifikasi, yaitu imbrikasi dan dupleks (Dahlstrom, 1970; Boyer dan Elliott, 1982; Mitra, 1986). Struktur imbrikasi pada awalnya dikenali oleh Peach dan Horne (1907) di sistem sesar naik Moin barat laut Skotlandia. Zona deformasi di daerah itu didominasi oleh sekumpulan sesar naik yang memperlihatkan jarak antar sesar berdekatan dan relatif konstan. Sedangkan, konsep dupleks pertamakali diperkenalkan oleh Dahlstrom (1970), dan sejak saat itu banyak peneliti mengenali struktur tersebut di beberapa lingkungan deformasi, termasuk di jalur pegunungan lipatan (Boyer dan Elliott, 1982), di sistem sesar lateral atau *strike fault* (Woodcock dan Fisher, 1986), dan di zona sesar ekstensional (Gibbs, 1984).

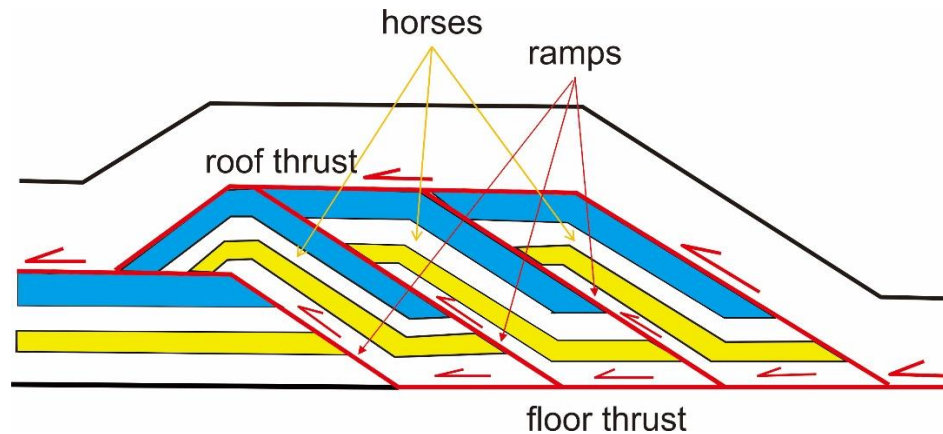
Struktur imbrikasi pada umumnya dibentuk oleh seri sesar naik dengan spasi relatif regular dan saling berdekatan. Beberapa peneliti telah mengelompokkan struktur ini berdasarkan pada besaran pergeseran sesar atau displasemen (*displacement*) (Boyer dan Elliott, 1982; McClay, 1992). Apabila pergerakan terbesar berada di bagian ujung depan sesar (*leading tip*), sistem disebut sebagai kipas imbrikasi depan (*leading imbricate fan*). Sebaliknya, jika displasemen terbesar berada di bagian ujung belakang sesar (*trailing line*), struktur disebut sebagai kipas imbrikasi belakang (*trailing imbricate fan*). Gambar 3.3 memperlihatkan model geometri dari struktur imbrikasi yang terbentuk secara progresif akibat gaya kompresi.



Gambar 3.3. Geometri imbrikasi dan ilustrasi perkembangan struktur (dimodifikasi dari Mitra, 1986; McClay, 1992).

Struktur dupleks dibentuk oleh beberapa *horse* yang dibatasi pada bagian bawah oleh sesar naik lantai atau *floor thrust*, dan pada bagian atas oleh sesar naik atap atau *roof thrust* (Boyer dan Elliott, 1982) (Gambar 3.4). Pada prinsipnya, sistem ini dibentuk oleh

sesar naik lantai dan atap yang dihubungkan oleh sesar miring atau ramp (*ramping fault*). Teori yang menjelaskan mekanisme pembentukan struktur dupleks hingga kini masih menjadi perdebatan di antara para peneliti.

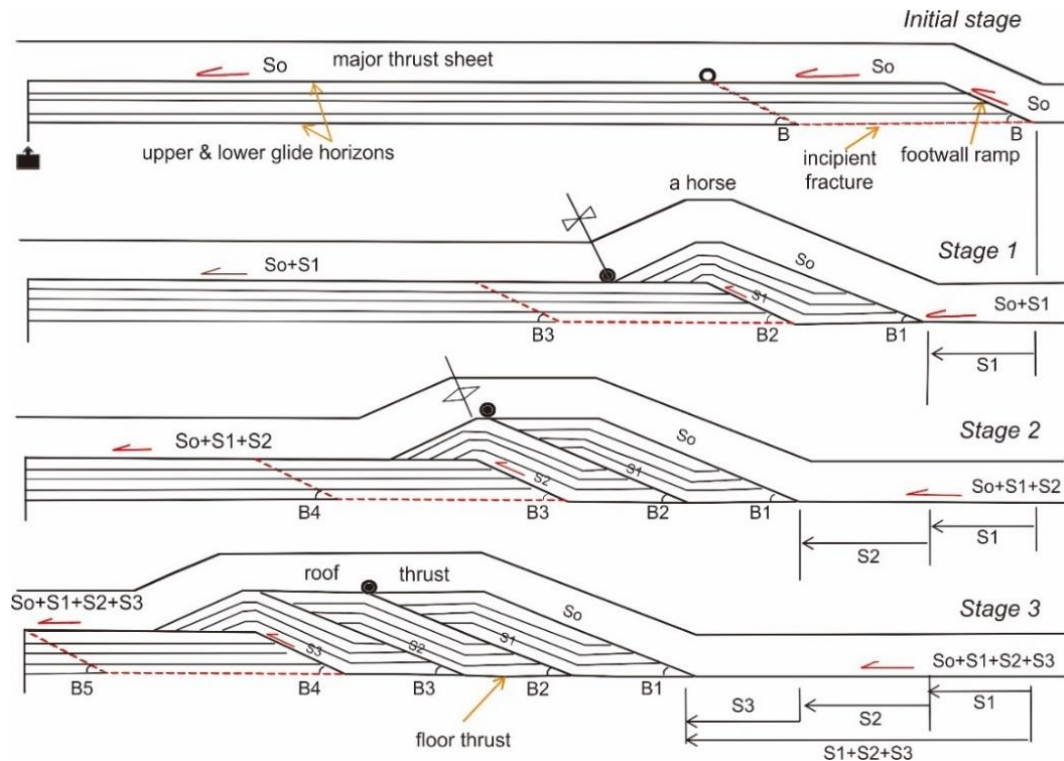


Gambar 3.4. Struktur dupleks didefinisikan sebagai kumpulan *horse* yang dibatasi oleh sesar naik alas di bawah dan sesar naik atap di atas, dan kedua jenis sesar naik dihubungkan oleh sesar miring atau *ramp thrust* (dimodifikasi dari Boyer dan Elliott, 1982).

Sejumlah peneliti menganggap sistem berkembang secara sikusial searah dengan gaya tektonik (Gambar 3.5), tetapi ada juga yang meyakini bahwa semua *horse* dalam dupleks terbentuk secara bersamaan (Fermor, 1999). Pensesaran terjadi di sepanjang detasemen alas (*basal detachment*), sehingga pergeseran sesar lantai dan atap selalu lebih besar dari pada sesar *ramp*. Hasil penelitian oleh Mitra (1986) memperlihatkan bahwa struktur dupleks mengindikasikan pemendekan sikuen batuan terdeformasi hingga mencapai 50%, tetapi Boyer dan Elliott (1982) menyatakan kontraksi rumpunan batuan yang membentuk sistem ini berkisar antara 30-60%.

Bentuk dupleks tergantung dari sudut *ramp*, jarak sesar naik, dan displasemen individual *thrust*. Mitra (1986) membagi dupleks atas dasar posisi struktur terhadap sesar naik yang lebih besar menjadi 3 kelas, yaitu:

- (1) *Independent ramp anticlines* dan *hinterland sloping duplexes*
- (2) *True duplexes*
- (3) *Overlapping ramp anticlines*



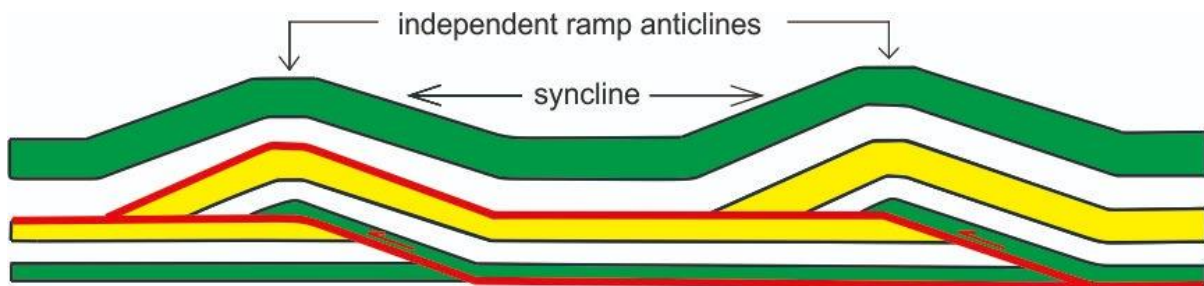
Gambar 3.5. Model sikuensial pertumbuhan struktur dupleks (dimodifikasi dari Boyer dan Elliott, 1982).

Independent ramp anticlines atau antiklin *ramp* independen dicirikan oleh jarak akhir (*final spacing*) antar sesar lebih besar dari pada displasemen individual *thrust*, dan struktur yang terbentuk terdiri dari antiklin *ramp* independen yang dipisahkan oleh sinklin relatif besar (Gambar 3.6). *Hinterland sloping duplexes* atau dupleks condong ke *hinterland* dicirikan oleh jarak awal (*initial spacing*) antar sesar kecil, displasemen individual *thrust* juga kecil, dan pada area kontak antar *horses* sesar atap condong ke arah *hinterland* (Gambar 3.7).

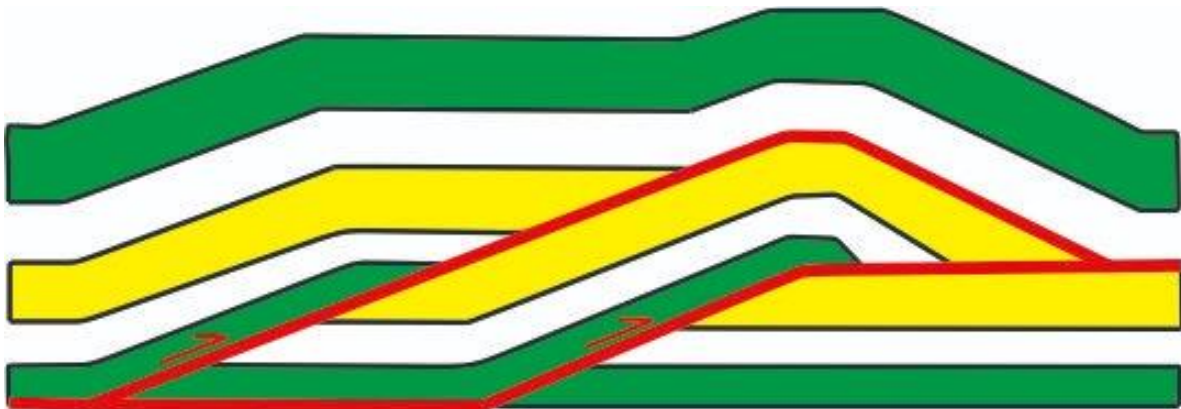
True duplexes atau dupleks sebenarnya di sini merupakan struktur dengan model seperti yang diajukan oleh Boyer dan Elliott (1982), terbentuk oleh keterkaitan elemen-elemen struktur yang terdiri dari jarak akhir sesar, sudut *ramp*, dan tinggi *ramp*, serta sesar atap paralel terhadap *ramp* depan dari dupleks seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4. Sedangkan *overlapping ramp anticlines* atau antiklin *ramp* tumpang tindih merupakan dupleks dimana puncak antiklin *ramp* yang berurutan saling tumpang tindih sebagian

ataupun keseluruhan (Gambar 3.8). Apabila antiklin *ramp* tumpang tindih keseluruhan, dimana sesar percabangan pada garis ujung belakang saling berimpitan, struktur ini diklasifikasikan sebagai *antiformal stack* (Gambar 3.9).

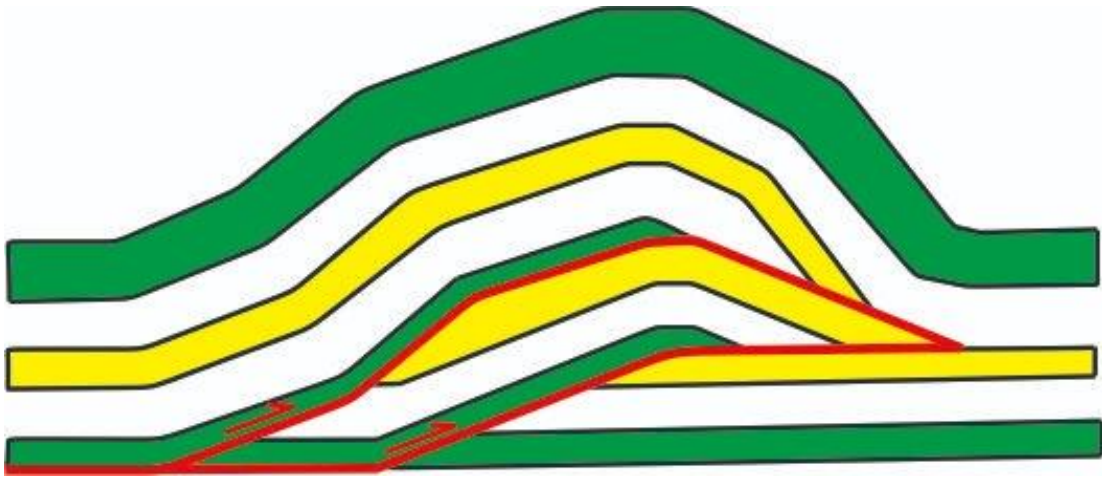
Selain klasifikasi di atas, pegunungan lipatan seringkali dibentuk oleh seri sesar naik dengan geometri *staircase* atau *stair-step thrust trajectory* (Gambar 3.10), yaitu jalur sesar naik yang terdiri dari rangkaian *flat* dan *ramp*. *Flat* merupakan sesar yang paralel terhadap perlapisan batuan, sedangkan *ramp* direpresentasikan oleh sesar yang lebih pendek, miring ke level stratigrafi atas, dan memotong perlapisan.



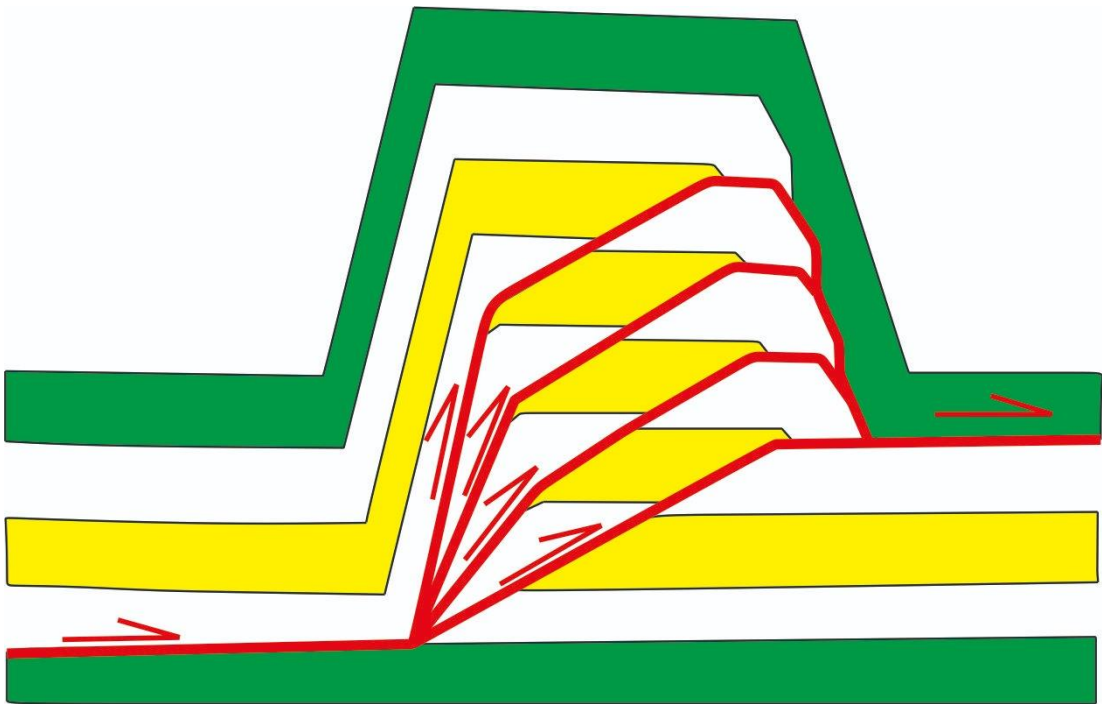
Gambar 3.6. Model antiklin *ramp* independen oleh Mitra (1986). Ilustrasi diagramatik dimodifikasi dari McClay (1992).



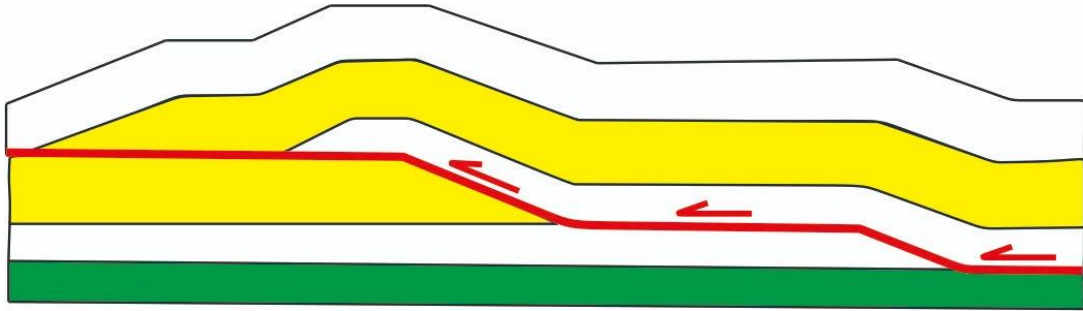
Gambar 3.7. Model *hinterland sloping duplexes* (dimodifikasi dari McClay, 1992).



Gambar 3.8. Model *overlapping ramp anticlines* (dimodifikasi dari McClay, 1992).



Gambar 3.9. Model *antiformal stack* (dimodifikasi dari McClay, 1992).

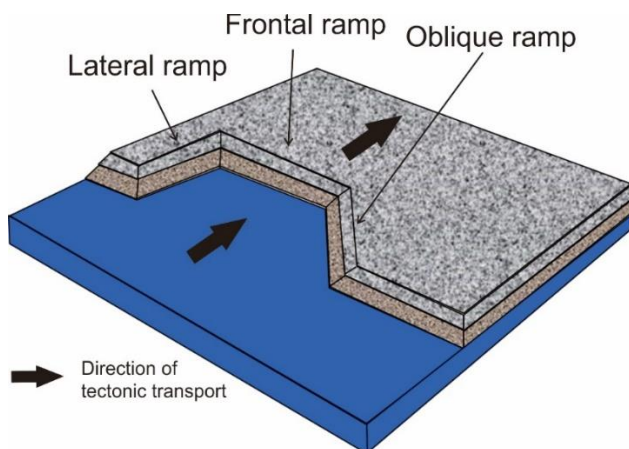


Gambar 3.10. Sesar naik membentuk geometri *staircase trajectory* (dimodifikasi dari McClay, 1992).

Dupleks dan imbrikasi dapat dengan mudah dibedakan apabila kedua jenis struktur tersebut belum mengalami erosi dan denudasi selama orogenesis. Boyer dan Elliott (1982) menyatakan bahwa dupleks yang telah mengalami erosi di percabangan bagian depan sesar (*leading branch lines*) akan sulit dibedakan dari sistem imbrikasi yang berasal dari sekumpulan sesar naik yang terhenti di bagian depannya dan mengalami erosi.

3.3. Konfigurasi 3D Sesar Naik

Butler (1982) telah membuat klasifikasi untuk sesar *ramp* menjadi tiga berdasarkan orientasinya terhadap arah pergerakan tektonik, yaitu (1) *ramp* tegak lurus atau ortogonal, (2) *ramp* lateral, dan (3) *ramp* menyerong atau *oblique* (Gambar 3.11).



Gambar 3.11. Ilustrasi diagramatik orientasi sesar miring *ramp* relatif terhadap arah transport tektonik (dimodifikasi dari McClay, 1992).

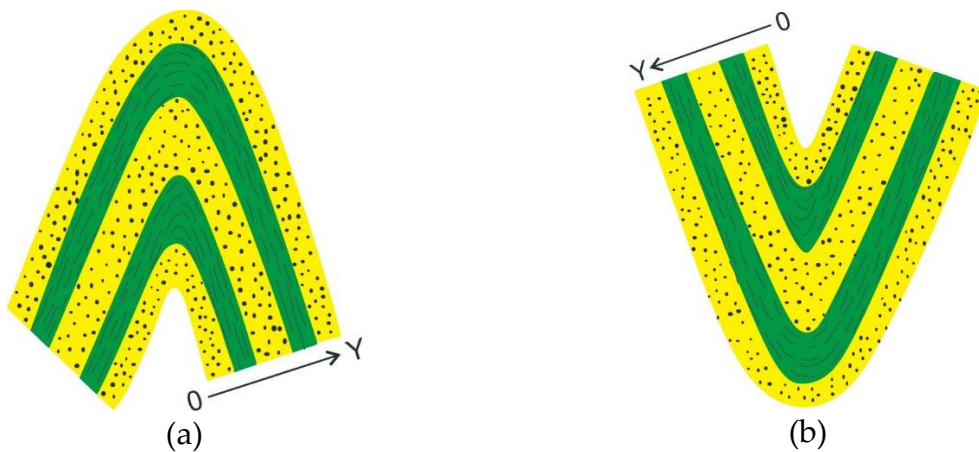
Ramp dengan sebaran relatif ortogonal terhadap arah tektonik dicirikan dengan pergeseran reversal terhadap kemiringan yang dominan. Sedangkan *ramp* yang paralel dengan orientasi tektonik dicirikan oleh pergerakan lateral yang dominan. Hossack (1981) menamakan *ramp* lateral sebagai dinding samping atau *sidewalls*, namun demikian terminologi yang diajukan Hossack ini tidak bisa diartikan sebagai sesar naik yang memotong blok *hangingwall*. Jenis *ramp* yang menyerong terhadap arah pergerakan tektonik pada umumnya dikenali dari kombinasi pergeseran lateral (*strike-slip*) dan reversal terhadap dip (*reverse dip slip*) (Dahlstrom, 1970).

Bab 4

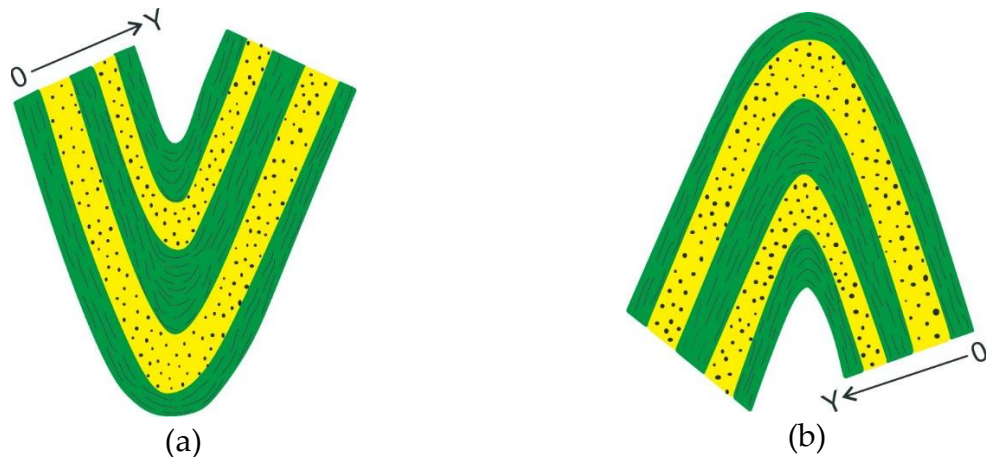
LIPATAN

4.1. Konfigurasi dan Komponen Struktur

Struktur lipatan biasanya dikenali dari bentuk lengkungan yang diperlihatkan oleh tubuh batuan, yaitu bentuk *antiform* dengan lengkungan ke atas dan kedua sayapnya miring saling menjauh, dan *sinform* dengan lengkungan ke bawah dan kedua sayapnya miring saling mendekat. Antiklin merupakan *antiform* yang di bagian inti struktur disusun oleh batuan berumur paling tua, sedangkan sinklin adalah *sinform* yang di bagian intinya merupakan batuan termuda. Namun demikian, antiklin dan sinklin tidak selalu berbentuk *antiform* dan *sinform*, karena antiklin dengan lengkungan menutup ke bawah disebut *synformal-anticline*, dan sinklin dengan lengkungan menutup ke atas dinamakan *antiformal syncline* (Gambar 4.1 dan Gambar 4.2).



Gambar 4.1. Struktur antiklin dicirikan oleh batuan tertua berada di inti (O atau *old*), dan ke arah sayap umur batuan semakin muda (Y atau *young*) (a); antiklin berbentuk *sinform* disebut *synformal anticline*, cirinya tetap sama yaitu batuan tertua berada di inti (O), dan ke arah sayap umur batuan semakin muda (Y) (b) (dimodifikasi dari Hobbs dkk., 1976, hal. 166).



Gambar 4.2. Struktur sinklin dicirikan batuan termuda berada di inti (Y) dan ke arah sayap umur batuan semakin tua (O) (a); sinklin berbentuk antiform disebut *antiformal sinklin*, cirinya tetap sama yaitu batuan termuda berada di inti (Y) dan ke arah sayap umur batuan semakin tua (O) (b) (dimodifikasi dari Hobbs dkk., 1976, hal. 166).

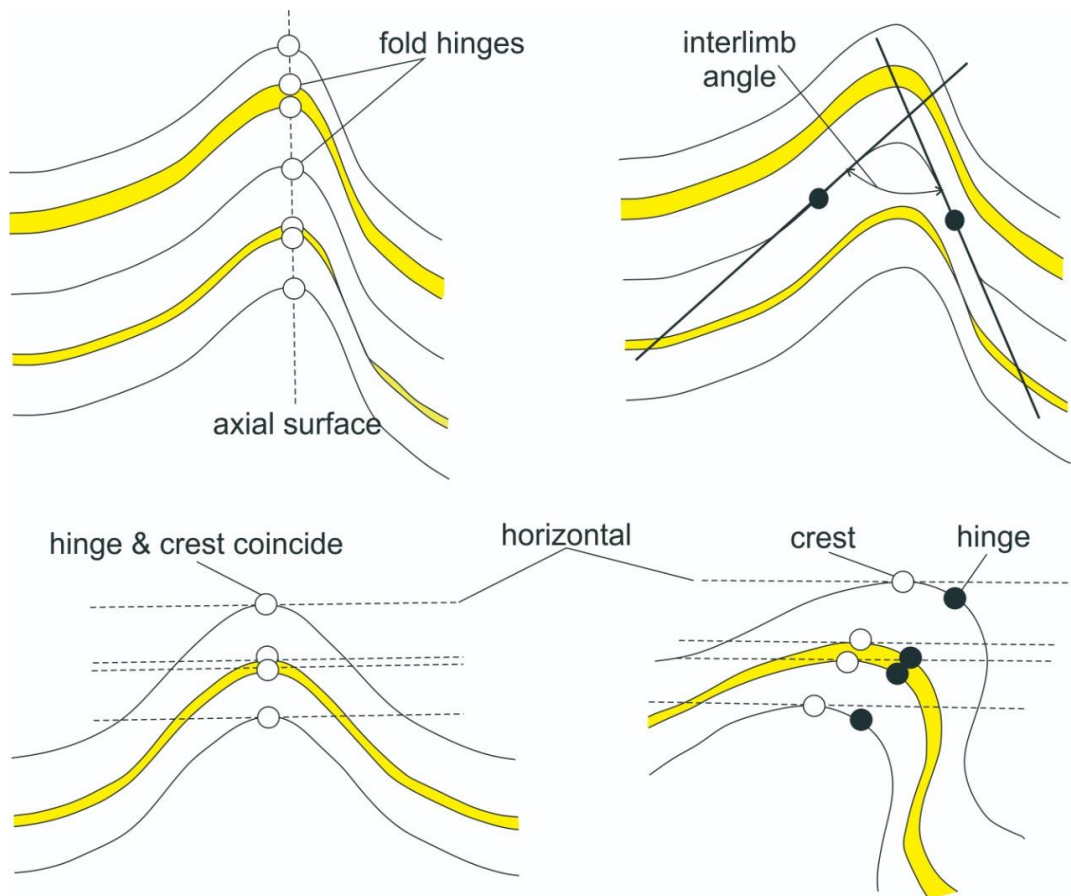
Remark

- ✚ The age of rock units is a critical matter in determining whether the folding structure is an anticline or a syncline; the oldest rock unit for the anticline forms its core, the youngest rock unit for the syncline occurs at its core.
- ✚ The recorded primary structures within the deformed rocks always provide a powerful tool to identify the younging direction.

Konfigurasi lengkung pada struktur diakibatkan batuan planar mengalami deformasi plastis oleh gaya tektonik kompresional. Batuan yang terlipat mengalami pemendekan perlapisan searah dengan pergerakan tektonik. Daerah yang memiliki bentangalam dengan kontrol mayoritas struktur lipatan dikenal sebagai jalur lipatan (*fold belts*) atau pegunungan lipatan. Lipatan pada umumnya dideskripsikan berdasarkan pada sejumlah komponen struktur, oleh karena itu setiap elemen yang terlihat pada singkapan batuan sangat penting untuk dikenali dan diukur dengan cara yang benar. Gambar 4.3 memperlihatkan beberapa komponen struktur yang digunakan untuk klasifikasi lipatan, antara lain:

- *Hinge* yaitu area lengkungan dengan radius kecil (*fold closure*) atau sering disebut juga sebagai *hinge zone*.

- *Limb* atau sayap merupakan dua area dengan radius lebih besar yang terkoneksi dengan *hinge*.
- *Interlimb angle* adalah sudut yang dibentuk antar sayap lipatan.
- *Crest* merupakan titik tertinggi atau puncak lengkungan lipatan.
- *Axial surface* adalah bidang sumbu yang membelah lipatan menjadi dua bagian yang sama, sehingga antar sayap terlihat seperti "*mirror image*".
- *Enveloping surface* yaitu bidang planar yang menghubungkan secara tangensial beberapa *hinge* dari sekumpulan lipatan. Bidang ini mencerminkan kemiringan rerata dari perlapisan batuan yang terlipat.



Gambar 4.3. Ilustrasi skematik menunjukkan beberapa elemen struktur untuk deskripsi dan klasifikasi lipatan (dimodifikasi dari Powel, 1992, hal. 67).

4.2. Klasifikasi Lipatan

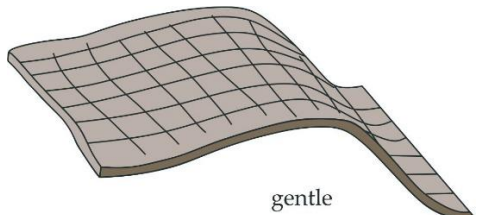
Perkembangan lipatan tidak selalu menghasilkan bentuk, ukuran, atau geometri yang sama, namun demikian struktur yang terlihat saat ini merupakan *strain* akhir yang dicapai batuan sebelum tersingkap ke permukaan. Pada awal deformasi, lipatan yang terbentuk pada umumnya memiliki geometri terbuka dan simetri. Seiring dengan progress deformasi, struktur mengalami evolusi semakin menyempit (*tighten*) dan cenderung menjadi asimetri yang dicirikan oleh perubahan panjang sayap, yaitu satu sayap lebih pendek dari pada sayap yang lain. Oleh karena itu, klasifikasi deformasi *ductile* menggunakan beberapa kriteria, antara lain:

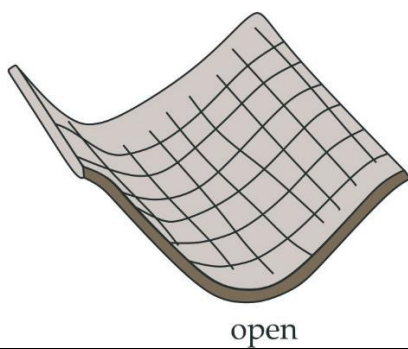
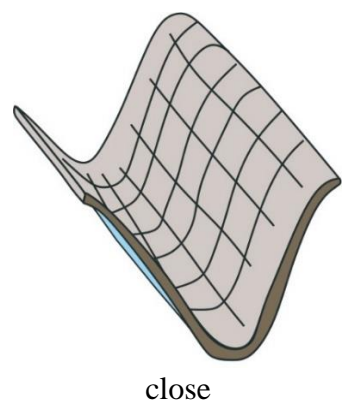
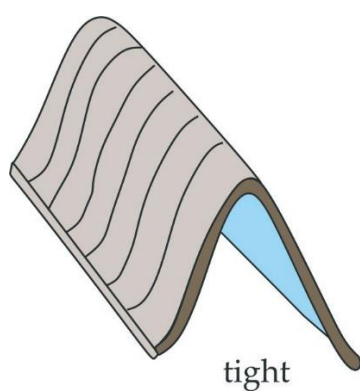
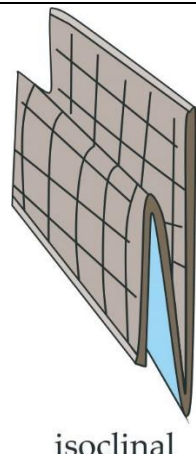
1. Sudut antar sayap.
2. Sudut bidang sumbu.
3. Penunjaman bidang sumbu.
4. Simetri dan asimetri.
5. Orientasi permukaan sumbu dan garis lengkung.

4.2.1. Sudut Antar Sayap

Klasifikasi struktur di sini mendasarkan pada derajat keterbukaan (*openness*) atau keketatan (*tightness*) yang diukur dari sudut antar sayap lipatan. Tabel 4.1 memperlihatkan klasifikasi berdasarkan atas sudut antar sayap lipatan mulai dari landai hingga isoklinal.

Tabel 4.1. Klasifikasi lipatan berdasarkan parameter sudut antar sayap (Fleuty, 1964).

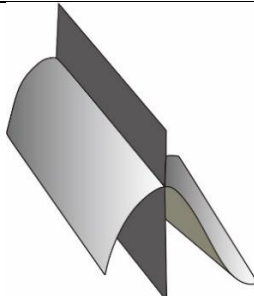
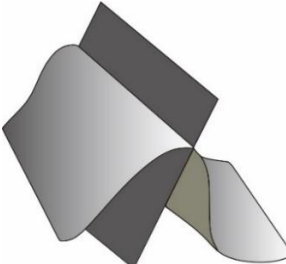
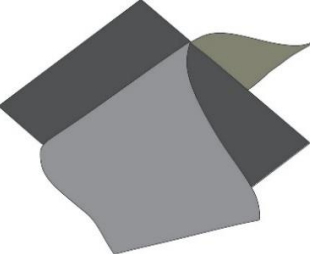
Sudut antar sayap (°)	Klasifikasi Lipatan	Ilustrasi skematik
180-120	Landai (<i>gentle</i>)	

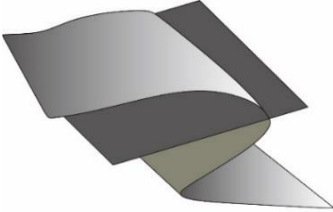
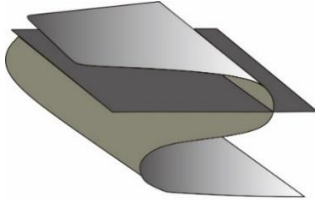
Sudut antar sayap (°)	Klasifikasi Lipatan	Ilustrasi skematik
120-70	Terbuka (<i>open</i>)	
70-30	Tertutup (<i>close</i>)	
30-0	Sempit (<i>tight</i>)	
0	Isoklin (<i>isoclinal</i>)	

4.2.2. Sudut Bidang Sumbu

Lipatan diklasifikasikan juga berdasarkan pada besaran sudut bidang sumbu terhadap bidang horizontal. Tabel 4.2 memberikan tipe-tipe lipatan yang dikelompokkan berdasarkan pada posisi bidang sumbu mulai dari vertikal hingga horizontal.

Tabel 4.2. Klasifikasi lipatan berdasarkan parameter sudut kemiringan bidang sumbu (Fleuty, 1964).

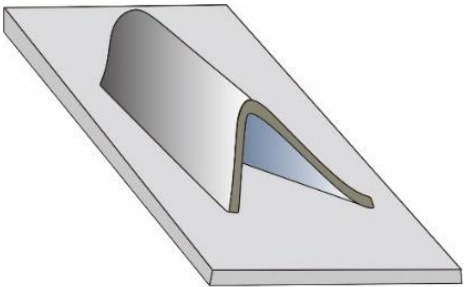
Sudut kemiringan bidang sumbu (°)	Klasifikasi Lipatan	Ilustrasi skematik
90-80	Tegak (<i>upright</i>)	 <i>upright</i>
80-60	Miring curam (<i>steeply inclined</i>)	 <i>steeply inclined</i>
60-30	Miring moderat (<i>moderately inclined</i>)	 <i>moderately inclined</i>

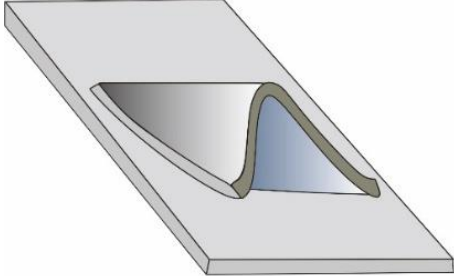
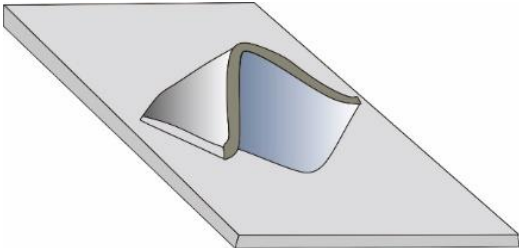
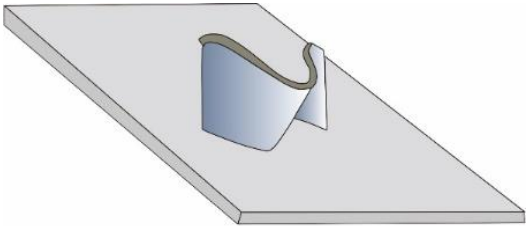
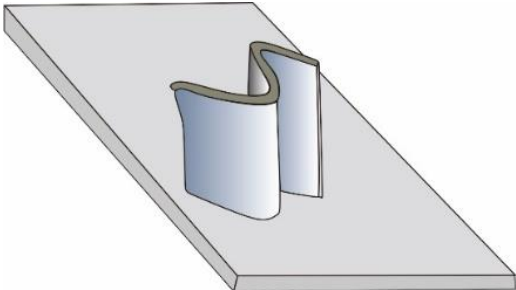
Sudut kemiringan bidang sumbu (°)	Klasifikasi Lipatan	Ilustrasi skematik
30-10	Miring landai (<i>gently inclined</i>) atau Menggantung (<i>overturned</i>)	 <i>gently inclined</i>
10-0	Rebah (<i>recumbent</i>)	 <i>recumbent</i>

4.2.3. Penunjaman Bidang Sumbu

Parameter lain yang digunakan untuk klasifikasi lipatan yaitu sudut penunjaman bidang sumbu. Tabel 4.3 memberikan lima jenis lipatan berdasarkan atas besaran penunjaman bidang sumbu mulai dari horizontal hingga vertikal.

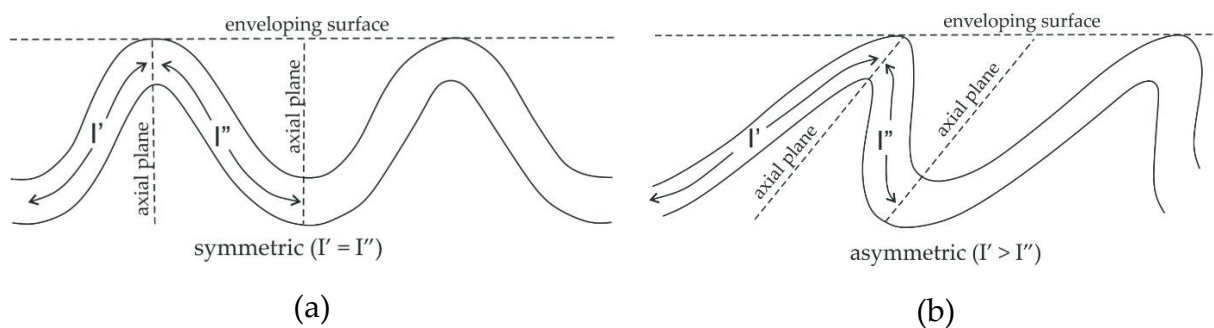
Tabel 4.3. Klasifikasi lipatan berdasarkan parameter sudut penunjaman bidang sumbu (Fleuty, 1964).

Sudut penunjaman bidang sumbu (°)	Klasifikasi Lipatan	Ilustrasi skematik
0	Horizontal atau tidak menunjam	 <i>horizontal</i>

Sudut penunjaman bidang sumbu (°)	Klasifikasi Lipatan	Ilustrasi skematik
0-10	Menunjam landai (<i>gently plunging</i>)	 <p data-bbox="1024 632 1227 661"><i>gently plunging</i></p>
30-60	Menunjam moderat (<i>moderately plunging</i>)	 <p data-bbox="992 1010 1260 1039"><i>moderately plunging</i></p>
60-80	Menunjam curam (<i>steeply plunging</i>)	 <p data-bbox="1016 1346 1235 1375"><i>steeply plunging</i></p>
90	Vertikal (<i>vertical</i>)	 <p data-bbox="1073 1745 1179 1774"><i>vertical</i></p>

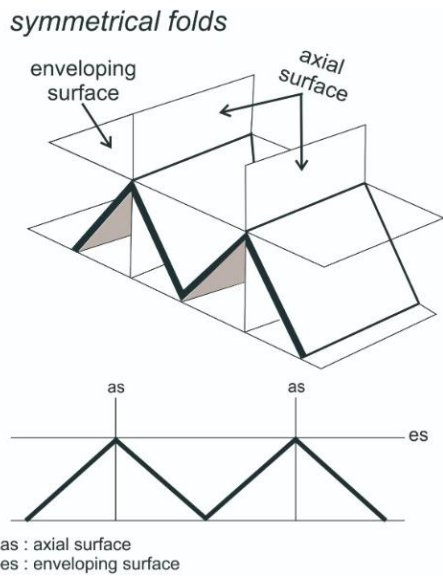
4.2.4. Simetri dan Asimetri

Lipatan dapat juga diklasifikasikan menjadi simetri dan asimetri berdasarkan pada parameter panjang sayap dan hubungan bidang sumbu dengan bidang planar pada *hinges* yang dinamakan *enveloping surface*. Jika lipatan memiliki sayap sama panjang dan bidang sumbu tegak lurus terhadap *enveloping surface*, maka struktur diklasifikasikan sebagai simetri, sedangkan bentuk asimetri dicirikan dengan sayap tidak sama panjang dan bidang sumbu menyerong terhadap *enveloping surface* (Gambar 4.3).

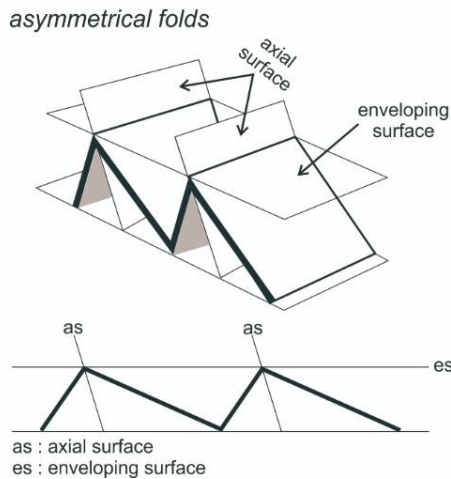


Gambar 4.4. Profil lipatan simetri dicirikan sayap sama panjang dan bidang sumbu tegak lurus *enveloping surface* (a), sedangkan lipatan asimetri ditandai dengan sayap tidak sama panjang dan bidang sumbu menyerong terhadap *enveloping surface* (b) (dimodifikasi dari Powel, hal. 66).

Selain klasifikasi seperti dijelaskan di atas, lipatan dideskripsikan berdasarkan pada bentuk lengkungan (*hinge*), yaitu berbentuk menyudut/meruncing (*angular*) dan membundar (*rounded*). Lipatan dengan sayap planar dan profil lengkungan sangat runcing dikenal sebagai *kink*. Struktur *kink* yang memiliki sayap sama panjang disebut simetri atau *chevron*, sedangkan lipatan *kink* yang memiliki sayap tidak sama panjang disebut asimetri atau *kink band* (Gambar 4.4). Kedua jenis lipatan *kink* ini dibedakan juga atas dasar hubungan antara *axial surface* dan *enveloping surface* (Hobbs dkk., 1976, hal. 172). Para peneliti ini menyatakan bahwa *chevron* memiliki *axial surface* tegak lurus *enveloping surface*, sedangkan *kink band* mempunyai *axial surface* menyerong terhadap *enveloping surface*.



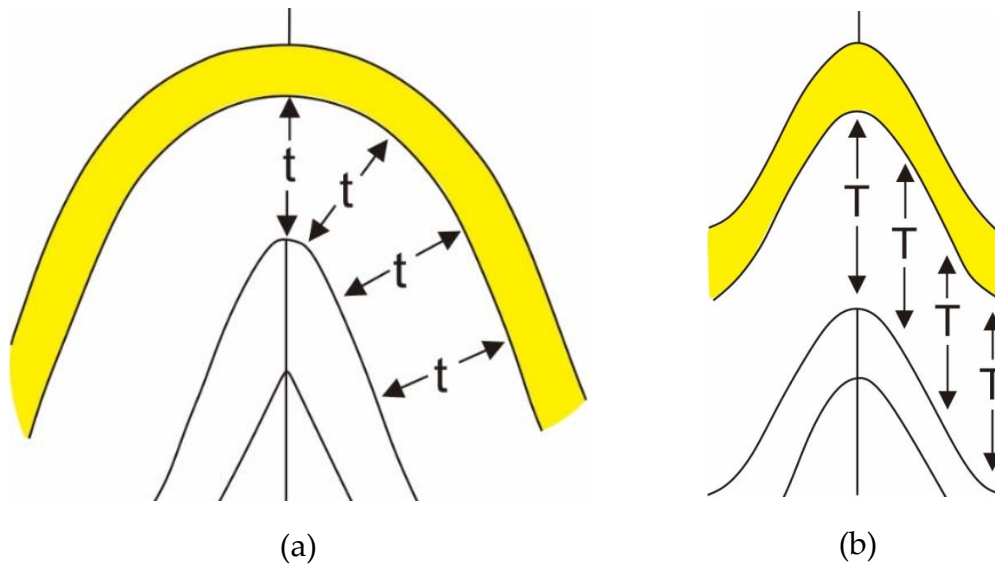
(a)



(b)

Gambar 4.5. Profil lipatan simetri dan asimetri dengan *hinge* meruncing. *Chevron* dicirikan dengan *axial surface* tegak lurus *enveloping surface* (a), dan *kink band* ditandai dengan *axial surface* menyerong terhadap *enveloping surface* (b); dimodifikasi dari Lisle (2004, hal. 33).

Deskripsi yang berdasarkan pada variasi ketebalan perlapisan terdeformasi telah membedakan jenis struktur lipatan menjadi paralel dan similar. Pengelompokan itu dilandasi oleh konsep yang beranggapan bahwa beberapa lapisan batuan mengalami distorsi atau *strain* selama episode perlipatan, sehingga ketebalan antar perlapisan dalam struktur menjadi berbeda. Gambar 4.5 memberikan ilustrasi skematik kedua jenis lipatan itu.



Gambar 4.6. Lipatan paralel dicirikan oleh ketebalan lapisan (t : *true thickness*) konstan di sepanjang struktur, dan bentuk *hinge* berubah di kedalaman (a), sedangkan lipatan similar ketebalan lapisan " t " di bagian sayap lebih tipis daripada di area *hinge*, tetapi ketebalan vertikal (T : *apparent thickness*) konstan di sepanjang struktur, dan bentuk *hinge* konstan hingga di kedalaman (b); dimodifikasi dari Lisle (2004, hal 35).

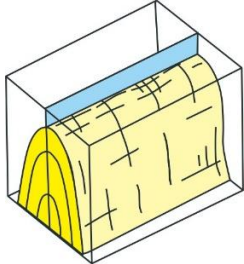
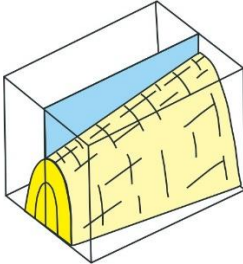
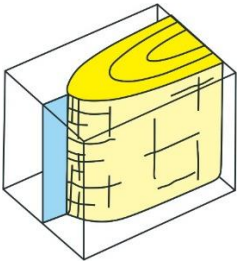
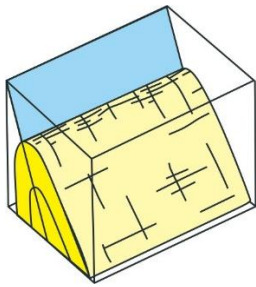
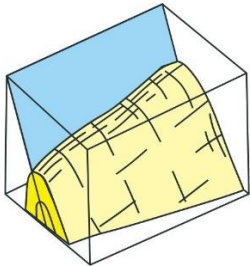
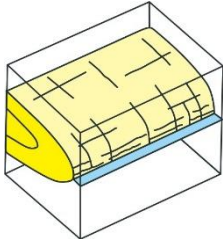
Remark

✚ There appears a wide range of fold classification in the published work, however the students herein are encouraged to implement the fundamental concepts in order to classify the folding structure.

4.2.5. Orientasi Permukaan Sumbu dan Garis Lengkung

Klasifikasi lain yang sering digunakan untuk menamakan struktur lipatan diajukan juga oleh Turner dan Weiss (1963). Parameter yang digunakan untuk membedakan jenis lipatan yaitu orientasi bidang sumbu atau *axial surface* dan garis lengkung atau *hinge line*. Tabel 4.4 memperlihatkan pembagian struktur lipatan berdasarkan kedua parameter tersebut menjadi tujuh kelas (cetak tebal atau **bold**). Ilustrasi diagramatik yang diperlihatkan pada tabel tersebut dimodifikasi dari Hobbs dkk. (1976, hal. 180 dan 181).

Tabel 4.4. Penamaan lipatan berdasarkan orientasi bidang sumbu dan garis lengkung.

		Orientasi Garis Lengkung		
		Horizontal	Menunjam	Vertikal
Orientasi Bidang Sumbu	Vertikal	horizontal normal 	menunjam normal 	vertikal 
	Miring	horizontal miring 	menunjam rebah (<i>reclined</i>) (strike bidang sumbu tegak lurus dengan sumbu lipatan) 	
		Horizontal	recumbent 	

Bab 5

INTERAKSI SESAR NAIK DAN LIPATAN

5.1. Korelasi Pensesaran dan Perlipatan

Jalur pegunungan yang berada di lingkungan tektonik konvergen telah dikenali dengan baik bahwa struktur lipatan berkembang di atas detasemen alas atau *décollment* (Rich, 1934; Gwinn, 1964; Faill, 1973; Suppe, 1983; Suppe dan Medwedeff, 1984; Jamison, 1987; Chester dan Chester, 1990). Pembentukan struktur lipatan yang berasosiasi dengan sesar naik (*thrust-associated fold*) berawal ketika litosfer bagian atas mengalami gaya kompresi. Episode kompresi akan membentuk detasemen pada kedalaman di sepanjang batuan yang mudah bergeser (*easy-slip rock unit*). Sesar naik yang terbentuk kemudian berkembang menuju *foreland* hingga jarak tertentu, dan progres pensesaran tergantung dari gradien gaya tegasan tektonik.

Oleh karena pensesaran berlanjut, sikuen sedimen di *hangingwall* mengalami pergesehan searah dengan pergerakan tektonik. Sesar ini tidak bermigrasi secara terus menerus, melainkan akan berhenti di titik tertentu (*dies to zero*), atau bergerak ke level stratigrafi atas membentuk sesar miring (*ramp*) dan memotong rumpunan batuan yang lebih muda. Dalam kedua kasus tersebut, sikuen *hangingwall* akan merespon pensesaran dengan cara melipat, sehingga mengalami pemendekan. Rumpunan batuan yang terlipat dapat membentuk lipatan konsentris pada batuan kompeten (Carey, 1962).

Dahlstrom (1990) menambahkan bahwa lipatan konsentris dapat terbentuk apabila di bagian inti lipatan terdapat unit batuan plastis. Ramsay (1974) menyampaikan bahwa sikuen *hangingwall* bisa juga membentuk lipatan *chevron* jika tersusun oleh berbagai lapisan dengan beragam level kompetensi batuan. Berdasarkan "*gravity-gliding*

theory" yang menggunakan hasil eksperimen dengan multi-lapisan gelatin menyatakan bahwa deformasi pada episode awal membentuk lipatan simetri, kemudian pada periode lebih akhir berkembang menjadi lipatan asimetri (Blay dkk., 1977).

Remark

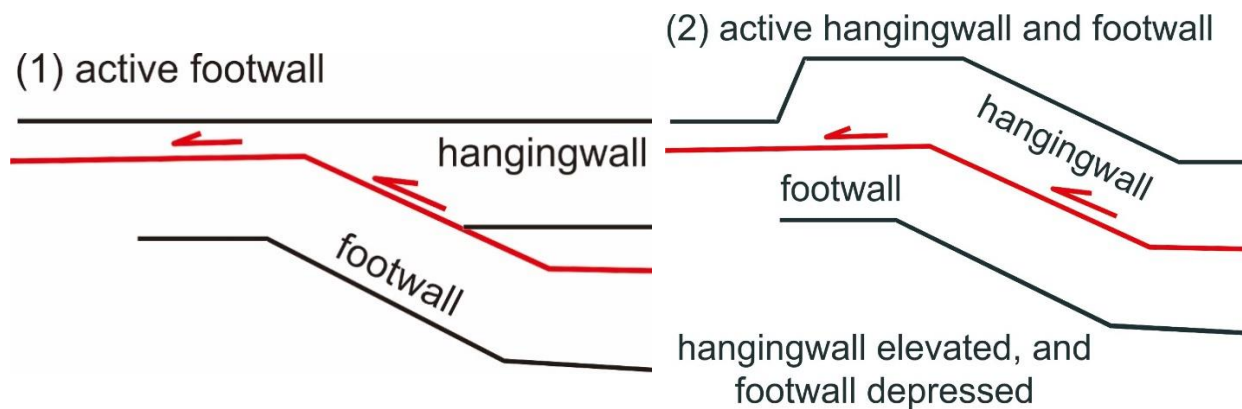
✚ As an upper rock sequence is subjected to compression, a detachment at depth along an easy slip rock unit is then generated. In this case, the cover rock unit is displaced in the direction of tectonic transport, and the basal fault either dies out or cuts upwards to a shallower stratigraphic level to form a ramping fault. The hanging wall block is responding to the fault movement by folding, consequently shortening.

Hasil-hasil studi baik dari eksperimen maupun di sejumlah terain kompresional terhadap struktur lipatan yang terkait dengan pensesaran naik melaporkan bahwa migrasi *kink band* telah menghasilkan geometri lipatan kubus atau *box-shaped folds* (Faill, 1973; Suppe, 1983, 1985; Suppe dan Medwedeff, 1984, 1990; Cosgrove, 2015; Lathrop dan Burberry, 2016). Mekanisme *kink band* menjelaskan bahwa sesar naik alas terbentuk terlebih dahulu, sedangkan rumpunan batuan yang terlipat dianggap sebagai hasil pembengkokan pasif (*non-active bending*), atau sebagai konsekuensi langsung dari pergerakan sesar. Sejauh ini ada tiga tipe mekanisme yang menjelaskan perlipatan akibat pensesaran, yaitu:

1. *Fault-bend folds* (Suppe, 1983, 1985; Cosgrove, 2015).
2. *Fault-propagation folds* (Cahpman dan Williams, 1984; Suppe dan Medwedeff, 1984; Mitra, 1986, 1990; Cosgrove, 2015).
3. *Detachment folds* (Jamison, 1987; Cosgrove, 2015).

Model geometri klasik untuk konfigurasi struktur tersebut, khususnya *fault-bend* dan *-propagation folds* pada umumnya mengilustrasikan hanya blok *hangingwall* yang terdeformasi (Suppe, 1983; Jamison, 1987). Selain itu, Jamison (1992) menganggap bahwa ketiga konfigurasi itu merupakan geometri akhir dari interaksi sesar naik dan lipatan sebelum struktur tersingkap ke permukaan. Namun demikian, beberapa contoh

singkapan di lapangan membuktikan adanya blok *footwall* yang aktif dalam episode deformasi (Ramsay, 1992). Oleh sebab itu, pensesaran yang mengakibatkan perlipatan tidak hanya terjadi di rumpunan batuan *hangingwall*, tetapi juga dalam beberapa kasus di sikuen *footwall* (Gambar 5.1). Ramsay (1992) menjelaskan bahwa blok *footwall* bisa terdeformasi jika efek gravitasi terhadap sikuen ini minimal, dan pergeseran unit *footwall* tidak terhalang oleh blok batuan dasar yang rigid atau basemen kristalin. Ramsay (1992) memberikan contoh pensesaran naik dengan *footwall* aktif tetapi *hangingwall* pasif pada singkapan batugamping dan marmer di Holderbank, Switzerland, dan sesar *ramp* dengan *footwall* dan *hangingwall* keduanya aktif pada singkapan dolomit di Kimmeridge Bay, Dorset.



Gambar 5.1. Ilustrasi *fault-related fold* dengan model (1) blok *footwall* terdeformasi tetapi *hangingwall* pasif, dan model (2) blok *hangingwall* dan *footwall* keduanya aktif dalam episode deformasi (dimodifikasi dari Ramsay, 1992).

Mekanisme lain yang dipandang penting dalam menginterpretasikan pembentukan lipatan oleh pensesaran naik yaitu reaktivitas struktur eksisting pada basemen atau sikuen yang lebih tua. Dalam hal ini, basemen telah terdeformasi oleh sesar-sesar normal yang merepresentasikan zona-zona lemah sebelum terkena regim kompresional. Episode tektonik baru dengan gaya tegasan kompresi mengaktifkan struktur tersebut menjadi sesar-sesar naik atau *reverse faults* yang mengangkat dan mengakibatkan sikuen di atas menjadi terlipat. Penjelasan ini menegaskan bahwa *reverse*

fault merupakan sesar naik dengan bidang sesar lebih curam ($>45^\circ$), yaitu bidang sesar normal sebelum diaktifkan oleh tegasan kompresif. Sejumlah contoh untuk mekanisme ini telah disampaikan oleh beberapa peneliti berdasarkan hasil studi di Gippsland basin tenggara Australia (Davis, 1984; Etheridge dkk., 1985), pegunungan Pyrenees di Alpine (Munoz, 1992), Tyrrhenian basin (Spadini dan Podladchikov (1996), dan pegunungan lipatan Papua bagian timur New Guinea (Hill, 1991; Buchanan dan Warburton, 1996; Hill dkk., 2004). Sutriyono (1999, 2001) telah mengimplementasikan konsep ini untuk mengevaluasi mekanisme pembentukan struktur pegunungan lipatan Lengguru di Papua Barat.

Remark

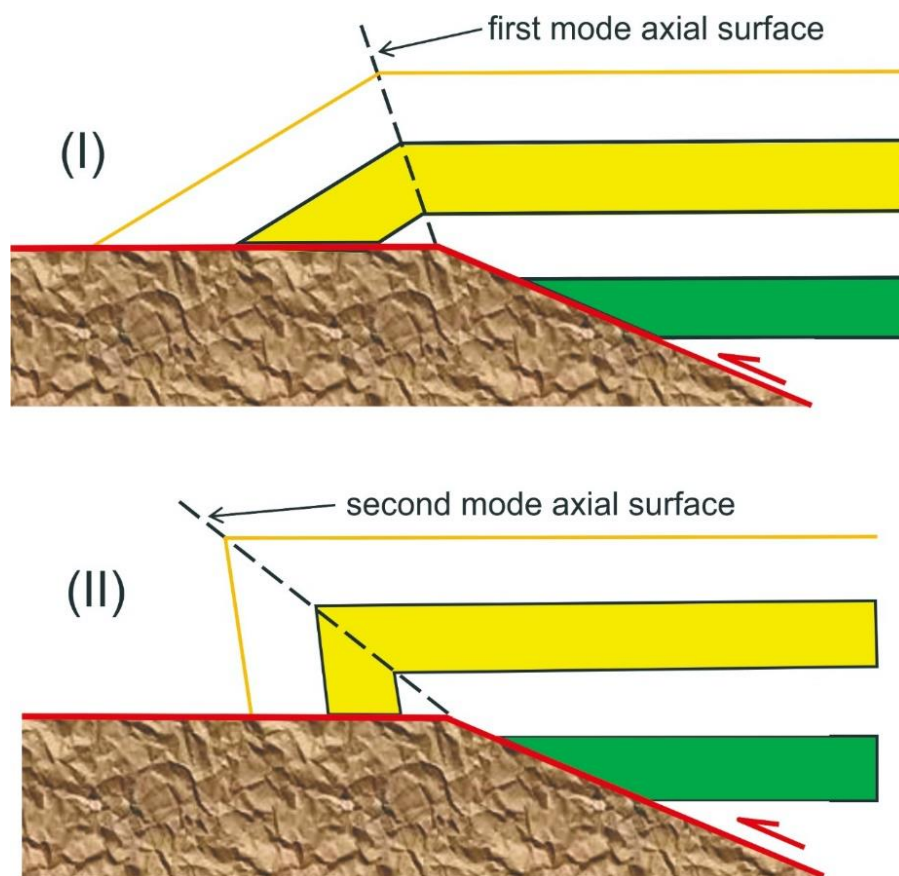
✚ *Fault-associated folds might have resulted from either hangingwall active but footwall passive during deformation, or footwall active but hangingwall passive along the period of deformation, or both hangingwall and footwall are getting involved in deformation.*

5.1.1. *Fault-Bend Fold*

Struktur ini pertamakali diperkenalkan oleh Rich (1934) berdasarkan hasil studinya di antiklin Powel Valley, Virginia, Amerika. Peneliti ini menginterpretasikan struktur lipatan dari blok Cumberland terbentuk oleh pergerakan sesar naik Pine Mountain. Sesar naik regional bergerak dengan jarak signifikan sepanjang unit serpih Chattanooga Devon, kemudian menuju lapisan inkompeten yang lebih atas, selanjutnya membengkokkan parallel bidang perlapisan sebelum naik kembali ke level stratigrafi lebih tinggi dan membentuk geometri undak tangga (*staircase geometry*). Lipatan pada pegunungan Cumberland terbentuk karena blok *hangingwall* bergerak di atas *ramp* yang melandasinya. Contoh klasik ini mengilustrasikan perlipatan yang berasosiasi dengan perlintasan undak tangga (*staircase trajectory*) (Suppe, 1983; Jamison, 1987).

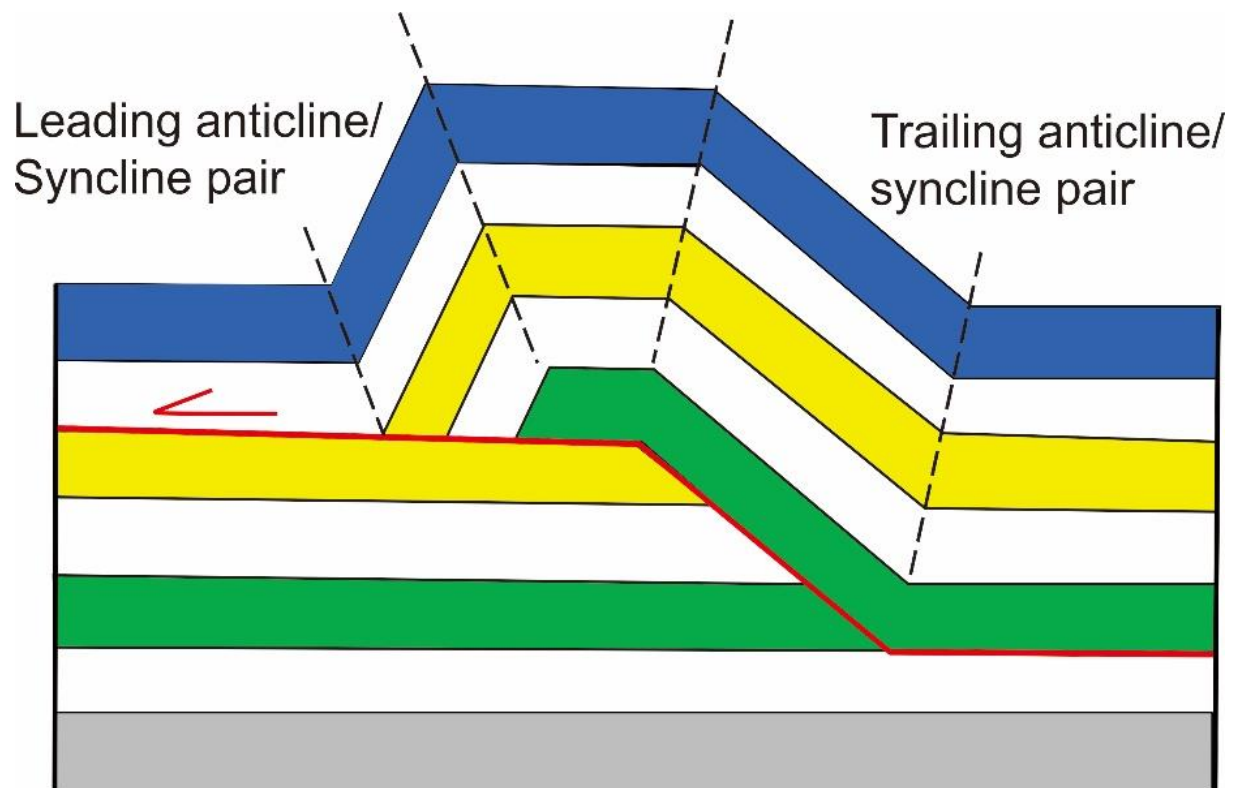
Lipatan jenis *fault-bend* ini dicirikan oleh sayap depan yang mengarah ke *foreland*. Suppe (1983, 1985) mengklasifikasikan struktur tersebut menjadi dua tipe, yaitu Mode-I

dengan sudut antar sayap lebih landai (*lower interlimb angle*), dan Mode-II dengan sudut lebih curam (*steeply-dipping interlimb*). Gambar 5.2 memperlihatkan kedua tipe lipatan dengan geometri yang serupa. Selain itu, Suppe (1983) mengajukan model kinematik yang sederhana untuk pasangan antiklin-sinklin belakang yang mengarah ke *hinterland*, dan antiklin-sinklin depan yang menuju *foreland* (Gambar 5.3). Peneliti ini mengestimasi juga rasio pergeseran sesar yang dikompensasikan untuk perlipatan pada *thrust sheet*. Estimasi yang dilakukan pada prinsipnya berdasarkan pada rasio antara nilai pergeseran sesar sebelum dan sesudah pembengkokan sesar. Jika sudut awal antara sesar dan perlapisan sebelum bergeser melewati bengkakan sebesar nol derajat, pergerakan sesar tetap berada di sepanjang *fault bend*.



Gambar 5.2. Ilustrasi skematik fault-bend fold mode-I dengan sudut antar sayap lebih landai, dan mode-II dengan sudut yang lebih besar (dimodifikasi dari Suppe, 1983).

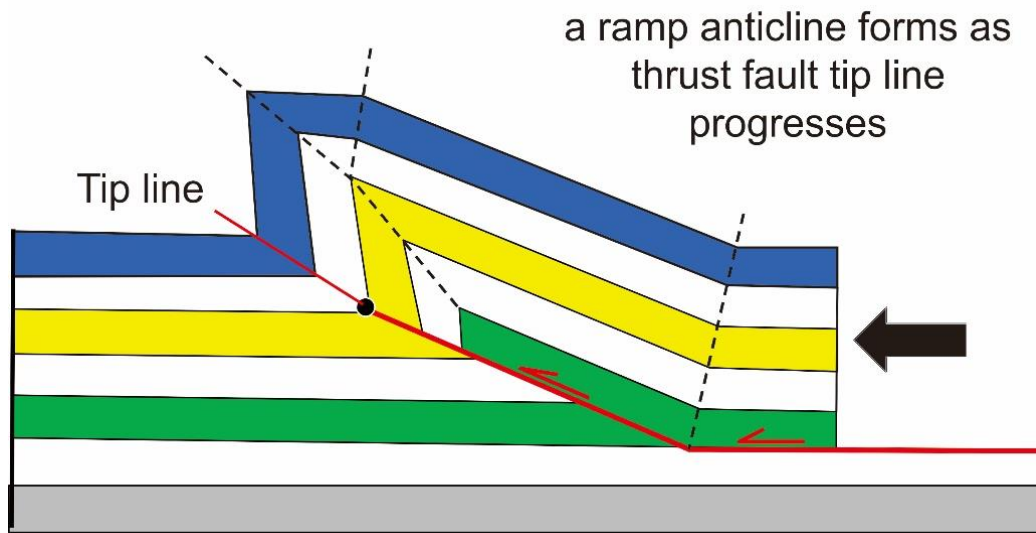
Geometri dari *fault-bend folds* dapat dicirikan pula oleh sudut *ramp* bawah dan atas, serta sejauhmana *hangingwall* mengalami penebalan (*thickening*) atau penipisan (*thinning*) pada *forelimb*. Boyer dan Elliott (1982) menyatakan bahwa sudut *ramp* dari beberapa struktur berkisar antara 10° - 40° . Perubahan sudut sesar naik akan merubah geometri lipatan. Selain itu, model geometrik beranggapan bahwa ketebalan lapisan batuan tetap konstan selama perlipatan, dan blok *hangingwall* bergerak paralel terhadap bidang perlapisan, sehingga volume dan panjang unit batuan tidak mengalami perubahan selama deformasi (Suppe, 1983, 1985; Jamison, 1987). Selain simpel, asumsi fundamental ini sangat berguna untuk analisis geometri konfigurasi struktur semacam itu di banyak pegunungan lipatan.



Gambar 5.3. Model kinematik *fault-bend fold* dengan pasangan antiklin-sinklin di *foreland* dan *hinterland* (dimodifikasi dari Suppe, 1983; McClay, 1992).

5.1.2. *Fault-Propagation Fold*

Suppe dan Medwedeff (1984) telah meneliti sejumlah pegunungan kompresional dan mengenali antiklin asimetri terbentuk di atas sesar naik yang masih berada di bawah permukaan atau belum tersingkap (*blind-tip line*), dan sinklin pada bagian depan sesar naik (McClay, 1992). Konfigurasi struktur seperti ini dikenal sebagai *fault-propagation fold* (Gambar 5.4). Model klasik dari geometri ini menjelaskan bahwa sesar naik berkembang di kedalaman pada awalnya paralel dengan bidang perlapisan inkompeten, kemudian berlanjut membentuk sesar *ramp*, dan pertumbuhan lipatan propagasi bersamaan dengan *progress tip line* atau ujung depan bidang sesar (William dan Chapman, 1983). Oleh karena itu, konsep ini menganggap bahwa bentuk akhir struktur merupakan fungsi dari dua variable yang berbeda, yaitu sudut *ramp* dan tegangan geser (*shear*) pada inti lipatan.



Gambar 5.4. Geometri *fault-propagation fold*, dimana lipatan berkembang seiring dengan progres ujung depan sesar naik (dimodifikasi dari McClay, 1992).

Pengaruh sudut *ramp* dan pergeseran pada inti lipatan terhadap geometri akhir telah pula diperkuat oleh (1) teori ketebalan konstan, yaitu panjang dan ketebalan lapisan tidak mengalami perubahan selama perlipatan, dan (2) konsep permukaan aksial tetap

(*fixed-axial surface*), yaitu volume batuan tidak berubah pada saat deformasi (Suppe dan Medwedeff, 1990; Mosar dan Suppe, 1992). Berdasarkan model ketebalan konstan, sesar *ramp* landai, dan pola pergeseran tinggi akan menghasilkan lipatan berbalik (*overturned fold*), sedangkan *ramp* yang lebih curam dengan sedikit pergeseran akan membentuk lipatan tegak (*upright fold*). Model permukaan aksial tetap menyatakan bahwa sesar naik landai dengan pergeseran tinggi membentuk lipatan dengan sayap menebal ke depan (*thickened forelimb*), sebaliknya sesar naik dengan sudut *ramp* lebih curam dan sedikit pergeseran menghasilkan lipatan dengan sayap menipis ke depan (*thinned forelimb*) (Mosar dan Suppe, 1992).

Model lain yang menerangkan mekanisme pembentukan lipatan pada lintasan *flat-ramp* telah diajukan oleh Eisenstadt dan De Paor (1987). Konsep mereka menyatakan bahwa sistem *ramp* bisa saja terbentuk terlebih dahulu pada lapisan kompeten di level stratigrafi tertentu, kemudian sesar berkembang ke strata yang lebih atas atau bisa juga menuju ke bawah. Sedangkan *flat* kemungkinan berkembang melalui pensesaran batuan inkompeten. Keterkaitan antara pergerakan *flat* dan *ramp* menghasilkan lintasan *flat-ramp*. Berbeda dengan model klasik dari Rich (1934), pergerakan sesar naik pada konsep alternatif ini terjadi setelah pembentukan *flat-ramp*, dan bentuk akhir lipatan sepanjang sesar diinterpretasikan sebagai representasi keseluruhan geometri dari *multiple fault-propagation folds*. Selanjutnya, para peneliti ini memberikan argumentasi bahwa geometri akhir lipatan pada konsep klasik pastilah tidak merepresentasikan perlipatan dari propagasi pensesaran, melainkan lipatan detasemen yang telah tergeser oleh *ramp*.

Analisis geometri untuk jenis *fault-propagation fold* di beberapa publikasi pada umumnya beranggapan bahwa evolusi kinetik dari pertumbuhan lipatan tidak terkait dengan perlintasan sesar undak tangga (Suppe, 1983; Jamison, 1987). Namun demikian, Mercier dkk. (1997) menyatakan lipatan pada sistem ini bisa juga memiliki geometri *staircase* yang terbentuk pada tahap akhir deformasi tektonik. Pembentukan lintasan dari *flat-ramp* di bawah berubah menjadi *flat* di atas pada *fault-propagation fold* dapat

diakibatkan oleh transport slip ujung *ramp* menjadi geometri mendatar pada bagian depan struktur.

Hasil studi lapangan di beberapa area dengan tatanan geologi berbeda memperlihatkan sejumlah struktur *fault-propagation folds* dengan banyak kemiripan geometri (Alonso dan Teixell, 1992). Lipatan pada umumnya asimetri, sayap depan melengkung, sayap belakang lurus dengan ketebalan konstan, dan lapisan batuan cenderung menipis ke arah sesar. Sebagaimana pada *fault-bend fold*, lapisan bawah *hangingwall* antiklin dari *fault-propagation fold* biasanya terpotong oleh sesar naik, sehingga struktur ini disebut juga sebagai antiform terpotong (*truncation antiform*).

Analisis geometri *fault-propagation fold* di zona kompresi pada umumnya menggunakan asumsi:

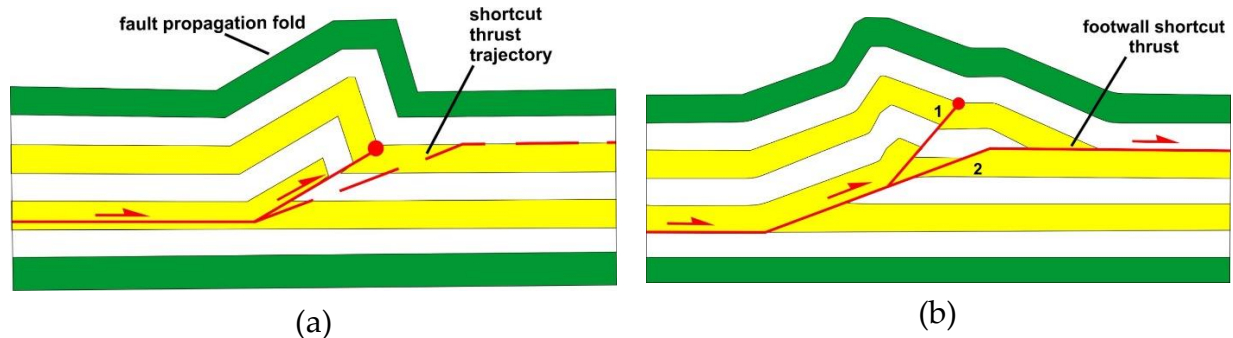
1. Area atau volume konstan (*conserved area*).
2. Panjang perlapisan konstan (*preserved line length of beds*) selama perlipatan, kecuali di bagian depan lipatan.
3. Perlipatan berlangsung di sepanjang bidang permukaan sesar naik, dan terdeformasi relatif paralel dengan bidang perlapisan selama kompresi.

Chester dan Chester (1990) menyampaikan geometri *fault-propagation fold* yang berkembang di atas sesar naik dengan kemiringan konstan. Model yang mereka tampilkan memperlihatkan sejumlah bengkakan menyudut (*kink-bands*) yang secara progresif semakin meluas seiring dengan bertambahnya pergeseran sesar. Model ini telah digunakan dalam Geosec™ untuk merekonstruksi *fault-propagation fold* dalam berbagai konfigurasi, termasuk:

1. Undak tangga *ramp* tunggal maupun berjenjang.
2. Geometri lipatan dengan sayap menipis ataupun menebal.
3. Geometri lipatan dengan sayap belakang tidak paralel dengan sesar *ramp*.

Varian lain dari struktur ini yaitu *footwall shortcut thrusts*, dimana pensesaran dengan sudut landai berkembang dari sesar naik yang lebih curam ke area *footwall*.

Konsep ini menyatakan bahwa perpotongan sesar dengan sudut landai secara kinematik dan mekanik dapat menghasilkan displasemen lebih besar dari pada perpotongan sesar dengan sudut curam (Knipe, 1985; McClay dan Buchanan, 1991). Gambar 5.5 memberikan ilustrasi skematik perkembangan lipatan propagasi dari trajektori sesar naik di area *footwall*.

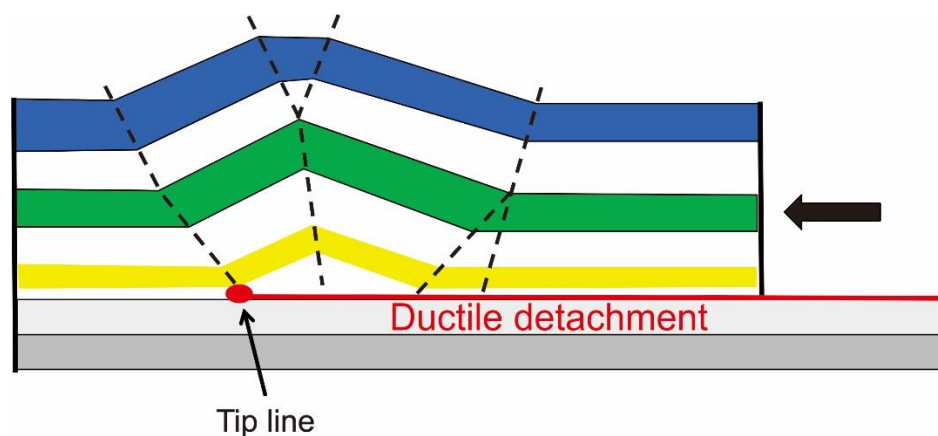


Gambar 5.5. Perkembangan struktur akibat perlintasan sesar naik pada area *footwall*. *Incipient fault* membentuk trajektori sesar naik landai di blok *footwall* (a), dan konfigurasi final setelah displasemen sesar naik landai di *footwall* (b) (dimodifikasi dari McClay, 1992).

5.1.3. Lipatan Detasemen

Model geometri konvensional untuk lipatan detasemen biasanya mengilustrasikan struktur berkembang di atas ujung terdepan sesar naik yang berada di bawah permukaan dan bergeser paralel dengan perlapisan batuan (Jamison, 1987). Namun demikian, struktur tipe ini dapat terbentuk di atas, bawah, atau atas dan bawah *blind thrust fault* (Poblet dan McClay, 1996). Berbeda dengan mekanisme perlipatan untuk *fault-bend fold* dan *fault-propagation fold*, amplifikasi struktur lipatan pada model ini tidak diakomodasikan oleh sistem *ramp*. Mekanisme perlipatan diawali dengan detasemen yang melandasi rumpunan batuan bergerak dan terhenti ke arah *foreland*. Di banyak pegunungan lipatan, struktur ini terlihat berasosiasi dengan perlapisan plastis (*ductile layers*) seperti serpih, lempung, dan garam yang mengalir, kemudian mengisi inti lipatan bertumbuh pada saat memendek.

Unit batuan lunak dapat menentukan konfigurasi akhir lipatan yang dibentuk oleh lapisan penutup kompeten. Apabila unit kompeten sangat tipis, lipatan akan terhenti tumbuh karena tidak cukup material untuk mengisi bagian inti antiform (Stewart, 1996). Terhentinya perlipatan detasemen bisa juga disebabkan karena perlapisan tidak lagi memendek dan/atau lipatan menjadi isoklinal (Poblet dan McClay, 1996). Namun demikian, Dahlstrom (1990) mengajukan model alternatif yang menerangkan bahwa amplifikasi lipatan konsentris bisa saja tidak memerlukan unit plastis. Asumsi yang digunakan oleh peneliti ini yaitu pertumbuhan lipatan seiring dengan perpanjangan gradual sayap dan peningkatan kemiringan sayap, serta area terangkat proporsional dengan besarnya pemendekan. Gambar 5.6 memperlihatkan geometri lipatan bertumbuh di atas sesar detasemen.



Gambar 5.6. Geometri klasik lipatan detasemen (dimodifikasi dari Jamison, 1987; McClay, 1992).

Homza dan Wallace (1995) mengkonstruksi dua model geometri untuk lipatan detasemen berdasarkan kedalaman sesar, yaitu konstan dan berbeda-beda. Model dengan kedalaman detasemen konstan (model 1) menyatakan bahwa selama episode deformasi kompresional unit batuan kompeten bisa mengalami pemendekan paralel dengan bidang perlapisan atau dikenal sebagai mekanisme pergeseran lentur (*flexural slip mechanism*), sementara itu perlapisan inkompeten dan plastis yang mendasari

mengalami deformasi internal dan menebal dengan cara mengisi bagian inti antiklin detasemen yang berkembang. Oleh karena itu, model geometri ini menggunakan asumsi bahwa unit batuan kompeten mempertahankan keseluruhan panjang perlapisan, sedangkan satuan batuan inkompeten menjaga luasan area selama pemendekan tektonik. Dalam rangka melakukan restorasi geometri struktur tipe ini perlu mengkombinasikan metode panjang konstan untuk batuan kompeten, dan konstan area untuk lapisan kurang kompeten. Program Geosec™ memiliki fasilitas untuk melakukan restorasi dengan menggunakan kedua metode tersebut.

Asumsi yang mendasari model dengan kedalaman berbeda (model 2) yaitu unit kurang kompeten di bawah lipatan selalu mengalir ke arah inti antiform selama episode perlipatan. Sebagai konsekuensinya, pengurangan ataupun penambahan material inkompeten tidak terjadi, dan geometri lipatan tentunya tergantung dari keseluruhan area detasemen. Oleh karena itu, analisis geometri untuk lipatan detasemen dengan kedalaman berbeda tergantung dari konservasi panjang perlapisan dan area. Panjang perlapisan terkonservasi direpresentasikan oleh batas antara lapisan kompeten dan inkompeten, sedangkan area terkonservasi ditunjukkan oleh jumlah diferensiasi dan terangkatnya area di atas regional. Jika dibandingkan dengan model kedalaman konstan, tipe struktur ini memberikan spektrum lebih luas untuk analisis geometri dan kinematik (Homza dan Wallace, 1995).

Remark

✚ *The fundamental concept of regional refers to an elevation of a particular stratigraphic level or datum surface that is not involved in the fault-associated structures (McClay, 1992).*

Studi geometri dan kinematik oleh Poblet dan McClay (1996) memberikan empat model yang menjelaskan *strain* konsentris sederhana dari lipatan detasemen. Model ini memperlihatkan bagaimana evolusi kinematik setiap lipatan detasemen bervariasi, dan kinematika tergantung dari evolusi kemiringan dan panjang sayap selama amplitudo

lipatan, meskipun struktur dari ke-empat mekanisme perlipatan tersebut memiliki kemiripan geometri akhir. Lipatan detasemen bisa berkembang kemungkinan dengan cara:

1. Perputaran progresif sayap dengan panjang tetap, dikenal sebagai konsep tekukan atau *buckling concept* (De Sitter, 1956).
2. Panjang dan kemiringan sayap berbeda atau model luncuran gravitasi (Blay dkk., 1977).
3. Peningkatan panjang sayap tetapi kemiringan konstan, disebut sebagai teori kemiripan sendiri atau *self-similar* (Mitchell dan Woodward, 1988).
4. Konservasi area unit-unit kompeten dan inkompeten atau hukum konservasi area (Dahlstrom, 1990).

Bab 6

PENAMPANG SEIMBANG DAN RESTORASI

6.1. Sayatan Geologi

Konstruksi penampang geologi idealnya merefleksikan integrasi data, seperti geofisika, sumur bor atau geologi bawah permukaan, dan geologi permukaan. Uji sederhana yang dapat dilakukan untuk validasi geometri sebuah sayatan geologi dari terain terdeformasi yaitu dengan merestorasi sikuen batuan pada posisi sebelum deformasi (*unstrained position*), atau dikenal sebagai *balancing and restoring technique*. Menurut Elliott (1983), penampang seimbang (*balanced stage*) bisa dianggap layak dan diterima secara geometrik, potongan geologi itu harus bisa direstorasikan ke posisi sebelum deformasi, dan memberikan konfigurasi arsitektural yang dapat dikenali di lapangan. Namun demikian penting untuk dimengerti bahwa irisan vertikal struktur tidaklah unik, dan hasil restorasi tidak perlu memperhitungkan sikuen tererosi, tetapi hanya memberikan hasil pemendekan minimum.

Sejumlah luaran penelitian yang dipublikasikan pada umumnya menggunakan dua metode untuk merekonstruksi penampang seimbang dan restorasi, yaitu (1) panjang perlapisan konstan, dan (2) area konstan. Contoh klasik untuk sayatan dengan asumsi panjang konstan yaitu konstruksi struktur dari pegunungan Rocky di Canada (Bally dkk., 1966; Price dan Mountjoy, 1970), dan pegunungan lipatan Wyoming (Royse dkk., 1975). Sejak saat itu, metode ini diimplementasikan secara luas dalam pembuatan penampang geologi dari berbagai pegunungan lipatan, termasuk diantaranya adalah terain Moine di barat laut Scotlandia (Elliott dan Johnson, 1980), jalur perbukitan Blue di selatan Appalachea (Boyer dan Elliott, 1982), dan pegunungan Pine di selatan

Appalachea (Mitra, 1988). Sedangkan aplikasi teknik equal area telah diaplikasikan untuk merekonstruksi struktur di Alberta Foothills (Dahlstrom, 1969a), Fernie Basin di tenggara British Columbia (Dahlstrom, 1969b), dan Pennsylvania Valley and Ridge di selatan Appalachia (Mitra dan Namson, 1989).

6.1.1. Metode Panjang Konstan

Beberapa penelitian telah memperlihatkan jalur-jalur pegunungan lipatan sebagai hasil deformasi konsentris, sehingga model struktural untuk terain tersebut direkonstruksikan dengan konsep perlipatan konsentris untuk antiklin *ramp* (Suppe, 1983; Mitra, 1986). Menurut Dahlstrom (1969a), rezim konsentris tidak mengakibatkan perubahan volume batuan, dan panjang serta ketebalan awal perlapisan tetap terjaga, kecuali di inti lipatan. Hal ini mengimplikasikan bahwa panjang setiap perlapisan dalam sikuen stratigrafi sebelum deformasi adalah equal, sehingga selama deformasi semua unit batuan mengalami pemendekan. Oleh karena itu, restorasi lipatan paralel, termasuk lipatan-lipatan konsentris, *box*, *kink*, dan *chevron*, dapat dibuat dengan mengukur panjang setiap perlapisan lengkung, kemudian panjang lengkung terukur ditarik lurus atau horizontal, sehingga diperoleh panjang perlapisan sebelum deformasi. Teknik ini menggunakan asumsi bahwa sikuen batuan sedimen melipat secara paralel dengan bidang perlapisan, thus pergeseran menyerong (*oblique shearing*) terhadap bidang perlapisan diabaikan.

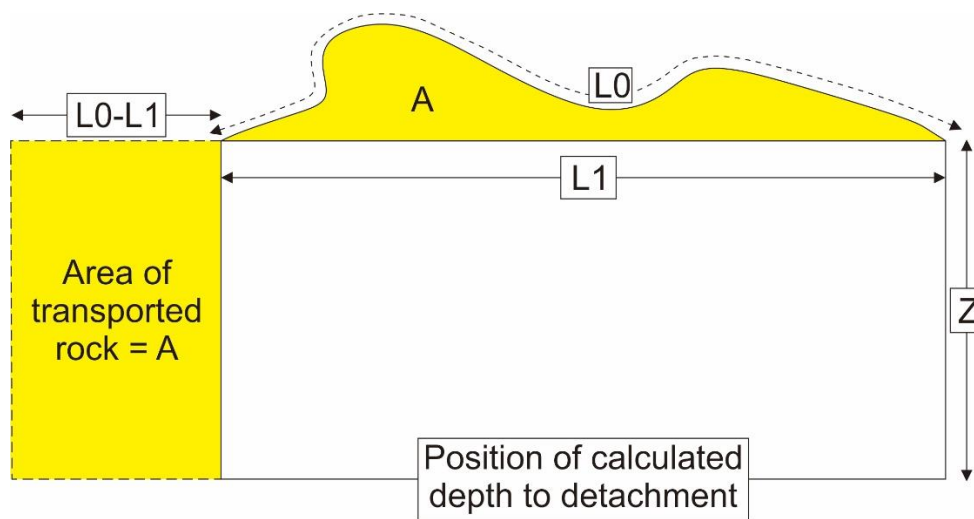
Remark

✚ *Constant length balancing technique assumes that oblique shearing of sedimentary rocks to bedding is negligible in the folding mechanism, and as a consequence the interpretation generally ignore non-parallel folding of the layers.*

6.1.2. Metode Area Konstan

Di region dimana deformasi menghasilkan penebalan dan atau penipisan perlapisan, maka struktur tektoniknya pasti area konstan. Hal ini dikarenakan ketebalan dan

panjang perlapisan berubah, tetapi volume batuan tetap selama deformasi, sebagai contoh lipatan similar. Dalam kasus ini, restorasi sayatan geologi biasanya menggunakan konsep konservasi area. Mitra dan Namson (1989) mengklasifikasikan teknik ini menjadi dua kategori, (1) restorasi area dan (2) area berlebih (*excess-area*). Dalam prakteknya, kedua metode itu masing-masing memiliki kelebihan. Pendekatan restorasi area ini sangat berguna dalam mengidentifikasi pemendekan regional, dan juga untuk menguji apakah penampang restorasi berimbang. Sedangkan, metode *excess-area* biasanya digunakan untuk mendapatkan kedalaman detasemen dan pemendekan regional (Dahlstrom, 1969a, 1990; Mitra dan Namson, 1989). Gambar 6.1 mengilustrasikan metode *excess-area* untuk menghitung kedalaman detasemen dan pemendekan regional.



Gambar 6.1. Teknik sederhana untuk kalkulasi kedalaman bidang detasemen (Z) dan nilai pemendekan minimum (L_0-L_1) atau L_0-L_1/L_0 (%).

Perhitungan kedalaman bidang detasemen dapat dihitung dengan menggunakan formula berikut ini:

$$Z = A/L_0-L_1$$

dimana,

Z = kedalaman detasemen

A = area terangkat di atas regional

- L0 = panjang lapisan terdeformasi
L1 = panjang alas lapisan terdeformasi
L0-L1 = nilai pemendekan minimum

Asumsi mendasar yang digunakan dalam formula tersebut yaitu tidak ada material batuan mengalir dari sinklin menuju inti antiklin selama deformasi, oleh sebab itu struktur terbentuk hanya karena pemendekan. Dahlstrom (1990) menyatakan bahwa aplikasi persamaan itu untuk deformasi plastis akan sulit atau semakin kompleks.

6.1.3. Garis Referensi

Dalam rangka merestorasi penampang geologi, dua garis referensi sebagai titik ikat perlu dibuat di kedua ujung sayatan (*tip lines*), biasanya diletakkan pada perlapisan dengan pergeseran antar lapisan minimum. Referensi pertama digunakan sebagai titik awal untuk kedua penampang seimbang dan restorasi, dan biasanya diletakkan di unit tak terdeformasi pada daerah *foreland*. Referensi kedua digunakan sebagai titik akhir untuk sayatan, dan umumnya diletakkan pada daerah *hinterland*. Kedua garis referensi *foreland* dan *hinterland* dikenal sebagai lintasan regional (Marshak dan Woodward, 1988).

Namun demikian, restorasi penampang melintasi jalur orogen yang tererosi secara signifikan (*deeply eroded orogenic belts*), dimana blok *hangingwall* jarang dijumpai, titik referensi lokal dapat digunakan. Woodward dkk. (1985) telah memakai beberapa referensi lokal untuk merestorasi blok *hangingwall* Appalachian bagian selatan. Mereka meletakkan spot referensi di tengah-tengah *thrust sheets* untuk direstorasi karena area bidang sumbu di sini memiliki pergeseran minimum. Sedangkan untuk region dimana ada pergeseran internal antar lapisan dalam *thrust sheet*, konstruksi penampang seimbang memerlukan garis lepas atau tak terikat (*loose line*). Pada sayatan restorasi dengan titik referensi ini bisa memberikan ukuran langsung pergeseran internal dan total pemendekan baik diukur dari garis regional maupun lokal.

6.1.4. Keterbatasan Metode

Pemakaian teknik penampang geologi seimbang untuk mempelajari struktur, khususnya di jalur orogenik yang kompleks, memiliki beberapa keterbatasan, termasuk diantaranya adalah:

1. Ketergantungan pada aturan konservasi (*conservation law*)
2. Solusi alternatif (*non-unique solution*)

Metode sayatan seimbang pada prinsipnya mendasarkan pada hukum konservasi, termasuk preservasi area, volume, dan atau panjang lapisan batuan. Oleh sebab itu, teknik ini mengabaikan pergeseran menyerong yang kemungkinan terjadi juga dalam deformasi, melainkan dalam model 2D yang direkonstruksi selalu beranggapan bahwa deformasi menghasilkan pergeseran paralel dengan perlapisan (*flexural bedding slip*). Selain itu, aplikasi teknik ini membuka ruang untuk berbagai alternatif dalam interpretasi data yang tersedia. Oleh karena itu, interpretasi dengan penampang seimbang tidak memberikan solusi tunggal untuk permasalahan struktur yang ada pada jalur orogen.

Meskipun demikian, keterbatasan tersebut tidak berarti menghilangkan kelebihan-kelebihan teknik penampang seimbang. Semakin banyak data yang tersedia dan penggunaan metode dengan benar dalam konstruksi sayatan dapat meminimalisir keterbatasan-keterbatasan yang ada, dan mampu menghasilkan solusi alternatif terbaik dalam interpretasi. Penentuan garis lintasan irisan vertikal di daerah studi merupakan faktor kritikal juga dalam mengkonstruksi sayatan seimbang. Irisan geologi sebaiknya dibuat melewati area dengan kriteria sebagai berikut:

1. Tersedia data relatif paling banyak (*most data available*)
2. Penggunaan asumsi yang sesuai, misal deformasi kulit tipis (*thin-skinned deformation*) untuk zona sesar naik dan deformasi inversi untuk sikuen yang lebih dalam, mekanisme *fault-bend fold*, dan konservasi area dan atau panjang perlapisan

3. Pemakaian program aplikasi yang tepat (misal *GeosecTM*).

6.2. Program *GeosecTM*

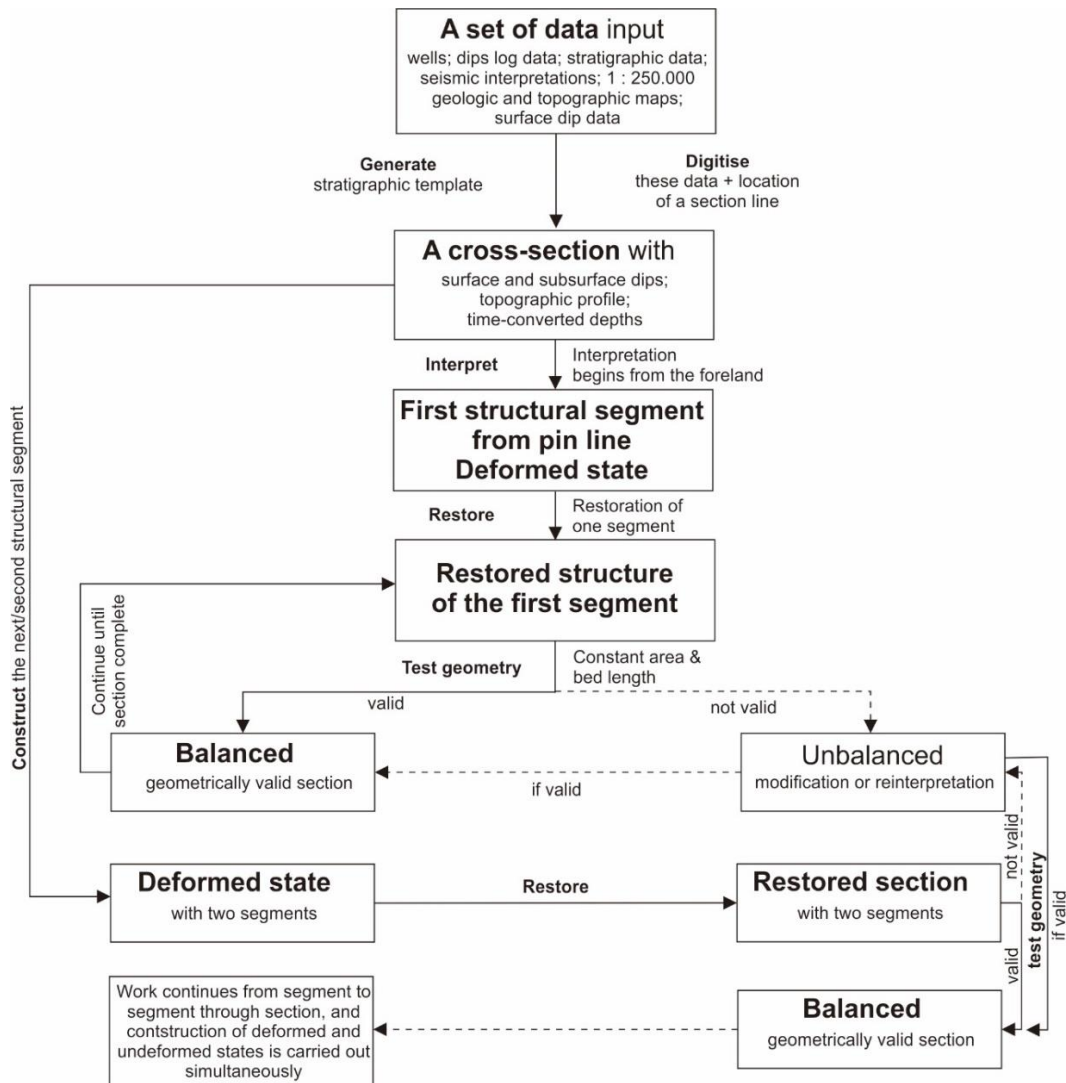
Pada Gambar 6.2 diperlihatkan pentahapan konstruksi penampang geologi menggunakan *GeosecTM*. Program ini digunakan untuk menggambar dengan sistem interaktif untuk konstruksi, restorasi, dan validasi penampang geologi. Data yang diperlukan sebagai masukan antara lain 2D dan 3D peta topografi dan peta geologi, 2D dan 3D sumur bosr, seismik, stratigrafi, dan interpretasi penampang geologi sebelumnya. Pengguna aplikasi *GeosecTM* harus menyadari bahwa program ini tidak membuat interpretasi, tetapi memberikan uji geometrik untuk validitas dan admisibilitas dari sayatan geologi yang dikonstruksi. Sutriyono (1999) dan Hill dkk. (2004) telah mengimplementasikan program ini untuk studi struktur pada jalur pegunungan lipatan New Guinea.

Asumsi fundamental yang digunakan dalam program ini antara lain konservasi area dan atau panjang perlapisan, algoritma *flexural* dan *oblique*, mekanisme *fault-bend* dan *-propagation folds* (Suppe, 1983; Chester dan Chester, 1990). Adapun kelebihan dan keterbatasan dari program ini jika dibandingkan dengan cara manual adalah sebagai berikut:

1. Kelebihan, apabila data sudah dimasukkan ke dalam sistem, multi interpretasi dapat dikonstruksi; dapat melacak dengan akurat semua area dan panjang perlapisan; ketelitian terjaga, sehingga terhindar dari kesalahan akibat kecerobohan; mampu menunjukkan problem geologi dan membantu indentifikasi lingkup persoalan; dan mudah untuk menggambar.
2. Keterbatasan hanya sebatas pada algoritma untuk *fault-bend fold* dan *fault-propagation fold* untuk penampang yang dikonstruksi; sulit untuk membuat perubahan stratigrafi, dan format yang ditunjukkan relatif sederhana; gangguan komputer yang berakibat kegagalan dalam konstruksi.

Remark

✚ It must be noted that the Geosec™ system does not do an interpretation, but it provides geometrical tests of validity and admissibility of an interpretation.



Gambar 6.2. Teknik konstruksi penampang geologi dengan aplikasi Geosec™ (Sutriyono, 1999).

Bab 7

SINGKAPAN STRUKTUR DAERAH CAPE LIPTRAP

7.1. Geologi

Cape Liptrap terletak di tenggara Melbourne Australia, dan daerah ini memiliki tatanan geologi dengan singkapan struktur tektonik yang sangat kompleks, namun cukup baik dan ideal untuk mengenali berbagai jenis deformasi tektonik kompresional. Sejumlah peneliti telah melaporkan kondisi geologi area tersebut, diantaranya adalah O'Connor (1978), Gardner dkk. (2008), dan Vollgger dan Cruden (2016). Ulasan singkat geologi Cape Liptrap di sini mengacu pada publikasi-publikasi tersebut. Sikuen batuan yang tersingkap di wilayah ini terdiri dari endapan laut dangkal dan deposit kipas bawah laut (turbidit) berumur Paleozoikum yang didominasi oleh perselingan serpih hitam, batulempung, dan batupasir arenit. Rumpunan batuan Devon dari Formasi Liptrap merupakan bagian dari Walhalla Group dan memperlihatkan karakteristik endapan turbidit.

Sejarah deformasi wilayah ini dimulai dengan perkembangan sesar Waratah selama periode pensesaran naik ke arah barat-timur pada saat orogen Mid-Devonian Tabberabberan. Deformasi kompresional menyebabkan sikuen batuan Formasi Liptrap mengalami perlipatan dan pensesaran naik, sehingga sikuen batuan penyusun formasi memendek sekitar 40-50% di terain Melbourne. Perlipatan menghasilkan lipatan menunjam landai (*gently plunging*), sempit (*tight*), dan mengarah utara-timurlaut. Deformasi dipercayai berlangsung segera setelah pengendapan sedimen klastik, sehingga rumpunan batuan tersebut belum pernah tertimbun di kedalaman yang signifikan (*the sequence had never been deeply buried*). Fenomena ini terlihat pada singkapan

batuan kompeten (misal batupasir) yang telah mengalami perlipatan sebagaimana layaknya batuan inkompeten atau *soft rock* yang bersifat plastis (*ductile*). Pasca orogen Tabberabberan, daerah Cape Liptrap mengalami tektonik ekstensional dan kompresional selama peristiwa pemekaran (*rifting*) antara Australia dan Antartika pada Kapur Awal, dan episode ini diikuti oleh pengangkatan (*uplift*) pada Kapur Tengah dan Tersier.

Struktur Cape Liptrap secara regional merupakan sinklinorium di bagian tengah dan dua antiklin yang lebih kecil dijumpai di bagian sayap sebelah barat. Namun demikian, di wilayah ini banyak tersingkap lipatan-lipatan sempit dengan profil konsentris dan *chevron* ataupun *kink bands*. Arah sumbu lipatan utara-tenggara dan menunjam landai ke selatan, meskipun reversal penunjaman dijumpai di beberapa lokasi. Struktur lipatan terlihat berasosiasi dengan sesar naik yang memperlihatkan bidang pensesaran landai. Sesar-sesar naik pada umumnya berkembang di sepanjang bidang perlapisan batulempung atau serpih, kemudian bergeser ke atas sebagai sesar naik miring (*ramp*) memotong lapisan kompeten batupasir, dan seringkali membentuk *fault-bend folds*. Secara keseluruhan, sikuen batuan di Cape Liptrap terpotong oleh *dextral tear fault* atau *transfer fault* dengan arah umum timur-barat. Sesar ini terlihat menggeser bidang-bidang perlapisan lengkung dari beberapa struktur lipatan.

Remark

✚ The Devonian rock unit underwent deformation shortly after the deposition of sediment clastic, implying the sequence was still soft on the onset of compressional tectonics, as a consequence the competent rock unit may response to the tectonic stresses in a way similar to that of the ductile rock bed (by bending, buckling, or even folding).

7.2. Identifikasi Struktur

Struktur geologi yang diidentifikasi dan disampaikan di sini mendasarkan pada singkapan batuan dari beberapa lokasi di daerah Cape Liptrap. Dalam rangka memberikan pembelajaran yang lebih mudah untuk dipahami oleh mahasiswa,

sistematika penyampaian materi diberikan secara bertahap mulai dari rekognisi elemen-elemen struktur, interpretasi, dan deskripsi. Telaah lebih lanjut dilakukan dengan mendigitasi fotograf singkapan untuk membuat ilustrasi diagramatik atau skematik struktur yang terekam oleh sikuen batuan. Selanjutnya, mahasiswa menuliskan secara singkat (*short essay*) untuk menjelaskan hasil identifikasi struktur tektonik yang sudah diobservasi.

Dalam proses pembelajaran struktur tektonik, mahasiswa diberi waktu untuk berdiskusi secara kelompok di kelas dan melakukan rekognisi, interpretasi, dan deskripsi struktur yang terlihat pada singkapan batuan. Dalam upaya meningkatkan pemahaman materi Geologi Struktur yang diberikan, mahasiswa diberi peluang kerja mandiri untuk memecahkan problematika deformasi melalui sejumlah latihan (*exercise*) dan tugas (*assignment*). Pada bab ini, pembahasan terhadap singkapan struktur di area Cape Liptrap disampaikan dengan nomor urut semata, karena informasi tentang koordinat dan nama lokasi secara spesifik tidak terdokumentasi pada saat survei lapangan.

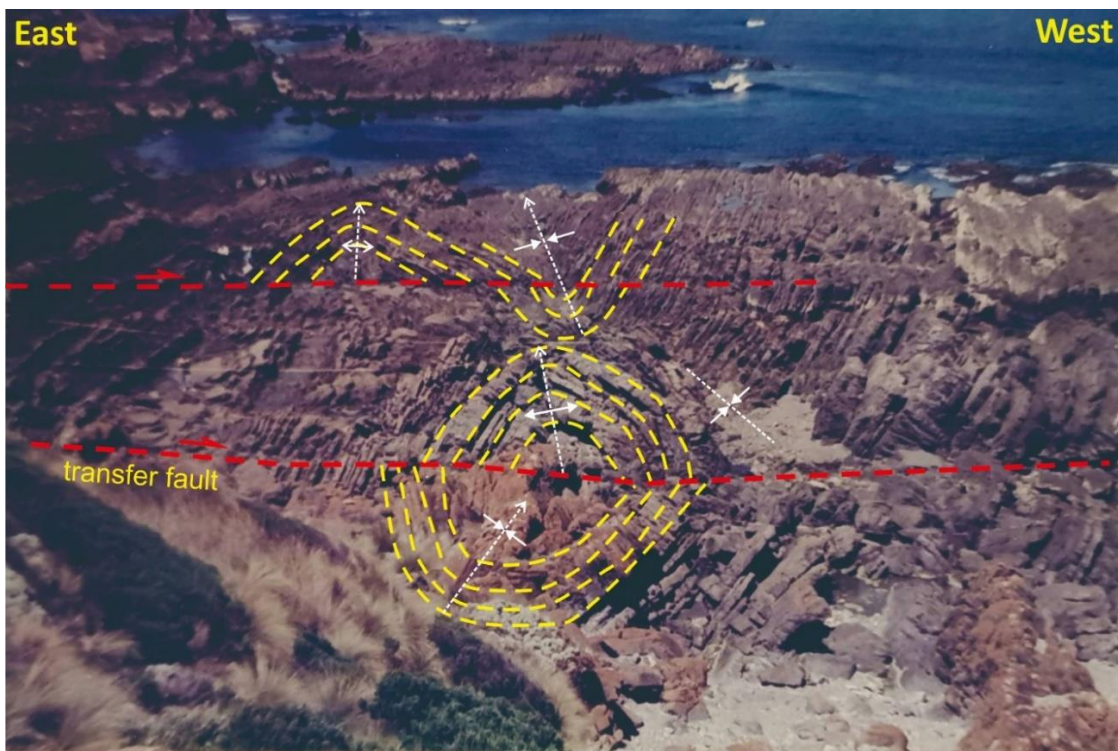
Learning process

✚ *Students ought to follow a learning process starting from understanding as well as implementing the fundamental concepts throughout recognition, interpretation, description, schematic reconstruction, dan writing up a short essay or report on structural architecture in the outcrops.*

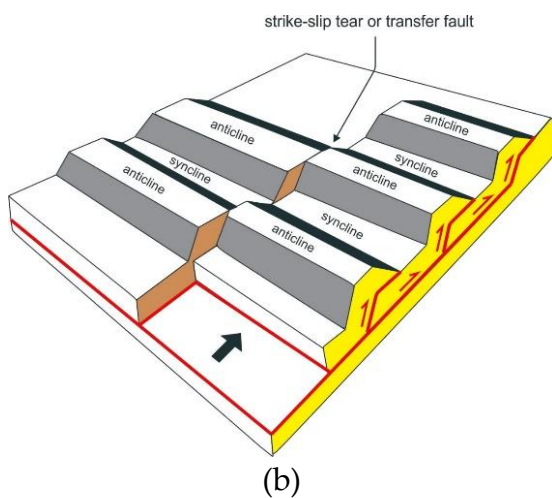
7.2.1. Singkapan-1 Zona Lipatan dan *Transfer Fault*

Observasi struktur pada singkapan batuan dapat dilakukan dengan beberapa teknik tergantung dari kondisi lapangan, yaitu pengamatan dari jarak dekat di lokasi singkapan (*on the spot*) atau dari jarak pandang jauh (*bird view*). Pengamatan detil biasanya dilakukan langsung di lokasi singkapan, sehingga deskripsi struktur dan posisi geografis objek dapat diidentifikasi secara lebih akurat. Sedangkan observasi dari jarak jauh dapat mengidentifikasi sebaran singkapan secara lebih luas, sehingga keterkaitan antar struktur di lokasi pengamatan dapat dipahami secara lebih baik. Namun demikian,

semakin banyak data yang diperoleh selama kegiatan lapangan, maka semakin mudah untuk memecahkan probematika geologi daerah observasi. Gambar 7.1 memperlihatkan sebaran singkapan dilihat dari ketinggian, sehingga cakupan pengamatan struktur dapat dilakukan dengan sudut pandang yang lebih luas. Namun demikian perlu ditegaskan di sini bahwa wilayah ini memiliki konstruksi arsitektur jauh lebih kompleks dari pada konfigurasi struktur yang diinterpretasikan dari jarak jauh.



(a)



(b)

Gambar 7.1. Observasi struktur dari ketinggian (*bird view*) untuk mendapatkan cakupan pengamatan lebih luas atau skala regional (a). Pada singkapan tersebut terlihat antiklin menunjam ke selatan berhadapan dengan sinklin menunjam ke selatan, dan fenomena itu mengindikasikan adanya transfer displasemen (Mitra, 1986). Ilustrasi *diagramatik strike-slip tear fault* atau *transfer fault* dimodifikasi dari McClay (1992) (b).

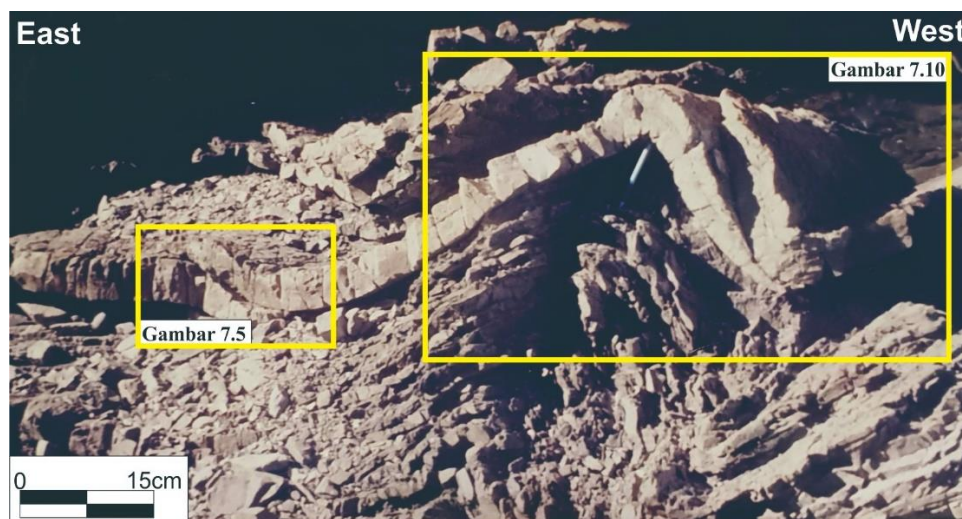
Di area tersebut tersingkap sikuen batuan turbidit berumur Devon yang telah terdeformasi oleh rezim kompresional yang membentuk zona lipatan. Sebaran singkapan, terutama yang berukuran besar dapat dilakukan dari jarak pandang jauh, dan sebaran struktur secara regional dapat diidentifikasi dengan baik melalui *bird view*. Fenomena seperti itu sangat sulit dijumpai di daerah dengan iklim tropis seperti Indonesia, karena vegetasi cenderung lebih lebat dan pelapukan batuan relatif lebih intensif. Pengamatan singkapan di lokasi ini dapat mengidentifikasi sebaran antiklin menunjam ke selatan, dan struktur ini berada pada satu kelurusan atau berhadapan dengan sinklin menunjam ke selatan. Struktur antiform dan sinform yang menunjam ke selatan dengan *strike* relatif NW-SE dijumpai juga di sisi selatan daerah pengamatan.

Pertemuan antiklin-sinklin dalam satu *strike* di area itu diinterpretasikan sebagai kontrol *dextral tear fault* yang memotong lipatan. Kelurusan *dextral tear faults* di lapangan dapat diikuti dengan mudah, karena menyebar sepanjang kanal kecil aliran air ke arah timur-barat (*E-W trending gullies*) yang memotong *strike* umum rumpunan batuan. *Strike-slip tear fault* atau dikenal juga sebagai *transfer fault* didefinisikan sebagai sesar geser lateral yang paralel terhadap arah pergerakan sesar naik (*thrust transport direction*) dan memisahkan dua bagian dari *thrust sheet* yang mempunyai displasemen berbeda (McClay, 1992).

7.2.2. Singkapan-2 Antiklin Ramp Independen

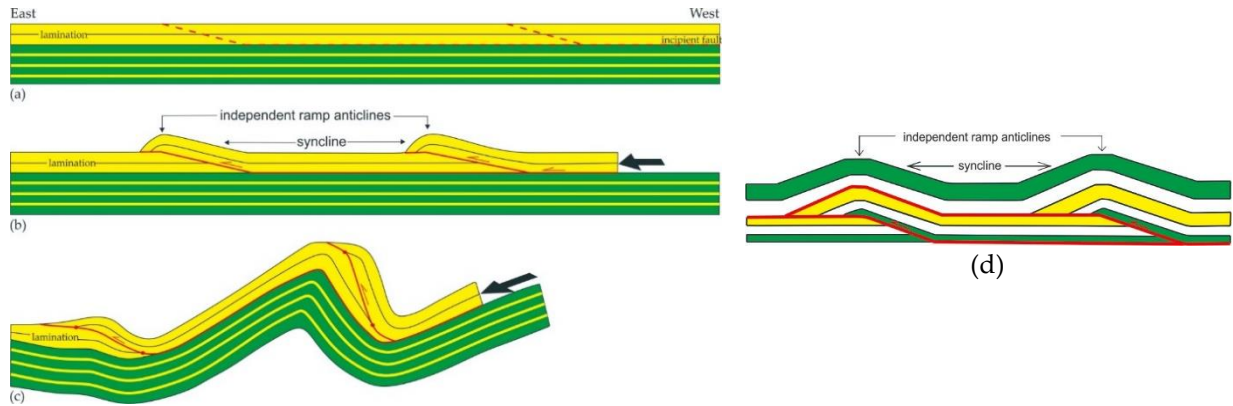
Pada Gambar 7.2 diperlihatkan singkapan struktur hasil deformasi sikuen batuan yang terdiri dari unit batupasir menumpang di atas serpih dengan perselingan batupasir tipis. Lapisan batupasir mengalami deformasi getas oleh pensesaran naik miring (*ramp faulting*). Pada singkapan itu terlihat juga blok *hangingwall* dan *footwall* keduanya terlipat. Perlipatan *hangingwall* membentuk dua antiklin yang terpisah di sepanjang *strike* batuan, dan kedua antiklin tersebut dipisahkan oleh sinklin yang berukuran relatif lebih besar.

Berdasarkan klasifikasi dupleks yang diajukan oleh Mitra (1986), struktur ini digolongkan ke dalam *independent ramp anticlines*. Dalam rangka memberikan pembelajaran lebih detil kepada mahasiswa, konfigurasi struktur pada singkapan tersebut dipisahkan menjadi dua segmen timur dan barat, dan kedua antiform itu dibahas secara terpisah. Rekognisi dan interpretasi kinematik untuk setiap individu struktur diberikan secara bertahap agar mahasiswa lebih mudah untuk memahami evolusi deformasi batuan.

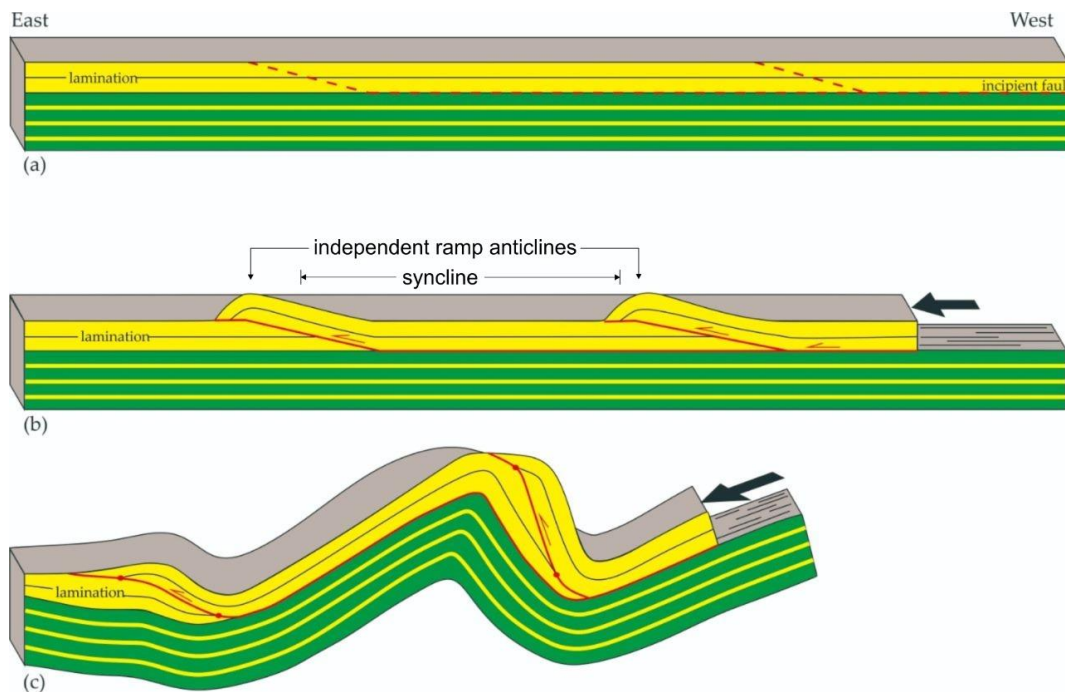


Gambar 7.2. Singkapan rumpunan batuan telah mengalami deformasi kompresional dan membentuk *west over east vergent structure* yang ditunjukkan oleh dua antiklin *ramp* independen di sepanjang strike lapisan. Pembahasan detil untuk kedua antiklin disampaikan secara terpisah dalam sesi berikut ini.

Dalam pembahasan evolusi deformasi, materi perkuliahan ini memberikan ilustrasi skematik untuk menjelaskan perkembangan pembentukan struktur. Diagram hasil rekonstruksi singkapan tersebut disandingkan dengan model yang disampaikan oleh Mitra (1986) sebagai analogi tipe deformasi batuan, sehingga penamaan unit struktur pada singkapan memiliki dasar teoritis. Pada sesi perkuliahan kali ini, mahasiswa dilatih untuk membuat diagram kinematik 2D (Gambar 7.3) dan 3D (Gambar 7.4), kemudian menuliskan esai singkat mengenai sejarah deformasi tektonik pasca pengendapan sikuen batuan.



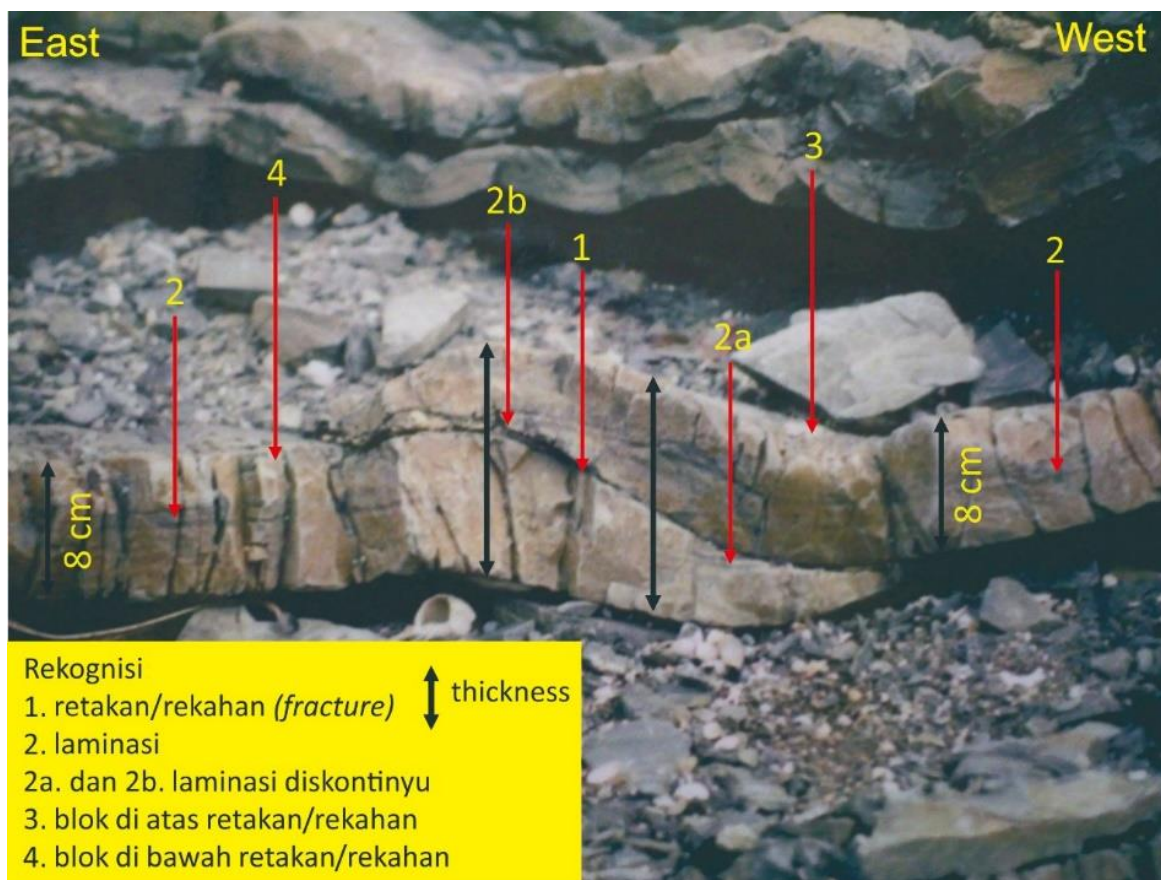
Gambar 7.3. Model skematik menunjukkan unit batupasir dilandasi perselingan serpih dan batupasir tipis (a); sikuen batuan terdeformasi getas dan plastis membentuk dua antiklin *ramp* independen dengan jarak lebih besar dari pada displasemen di setiap sesar, dan kedua antiklin dipisahkan oleh sinklin yang relatif lebih besar (b); struktur mengalami amplifikasi asimetri, dimana segmen barat terangkat lebih tinggi dari pada blok timur (c). Model *independent ramp anticlines* oleh Mitra (1986) digunakan sebagai analogi konfigurasi arsitektur pada singkapan Cape Liptrap, dan ilustrasi diagramatik tipe struktur tersebut dimodifikasi dari McClay (1992) (d).



Gambar 7.4. Konfigurasi 3D memberikan ilustrasi evolusi struktur dalam perspektif keruangan (a). Perkembangan struktur diawali dengan rezim kompresional yang menyebabkan pensesaran dan membentuk dupleks dalam wujud dua antiklin *ramp* independen yang dipisahkan oleh sinklin (b). Pada akhir episode deformasi, struktur terlipat lebih lanjut secara asimetri, dimana amplifikasi antiklin di segmen barat terlihat lebih besar dari pada antiklin di sektor timur (c).

7.2.2.1. Antiklin Ramp Independen Segmen Timur

Singkapan yang diperlihatkan pada Gambar 7.5 merupakan antiklin *ramp* independen di segmen timur dari struktur yang ditampilkan di Gambar 7.2. Dalam rangka mengenali tipe deformasi tektonik dan kinematikanya, mahasiswa diajarkan untuk melakukan rekognisi terhadap elemen-elemen struktur, kemudian menginterpretasikan konfigurasi arsitektur dengan mendigitasi singkapan, selanjutnya membuat deskripsi berdasarkan paket data yang diperoleh.



Gambar 7.5. Rekognisi elemen-elemen struktur yang terekam pada lapisan batupasir dengan memberikan notasi 1-4. Pada tahap ini, terminologi spesifik untuk penamaan komponen struktur belum digunakan.

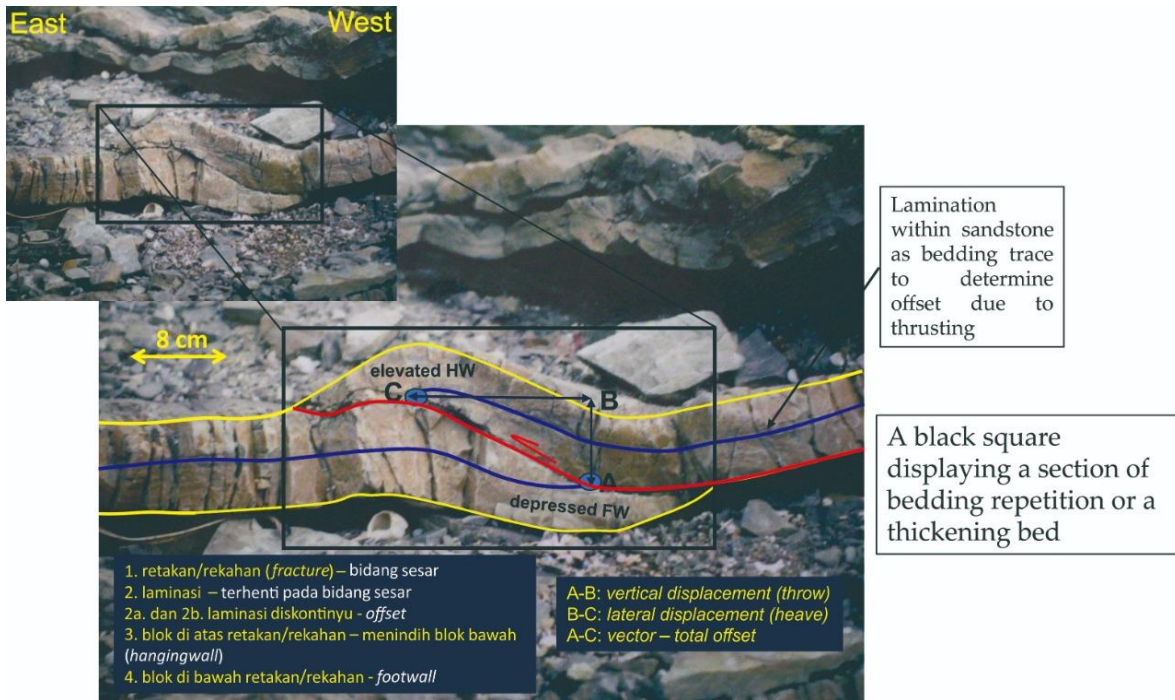
Pada sesi ini mahasiswa diberi kesempatan untuk mengenali elemen-elemen struktur secara mendetil melalui singkapan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.5.

Pada gambar tersebut diberikan notasi 1-4 untuk menunjukkan setiap komponen struktur, yaitu:

1. Retakan/rekahan (*fracture*) miring ke barat.
2. Laminasi, dimana 2a dan 2b terlihat diskontinyu atau tidak menerus.
3. Blok batuan yang terletak di atas bidang retakan/rekahan.
4. Blok batuan yang berada di bawah bidang retakan/rekahan.

Penekanan pembelajaran di sini difokuskan pada pengenalan elemen struktur yang terlihat pada singkapan, agar mahasiswa tidak secara langsung menduga-duga atau “menebak” jenis struktur pada batuan tersebut (meskipun mahasiswa kemungkinan dapat dengan mudah mengenali struktur melalui singkapan itu, tetapi proses pembelajaran secara sistematis sangat penting untuk dilakukan). Tahap pembelajaran berikutnya yaitu menginterpretasikan tipe deformasinya, apakah getas (*brittle*) ataukah plastis (*ductile*), dan juga membuat model perkembangan kinematik setiap struktur pada lapisan batuan.

Oleh karena itu, singkapan batuan perlu didigitasi untuk memperjelas konfigurasi arsitekturnya. Gambar 7.6 memperlihatkan hasil digitasi singkapan batupasir dengan penambahan notasi-notasi yang menunjukkan nama setiap komponen deformasi. Pembahasan selanjutnya yaitu menginterpretasikan jenis struktur yang berkembang pada lapisan tersebut. Pada prinsipnya, fokus pembelajaran pada tahap ini yaitu pengenalan secara detil setiap komponen struktur yang terbentuk akibat pensesaran naik, sehingga mahasiswa dapat dengan mudah mengenali indikasi-indikasi lapangan yang mendukung kehadiran sesar naik. Proses pembelajaran untuk pengenalan struktur diawali dari percontoh singkapan batuan dengan konfigurasi deformasi yang sangat sederhana, namun rekaman elemen-elemen struktur terlihat dengan sangat jelas. Pada tahap pembelajaran selanjutnya, mahasiswa diajarkan untuk mengevaluasi secara lebih holistik singkapan batuan dengan rekaman struktur geologi yang lebih kompleks.



Gambar 7.6. Interpretasi deformasi batuan dilakukan dengan digitasi singkapan. Pada tahap pembelajaran ini komponen struktur disebutkan dengan terminologi yang baku secara konseptual.

Berdasarkan elemen-elemen struktur hasil rekognisi singkapan dengan notasi 1-4 di Gambar 7.5 dapat diinterpretasikan segmen-segmen deformasi, sebagai berikut:

1. Retakan/rekahan pada batupasir adalah bidang sesar.
2. Laminasi telah mengalami *offset* atau pergeseran sehingga tidak menerus atau diskontinyu (2a dan 2b).
3. Blok batuan di atas bidang sesar merupakan *hangingwall*.
4. Blok batuan di bawah bidang sesar adalah *footwall*.

Observasi lebih detil pada tahap ini difokuskan pada struktur primer di dalam batupasir yang dikenal sebagai laminasi. Lapisan tipis ini terlihat tidak menerus (diskontinyu) pada bidang sesar karena telah mengalami displasemen (*offset*), yaitu naik untuk laminasi yang berada di blok *hangingwall* dan turun di bagian *footwall*. Arah pergeseran laminasi mengindikasikan blok *hangingwall* bergerak naik relatif terhadap *footwall*, thus jenis deformasinya getas yaitu berupa sesar naik miring (*ramp thrust fault*)

dengan bidang sesar relatif landai dan miring $\sim 28^\circ$ ke arah barat. Singkapan ini memberikan penegasan bahwa struktur sedimen selain laminasi, misal *graded bedding*, *cross-bedding*, dan *load cast*, pada batuan terdeformasi merupakan alat yang sangat baik (*powerful tool*) untuk merekonstruksi sejarah deformasi pasca pengendapan. Oleh karena itu, observasi singkapan batuan diupayakan untuk selalu mencermati keberadaan struktur primer.

Remark

- ✚ *The occurrence of primary structures such as graded bedding, cross bedding, scour and fill, ripple mark, flute cast, load cast, etc. within the deformed rock unit, particularly in the overturned bed, is considered as a powerful tool in order to reconstruct history of tectonic deformation after deposition, as they provide invaluable information concerning the younging direction or the way-up indicator.*
- ✚ *You would be better not to miss them wherever they are "showing off" in the outcropping rocks.*

Komponen pergerakan sesar pada lapisan batupasir tersebut dapat diuraikan lebih rinci, sebagai berikut:

- Pergeseran vertikal (*throw*) A-B sebesar ~ 6 cm.
- Pergerakan lateral (*heave*) B-C sebesar ~ 15 cm.
- Vektor A-C sebesar ~ 16 cm.

Pensesaran naik ini membuat lapisan batupasir di zona deformasi terlihat semakin menebal hampir dua kali lipat dari ketebalan sebenarnya (*true thickness*), sehingga ada pengulangan (*repetition*) jenis batuan yang sama, dan penebalan (*thickening*) ini mengimplikasikan batuan telah mengalami kontraksi atau pemendekan (*shortening*).

Pengamatan selanjutnya difokuskan pada unit batuan yang tersesarkan. Blok *hanging wall* terlihat melengkung ke atas membentuk antiform, sedangkan *footwall* melengkung ke bawah membentuk sinform. Selain itu, sesar naik terlihat juga membengkok, dan pembekokan sesar memberikan indikasi kuat bahwa bidang sesar turut pula mengalami perlipatan pada fase akhir deformasi kompresional. Berdasarkan

konfigurasi arsitektur singkapan dapat disimpulkan bahwa lapisan batupasir telah mengalami deformasi awal getas melalui pensesaran, kemudian plastis via perlipatan pada fase akhir kompresi. Tabel 7.1 memberikan deskripsi struktur berdasarkan hasil observasi dan interpretasi singkapan.

Remark

- ✦ *The outcropping rock unit provides direct evidence for the presence of a ramp thrust fault, including a westward-dipping fracture, repetition of rock unit, thickening of bed, and the offset of lamination.*
- ✦ *For a sequence with multiple-layers of different ages, the presence of a thrust fault may be indicated by the older rock located stratigraphically on top of the younger unit.*

Eksplorasi struktur dapat dilakukan lebih jauh lagi dengan membuat diagram skematik untuk menyusun skenario mekanisme deformasi. Rekonstruksi dapat dilakukan dengan membuat diagram 2D dan atau 3D untuk melengkapi pemahaman struktur tektonik dalam dimensi keruangan. Pada konfigurasi 3D terlihat dengan jelas bahwa semua komponen struktur (sesar, dan *hangingwall antiform-siniform*) mengalami perlipatan lebih lanjut pada fase akhir deformasi kompresional.

Dalam perkuliahan struktur, mahasiswa didorong menggunakan program aplikasi 3D untuk membuat konstruksi arsitektur deformasi tektonik pada batuan.

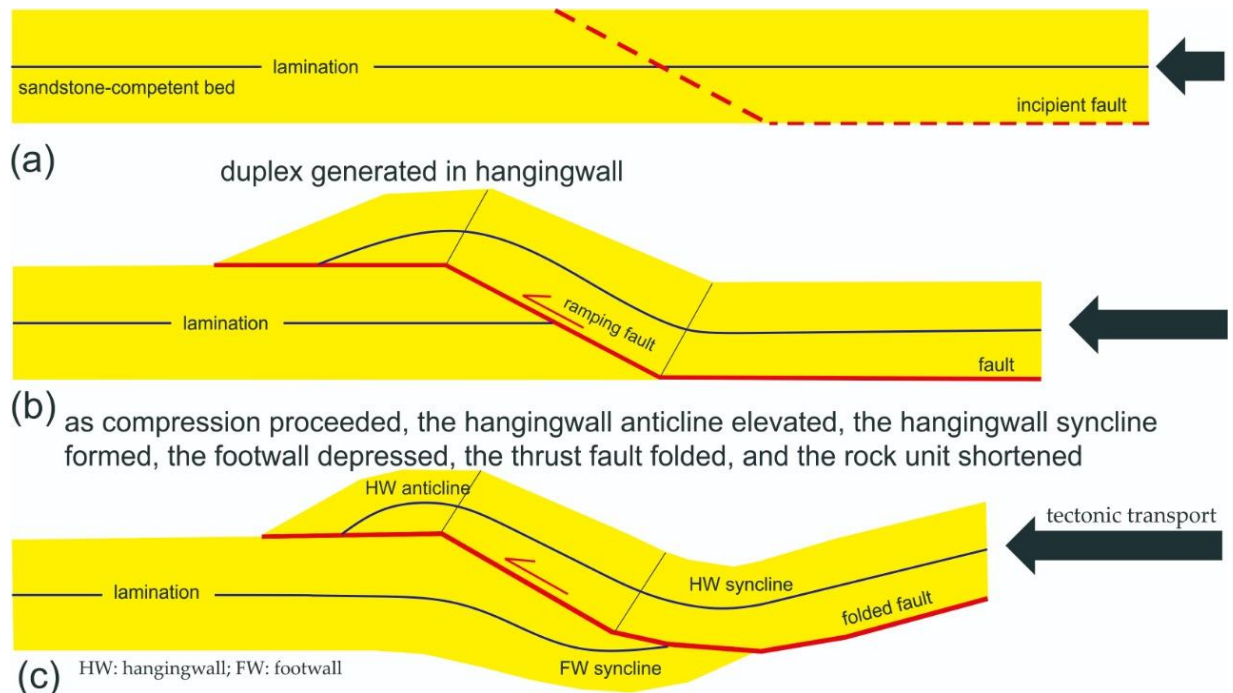
Asumsi-asumsi yang digunakan dalam membuat konfigurasi struktur meliputi:

- Bidang geser (*incipient fault*) berkembang sepanjang lapisan inkompeten *mudstone*, kemudian bergeser ke atas membentuk *ramp* yang memotong lapisan kompeten batupasir.
- Panjang dan ketebalan lapisan konstan selama deformasi.
- *Hangingwall* dan *footwall* keduanya aktif dalam episode deformasi (Ramsay, 1992).
- Bidang sesar terlipat, mengindikasikan pensesaran terjadi sebelum atau bersamaan perlipatan.

Tabel 7.1. Hasil rekognisi, interpretasi, dan deskripsi struktur yang terekam pada lapisan kompeten batupasir.

Elemen	Rekognisi	Interpretasi	Deskripsi
1	Retakan/rekahan/ <i>fracture</i>	Sesar naik dengan bidang sesar landai mengarah ke barat, tetapi terlihat melengkung, mengindikasikan ikut terlipat.	Lapisan batupasir telah mengalami deformasi tektonik tipe getas, ditunjukkan oleh sesar naik dengan bidang sesar landai (28°). Pensesaran telah menggeser blok <i>hangingwall</i>
2	Laminasi	Terhenti di bidang sesar.	naik menindih <i>footwall</i> , sehingga terjadi penebalan lapisan batupasir hampir 2x ketebalan aslinya ~8 cm.
2a dan 2b	Laminasi diskontinyu atau tidak menerus	Ada <i>offset</i> laminasi, berarti mengindikasikan ada pergeseran vertikal (<i>throw</i>), lateral (<i>heave</i>), dan miring (<i>vector</i>).	<i>Hangingwall</i> , <i>footwall</i> , dan sesar naik semuanya terlihat melengkung atau terlipat.
3	Blok di atas rekahan	Blok <i>hangingwall</i> bergerak naik, sehingga memPERTEBAL lapisan batuan, dan terlihat melengkung atau cembung ke atas membentuk <i>antiform</i> .	Perlipatan menghasilkan sepasang <i>hangingwall anticline</i> dan <i>syncline</i> , serta <i>footwall syncline</i> . Indikasi pergeseran ditunjukkan pula adanya <i>offset</i> struktur primer laminasi yang terdapat di dalam batupasir. Pergeseran vertikal (<i>throw A-B</i>) sebesar ~6 cm, lateral (<i>heave B-C</i>) sebesar ~15 cm, dan miring (<i>vector A-C</i>) sebesar ~16 cm.
4	Blok di bawah rekahan	Blok <i>footwall</i> terlihat melengkung ke bawah membentuk <i>sinform</i> .	

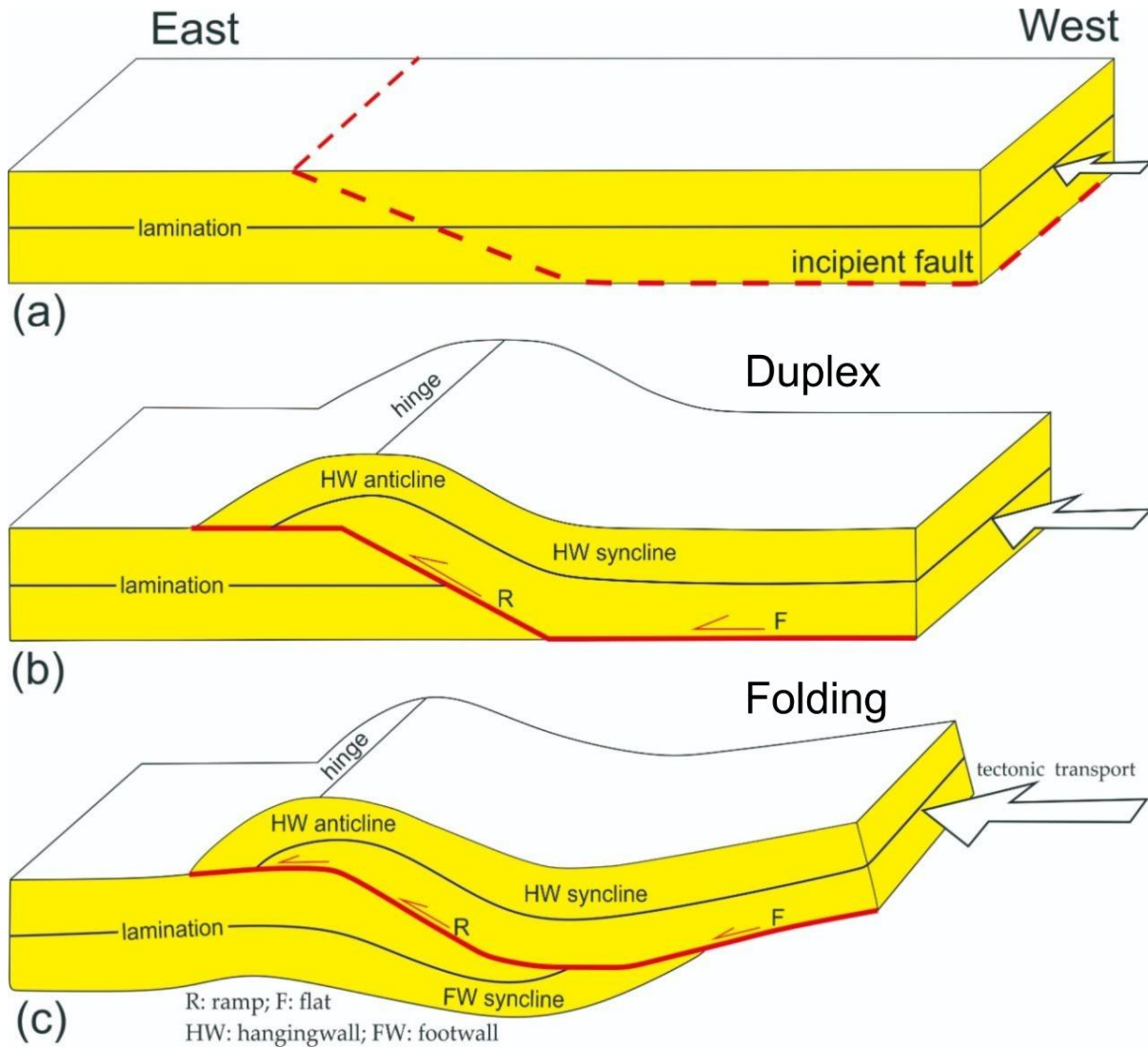
Pemahaman lebih lanjut terhadap perkembangan deformasi batuan diberikan dalam bentuk konfigurasi diagramatik. Gambar 7.7 menyajikan ilustrasi skematik perkembangan deformasi batuan dalam 2D, sedangkan Gambar 7.8 memberikan diagram kinematik pembentukan struktur pada batuan dalam perspektif keruangan 3D.



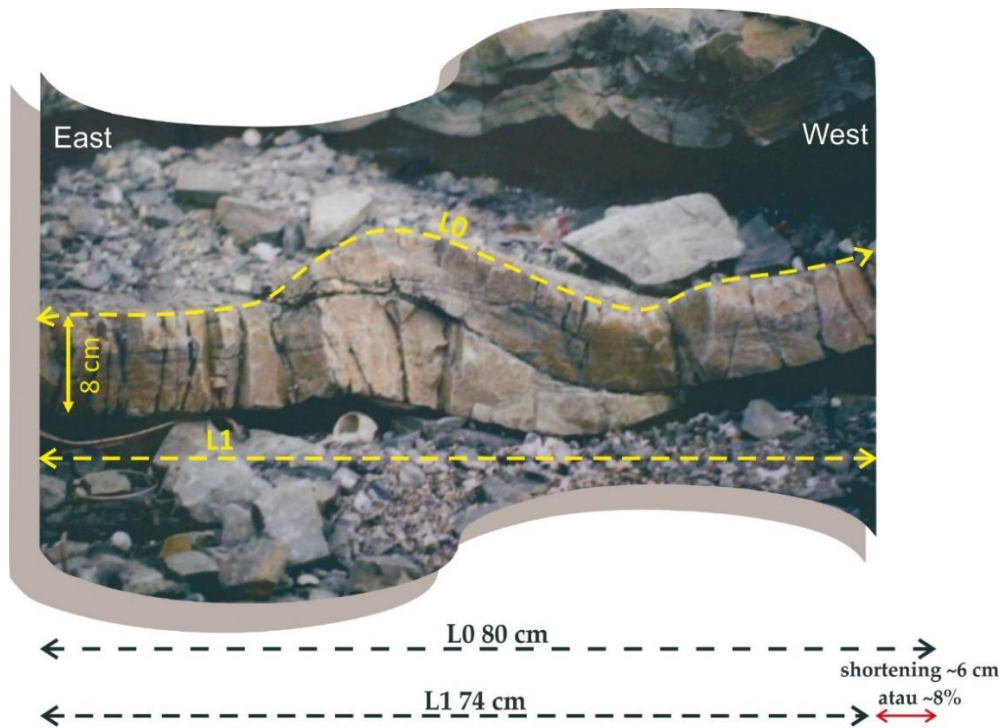
Gambar 7.7. Ilustrasi skematik 2D unit batupasir terdeformasi getas. Rekonstruksi diawali dengan mengembalikan lapisan ke posisi horizontal (prinsip keaslian horizontal endapan sedimen) (a). Sikuen batuan mengalami deformasi kompresional dan detasemen berkembang di lapisan inkompeten batulempung yang melandasi batupasir (di sini *strain* batulempung tidak diilustrasikan), dan pada tahap ini terbentuk dupleks dalam bentuk antiklin ramp pada hangingwall (b). Kompresi berlanjut, *hangingwall* terlipat sehingga strain antiformal semakin tinggi dan sinform terbentuk, sedangkan *footwall* mengalami depresi membentuk sinform karena dilandasi oleh batuan lunak atau plastis (c). Arah dan progress transport tektonik divisualisasikan dengan tanda panah hitam. Pada skala regional, mekanisme deformasi seperti itu telah ditunjukkan oleh Ramsay (1992) pada singkapan *the Flats Stone Band dolostone* di Kimmeridge Bay, Dorset, dimana hangingwall dan *footwall* keduanya aktif sepanjang episode deformasi.

Analisis struktur dilanjutkan dengan mengestimasi besaran kontraksi unit batuan akibat kompresi. Gambar 7.9 memberikan teknik pengukuran sederhana untuk mendapatkan nilai pemendekan lapisan batupasir karena membentuk pasangan antiklin-sinklin pada *hangingwall*. L_0 merupakan panjang lapisan terdeformasi seperti terlihat sekarang di lapangan. Apabila L_0 dikembalikan ke posisi sebelum terlipat (lateral), diperoleh panjang pra-strain sebesar ~80 cm. Sedangkan L_1 merupakan jarak titik referensi yang ditetapkan pada setiap sayap sinklin, dan hasil pengukuran memberikan nilai sebesar ~74 cm (skala yang terlihat pada lapisan ~8 cm). Berdasarkan

hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa batupasir telah merespon tegasan kompresional melalui pensesaran, kemudian perlipatan dengan besaran pemendekan ~6 cm atau ~8%.



Gambar 7.8. Visualisasi skematik 3D memberikan pemahaman kinematik deformasi dalam perspektif keruangan. Pensesaran diawali dengan terbentuknya rekahan (a), kemudian bergeser paralel terhadap perlapisan bagian bawah (flat), dan bergerak ke atas memotong perlapisan membentuk ramp (b). Blok hangingwall dan sesar terlihat jelas semakin terangkat dan berputar berlawanan arah jarum jam karena terlipat pada fase akhir deformasi sebelum tersingkap ke permukaan akibat erosi dan denudasi (c).



Gambar 7.9. Lapisan batupasir telah mengalami kontraksi ~8% akibat tektonik kompresif. Ilustrasi ini merupakan teknik sederhana untuk estimasi pemendekan lapisan batuan akibat tegasan kompresional.

Remark

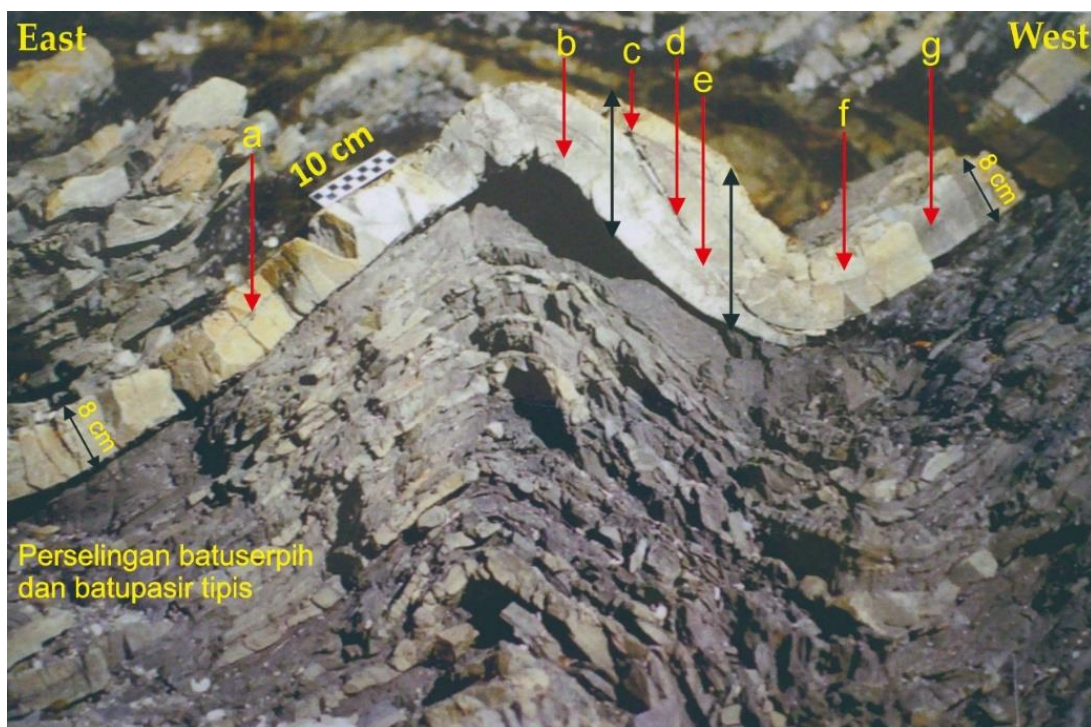
- ✦ Incipient fault developed on the onset of compressive stress.
- ✦ Thrust fault moved along the top of black shale (invisible as covered by sediments of the reworked rocks), subsequently migrated upwards as a ramp fault.
- ✦ Ramping thrust generated an anticline in the hangingwall.
- ✦ As compression proceeded, the sandstone bed folded, including hangingwall, footwall, and thrust fault, thus a pair of hangingwall anticline-syncline and footwall syncline generated.
- ✦ Such a structural phenomenon appears to occur in a larger scale at a ramping thrust fault in the Flats Stone Band dolostone (Ramsay, 1992).

7.2.2.2. Antiklin Ramp Independen Segmen Barat

Pada Gambar 7.10 diperlihatkan singkapan unit batupasir dengan ketebalan sekitar 8 cm berada di atas serpih berselang-seling batupasir tipis. Singkapan ini merupakan kemenerusan di sektor barat lapisan batupasir yang ditunjukkan pada Gambar 7.2. Batuan di bawah batupasir yang didominasi oleh serpih telah mengalami deformasi

dengan cara melipat, meskipun dijumpai juga sesar-sesar minor pada lapisan batupasir tipis, sedangkan lapisan atas telah terdeformasi dengan cara tersesarkan dan terlipat. Konfigurasi struktur tersebut mencerminkan adanya keterkaitan dalam mekanisme pensesaran dan perlipatan (*fault-related fold mechanism*).

Pada sesi pembelajaran kali ini mahasiswa dikondisikan untuk membuat kelompok diskusi kelas yang terdiri dari 4-5 orang. Diskusi difokuskan pada rekognisi, interpretasi dan deskripsi struktur yang terekam oleh unit serpih dan batupasir yang menumpang di atasnya. Gambar 7.10 merupakan singkapan struktur tektonik untuk didiskusikan dan disusun skenario mengenai progres deformasi rumpunan batuan di lokasi tersebut.



Gambar 7.10. Singkapan batupasir menindih serpih abu-abu gelap berselang-seling dengan batupasir tipis telah terdeformasi. Identifikasi deformasi tektonik dimulai dengan mengisi notasi a-g dengan nama-nama elemen struktur yang terekam oleh unit batuan.

Class Discussion

- + A group of 4 up to 5 students ought to analyze structures shown in Figure 8.10, starting from recognition, interpretation (use Figure 8.11 for digitation), and eventually description.*
- + The class discussion proceeds to evaluate a structural model displaying faulting-related-folding mechanism shown in Figure 8.12.*
- + Using Figure 8.13 and 8.14, students have to understand the way of sequence responding to tectonic forces and restate orally the scenario of kinematical development of deformation.*

Rekognisi

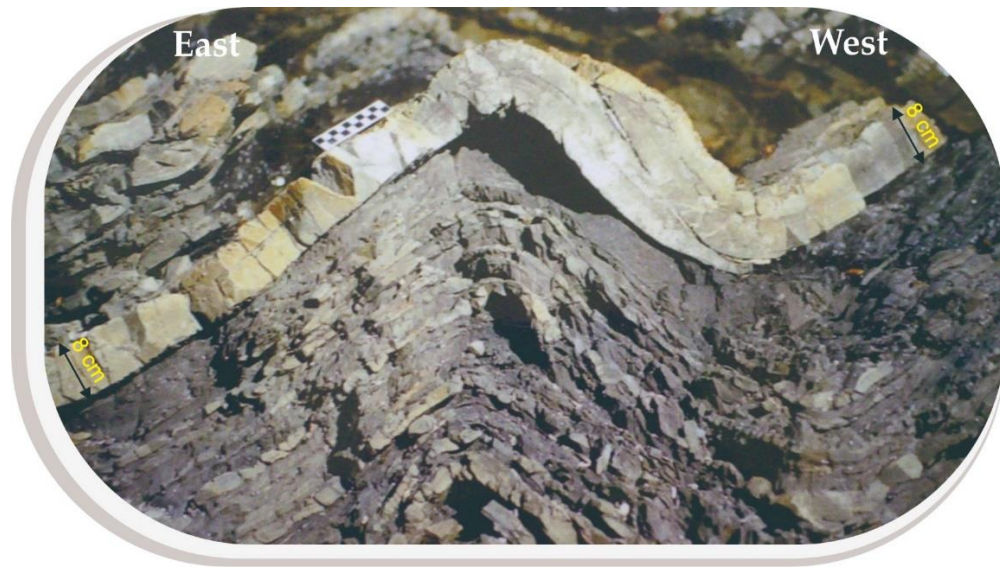
Pada tahap ini, mahasiswa diajarkan untuk mengenali elemen-elemen struktur yang ditunjukkan dengan tanda panah merah dengan notasi a-g di Gambar 7.10. Pengenalan komponen struktur pada singkapan di sini dapat dilakukan dengan cara yang telah diajarkan sebelumnya untuk singkapan-2, karena unit batupasir di sini merupakan kemenerusan di sektor barat lapisan yang diperlihatkan pada Gambar 7.2. Rekognisi dilakukan juga untuk sikuen serpih dan batupasir tipis yang melandasi unit batupasir.

Interpretasi

Setelah menyelesaikan tahap rekognisi, mahasiswa dapat meneruskan interpretasi dengan mendigitasi Gambar 7.11 dalam rangka memvisualisasikan konfigurasi struktur, sehingga terlihat jelas hubungan antar komponen pada lapisan batuan. Selanjutnya, deskripsi geometri dan elemen struktur dibuat berdasarkan pada hasil digitasi singkapan batuan. Pada kesempatan ini mahasiswa bisa merujuk ke visualisasi yang diberikan dalam materi ajar ini, tetapi diwajibkan untuk merekonstruksi sendiri agar bisa belajar sambil berlatih membuat konfigurasi struktur dari singkapan batuan.

Remark

- + Learning by doing is so far a better method in transferring the knowledge, and be always worth it.*
- + Herein, the teaching materials are designed to allow students to have the opportunity on doing some practical work in a class room.*



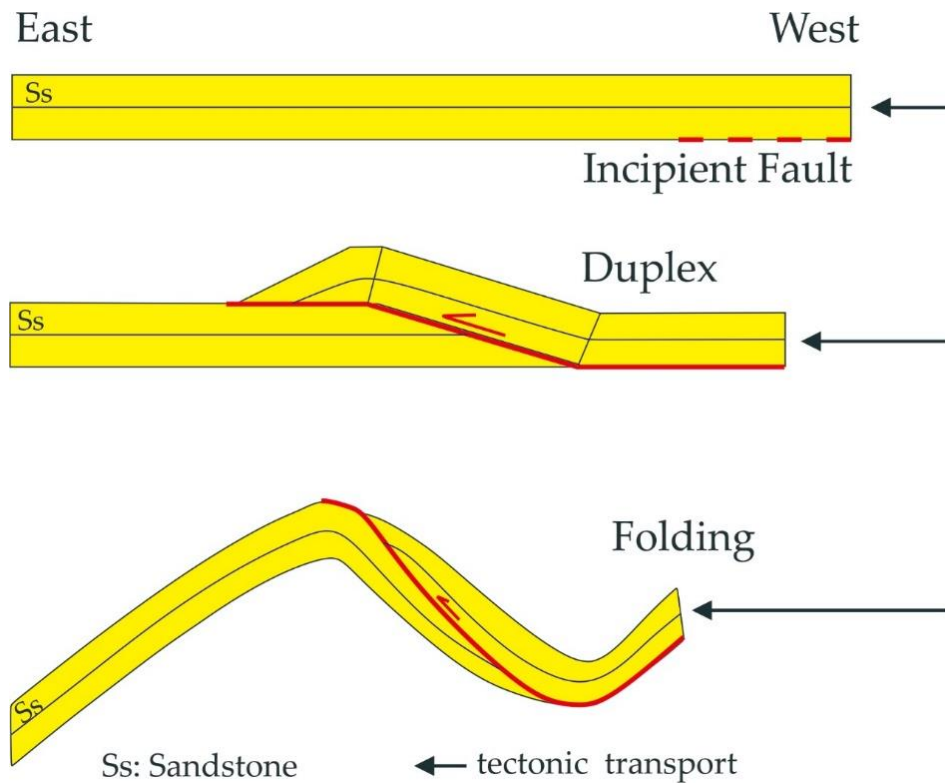
Gambar 7.11. Singkapan lapisan batupasir dilandasi oleh sikuen serpih abu-abu gelap berselang-seling dengan batupasir tipis. Fotograf ini digunakan untuk membuat ilustrasi skematik berdasarkan hasil pengenalan elemen-elemen struktur sebagaimana telah dicontohkan sebelumnya.

Rekonstruksi

Pada Gambar 7.12 diperlihatkan rekonstruksi skematik untuk menjelaskan mekanisme deformasi. Perkembangan struktur diawali dengan terbentuknya detasemen (*incipient fault*) di atas lapisan serpih pada saat batuan mengalami kompresi. Selanjutnya, pensesaran berkembang di sepanjang unit inkompeten, dan bergerak ke atas memotong lapisan batupasir, serta membentuk *ramp anticline* pada *hangingwall*. Sebagaimana telah disampaikan di atas bahwa struktur ini berada pada kemenerusan ke arah barat dari unit batupasir yang ditunjukkan di Gambar 7.2, dan merupakan salah satu *independent ramp anticline* dari dupleks yang berkembang pada perlapisan tersebut.

Konfigurasi struktur pada singkapan mengindikasikan bahwa sesar naik mengalami perlipatan, dan elevasi antiklin *hangingwall* semakin tinggi. Fenomena itu mengimplikasikan kompresi masih berlanjut dan mengaktifkan struktur yang sudah terbentuk. Di fase akhir deformasi, gaya tektonik kompresional membentuk sinklin *hangingwall* dan juga sinklin *footwall*. Ramsay (1992) menyatakan bahwa deformasi

footwall dimungkinkan terjadi jika efek gravitasi kecil dan dilandasi oleh batuan lunak atau plastis.



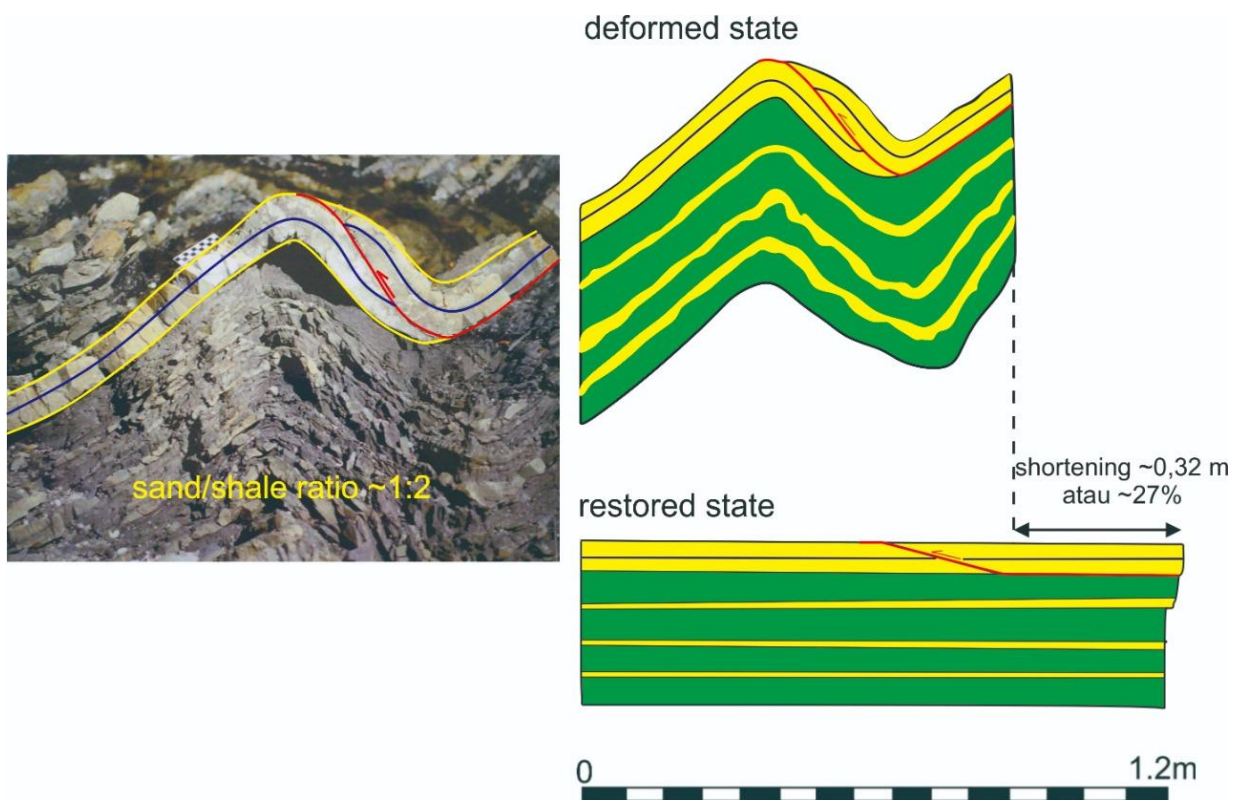
Gambar 7.12. Model skematik memberikan ilustrasi mekanisme deformasi tektonik kompresional membentuk dupleks dalam wujud antiklin *ramp* independen pada lapisan batupasir, kemudian struktur tersebut terdeformasi lebih lanjut karena episode kompresi masih berlanjut dan mengakibatkan sesar naik terlipat serta antiklin-sinklin *hangingwall* semakin terangkat.

Restorasi

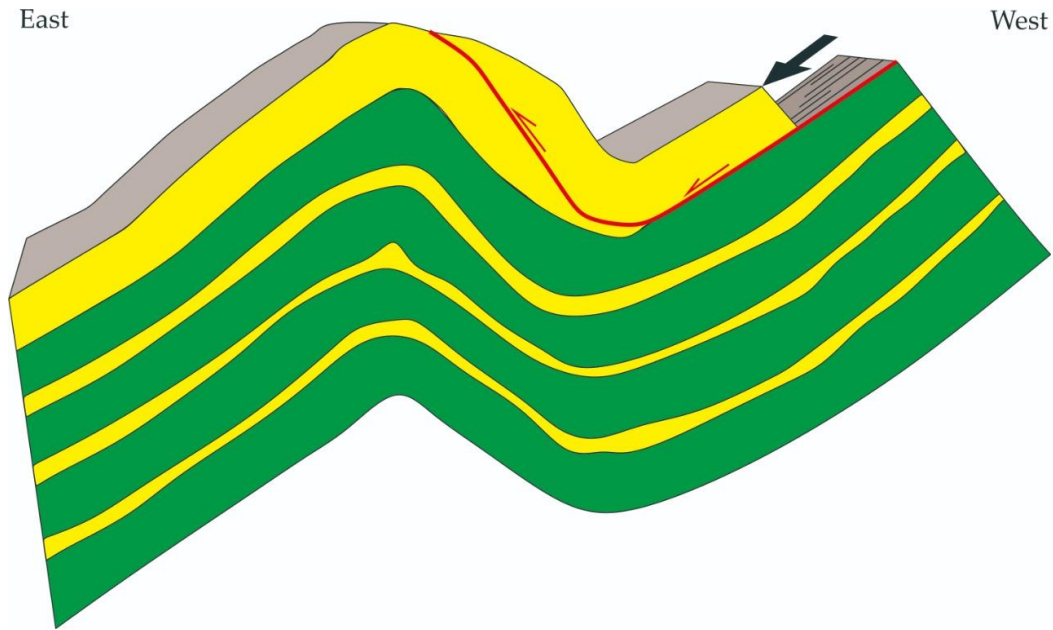
Gambar 7.13 memperlihatkan rekonstruksi struktur dalam dua keadaan, yaitu terdeformasi (*deformed state*) dan restorasi (*restored state*). Berdasarkan kedua model tersebut, besaran pemendekan minimum dari sikuen batuan dapat diestimasikan sebesar ~0,32 m atau ~27%. Diagram skematik ini menunjukkan lapisan kompeten batupasir memendek melalui pensesaran di awal deformasi, kemudian perlipatan di akhir periode kompresi, sedangkan unit shale dengan perselingan batupasir tipis mengalami kontraksi dengan cara melipat (*ductile fashion*), meskipun dijumpai beberapa sesar minor di dalam

struktur lipatan. Gambar 7.14 merupakan ilustrasi 3D untuk memvisualisaikan struktur dalam dimensi keruangan, sehingga lebih mudah bagi mahasiswa untuk memahami geometri singkapan dan mekanisme deformasi.

Pada sesi perkuliahan ini mahasiswa diminta menggunakan program aplikasi untuk merekonstruksi diagram kinematik perkembangan deformasi, mulai dari fase awal hingga akhir sebelum struktur tersingkap ke permukaan akibat erosi dan denudasi sikuen penutup atau *overburden*.



Gambar 7.13. Penampang deformasi dan restorasi sikuen batupasir dan serpih memperlihatkan estimasi kontraksi sekitar ~27%. Nilai kontraksi ini jauh lebih besar dari pada pemendekan yang membentuk antiklin di segmen timur (~8%), dan perbedaan ini terlihat juga dari amplifikasi antiklin di sektor barat jauh lebih besar dari pada di bagian timur. Fenomena ini mengimplikasikan bahwa tegangan kompresional pada fase akhir sebagian besar terkonsentrasi untuk mengangkat struktur di blok barat.



Gambar 7.14. Model diagramatik 3D mengilustrasikan kinematika deformasi plastis sikuen serpih berselang-seling dengan batupasir tipis membentuk lipatan dengan ketebalan maksimum berada pada *hinge*. Lipatan ini mengalami amplifikasi dan meninggikan struktur *hangingwall* pada fase akhir deformasi

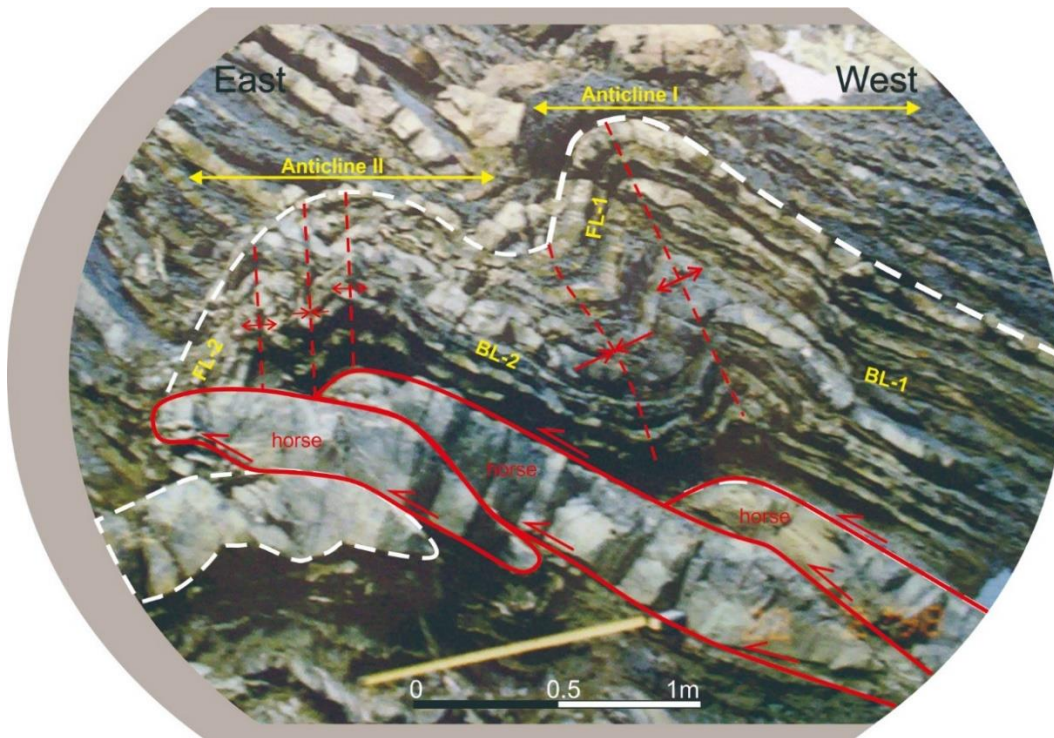
Exercise

- ✚ Use figure 7.10 to identify all structural elements (a-g).
- ✚ Use figure 7.11 to digitalize structural configuration on the basis of all identified elements.
- ✚ Use figure 7.12 to elaborate the development of structuring or deformation.
- ✚ Use figure 7.13 to explore further the observed structure.
- ✚ Again, students are encouraged to visualize the kinematic development of structure in both 2D and 3D versions using a computer-aided application program.
- ✚ Write a short essay explaining what you have learned from the outcropping rock successions.

7.2.3. Singkapan-3 *Triple Dupleks* dan Lipatan Propagasi

Pada Gambar 7.15 diperlihatkan singkapan sikuen batuan terdeformasi oleh tegasan kompresional yang menghasilkan *west over east vergent structure*. Unit bawah berupa lapisan batupasir mengalami deformasi getas dan membentuk struktur *triple* dupleks dengan tiga *horse* yang saling tumpang tindih sebagian, dan sesar naik atap membentuk antiform dan sinform. Sesar atap dan sesar lantai dihubungkan oleh sesar *ramp* landai dengan kemiringan $\sim 27^{\circ}$ - 30° . Teori mengenai pembentukan *duplex* telah disampaikan oleh Tanner (1989, 1992). Menurutnya, struktur ini terbentuk setelah material sedimen

mengalami litifikasi, selanjutnya batuan berlapis mengalami pergeseran satu sama lain selama pelipatan (model *flexural slip fold*). Sedangkan rumpunan batuan atas berupa serpih dan lapisan batupasir tipis berubah dari planar menjadi lipatan akibat deformasi plastis. Struktur pada rumpunan serpih dikontrol oleh geometri dupleks, dimana antiklin berkembang di atas antiform dupleks dan sinklin terbentuk di atas sinform dupleks. Model ini menegaskan bahwa perkembangan struktur lipatan pada umumnya dikontrol oleh geometri *strain* yang melandasinya, dalam hal ini sesar naik.



Gambar 7.15. Singkapan batuan dengan dua tipe deformasi berbeda, unit batupasir membentuk *triple* dupleks dengan beberapa *horse*, dan sikuen serpih membentuk lipatan propagasi di sepanjang sesar atap dupleks; FL-1 *forelimb* antiklin I, BL-1 *backlimb* antiklin I, FL-2 *forelimb* antiklin II, dan BL-2 *backlimb* antiklin II.

Struktur rumpunan batuan secara keseluruhan merupakan lipatan propagasi yang terdiri dari dua antiklin *hangingwall* (di sini disebut antiklin I di sektor barat, dan antiklin II di bagian timur), dan keduanya dipisahkan oleh sinklin. Struktur yang terbentuk pada sikuen ini memiliki karakteristik geometri serupa dengan kebanyakan *fault-propagation fold* di berbagai pegunungan lipatan, yaitu asimetri dengan sayap belakang memiliki ketebalan konstan, lebih panjang, dan semakin menebal ke arah *hinge* (tebal maksimum di area lengkungan lipatan), sedangkan sayap depan lebih tipis, lebih

pendek, dan berotasi ke arah pergerakan sesar yang melandasinya (Alonso dan Teixell, 1992).

Pada pembahasan materi kuliah kali ini mahasiswa diberi tugas (*assignment*) yang diawali dengan membentuk grup diskusi untuk menelaah lebih detil struktur geologi pada singkapan tersebut, termasuk membuat komparasi yang mencakup kesamaan dan perbedaan antara antiklin I dan antiklin II dengan melihat karakteristik sayap untuk setiap antiklin (diamati dan diukur ketebalan dan kemiringan sayap, serta ketinggian struktur). Fenomena yang menarik pada singkapan ini yaitu antiklin I lebih tinggi dari pada antiklin II, padahal antiklin II dilandasi oleh *horse* dupleks dengan elevasi lebih tinggi dari pada struktur yang melandasi antiklin I. Oleh karena itu, pengamatan struktur lipatan minor yang berkembang di sayap depan antiklin II sangat krusial, karena kehadiran seri antiklin-sinklin di area itu dapat menjelaskan perbedaan ketinggian profil antiklin I dan antiklin II. Dalam konteks ini, progres tegasan kompresional yang bertanggungjawab atas perkembangan struktur lipatan di atas dupleks perlu dijelaskan oleh mahasiswa.

Assignment

A group of 4-5 students ought to discuss the structures by:

- ✚ Digitizing the exposed structures from a given photograph (Figure 7.15).*
- ✚ Observing the type of deformation involving the underlying sandstone unit and the overlying layers, subsequently identifying the resulted structures on each sequence.*
- ✚ Exploring in further details the hangingwall anticlines, in particular the thickness and length of each limb of the anticlines, as well as the elevation of each anticline, then making a comparison on every single structural component. In this step, it is crucial to observe the occurrence of a series of anticline-syncline within the forelimb of anticline II, as they provide a conceptual explanation for the different profiles between anticline I and II.*
- ✚ Classifying each fold on the basis of interlimb angles and axial plane angles.*
- ✚ Constructing either a 2D or 3D schematic diagram to illustrate the kinematic development of deformation.*
- ✚ Write a short essay describing the evolution of structuring.*

Selain itu, mahasiswa diminta untuk membuat klasifikasi masing-masing lipatan berdasarkan sudut antar sayap dan kemiringan bidang sumbu antiklin. Tahap selanjutnya, mahasiswa merekonstruksi diagram skematik 2D atau 3D untuk menjelaskan perkembangan kinematika deformasi batuan, dan yang terakhir menyusun skenario dalam bentuk esai yang menjelaskan progres deformasi dari awal hingga akhir

episode kompresional sebelum struktur tersingkap ke permukaan oleh erosi dan denudasi.

7.2.4. Singkapan-4 Sinklin dan Sesar Naik Landai

Struktur yang dibahas dalam pembelajaran berikutnya yaitu sinklin dengan ukuran cukup besar untuk skala singkapan (Gambar 7.16). Deformasi plastis sikuen batuan kemungkinan terjadi melalui mekanisme pelengkungan lipatan sederhana (*simple buckle fold*), tetapi bagian dalam struktur mengandung sejumlah sesar naik landai yang bergeser dari barat ke timur, sehingga terbentuk lipatan propagasi. Lipatan dibentuk oleh rumpunan batuan yang terdiri dari lapisan batupasir dengan ketebalan bervariasi dan unit serpih berselingan batupasir tipis.

Observasi singkapan difokuskan pada unit batupasir tebal dan lapisan A dan B. Bentuk lengkungan sinklin pada batupasir tebal terlihat membulat, tetapi ke arah inti struktur berubah semakin menyudut, terutama pada unit batuan yang lebih tipis, dan perubahan bentuk *hinge* mencirikan lipatan paralel dengan ketebalan lapisan konstan di sepanjang struktur. Pada bagian dalam sinklin terlihat lapisan A dan B mengalami deformasi getas oleh sesar naik landai ($<15-20^\circ$), sehingga terjadi pengulangan urutan stratigrafi dari kedua lapisan tersebut.

Remark

Parallel fold

- ✚ *Folded surface parallel each other during folding*
- ✚ *Thickness perpendicular to the bed (true thickness) constant around the fold*
- ✚ *Shape of curves must change with depth (e.g. angular to rounded hinges)*

Tight fold

- ✚ *Interlimb angle between $30^\circ-0^\circ$*

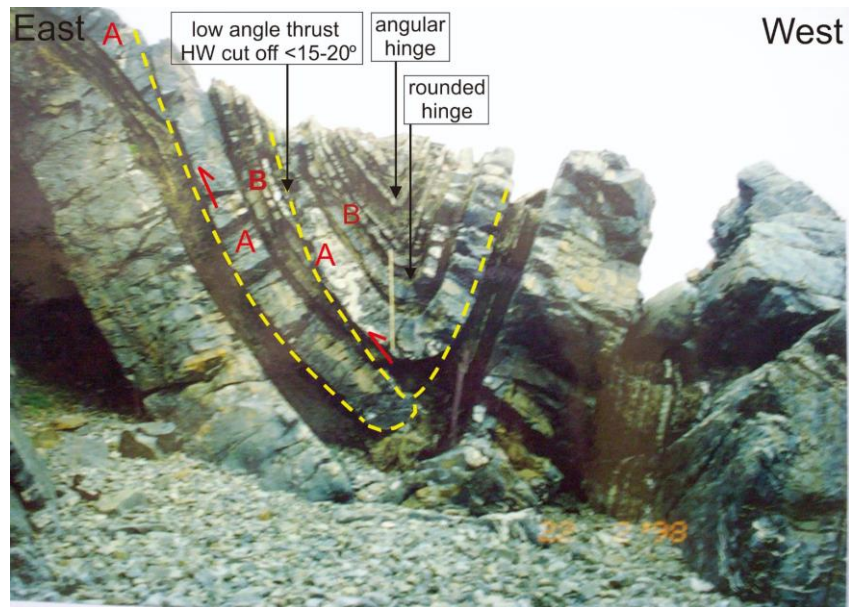
Upright fold

- ✚ *Angle of axial surface $90^\circ-80^\circ$*

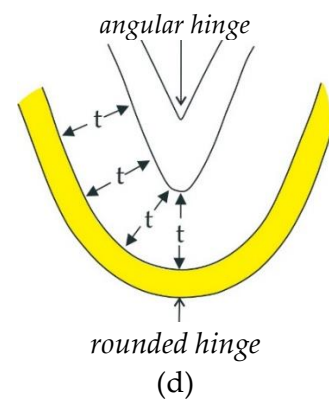
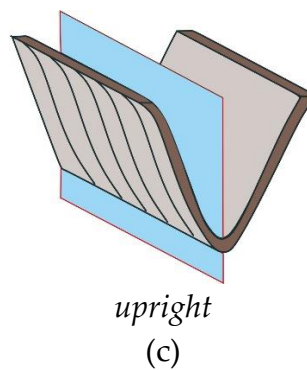
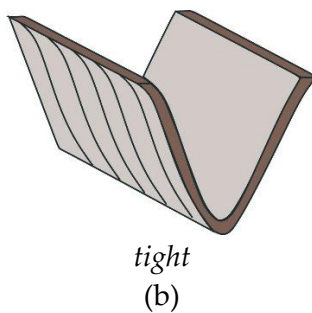
Exercise

A group of 4-5 students ought to discuss and to do some exercise by:

- ✚ *Constructing the diagrammatic configuration to show the kinematic development of a low angle thrust fault showing west over east vergence and cutting off units A and B.*
- ✚ *Drawing the schematic illustration, either in 2D or 3D fashion, which allows students to generate a scenario on the evolution of deformation.*
- ✚ *Classifying the folding structure on the basis of an interlimb angle and the fold axis angle.*
- ✚ *Writing a short essay describing what you have done in the exercise.*



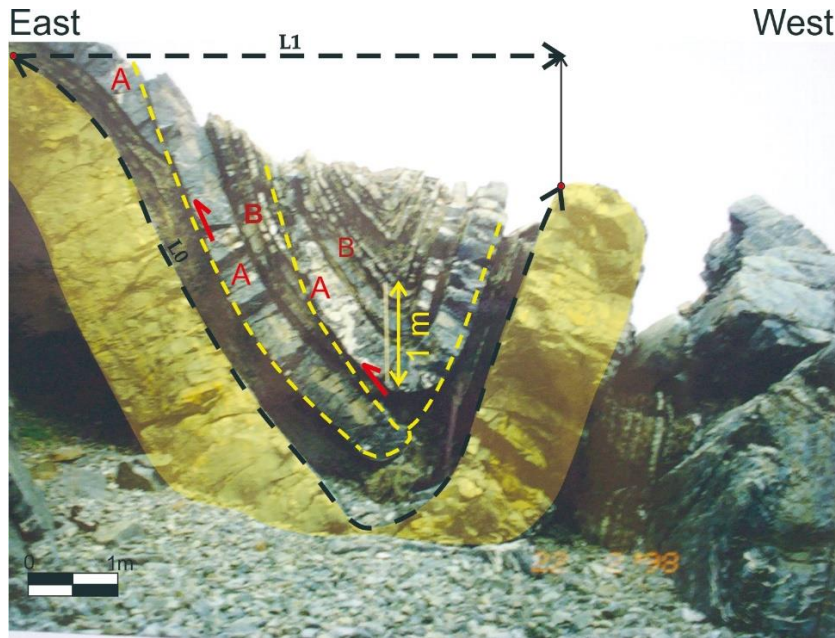
(a)



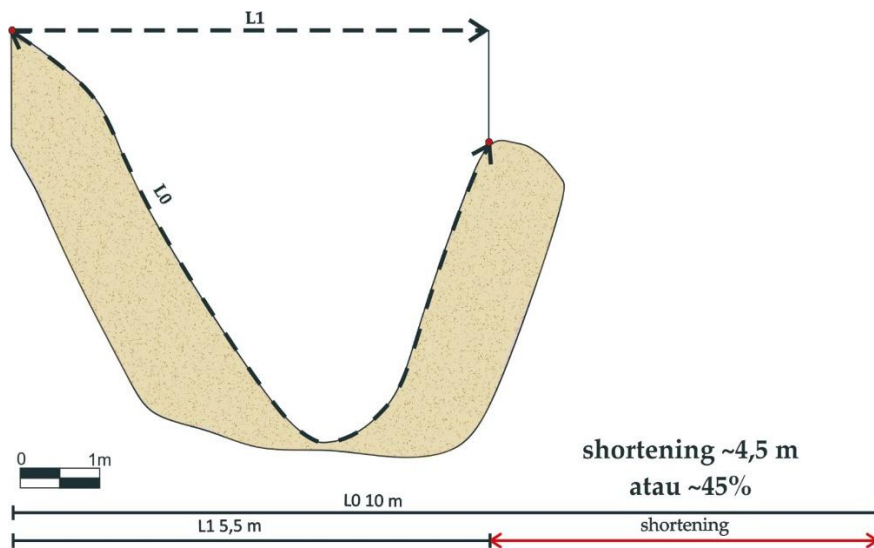
Gambar 7.16. Singkapan sinklin memperlihatkan lapisan batupasir tebal dengan kedudukan $\sim 64^\circ$ di sayap timur dan $\sim 71^\circ$ di sayap barat (a). Sudut antar sayap terukur $\sim 5^\circ$, sehingga lipatan merupakan sinklin sempit (*tight syncline*) (b), sedangkan kemiringan bidang sumbu lipatan $\sim 87^\circ$, maka struktur dikategorikan sebagai sinklin tegak (*upright syncline*) (c). Sinform ini dapat juga digolongkan sebagai lipatan paralel (*parallel fold*), karena bentuk lengkungan (*hinge*) berubah dari menyudut menjadi membundar di kedalaman, dan ketebalan lapisan “t” konstan sepanjang lapisan terlipat (d). Pada bagian inti sinklin terlihat sejumlah sesar naik landai memotong lapisan A dan B, sehingga ada pengulangan urutan sikuen unit batuan, dan terbentuk lipatan propagasi. Tiga diagram (b)-(d) memberikan profil sederhana sebagai ilustrasi diagramatik untuk klasifikasi lipatan sesuai data struktur pada singkapan.

Eksplorasi lebih lanjut dilakukan dengan merestorasi struktur ke kondisi pra-deformasi, sehingga diperoleh nilai besaran kontraksi unit batuan akibat kompresi. Pada Gambar 7.17 dan Gambar 7.18 diperlihatkan teknik restorasi secara sederhana, yaitu panjang lengkungan sinklin didigitasi, kemudian garis lengkung ditarik horizontal,

selanjutnya dengan menggunakan skala yang terlihat pada fotograf (meteran ~1 m) diperoleh panjang terukur lapisan sebelum deformasi (L_0) ~10 m. Sedangkan L_1 atau panjang unit terdeformasi merupakan jarak lateral struktur yang dihitung dengan menetapkan titik referensi pada kedua sayap sinklin dengan jarak terukur ~5,5 m. Thus, hasil restorasi terhadap lapisan batupasir tebal diperoleh estimasi pemendekan minimal sekitar 4,5 m atau ~45%.



Gambar 7.17. Singkapan batupasir dengan ketebalan bervariasi dan berselang-seling dengan *mudstone* dan *sandstone* telah mengalami deformasi tipe plastis membentuk sinform.



Gambar 7.18. Estimasi kontraksi sikuen batuan diukur dari lapisan batupasir diperoleh nilai minimal ~4,5 m atau ~45%.

Exercise

- ✚ The exercise is for a group that consists of 4-5 students
- ✚ Students ought to reconstruct a schematic model showing the development of structuring from the commencement of compressive stresses up to the present configuration, particularly for sandstone beds A and B, which have been repeatedly thrust at low angle (dashed yellow lines), hence the generation of fault-propagation fold.

7.2.5. Singkapan 5 Antiklin Asimetri dan Deformasi Internal

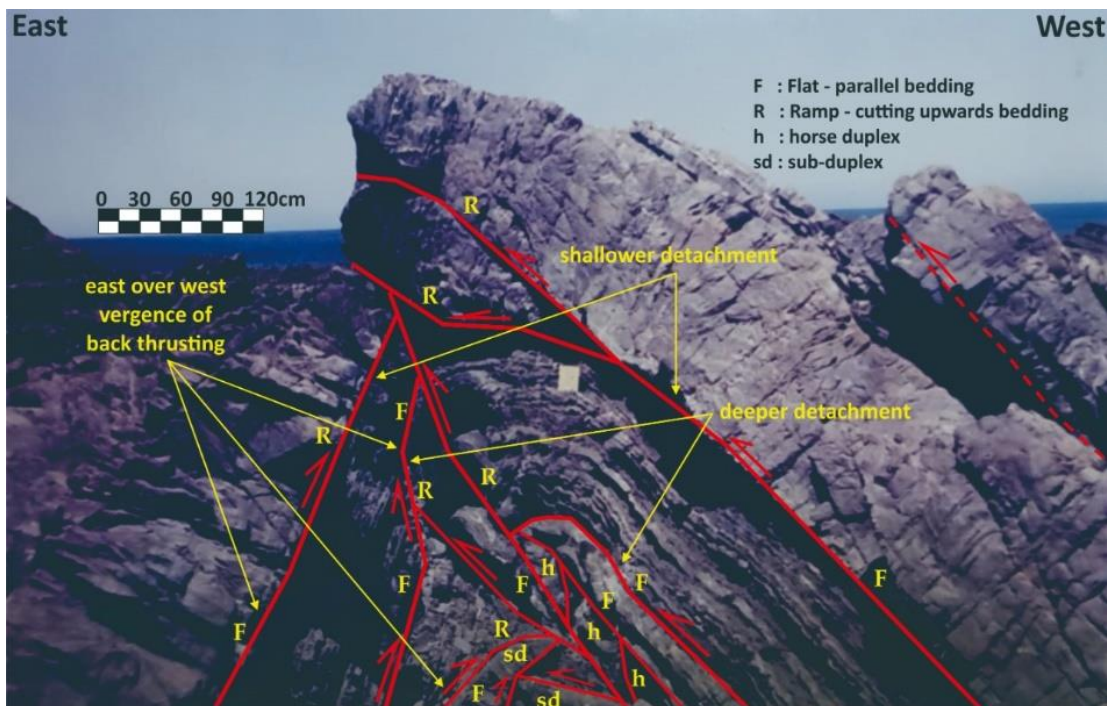
Di lokasi ini dijumpai unit batuan kompeten berupa batupasir tebal yang secara stratigrafi berada di atas rumpunan batuan plastis yang terdiri dari batulempung berselang-seling dengan batupasir tipis (Gambar 7.19). Sikuen batuan telah mengalami deformasi kompresional, dan unit kompeten membentuk lipatan konsentris. Menurut Dahlstrom (1990), lipatan konsentris terbentuk apabila inti struktur merupakan sikuen batuan plastis.

Berdasarkan geometri struktur, lipatan merupakan antiklin menggantung atau *overtuned anticline* dengan kemiringan *forelimb* $>65^\circ$ dan *backlimb* $\sim 45^\circ$. Lapisan batupasir tebal terlipat dan mengalami penebalan akibat pensesaran naik pada area *hinge*. Sesar-sesar naik bergerak ke arah timur atau *west over east vergence of thrust faulting*. Pensesaran diawali dari detasemen alas (*basal detachment*) di batas atas sikuen batulempung, kemudian naik memotong unit batupasir dengan sudut landai (*low angle ramping thrust*). Sedangkan di internal struktur atau bagian inti antiklin, sikuen batuan mengalami deformasi yang lebih kompleks oleh sesar-sesar naik minor yang mengarah ke timur dan juga ke barat (*west over east vergence* dan *east over west vergence of thrusting*). Pensesaran internal telah membentuk struktur *triple duplex* dan *sub duplex* pada lapisan batupasir tipis, dan sesar terlihat memotong sayap depan antiklin di sisi timur.

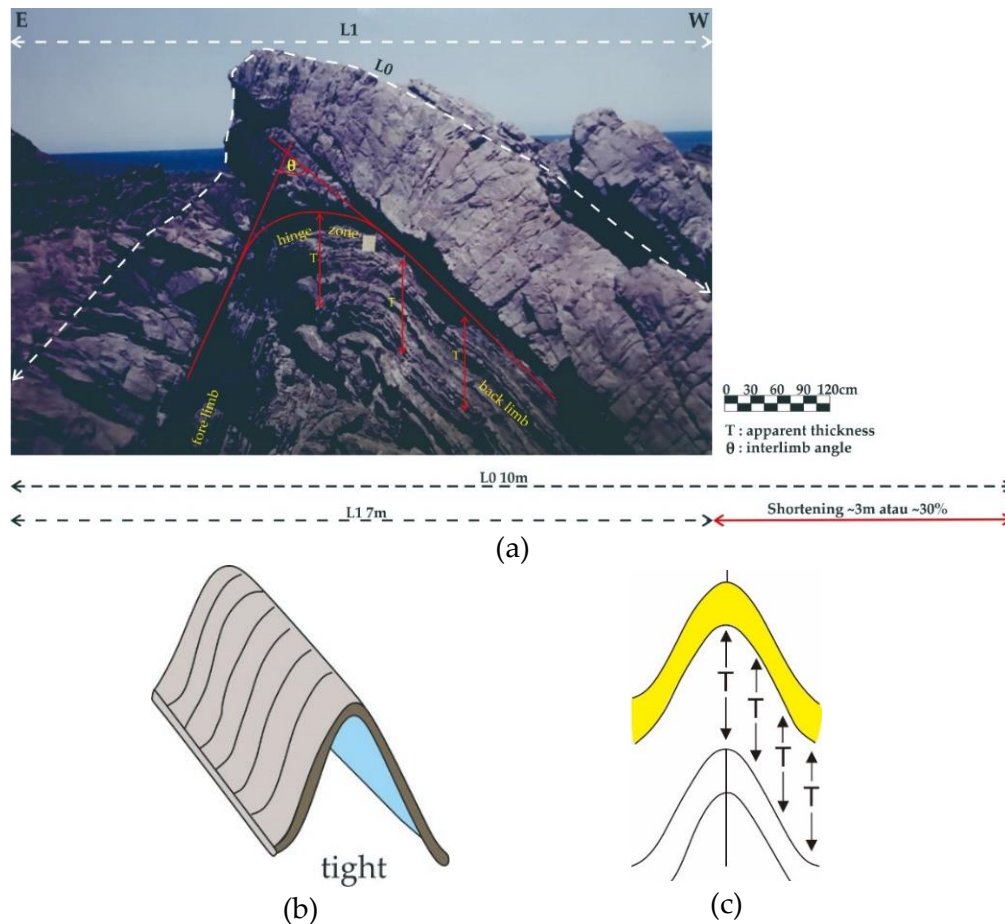
Pada singkapan ini terlihat bahwa lipatan *hangingwall* merepresentasikan deformasi plastis, mempunyai ketebalan stratigrafi konstan di sepanjang struktur, dan puncak lengkungan lipatan terlihat memutar menuju sesar yang melandasinya. Berdasarkan parameter ketebalan perlapasan di bagian sayap dan di zona *hinge*, struktur dapat diklasifikasikan sebagai lipatan paralel. Hasil pengukuran sudut antar sayap pada lipatan batulempung dengan perselingan batupasir $\sim 21^\circ$, sehingga struktur tersebut dikategorikan sebagai *tight anticline* (Gambar 7.20). Pensesaran yang mengontrol *strain* unit *ductile* berasal dari detasemen yang berkembang di sepanjang lapisan bawah (*deeper detachment*). Oleh karena itu, di lokasi ini dijumpai ada dua detasemen utama yang

mengakomodasikan rezim tektonik kompresional melalui pensesaran naik dan perlipatan, yaitu detasemen yang lebih dangkal di sepanjang lapisan atas batulempung dan yang lebih dalam berada di lapisan bawah unit batuan ini.

Konfigurasi arsitektur singkapan secara keseluruhan mengindikasikan bahwa sikuen batuan telah mengalami kontraksi atau pemendekan (*shortening*) secara signifikan melalui perlipatan dan pensesaran naik. Struktur berkembang dari barat ke timur, meskipun dijumpai beberapa sesar di sayap timur lipatan bergerak ke arah berlawanan (*back thrusting*). Singkapan batuan telah merekam dua tipe deformasi, yaitu getas pada batuan kompeten batupasir, dan plastis pada unit inkompeten batulempung. Amplifikasi struktur terlihat dikontrol oleh pensesaran naik dengan lintasan *flat-ramp geometry* yang berkembang dari detasemen atas dan bawah sikuen batulempung. Pada Gambar 7.20 diperlihatkan juga ilustrasi perhitungan kontraksi sikuen batuan, dan berdasarkan skala yang ada diperoleh nilai $L_0 = 10\text{ m}$, $L_1 = 7\text{ m}$, dan $\Delta L = 3\text{ m}$ atau $\sim 30\%$.



Gambar 7.19. Singkapan struktur hasil deformasi plastis dan getas membentuk antiklin. Unit batupasir tebal tersesarkan oleh detasemen lebih dangkal (*shallower detachment*) yang berkembang di sepanjang kontak antara lapisan ini dan batulempung yang melandasi. Sedangkan rumpunan batuan di bawah batupasir mengalami deformasi lebih kompleks, dan struktur-struktur minor seperti dupleks dan sub-dupleks terlihat di bagian inti antiklin. Perlipatan di lokasi ini diinterpretasikan berkembang pada fase awal kompresi, dan pada episode tektonik kompresional selanjutnya struktur tersegmentasi oleh pensesaran yang membentuk geometri *flat-ramp*.



Gambar 7.20. Antiklin dibentuk oleh unit batupasir tebal dan rumpunan batulempung. Sikuen batuan mengalami kontraksi sebesar ~3 m atau ~30% (a); struktur ini dapat diklasifikasikan sebagai *tight anticline* atas dasar besaran sudut antar sayap ~21° (b), dan sebagai lipatan paralel atas dasar konsistensi ketebalan stratigrafi dari sayap hingga area *hinge* (c).

Remark

- ✦ A rock section of thick sandstone underlain by the intercalated mudstones-thin sandstone layers has been deformed to form a concentric fold at the onset of compressional stresses. The compression processed and resulted in two detachments at the top and the bottom of mudstone-sandstone column.
- ✦ As the tectonic event progressed, the shallower detachment developed along the top unit, subsequently ramp up through the thick sandstone in both directions, west over east vergence and east over west vergence (back thrusting), whilst the deeper detachment moved along the bottom layer, then breached out the forelimb of the antiform at its core. Hence, the movement of both basal detachments from deeper to shallower stratigraphic levels formed a flat-ramp trajectory. At the deepest section of the structure, brittle deformation broke up the thin competent beds, resulted in triple duplex and sub-duplex. Formation of the antiformal structure in this area caused the rock sequence to shorten at least ~30%.
- ✦ More importantly, the exposed structure at this particular location allows us to better understand on how the mechanical stratigraphy of rock sequences determines the deformational strain among the beds, the thicker competent unit tends to deform relatively simpler than the thinner multilayers.

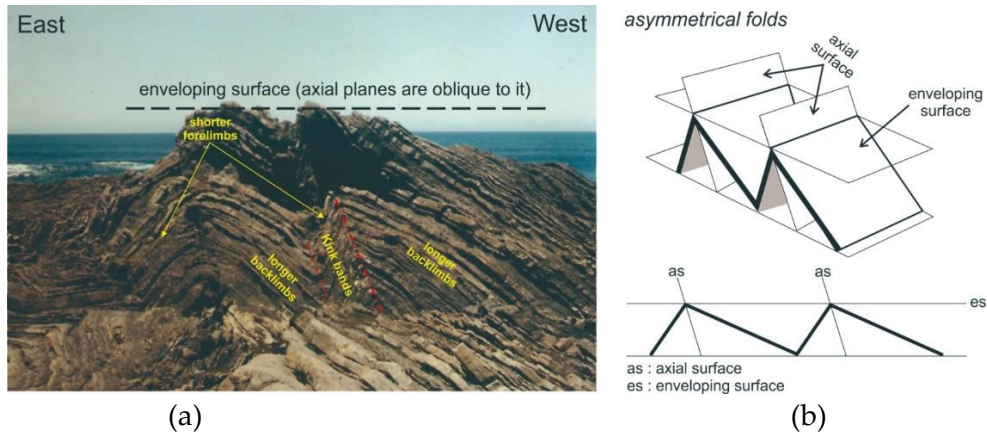
7.2.6. Singkapan 6 Lipatan *Kink Band* dan *Chevron*

Singkapan lain yang dijumpai di Cape Liptrap yaitu dua tipe seri antiklin-sinklin yang keduanya memiliki bentuk lengkungan meruncing. Sikuen batuan yang membentuk struktur ini terdiri dari perselingan lapisan tipis-tipis batulempung dan batupasir. Deformasi rumpunan batuan berkembang dari barat ke timur atau *west over east vergent structure*. Klasifikasi struktur yang dilakukan di sini tidak hanya mendasarkan pada bentuk *hinge* yang angular, tetapi juga dideskripsikan dari panjang sayap lipatan, dan korelasi antara *axial surface* dan *enveloping surface*. Singkapan yang ditampilkan pada Gambar 7.21 memiliki sayap depan sangat sempit, pendek, dan miring lebih curam, sedangkan sayap belakang lebih panjang dengan kemiringan relatif lebih landai, dan bidang sumbu lipatan menyerong terhadap *enveloping surface*. Karakteristik ini menunjukkan bahwa jenis struktur adalah lipatan *kink* asimetri atau *asymmetrical kink fold*. Studi kasus melalui penelitian lapangan yang mempelajari perkembangan *kink bands* telah disampaikan oleh Aller dkk. (2020).

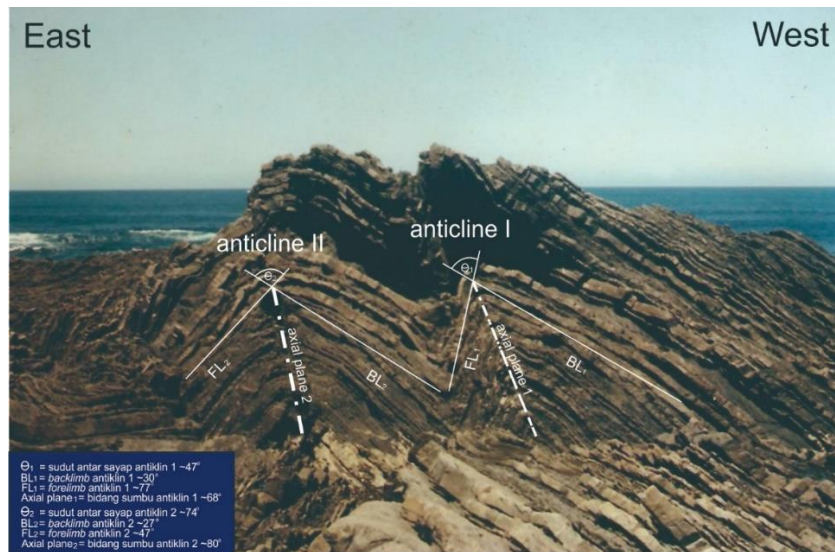
Eksplorasi lebih detail dalam pembelajaran ini dilakukan dengan membagi struktur menjadi antiklin I dan antiklin II. Selanjutnya masing-masing antiklin diklasifikasi berdasarkan sudut antar sayap dan kemiringan bidang sumbu (Gambar 7.22). Hasil pengukuran terhadap komponen struktur antiklin I diperoleh kemiringan sayap belakang $\sim 30^\circ$ dan sayap depan $\sim 77^\circ$, serta sudut antar sayap $\sim 47^\circ$, dan parameter ini mengindikasikan jenis antiklin tertutup. Sedangkan kemiringan bidang sumbu lipatan terukur sebesar $\sim 68^\circ$, dan data ini menandakan tipe antiklin miring curam.

Hasil pengukuran elemen-elemen struktur dari antiklin II diperoleh kemiringan sayap belakang $\sim 27^\circ$ dan sayap depan $\sim 47^\circ$, serta sudut antar sayap $\sim 74^\circ$, dan data ini mencirikan jenis antiklin terbuka. Kemiringan bidang sumbu terukur sekitar 80° , sehingga lipatan merupakan antiklin miring curam. Berdasarkan hasil pengukuran di kedua antiklin dapat dideskripsikan bahwa struktur tersebut merupakan lipatan *kink band* asimetri berupa antiklin miring curam dengan derajat keketatan (*tightness*) mulai dari terbuka hingga tertutup.

Singkapan struktur yang ditunjukkan pada Gambar 7.23 memperlihatkan lipatan zig-zag dengan sayap relatif sama panjang, dan bidang sumbu struktur tegak lurus terhadap *enveloping surface*. Komponen struktur tersebut mencirikan lipatan *kink* simetri atau *symmetrical kink fold*, atau lebih umum dikenal sebagai *chevron*.



Gambar 7.21. Singkapan batulempung berselang-seling batupasir membentuk lipatan kink asimetri dengan sayap depan terlihat lebih curam atau *overturned* (a); diagram skematik untuk mengilustrasikan model struktur (b).

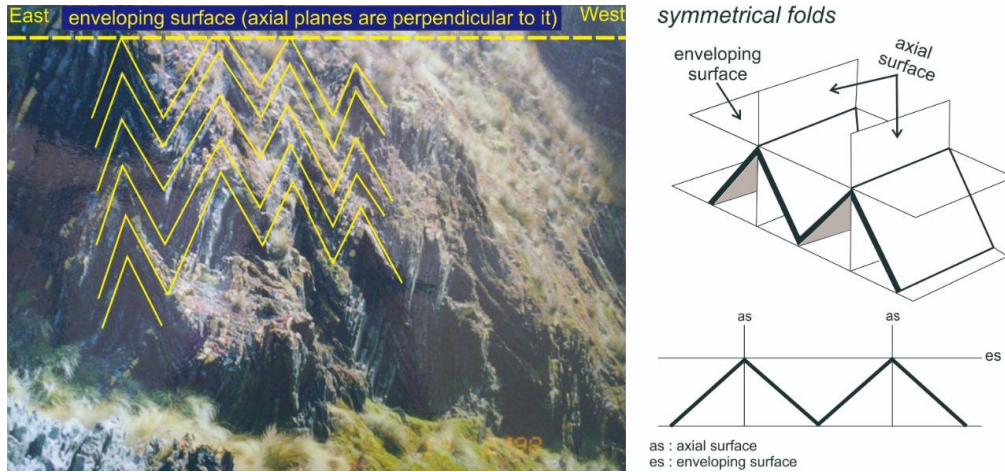


Gambar 7.22. Pengukuran komponen struktur untuk membuat klasifikasi masing-masing antiklin yang menyusun *kink band fold*. Hasil pengukuran terhadap parameter struktur dapat disimpulkan bahwa lipatan ini merupakan *kink band* asimetri yang dibentuk oleh antiklin miring curam dengan derajat keterbukaan ataupun keketatan mulai dari terbuka sampai tertutup.

Remark

Symmetry, asymmetry

- ✚ *Enveloping surface: imaginary surface just tangent to wave strain in a particular folded surface.*
- ✚ *If axial planes are perpendicular to enveloping surface, structures are symmetrical folds, e.g. symmetrical kink folds (sometimes called chevron folds or zig-zag folds).*
- ✚ *If axial planes are oblique to enveloping surface, structures are asymmetrical folds (used to all appropriate folds, not just kinks).*

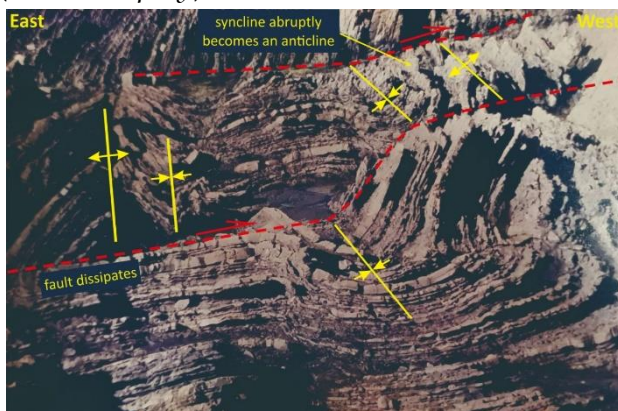


Gambar 7.23. Singkapan batuan dengan rekaman struktur berupa lipatan *kink* simetri atau *chevron* (a); ilustrasi model struktur secara diagramatik (b).

7.2.7. Singkapan 7 Lipatan Disharmonik

Pada sesi pembelajaran kali ini disampaikan singkapan struktur yang terbentuk pada sikuen batulempung dengan perselingan batupasir tipis. Rumpunan batuan terletak di atas blok *hangingwall* batupasir tebal yang telah mengalami detasemen. Sikuen ini memperlihatkan serangkaian lipatan disharmonik, yaitu struktur lipatan dengan beragam bentuk (*impersistent*) (Gambar 7.24). Selain itu, beberapa tipe deformasi dapat diidentifikasi di area ini, antara lain:

- Deformasi plastis batulempung di atas permukaan bidang detasemen.
- *Dextral tear fault* mengakibatkan *offset* pasangan antiklin-sinklin, sehingga struktur sinform mendadak berubah menjadi antiform.
- Pensesaran *dextral* kemungkinan merupakan percabangan dari struktur imbrikasi (*horsetail splay*).



Gambar 7.24. Singkapan struktur memperlihatkan sejumlah lipatan dengan beragam bentuk (*disharmonic folds*) yang melibatkan rumpunan batulempung dengan perselingan batupasir tipis.

Bab 8

SINGKAPAN STRUKTUR REGION SUMATERA

8.1. Sumatera Selatan dan Bengkulu Selatan

Pada Bab ini disampaikan sejumlah singkapan struktur tektonik yang berasal dari beberapa lokasi di Sumatera Selatan dan Bengkulu Selatan. Merujuk dari berbagai sumber yang dipublikasikan, deformasi sikuen batuan yang disajikan di sini secara umum terjadi pada Plio-Plistosen atau diperkirakan pada era orogenik Neogen Akhir (Simanjuntak dan Barber, 1996). Sebagaimana telah diajarkan sebelumnya, pengamatan struktur diawali dari rekognisi dan interpretasi lapangan, kemudian dilanjutkan dengan mengkonstruksi model kinematika untuk menjelaskan mekanisme deformasi tektonik. Rekognisi, termasuk pengukuran elemen-elemen struktur, dilakukan di lokasi singkapan untuk mendapatkan paket data lapangan, dan interpretasi yang bersifat sementara juga dibuat melalui penggambaran sejumlah sketsa. Sedangkan analisa dan konstruksi model arsitektur untuk menjelaskan mekanisme deformasi dilaksanakan di studio dengan mengintegrasikan konsep-konsep fundamental dari hasil studi terdahulu.

Dalam proses pembelajaran di sini, mahasiswa diberikan penjelasan mengenai jenis struktur melalui foto singkapan yang disandingkan dengan model ideal dari referensi. Kemudian, mahasiswa diajarkan cara memahami model diagramatik melalui konfigurasi 2D, dan bilamana memungkinkan disajikan dalam bentuk 3D untuk memberikan pemahaman lebih detil tentang evolusi deformasi atau perkembangan struktur tektonik yang dipelajari. Perlu ditegaskan di sini bahwa interpretasi data struktur selalu membuka ruang yang luas untuk berbagai alternatif, oleh sebab itu buku ini tidak mengklaim kajian deformasi yang digunakan sebagai materi pembelajaran

Geologi Struktur merupakan satu-satunya sumber rujukan, khususnya untuk evaluasi kinematik perkembangan struktur secara umum. Penamaan unit batuan, misal Cs_1 , Cs_2 , Ss_1 , Ss_2 , dan Ss_3 bersifat lokal atau hanya untuk singkapan yang sedang dibahas saja, karena pembelajaran struktur tektonik di sini terbatas pada skala singkapan dan belum sampai pada tahap evaluasi geologi regional.

Remark

- ✚ *It is important to note that interpretation of the available data always open a wide range of alternatives, thus it seems unfair to consider that the structural evaluation presented in this book is a unique solution for the existing field problem as expressed by the outcropping rock unit.*
- ✚ *The second, third, or even more alternatives may generate better explanation on the structure as well as the kinematic development of deformation recorded by the studied rock sequence.*
- ✚ *In this sense, students are encouraged to be brave enough to reconstruct the alternative interpretation relying on the given data.*

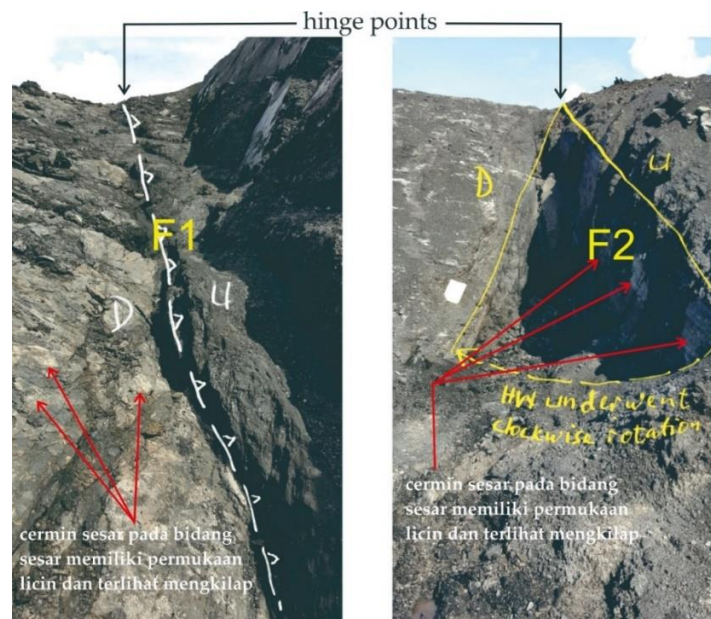
8.2. Singkapan Banjarsari

Pada Gambar 8.1 – Gambar 8.6 diperlihatkan sepasang sesar (F1 dan F2) pada lapisan batubara (*coal seam*) yang tersingkap di Desa Banjarsari, Kecamatan Merapi Timur, Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan. Dalam buku ajar ini, sepasang struktur tektonik tersebut dinamakan dengan terminologi baru yang diambil dari istilah kedokteran yaitu “**kembar dampit**” (kembar berbeda jenis kelamin). Dalam konteks sesar sebagai kembar dampit yaitu sepasang sesar terdiri dari satu sesar turun (F2) dan satunya lagi sesar naik (F1), tetapi keduanya sama-sama memiliki bentuk menyerupai lensa (Gambar 8.1), dan “terlahir” dari “ibu kandung” Formasi Muara Enim yang berusia Miosen Akhir, serta dilahirkan melalui satu mekanisme pensesaran *hinge* dengan pergerakan memutar (*rotational slip*) searah jarum jam. Namun demikian, sesar kembar dampit tersebut telah tiada, karena aktifitas penambangan telah mengakhiri eksistensi mereka di lapangan, dan kemungkinan telah pula mengirimkan bongkahan “si kembar dampit” ke tungku pembakaran Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Oleh karena itu, penulis merasa sangat beruntung karena pernah menjumpai dan memperoleh ilmu

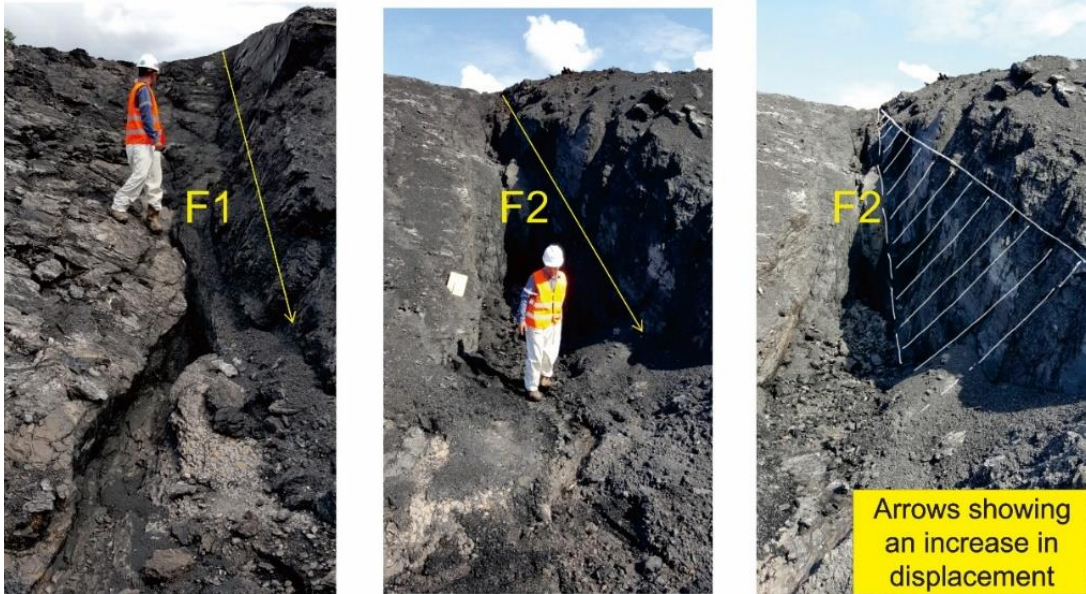
pengetahuan dari keduanya untuk dibagikan kepada mahasiswa melalui karya ilmiah ini, dan kegiatan perkuliahan Geologi Struktur.



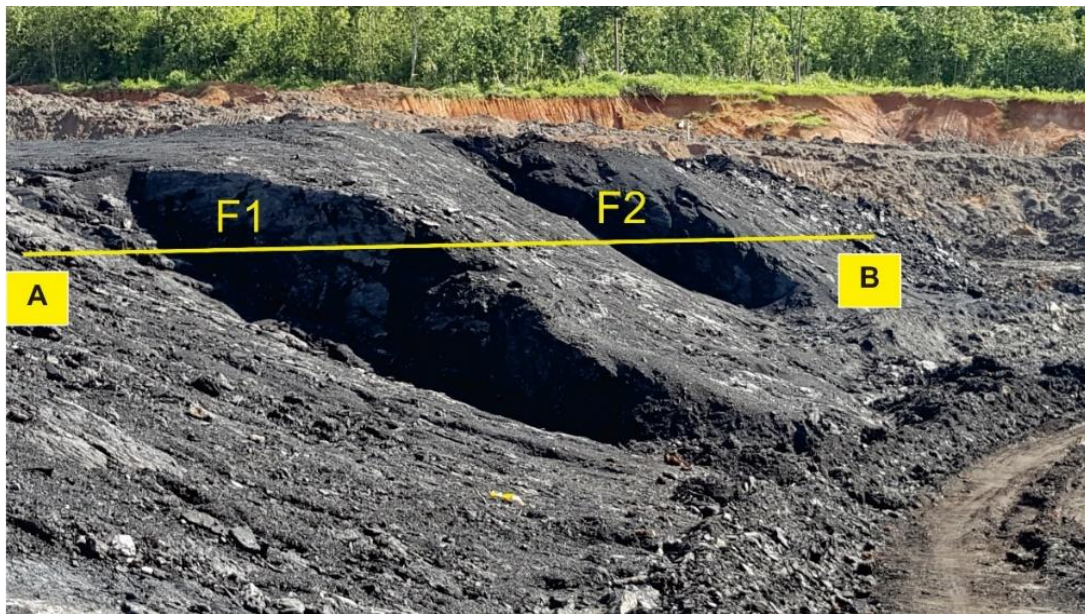
Gambar 8.1. Singkapan sesar hinge dengan pergerakan memutar searah jarum jam (*clockwise rotational slip*) yang dijumpai di lapisan batubara. F1 memperlihatkan gerak relatif naik, dan F2 menunjukkan gerak relatif turun, tetapi bentuk morfologi keduanya sama-sama menyerupai lensa.



Gambar 8.2. Singkapan sesar F1 dan F2 dilihat dari elevasi bawah menghadap ke arah titik *hinge* di atas, dimana displasemen nol. Diperlihatkan juga sketsa lapangan untuk membuat interpretasi sementara berdasarkan elemen-elemen struktur yang terlihat dan terukur di singkapan, termasuk bidang sesar naik dengan kemiringan 25° (F1) dan sesar turun dengan kemiringan 80° (F2), cermin sesar, *offset* lapisan batubara, dan displasemen sepanjang *strike* sesar.

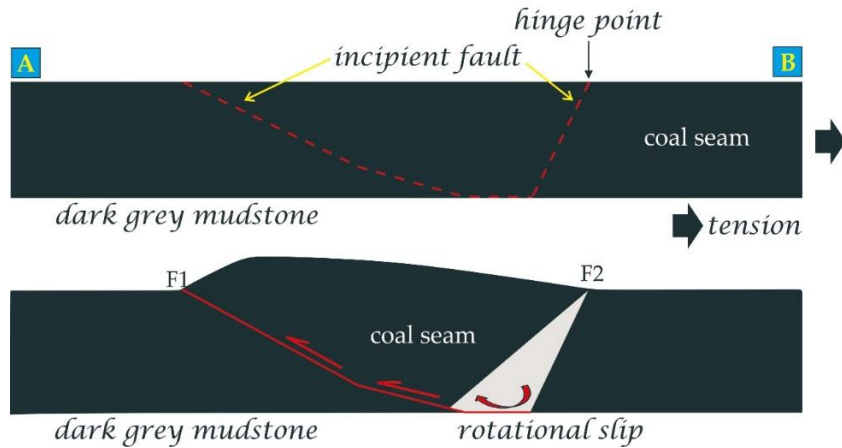


Gambar 8.3. Sketsa lapangan untuk mengilustrasikan konfigurasi displasemen sesar F1 dan F2. Kedua sesar memperlihatkan displasemen dari titik *hinge* nol ke arah *strike* semakin besar.

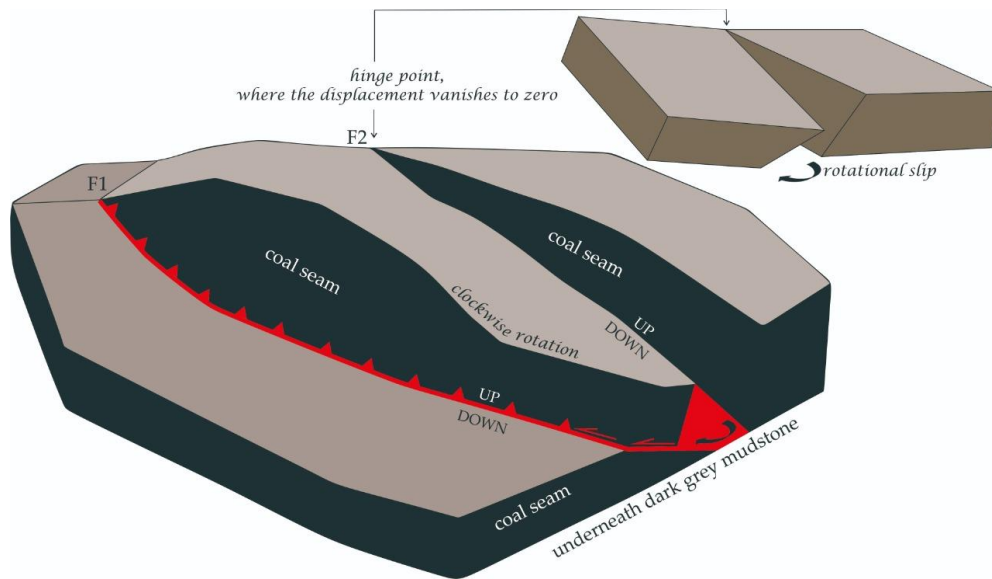


Gambar 8.4. Penetapan garis lintasan yang memotong *strike* sesar untuk mengkonstruksi sayatan 2D (Gambar 8.5) dan konfigurasi 3D (Gambar 8.6), sehingga mekanisme pensesaran yang “melahirkan” sesar kembar dampit dapat tergambarkan secara lebih jelas.

schematic structural cross-section within coal seam



Gambar 8.5. Penampang melintang A-B mengilustrasikan mekanisme pensesaran F1 dan F2 pada lapisan batubara secara 2D. F2 merupakan pensesaran turun berputar (*rotational slip faulting*) searah jarum jam karena gaya tensi (*tension*) yang terjadi seiring dengan penurunan tekanan batuan penutup (*releasing overburden pressure*). Perputaran *hangingwall* F2 diakomodasikan oleh lapisan *mudstone* abu-abu gelap yang berperan sebagai bidang geser, dimana pergeseran ini menimbulkan pensesaran naik F1, dan kedua sesar tersebut merupakan *hinge faults*.



Gambar 8.6. Konfigurasi 3D mengilustrasikan mekanisme pensesaran lapisan batubara yang menghasilkan sesar kembar dampit, dimana blok tengah yang merupakan *hangingwall* F1 dan F2 mengalami rotasi searah jarum jam dan bergerak naik melalui pensesaran *ramp* (*ramping thrust*). Blok diagram di kanan atas digunakan untuk memberikan ilustrasi sederhana model *hinge fault* dengan pergeseran berputar (*rotational slip*).

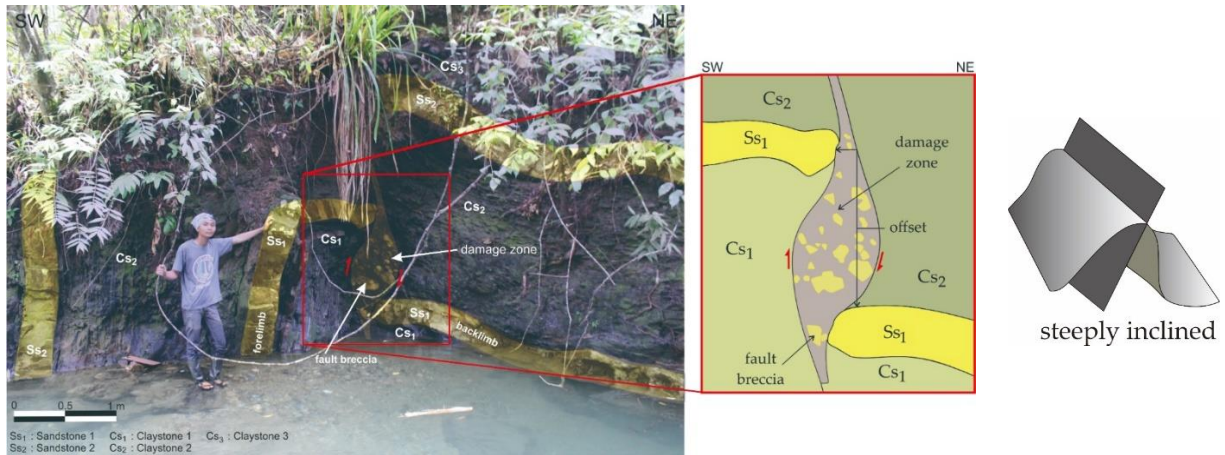
8.3. Singkapan Pulau Timun

Di lokasi ini dijumpai singkapan struktur berupa lipatan yang berasosiasi dengan sesar naik. Batuan yang terdeformasi merupakan batulempung dengan perselingan batupasir gampingan dari Formasi Seblat yang berumur Miosen Awal (Amin dkk., 1993; Yulihanto dkk., 1995). Gambar 8.7 memperlihatkan singkapan struktur di sungai Pino Pentaring yang mengalir ke wilayah Tanjung Sakti, Sumatera Selatan. Sikuen batuan mengalami deformasi plastis dan getas yang terlihat jelas di lapisan batupasir. Rekognisi lapangan dilakukan tidak hanya di lokasi singkapan tetapi juga ke area yang lebih luas, sehingga diperoleh data sebaran struktur dalam skala yang relatif lebih besar. Cakupan area pengamatan sangat krusial, terutama dalam rangka mengkonstruksi konfigurasi arsitektur struktur.

Elemen-elemen struktur yang diukur termasuk diantaranya adalah bidang perlapisan batupasir di kedua sayap lipatan, dan *offset* perlapisan batupasir serta ketebalannya. Selain itu, pengamatan lapangan difokuskan pada zona hancuran yang menyebar diantara *offset* batupasir yang membentuk *backlimb* dan *forelimb* lipatan. Struktur lipatan memiliki *backlimb* dengan kemiringan relatif landai atau sekitar 15° , sedangkan *forelimb* dengan *dip* sekitar 80° .

Berdasarkan kemiringan bidang sumbu, lipatan diklasifikasikan sebagai *steeply inclined fold* atau *overturned fold*, dimana sayap depan lipatan berputar berlawanan arah jarum jam (*anticlockwise rotation*) hingga hampir vertikal. Perputaran sikuen batuan terjadi kemungkinan seiring dengan pergerakan *SW over NE vergence of back thrust fault* (Gambar 8.7). Pada gambar ini ditunjukkan juga hasil identifikasi komponen struktur di area yang merupakan kunci utama untuk mengungkapkan kehadiran sesar naik, termasuk diantaranya adalah kontak antara batuan tua dan muda, *offset* perlapisan batuan, dan zona hancuran dengan breksi sesar yang mengandung fragmen litologi

batupasir. Zona hancuran diidentifikasi batas-batas sebarannya, sehingga memudahkan dalam merekonstruksi *strike* sesar naik.

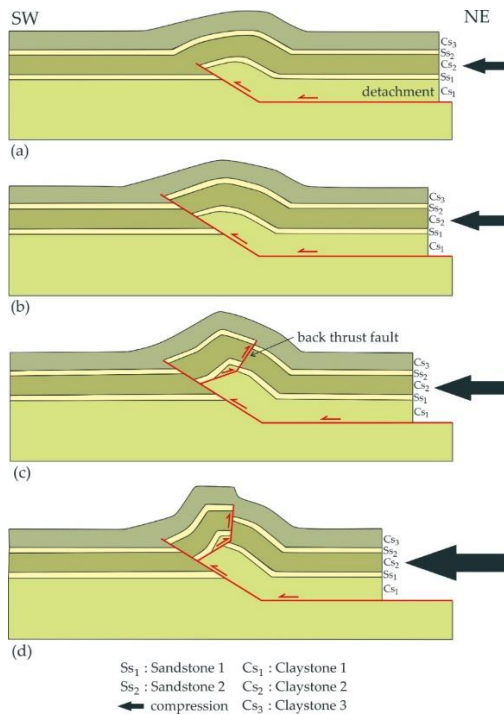


Gambar 8.7. Singkapan struktur lipatan (*steeply inclined fold* atau *overturned fold*) mengalami pensesaran naik ke arah *hinterland* (*back thrusting*) di area lengkungan (*hinge zone*). Kehadiran sesar naik di area ini diidentifikasi dari (1) kontak batuan berumur tua dan muda (Ss_1 dan Cs_1 ; Cs_1 dan Cs_2 ; Ss_1 dan Cs_2), (2) zona hancuran (*damage zone*) dengan breksi besar, dan (3) *offset* lapisan batupasir Ss_1 . Kompleks struktur ini dijumpai di sungai Pino Pentaring daerah Pulau Timun (*observer* lapangan dalam foto adalah Shofy – TG 13).

Ekspresi struktur yang terlihat di lapangan kemudian didigitasi melalui foto singkapan dalam rangka memperjelas sebaran dan geometrinya. Pada Gambar 8.7 lapisan batupasir dipertegas dengan warna kuning bergradien rendah, sehingga terlihat lebih kontras dari batulempung yang berwarna abu-abu gelap. Zona hancuran (*damage zone*) dibentuk oleh breksi sesar dengan fragmen utamanya batupasir. Pada gambar itu warna fragmen breksi sesar dipertajam untuk memperjelas sebarannya, dan area ini diinterpretasikan sebagai jejak pensesaran sikuen batuan. Berdasarkan hasil pelacakan breksi sesar terlihat dengan jelas sebarannya hampir vertikal, dan memotong lipatan di area lengkungan (*hinge zone*), sehingga lapisan batupasir *forelimb* bergeser naik hampir 1,0 m dari lapisan batupasir *backlimb*.

Gambar 8.8 merupakan konstruksi 2D untuk memperlihatkan evolusi deformasi secara kinematik yang menghasilkan konfigurasi arsitektur akhir sebelum struktur tersingkap di permukaan oleh erosi dan denudasi sikuen penutup (*overburden*). Pada

Gambar 8.9 ditunjukkan area spesifik dari model kinematik yang merepresentasikan konfigurasi arsitektur singkapan struktur di lapangan. Berdasarkan model kinematik tersebut dapat diungkapkan bahwa lipatan rebah atau *overturned anticline* lebih dikontrol oleh pensesaran *back thrust* yang mengarah ke timurlaut (*NE over SW vergent back thrust fault*). Sesar ini bertanggungjawab atas geometri akhir struktur yang dihasilkan dari episode deformasi kompresional di wilayah tersebut.



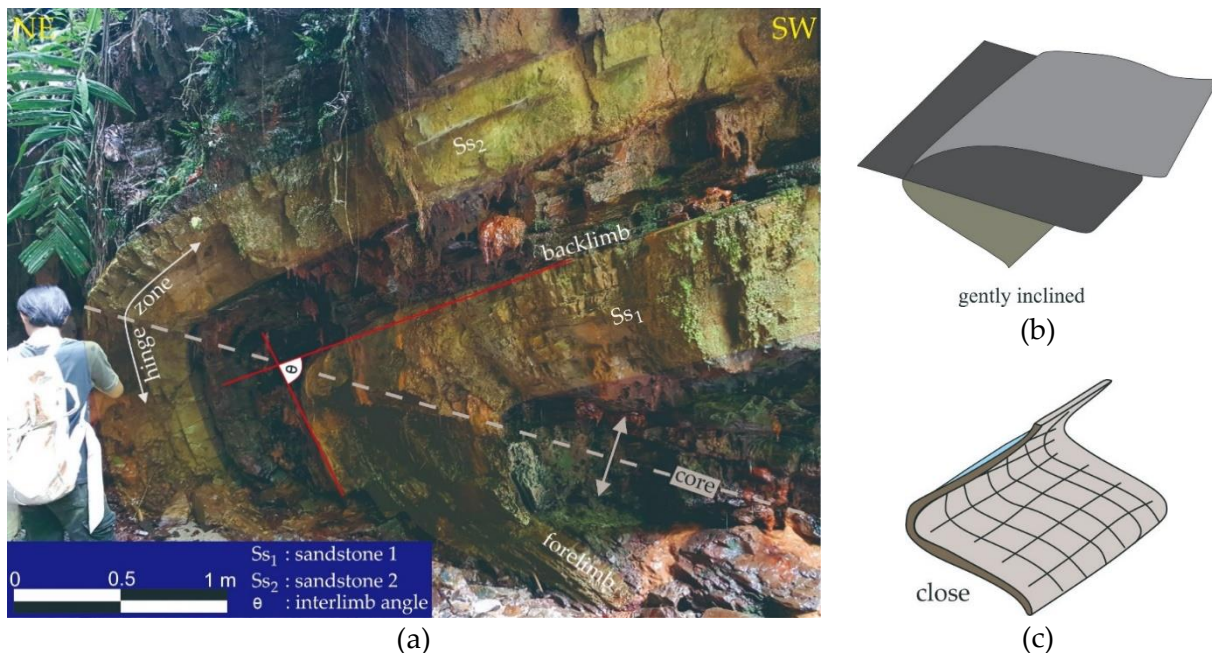
Gambar 8.8. Deformasi diawali dengan terbentuknya *detachment* pada saat terjadi kompresi (a); kemudian berkembang lipatan propagasi pada *hanging wall* seiring dengan progress *tip line* sesar dari *flat* menjadi *ramp* atau *ramping fault* (b); tektonik kompresi berlanjut dan menyebabkan elevasi struktur lipatan semakin tinggi, pada fase ini berkembang *back thrust fault* di zona *hinge* (c); sesar mengangkat sayap depan lipatan sehingga bergerak berlawanan arah jarum jam, dan sejak episode ini tektonik kompresional diakomodasikan oleh pergeseran *back thrust fault*, selanjutnya pada fase akhir deformasi kompresional sayap depan lipatan dan sesar terangkat hingga hampir vertikal (d), dan peristiwa ini merupakan fase pembentukan *strain* akhir sebelum tersingkap ke permukaan.



Gambar 8.9. Struktur di Pulau Timun dikonstruksikan dengan model skematik berdasarkan hasil interpretasi untuk mekanisme deformasi seperti yang disajikan pada Gambar 8.8.

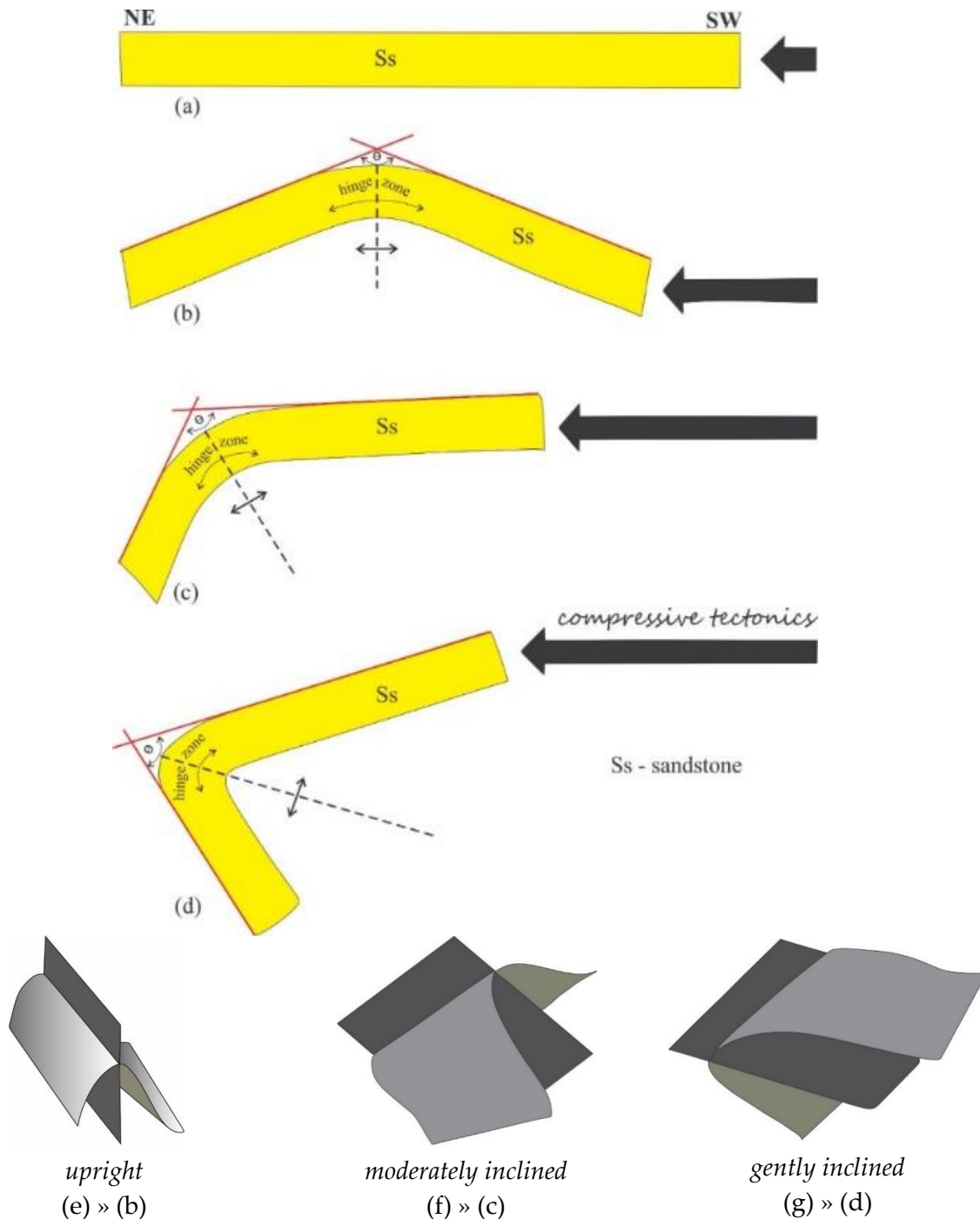
8.4. Singkapan Air Tenam

Gambar 8.10 memperlihatkan singkapan antiklin rebah yang dijumpai di sungai Manna, Desa Air Tenam, Kecamatan Ulu Manna, Kabupaten Bengkulu Selatan. Secara lokal, struktur ini terlihat tidak berasosiasi dengan pensesaran naik, oleh sebab itu deformasi plastis yang menghasilkan lipatan diinterpretasikan terjadi melalui pentahapan *flexural slip*. Namun demikian, interpretasi model kinematik yang dibuat di sini kemungkinan besar akan berubah jika data baru hasil pengamatan regional diperoleh dari daerah tersebut.



Gambar 8.10. Antiklin rebah tersingkap di sungai Manna, daerah Air Tenam (a); lipatan memiliki sudut kemiringan bidang sumbu $\sim 17^\circ$ diklasifikasikan sebagai *gently inclined anticline* atau *overturned anticline* (b); sudut antar sayap lipatan sebesar $\sim 40^\circ$ digolongkan sebagai antiklin tertutup (c).

Gambar 8.11 memberikan diagram skematik untuk menjelaskan perkembangan kinematik antiklin di lokasi singkapan. Pada diagram tersebut diperlihatkan tahap awal deformasi terjadi pada saat sikuen batuan terkena gaya kompresi (σ_1) paralel terhadap bidang perlapisan (Gambar 8.11a).



Gambar 8.11. Model kinematik struktur lipatan di daerah Pulau Timun, Tanjung Sakti, Sumatera Selatan. Ilustrasi di sini hanya menggunakan lapisan batupasir untuk merekonstruksi perkembangan deformasi plastis. Fase awal dimulai dari sikuen batuan terkena tegasan kompresional paralel terhadap bidang perlapisan (a), kemudian membentuk antiklin simetri, tegak, dan tertutup (b). Fase berikutnya pembentukan antiklin miring moderat dan tertutup (c), dan di akhir periode deformasi antiklin semakin rebah dan tertutup (d). Ilustrasi skematik untuk penyerdahanana profil lipatan diperlihatkan pada (e), (f), dan (g) dengan ekuivalensi untuk setiap diagram kinematiknya.

Pada fase berikutnya, rumpunan batuan terlipat melalui *flexural slip* dan membentuk lipatan simetri atau dikenal sebagai *symmetric stage* dengan bidang sumbu tegak atau *upright anticline* (90° - 80°), dan sudut antar sayap $\sim 45^{\circ}$ mencirikan antiklin tertutup (Gambar 8.11b). Seiring dengan progres tegasan kompresional, *flexural slip* berlanjut sehingga sayap depan dan juga bidang sumbu antiklin berputar berlawanan arah jarum jam atau dikenal sebagai fase rotasi (Gambar 8.11c). Interpretasi pada tahap ini memberikan konfigurasi bidang sumbu miring sekitar 58° dan membentuk *moderately inclined anticline*, serta sudut antar sayap $\sim 62^{\circ}$ yang mencirikan antiklin tertutup. Berdasarkan profil ini dapat dinyatakan bahwa fase rotasi awal sayap depan lipatan tidak merubah geometri struktur secara signifikan. Pada fase akhir deformasi atau *final stage*, sayap depan antiklin dan bidang sumbu semakin memutar searah dengan tegasan tektonik kompresional, sehingga mencapai konfigurasi struktur dengan profil bidang sumbu $\sim 17^{\circ}$ dan membentuk *gently inclined anticline*, serta sudut antar sayap $\sim 40^{\circ}$ yang menandakan tipe antiklin tertutup (Gambar 8.11d).

8.5. Singkapan Kayu Ajaran

Bahasan struktur berikutnya mendasarkan pada singkapan yang dijumpai di sungai Pino Poros, Desa Kayu Ajaran, Kecamatan Ulu Manna, Kabupaten Bengkulu Selatan. Sikuen batuan yang terdeformasi disusun oleh batulempung yang melandasi unit batupasir gampingan dari Formasi Seblat berumur Miosen Awal. Tektonik kompresional di wilayah ini tampaknya telah mengakibatkan deformasi rumpunan batuan dan membentuk sekumpulan struktur yang terlihat sangat kompleks. Berdasarkan pengamatan singkapan dan pengukuran lapangan terhadap komponen struktur dapat diinterpretasikan bahwa awal episode deformasi kompresional menyebabkan pensesaran naik pada unit *ductile* Cs_1 yang mengarah ke selatan. Pergerakan sesar ini membentuk kompleks struktur yang melibatkan sikuen batuan Formasi Seblat, termasuk

diantaranya (1) tripel dupleks-1, (2) lipatan propagasi, (3) lipatan *ramp*, (4) lipatan isoklin, dan (5) *antiformal stack* yang disusun oleh *horse* tripel dupleks-2 (Gambar 8.12).



Gambar 8.12. Singkapan sikuen batuan di sungai Pino Poros. Sekumpulan struktur lipatan yang dilandasi oleh *triple duplex-1* dari unit batupasir gampingan Ss₁ (a). Ilustrasi skematik merupakan model struktur yang disederhanakan (*simplified structural models*) untuk dupleks (b), lipatan propagasi (c), lipatan isoklin (d), dan *antiformal stack* (e).

Tripel dupleks-1 dibentuk oleh unit batupasir gampingan Ss₁, terdiri dari beberapa *horse* yang dibatasi oleh sesar-sesar *ramp* sebagai penghubung *roof* dan *floor thrusts*. Sesar atap dan lantai merupakan struktur mayor yang berkembang dari unit batulempung Cs₁, kemudian naik memotong stratigrafi ke sikuen atas. Pensesaran sesar atap ke arah selatan berkembang menjadi beberapa cabang sesar naik yang membentuk

struktur tripel dupleks-2 di sayap utara sinklin. Selain itu, *horse* dupleks-2 membentuk *antiformal stack*, yaitu struktur disusun oleh sekumpulan *horse* yang saling tumpang tindih satu sama lain dan menghasilkan *strain* antiform, dan konfigurasi ini dibentuk oleh *thrust splay* dengan garis ujung belakang sesar atau *trailing branch lines* saling berimpitan (McClay, 1992).

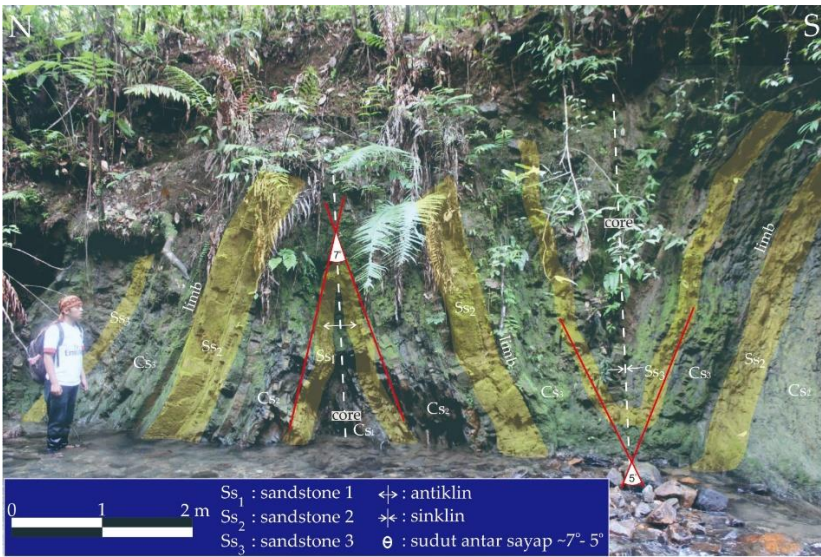
Struktur dupleks-1 terlihat melandasi deformasi *ductile* dari lapisan batupasir Ss₂. Oleh sebab itu, geometri setiap *horse* mengontrol perkembangan deformasi rumpunan batuan atas. *Horse* dupleks-1 telah mengalami pelipatan membentuk sinform, dan struktur ini melandasi sinklin dari unit batuan yang lebih muda (Ss₂). Pada sisi utara dupleks-1 berkembang lipatan propagasi dari unit batupasir gampingan Ss₁ dengan geometri mengikuti *strain* sesar mayor yang melandasi. Di atas lipatan propagasi dijumpai *ramp folds* yang terbentuk seiring dengan progres garis ujung depan (*tip line*) sesar *ramp* yang mendasari.

Dua struktur antiformal yang dipisahkan oleh sinform dijumpai bertengger di atas dupleks-1. Litologi yang membentuk deformasi ini yaitu unit batupasir Ss₂. Antiform di sektor utara merupakan antiklin isoklin dengan sayap paralel satu sama lain dan bentuk lengkungan membulat (*rounded hinge*). Lipatan ini kemungkinan berkembang seiring dengan pensesaran naik yang mengarah ke utara (*south over north vergent back thrusting*), sehingga antiklin isoklin condong ke arah pergerakan sesar. Di sisi selatan, unit batupasir membentuk antiform dengan sekumpulan *horse* dari tripel dupleks-2 berada di sayap selatan. Bentuk antiform yang diperlihatkan struktur pada dasarnya merupakan tumpukan *horse* dari dupleks-2 yang membentuk *antiformal stack*.

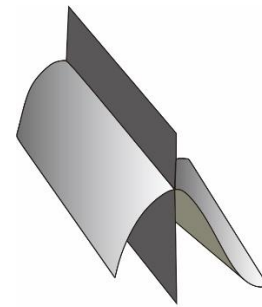
8.6. Singkapan Pino Pentaring

Pembelajaran pada sesi ini masih menggunakan singkapan struktur yang dijumpai di sungai Pino Pentaring daerah Pulau Timun, dan terletak sekitar 1 km ke arah selatan dari lokasi singkapan yang diperlihatkan pada Gambar 8.7. Hasil observasi lapangan

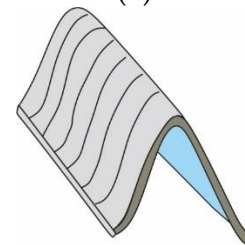
menunjukkan bahwa pasangan antiklin-sinklin dibentuk oleh sikuen batulempung berselang-seling dengan batupasir dari Formasi Seblat Miosen Awal. Unit batulempung di singkapan ini diberi notasi berturut-turut dari bawah ke atas stratigrafi sebagai Cs_1 , Cs_2 , dan Cs_3 , sedangkan lapisan batupasir yang berselingan dengan batulempung terdiri dari Ss_1 , Ss_2 , dan Ss_3 (Gambar 8.13).



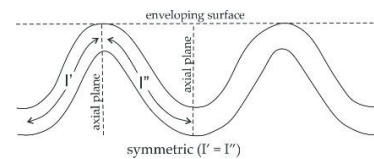
(a)



upright
(b)



tight
(c)



symmetric ($l' = l''$)
symmetric folds
(d)

Gambar 8.13. Singkapan struktur lipatan di sungai Pino Pentaring. Struktur diklasifikasikan sebagai lipatan *upright* dengan sudut bidang sumbu tegak atau sekitar 80° - 90° , dan sebagai *tight fold* dengan sudut antar sayap lipatan $\sim 7^\circ$ - 5° (a). Pada gambar ini diperlihatkan juga ilustrasi sederhana untuk menunjukkan jenis lipatan tegak (b) dan ketat (c). Selain itu, pasangan antiform-siniform tersebut dapat juga diklasifikasikan sebagai lipatan simetri, karena memiliki sayap relatif sama panjang dan bidang sumbu tegak lurus terhadap enveloping surface (d).

Pada singkapan ini tidak tampak adanya jejak pensesaran, sehingga perlipatan kemungkinan terjadi melalui mekanisme *flexural slip* akibat terkena dua tegasan kompresional dari dua arah berlawanan yang paralel terhadap bidang planar sikuen batuan. *Flexural slip* di sini lebih mencerminkan dominasi deformasi *ductile*, karena rumpunan batuan mayoritas disusun oleh batuan inkompeten batulempung. Interpretasi

ini mendasarkan pada geometri struktur yang simetri, dan lipatan memiliki sayap relatif sama panjang, serta kemiringan lapisan yang diukur dari unit batupasir S_{s2} relatif konstan, yaitu berkisar 69°-72°.

Pengukuran sudut antar sayap lipatan pada unit S_{s1} baik dari antiklin maupun sinklin menunjukkan tingkat keketatan lipatan yang tinggi (*tight* ~7°-5°). Bidang sumbu antiform dan sinform keduanya memperlihatkan kedudukan tegak (80°-90°), sehingga struktur dikategorikan sebagai lipatan tegak (*upright folds*). Pasangan antiform-sinform ini dapat juga diklasifikasi sebagai lipatan simetri, karena memiliki sayap relatif sama panjang, dan bidang sumbu tegak lurus terhadap *enveloping surface*. Berdasarkan tiga parameter tersebut struktur di lokasi ini diklasifikasi sebagai lipatan simetri yang tegak dan ketat.

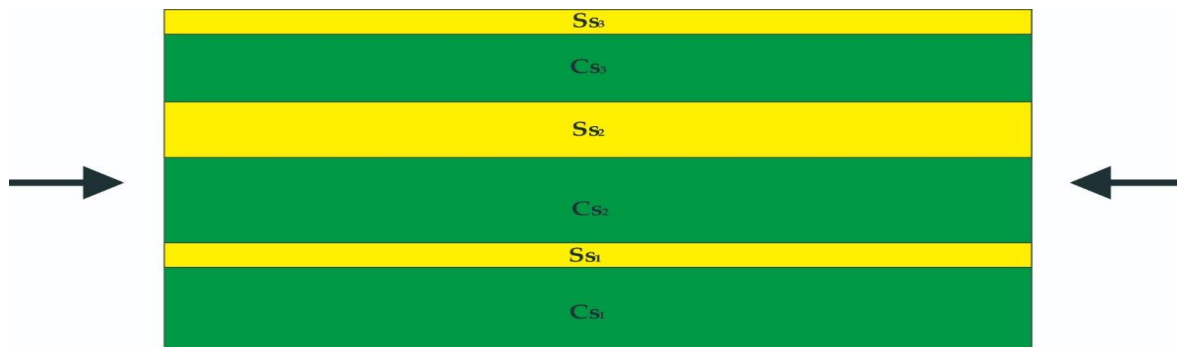
Tahap pembelajaran selanjutnya, mahasiswa diminta untuk membentuk grup diskusi yang terdiri dari 4-5 orang untuk membahas bersama mengenai model kinematika perkembangan deformasi mulai dari sikuen batuan planar hingga terbentuk konfigurasi arsitektur singkapan seperti terlihat saat ini di lapangan. Luaran dari diskusi adalah diagram skematik setidaknya dalam bentuk 2D, tetapi akan jauh lebih baik jika sampai pada penggambaran 3D untuk mengilustrasikan progres deformasi. Hasil rekonstruksi tersebut harus dilengkapi dengan narasi dalam bentuk esai yang menjelaskan pentahapan perlipatan mulai dari awal terjadinya tegasan kompresional sampai pembentukan *strain* deformasi akhir.

Gambar 8.14 memberikan ilustrasi sikuen batuan dalam posisi planar, selanjutnya digunakan mahasiswa untuk mengkonstruksi perkembangan struktur sampai pada tahap final deformasi. Perlu diingatkan di sini bahwa rekonstruksi model kinematik harus menggunakan konsep fundamental, yaitu panjang dan ketebalan awal perlapisan tetap terjaga selama perlipatan, kecuali di area inti lipatan. Selain itu, konsep deformasi konsentris menyatakan bahwa volume batuan tidak berubah selama episode perlipatan (Dahlstrom, 1969a).

Exercise

- ✦ In this session, students have to do exercise in a group consisting of 4-5 people to discuss the kinematic development of compressive deformation based on the given photograph of the outcrop in 2D configuration.
- ✦ The exercise begins with reconstructing the planar sedimentary beddings (Figure 9.14), subsequently illustrating the early formed strain on the commencement of tectonic stresses.
- ✦ As compression proceeded, the deformed rock units were likely changing into a new but unnecessarily final strain in this phase. Students ought to illustrate such a development.
- ✦ At the final stage of deformation, the rock sequence might have achieved its present configuration prior to being exposed to the surface due mainly to erosion and denudation. Again, students ought to reconstruct the architecture of the deformed sequence based on fundamental concepts, which have been explained earlier in the previous chapters of the book.
- ✦ Do your best!

Here you are, I assume that you will have fun with the exercise.



Gambar 8.14. Ilustrasi rumpunan batuan terdiri dari batulempung berselingan dengan batupasir dalam posisi planar atau sebelum terkena tegasan kompresional. Mahasiswa supaya menggunakan ilustrasi ini untuk mengawali rekonstruksi diagram skematik 2D dalam rangka menjelaskan perkembangan kinematika deformasi, mulai dari kompresi pada fase awal hingga *strain* akhir tercapai. Perlapisan awal dapat diperpanjang untuk disesuaikan dengan teknis rekonstruksi, namun harus dipertahankan konstan meskipun telah mengalami perlipatan akibat progres dari tegasan kompresional. Ketebalan awal setiap layer sudah diukur dari singkapan batuan, tetapi mahasiswa masih bisa merubah untuk skematik asalkan ketebalan antar lapisan masih proporsional sesuai data.

Bab 9

PROYEK AKHIR PERKULIAHAN

9.1. Penjelasan Umum

Pada akhir perkuliahan setiap mata kuliah, mahasiswa diwajibkan mengikuti UAS sebagai salah satu komponen evaluasi hasil belajar. Khusus untuk materi “Sesar Naik dan Lipatan” mahasiswa diberi opsi untuk memilih UAS atau “Proyek Akhir Perkuliahan (PAP)”. Mahasiswa yang memilih PAP tidak perlu lagi mengikuti UAS, demikian sebaliknya. Evaluasi akhir hasil belajar tetap memperhitungkan komponen-komponen yang lain, termasuk kehadiran dalam perkuliahan (minimal 80%), tugas dan kuis (25%), UTS (30%), dan UAS (45%). Komposisi tersebut berubah khusus untuk materi kuliah ini menjadi PAP ~60%, UTS ~10%, tugas dan kuis ~30%.

PAP dikerjakan mengikuti arahan-arahan dari dosen pengampu MK, dan diselesaikan dalam batas waktu yang ditentukan oleh pengajar. UAS mengikuti kalender akademik Universitas Sriwijaya. Bobot PAP untuk kalkulasi nilai akhir lebih besar atau ~60% dari pada UAS sebesar ~45%. Perbedaan lain yaitu UAS mengerjakan semua soal dari materi Geologi Struktur dalam waktu ~150 menit (3 sks), sedangkan PAP menyelesaikan proyek 1-7 dalam waktu sekitar 1-2 bulan. Berikut ini disampaikan beberapa singkapan struktur untuk diobservasi, diinterpretasikan, diklasifikasikan, dianalisis, dan dibuat model kinematika untuk selanjutnya dibuat laporan proyeknya. Proyek pada prinsipnya merupakan kegiatan mandiri, tetapi mahasiswa didorong untuk selalu berdiskusi dalam kelompok agar capaian pembelajaran dapat lebih baik lagi. Materi yang diberikan untuk kegiatan ini mencakup sejumlah singkapan berasal dari

Cape Liptrap dan region Sumatera, dan sebagian besar telah diajarkan atau disampaikan dalam Bab 8 dan Bab 9.

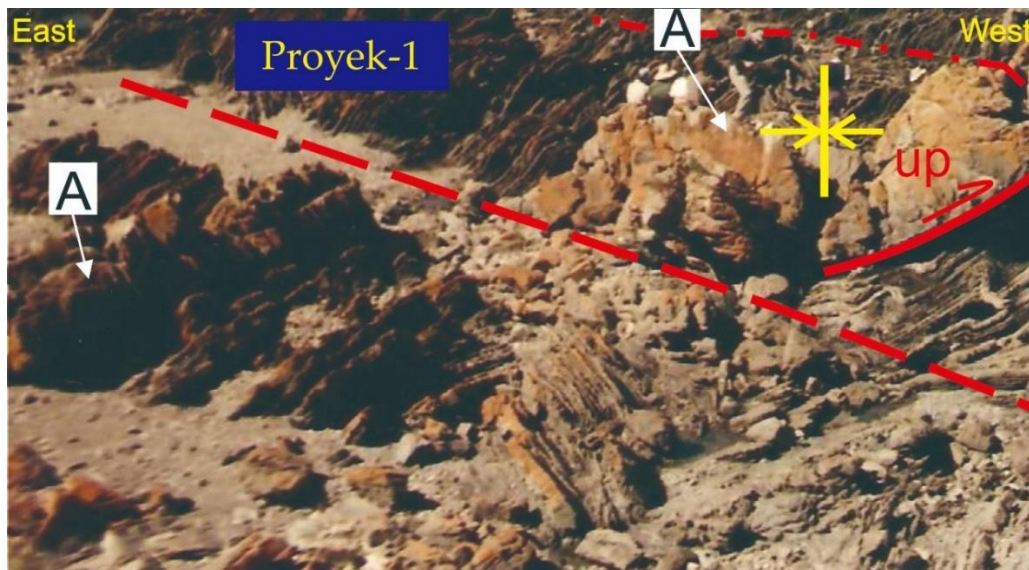
9.2. Proyek Evaluasi Struktur

Bagi mahasiswa yang mengambil PAP diwajibkan untuk mengerjakan semua materi proyek yang terdiri dari tiga bagian, yaitu (1) area Cape Liptrap, (2) region Sumatera Selatan, dan (3) wilayah Bengkulu Selatan. Gambar 9.1 – 9.4 merupakan bahan untuk kajian struktur dari singkapan di Cape Liptrap, sedangkan Gambar 9.5 – 9.7 adalah materi proyek berasal dari wilayah Sumatera Selatan dan Bengkulu Selatan. Luaran akhir proyek merupakan satu eksemplar laporan tertulis dengan sejumlah lampiran yang digunakan untuk mendukung penjelasan pokok bahasan atau evaluasi struktur.

Laporan sebaiknya dalam bentuk *softcopy* dan dikumpulkan ke dalam *drop box*. Lama waktu proyek dibatasi mulai dari akhir pembahasan materi “Sesar Naik dan Lipatan” (bukan akhir perkuliahan) hingga tiga hari sebelum batas waktu berakhirnya (*deadline*) pengunggahan nilai akhir ke dalam sistem (DPNA). Perlu diperhatikan oleh mahasiswa bahwa laporan akhir proyek harus mengikuti kaidah penulisan ilmiah yang diajarkan, dan jika didukung dengan hasil studi terdahulu, wajib hukumnya untuk mencantumkan sumber di dalam laporan. Kerjakanlah proyek akhir ini dengan cara yang sudah diajarkan dan dicontohkan dalam perkuliahan, yaitu observasi, interpretasi, deskripsi, dan digitasi semua foto singkapan struktur untuk merekonstruksi model skematik yang memperlihatkan perkembangan kinematika deformasi.

Dalam kegiatan proyek ini, mahasiswa diharapkan dapat meningkatkan intensitas diskusi kelompok agar lebih sering berlatih bekerja tim dalam rangka memecahkan suatu persoalan geologi. Meskipun demikian, penulisan laporan harus dilakukan secara individual, artinya mahasiswa diwajibkan menggunakan kalimat sendiri (*use your own words*). Bagi laporan-laporan proyek yang kedapatan kemiripan kalimat dalam penulisan diduga kuat melakukan praktek *copy paste*, dan hasil kerja seperti ini akan diberikan

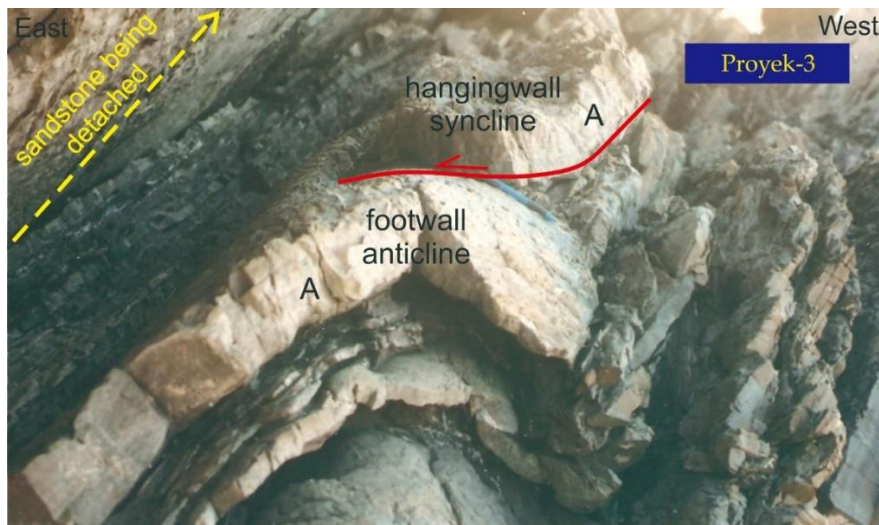
“*pinalti*” sesuai dengan besar kecilnya pelanggaran etika akademik dalam menulis (batas toleransi maksimum ~20% kemiripan).



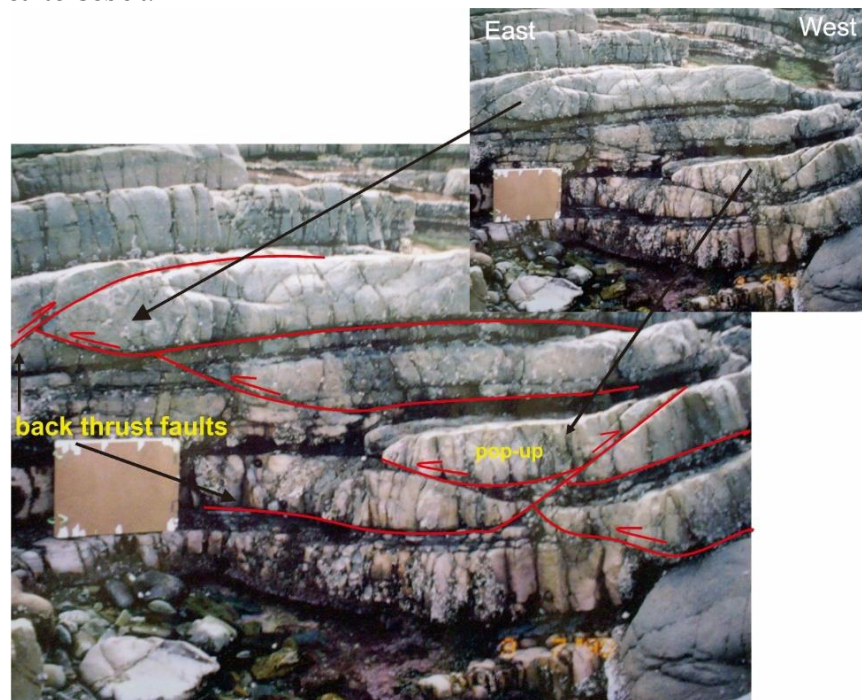
Gambar 9.1. Lokasi proyek 1. Kegiatan difokuskan pada pengamatan dan evaluasi struktur pada singkapan batuan. Luaran proyek mencakup laporan tertulis hasil kegiatan dengan lampiran berupa model skematik yang didigitasi dari fotograf, dan skenario deformasi.



Gambar 9.2. Lokasi proyek 2. Kegiatan yang dilakukan di sini yaitu pengamatan dan evaluasi struktur. Luaran hasil kegiatan berupa laporan tertulis dengan lampiran ilustrasi-ilustrasi skematik yang digunakan untuk menjelaskan perkembangan pembentukan struktur yang dievaluasi.



Gambar 9.3. Lokasi proyek 3. Fokus kegiatan berada di sikuen batuan di bawah bidang detasemen. Amati dan kenali tipe deformasi yang ada di area tersebut. Luaran proyek berupa laporan tertulis dengan lampiran ilustrasi-ilustrasi yang digunakan untuk menjelaskan struktur di area tersebut.



Gambar 9.4. Lokasi proyek 4. Singkapan batupasir yang mengalami penebalan karena tersesarkan berulang kali. Dalam proyek ini kegiatan difokuskan pada rekonstruksi urutan pensesaran yang telah mendeformasi unit batupasir (gunakan nomor urutan pensesaran 1, 2, 3, dst dengan prinsip *cross-cutting relationships*). Luaran kegiatan berupa laporan akhir dengan lampiran model skematik yang mengilustrasikan perkembangan kinematika struktur.



Gambar 9.5. Lokasi proyek 5. Kegiatan di sini mengevaluasi struktur di sungai Pino Pentaring yang mengalir ke wilayah Tanjung Sakti, Sumatera Selatan, kemudian membuat laporan tertulis yang dilengkapi dengan lampiran hasil pemodelan struktur di lokasi proyek.



Gambar 9.6. Lokasi proyek 6. Fotograf ini merupakan materi proyek 6 yang berlokasi di sungai Manna, Desa Air Tenam, Kecamatan Ulu Manna, Bengkulu Selatan. Kegiatan proyek mencakup observasi, interpretasi, deskripsi, rekonstruksi model kinematika, dan penulisan laporan akhir proyek dengan lampiran model diagramatik yang digunakan untuk menjelaskan perkembangan deformasi batuan.



Gambar 9.7. Lokasi proyek 7. Singkapan struktur di sungai Pino Poros, Desa Kayu Ajaran, Kecamatan Ulu Manna, Kabupaten Bengkulu Selatan. Interpretasi sudah dilakukan oleh tim terdahulu, tetapi belum diuji secara geometrik. Oleh sebab itu, mahasiswa diberi sejumlah target proyek yang harus diselesaikan sebagaimana disampaikan berikut ini.

Target untuk Proyek 7:

Konstruksi penampang seimbang atau *deformed state* di atas belum diuji secara geometrik dengan merestorasi menjadi *undeformed state*, sehingga belum bisa dipastikan sayatan struktur tersebut *viable* ataukah tidak. Oleh sebab itu, proyek ini memiliki beberapa target yang harus dicapai sebagai berikut:

- pertama, merestorasi konfigurasi struktur pada Gambar 9.7 untuk menguji secara geometrik.
- kedua, membuat interpretasi alternatif berdasarkan singkapan struktur seperti yang terlihat pada fotograf di bawah ini, selanjutnya penampang seimbang diuji secara geometrik dengan membuat sayatan restorasi.
- ketiga, menyusun laporan akhir proyek yang dilengkapi dengan lampiran penampang seimbang dan restorasinya.



Gambar 9.8. Singkapan struktur sebelum diinterpretasikan untuk Proyek 7. Berdasarkan fotograf singkapan ini, mahasiswa diberi target proyek dengan membuat interpretasi alternatif atau berbeda dengan konfigurasi di Gambar 9.7, kemudian hasilnya diuji dengan merekonstruksi penampang restorasi struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Aller, J., Bastida, F., dan Bobillo-Ares, N. C., 2020. On the development of kink-bands: a case study in the Westasturian-Leonese zone (Variscan belt, NW Spain). *Earth Sciences Bulletin*, 191, 6. DOI://doi.org/10.1051/bsgf/2020003.
- Alonso, J. L. dan Teixell, A., 1992. Forelimb deformation in some natural examples of fault-propagation folds. In McClay, K. R. (ed.): *Thrust Tectonics*. Chapman & Hall, London, 175–180.
- Amin, T. C., Kusnama, Rustandi, E., dan Gafoer, S., 1993. Peta Geologi Lembar Manna dan Enggano Skala 1:250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Bally, A. W., Gordy, P. L., dan Stewart, G. A., 1966. Structure, seismic data, and orogenic evolution of Southern Canadian Rocky Mountains. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 14 (3), 337-381.
- Blay, P., Cosgrove, J. W., dan Summers, J. M., 1977. An experimental investigation of the development of structures in multilayers under the influence of gravity. *Journal of the Geological Society, London*, 133, 329–342.
- Boyer, S. E. dan Elliott, D., 1982, Thrust systems. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 66, 1196–1230.
- Buchanan, P. G. dan Warburton, J., 1996. The influence of pre-existing basin architecture in the development of the Papuan fold and thrust belt: Implications for petroleum prospectivity. *Third PNG Convention*, 89-109.
- Butler, R. W. H., 1982. A structural analysis of the Moine thrust zone between Loch Eriboll and Foinaven, NW Scotland. *Journal of Structural Geology*, 4, 19–29.
- Carey, S. W., 1962. Folding. *Journal of the Alberta Society of Petroleum Geologist*, 10 (3), 95-144.
- Chapman, T. J. dan Williams, G. D. 1984. Displacement-distance methods in the analysis of fold-thrust structures and linked-fault systems. *Journal of the Geological Society* 141 (1), 121-128.
- Chester, J. S. dan Chester, F. M., 1990. Fault-propagation folds above thrust with constant dip. *Journal of Structural Geology*, 12, 903-910.
- Cosgrove, J. W., 2015. The association of folds and fractures and the link between folding, fracturing and fluid flow during the evolution of a fold-thrust belt : a brief review. Imperial College London.
- Dahlstrom, C. D. A., 1969, Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6, 743–757.
- Dahlstrom, C. D. A., 1970. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 18 (3), 332-406.
- Dahlstrom, C. D. A., 1990. Geometric constraints derived from the law of conservation of volume and applied to evolutionary models for detachment folding. *AAPG Bulletin*, 74 (3), 336-344.
- Davis, R. A., 1984. Barrier island system: a geologic overview. *Geology of Holocene Barrier Island System*, 1-46.

- De Sitter, L. U., 1956. *Structural Geology*. Mc-Graw-Hill series in the geological sciences. McGraw-Hill Book Camp.
- Eisenstadt, G. dan De Paor, D. G., 1987. Alternative model of fault propagation. *Geology*, 15, 630-633.
- Elliott, D., 1983. The construction of geological cross-section. *Journal of Structural Geology*, 5 (2), 99.
- Elliott, D. dan Johnson, M. R. W., 1980. Structural evolution in the northern part of the Moine thrust Zone, NW Scotland. *Transactions of the Royal Society, Edinburgh*, 71, 69-96.
- Etheridge, M. A., Branson, J. C., dan Stuart-Smith, P. G., 1985. Extensional basin-forming structures in Bass Strait and their importance for hydrocarbon exploration. *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, 25, 344-206.
- Faill, R. T., 1973. Kink band folding. Valley and Ridge Province, Pennsylvania. *Geological Society of America Bulletin*, 84, 1289-1314.
- Fermor, P., 1999. Aspect of the three-dimensional structure of the Alberta Foothills and Front Ranges. *GSA Bulletin*, 111 (3), 317-346.
- Fluety, M. J., 1964. The description of folds. *Proceedings of the Geologist' Association*, 75, 461-492.
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., dan Gregory, A. R., 2008. Formation velocity and density-the diagnostic basics for stratigraphic traps. *SEG Library*, 39 (6).
- Gibbs, A. D., 1984. Structural evolution of extensional basin margins. *Geological Society of London Journal*, 141, 609-620.
- Griggs, D., 1967. Hydraulic weakening of quartz and other silicates. *Geophysic Journal International*, 14, 19-31.
- Griggs, D. dan Handin, J., 1960. Rock deformation (a symposium). *Geological Society of America* 79.
- Gwinn, V. E., 1964. Thin-skinned tectonics in the plateau and northwestern Valley and Ridge Province of the central Appalachians. *Geological Society of America*, 75, 863-900.
- Heard, H. C., 1960. Transition from brittle fracture to ductile flow in Solenhofen Limestone as a function of temperature, confining pressure, and interstitial fluid pressure. In Griggs, D. and Handin, J. (eds.), *Rock Deformation (a symposium)*. *Geological Society of America Memoir*, 79, 193-226.
- Hill, K. C., 1991. Structure of the Papuan Fold Belt, Papua New Guinea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 75, 857-872.
- Hill, K. C., Keetley, J. T., Kendrick, R. D., dan Sutriyono, E., 2004. Structure and hydrocarbon potential of the New Guinea Fold Belt. *AAPG Special Volumes, AAPG Memoir*, 82, 494-594.
- Hobbs, B. E., 1971. The analysis of strain in folded layers. *Tectonophysics*, 11, 329-375.
- Hobbs, B. E., Means, W. D., dan Williams, P. F., 1976. *An Outline of Structural Geology*. John Wiley and Sons, New York, 571 hal.
- Homza, T. X. dan Wallace, W. K., 1995. Geometric and kinematic models for detachment fold with fixed and variable detachment depths. *Journal of Structural Geology*, 17, 575-588.
- Hossack, J. R., 1981. Sequence of hangingwall imbrication in the Valdres Thrust, Djuptjernskampen, Norway (Abstract). *Journal of Structural Geology*, 3, 188.

- Jaeger, J. C., 1969. *Elasticity, Fracture and Flow with Engineering and Geological Applications*. Third edition. Chapman & Hall, London.
- Jamison, W. R., 1987. Geometric analysis of folds development in overthrust terranes. *Journal of Structural Geology*, 9, 207-219.
- Jamison, W. R., 1992. Stress controls of fold thrust style. In McClay, K. R. (ed.): *Thrust Tectonics*. Chapman and Hall, London, 155-164.
- Knippe, R. J., 1985. Footwall geometry and the rheology of thrust sheet. *Journal of Structural Geology*, 7 (1), 1-10.
- Lathrop B. A. dan Burberry, C. M., 2016. Accomodation of penetrative strain during deformation above a ductile decollement. *The Geological Society of America*, 9 (1), 46-57.
- Lisle, R. J., 2004. *Geological structures and maps: a practical guide*. Elsevier Butterworth-Heinemann. British Library Cataloguing in Publication Data.
- Marshak, S., Woodward, N., dan Mitra, G., 1988. Introduction to cross-section balancing. *Basic methods of structural geology*. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 303-314.
- McClay, K. R. 1992. Glossary of thrust tectonics terms. In McClay, K.R. (ed.): *Thrust Tectonics*. Chapman & Hall, London, 419-433.
- McClay, K. R. dan Buchanan, P. G., 1992. Thrust faults in inverted extensional basins. In K. R. McClay (ed.): *Thrust Tectonics*. Chapman & Hall, London, 93-104.
- Mercier, E., Outtani, F., dan De Lamotte, D. F., 1997. Late-stage evolution of fault-propagation folds: principles and example. *Journal of Structural Geology*, 19, 185-193.
- Mitchell, M. M. dan Woodward, N. B., 1988. Kink detachment fold in the southwest Montana fold and thrust belt. *Geology*, 16 (2), 162-165.
- Mitra, G., Hull, J. M., Yonkee, W. A., dan Protzman, G. M., 1988, Comparison of mesoscopic and microscopic deformational styles in the Idaho-Wyoming thrust belts and Rocky Mountain foreland. In Schmidt, C. J., dan Perry, W. J. (eds.): *Interaction of the Rocky Mountain Foreland and the Cordilleran Thrust Belt*. Geological Society of America Memoir, 171, 119-141.
- Mitra, S., 1986. Duplex structures and imbricate thrust systems: geometry, structural position, and hydrocarbon potential. *AAPG Bulletin*, 70, 1087-1112.
- Mitra, S., 1990. Fault-propagation folds: geometry, kinematic evolution, and hydrocarbon traps. *AAPG Buletin*, 74, 361-373.
- Mitra, S. dan Namson, J., 1989. Limitations and modifications of area balancing methods: in excess area method. *Geological Society of America. Abstract with Programs*, 19, 774.
- Mosar, J. dan Suppe, J., 1992. Role of shear in fault-propagation folding. In McClay, K. R. (ed.): *Thrust Tectonics*. Chapman and Hall, London, 123-132.
- Munoz, J. A., 1992. Evolution of a continental collision belt: ECORS-Pyrenees crustal balanced cross-section. In K.R. McClay (ed.): *Thrust Tectonics*. Chapman and Hall, 235-246.
- O'Connor, B., 1978. *The Sedimentary and tectonic structures of the Lower Devonian Liptrap Formation (PhD thesis)*. University of Melbourne, Victoria.

- Peach, B. N. dan Horne, J., 1907. Geological structure of the north-west Highlands of Scotland. Geological Survey Scotland Memoir.
- Poblet, J. dan McClay, K., 1996. Geometry and kinematics of single-layer detachment folds. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 80, 1085-1109.
- Powel, D., 1992. Interpretation of geological structures through maps. Longman scientific and technical.
- Price, R. A. dan Mountjoy, E. W., 1970. Geologic structure of the Canadian Rocky Mountains between Bow and Athabasca Rivers: a progress report. In Wheeler, J. O. (ed.): *Structure of the southern Canadian Cordillera*. Geological Association of Canada, Special Publication, 6, 7-25.
- Ramsay, J. G. 1967. *The folding and fracturing of rocks*. McGraw-Hill, New York.
- Ramsay, J. G., 1974. Development of chevron folds. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 1741-1754.
- Ramsay, J. G., 1992. Some geometric problems of ramp-flat thrust models. In K. R. McClay (ed.): *Thrust Tectonics*. Chapman and Hall, London, 191-200.
- Ramsay, J. G. dan Graham, R. H., 1970. Strain variation in shear belts. *Canadian Journal of Earth Science*, 7, 786-813.
- Rich, J. L., 1934. Mechanics of low-angle overthrust faulting as illustrated by the Cumberland Thrust Block, Virginia, Kentucky and Tennessee. *AAPG Bulletin*, 18, 1584-1596.
- Royse, F., Warner, M. A., dan Reese, D. L., 1975. Thrust belt structural geometry and related stratigraphic problems, Wyoming-Idaho-northern Utah. In Boylard, E. W. (ed.): *deep drilling frontiers of the central Rocky Mountains*, Denver. Rocky Mountain Association of Geologists Symposium, 41-45.
- Simandjuntak, T. O. dan Barber, A. J., 1996. Contrasting tectonic styles in the Neogene orogenic belts of Indonesia. In Hall, R. dan Blundell, D. (eds): *Tectonic Evolution of Southeast Asia*. Geological Society Special Publication, 106, 185-200.
- Spadini, G. dan Podladchikov, Y., 1996. Spacing of consecutive normal faulting in the lithosphere: a dynamic model for rift axis jumping (Tyrrhenian Sea). *Earth and Planetary Science Letters*, 144, 21-34.
- Stewart, S. A., 1996. Influence of detachment layer thickness on style of thin-skinned shortening. *Journal of Structural Geology*, 18, 1271-1274.
- Suppe, J., 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science*, 283, 684-721.
- Suppe, J., 1985. *Principles of structural geology*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ.
- Suppe, J. dan Medwedeff, D. A., 1984. Fault-propagation folding. *Geological Society of America Bulletin*, Abstract with Programs, 16, 670.
- Suppe, J. dan Medwedeff, D. A., 1990. Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geol. Helv.*, 83 (3), 409-454.
- Sutriyono, E., 1999. Structure and thermochronology of the Bird's Head of Irian Jaya, Indonesia. PhD thesis, Departement of Earth Science, La Trobe University, Australia, 321 hal.

- Sutriyono, E. dan Hill, K. C. 2001. Structure and hydrocarbon prospectivity of the Lengguru fold belt, Irian Jaya. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association*, 1, 319-334.
- Tanner, P. W. G., 1989. The flexural-slip mechanism. *Journal of Structural Geology*, 11, 635-655.
- Tanner, P. W. G., 1992. The duplex: implication from a study of flexural-slip duplexes. In K. R. McClay (ed.): *Thrust tectonics*. Chapman and Hall, London, 201-206.
- Turner, F. J. dan Weiss, L. E., 1963. *Structural analysis of metamorphic tectonites*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Vollgger, S. A. dan Cruden, A. R., 2016. Mapping folds and fractures in basement and cover rocks using UAV photogrammetry, Cape Liptrap and Cape Paterson, Victoria, Australia. *Journal of Structural Geology*, 85, 168–187.
- Weertman, J., 1970. The Creep Strength of the earth's mantle. *Review of Geophysics*, 8 (1), 145.
- Williams, G. D. dan Chapman, T. J., 1983. Strains developed in the hangingwalls of thrust due to their slip/propagation rate: a discolation model. *Journal of Structural Geology*, 6, 563-571.
- Woodcock, N. H. dan Fischer, M., 1986. Strike-slip duplexes. *Journal of Structural Geology*, 8, 725– 735.
- Woodward, N. B., Boyer, S. E., dan Suppe, J., 1989. *Balanced Geological Cross-Sections*. American Geophysical Union, Washington, DC.
- Yulihanto, B., Situmorang, B., Nurdjajadi, A., dan Sain, B., 1995. Structural analysis of the onshore Bengkulu forearc. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association*, 24, 85-96.

INDEKS

A

accelerating creep 20
admisibilitas 60
Air Tenam 102, 103, 115
aktif 44, 45, 73, 74
algoritma 60
angular 39, 85, 86, 91
anticlockwise rotation 100
antiform 31, 32, 50, 52, 53, 66, 72, 73, 74, 82, 91, 94, 107, 108
antiformal stack 28, 29, 106, 107
antithetic strike-slip fault 13, 14
area konstan 55, 56
asimetri 33, 34, 38, 39, 40, 44, 48, 50, 68, 68, 83, 91, 92, 93
axial surface 39, 40, 41, 49, 85, 91

B

backlimb 83, 88, 100, 101
Banjarsari 96
basal detachment 26, 88, 91
batuan 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 28, 31, 32, 33, 40, 43, 44, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 56, 58, 59, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 99, 100, 101, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 113, 114, 115
batulanau 20
batulempung 20, 62, 63, 74, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 100, 101, 105, 106, 107, 108, 110
batupasir 15, 20, 62, 63, 66, 67, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 100, 101, 104, 105, 106, 107, 108, 110, 114

bawah permukaan 48, 51, 55
bending 21, 44, 63
bidang sumbu 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 58, 84, 86, 91, 92, 100, 103, 104, 108, 109
bird view 64, 65
blind-tip line 48
breksi tektonik 18
brittle 18, 69, 91
buckling 21, 54, 63
burial 9

C

Cape Liptrap 2, 62, 63, 64, 68, 91, 111, 112
chevron 39, 43, 56, 63, 92, 93
compression 10, 11, 18, 44, 76, 110
creep 19
cross-bedding 71

D

damage zone 101
deeper detachment 88, 91
deformasi 1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 32, 33, 43, 44, 45, 47, 49, 50, 53, 55, 56, 58, 59, 62, 64, 66, 67, 68, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 94, 95, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 114, 115
deformed state 7, 14, 80, 116
denudasi 29, 75, 81, 84, 101
Devon 46, 62, 65
dextral 13, 14, 63, 66, 94
diagram skematik 2, 5, 6, 8, 72, 84, 92, 103, 109, 110
diskontinyu 15, 69, 71, 73
dislokasi 15, 20

displacement 9, 16, 24
distorsi 14, 16, 40
dolomit 45
ductile 18, 34, 52, 62, 63, 69, 80, 88, 105, 107, 108
dupleks 6, 24, 25, 26, 27, 29, 66, 68, 74, 79, 80, 82, 83, 84, 89, 105, 106, 107

E

ekstensional 13, 14, 24, 63
elemen 2, 6, 7, 8, 14, 23, 27, 32, 33, 63, 68, 69, 70, 77, 78, 79, 92, 95, 97, 100
enveloping surface 38, 39, 40, 91, 92, 93, 108, 109
equal 55, 56
equilibrium 14
erosi 29, 75, 81, 84, 101
evolusi 2, 8, 17, 33, 50, 54, 66, 67, 68, 95, 101
excess-area 56

F

fault-bend 44, 46, 47, 48, 50, 52, 59, 60, 63
final spacing 27
flat-ramp 49, 50, 89, 90, 91
flexural slip 21, 53, 82, 103, 104, 108
floor thrust 25, 106
fold belts 32
footwall 22, 23, 44, 45, 46, 51, 66, 71, 72, 73, 74, 76, 79
foreland 43, 46, 48, 52, 58
forelimb 47, 83, 84, 88, 91, 100, 101
fractures 14
fracturing 19, 21

G

gaya 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 19, 20, 23, 25, 26, 32, 43, 45, 79, 99, 103
gently plunging 37, 62
geofisika 55
geometri 14, 25, 28, 29, 33, 44, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 78, 80, 82, 83, 90, 102, 105, 107, 108

Geosec™ 51, 53, 59, 60, 61
graded bedding 71

H

hangingwall 22, 23, 30, 43, 44, 45, 46, 47, 50, 58, 66, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 79, 80, 81, 83, 84, 88, 94, 99, 102
hinge 32, 33, 39, 40, 41, 81, 83, 85, 86, 88, 90, 91, 96, 97, 98, 99, 101, 102, 107
hinterland 26, 27, 28, 46, 48, 58, 101
homogen 16, 17
horizontal 11, 15, 22, 35, 37, 42, 56, 74, 86
horse 25, 26, 82, 83, 84, 105, 106, 107

I

imbrikasi 6, 24, 25, 29, 94
impurities 19
incipient fault 72, 79
increment of deformation 9
inhomogeneous 17
initial spacing 27
integrasi data 55
interlimb angle 46, 84, 85
interpretasi 4, 6, 7, 8, 59, 60, 63, 64, 66, 72, 73, 77, 78, 95, 97, 102, 103, 112, 115, 117

K

Kapur 63
Kayu Ajaran 105, 116
kekar 3
kelurusan 66
kembar dampit 96, 98, 99
kemiringan sayap 52, 54, 83, 91, 92
ketebalan 3, 40, 41, 47, 49, 50, 56, 72, 73, 76, 81, 83, 85, 86, 87, 88, 90, 109, 110
kinematik 46, 48, 51, 53, 54, 66, 67, 69, 74, 75, 80, 96, 101, 103, 104, 109
kinematika 4, 5, 6, 7, 8, 10, 54, 81, 84, 95, 109, 110, 111, 112, 114, 115
kinetik 50

kink band 39, 40, 44, 63, 91, 92, 93
klasifikasi struktur 1, 7
komposisi kimia 9
kompresi 2, 23, 25, 43, 45, 50, 72, 74, 79, 80, 86,
89, 102, 103, 110
konfigurasi struktur 1, 9, 44, 47, 65, 66, 72, 78,
105, 117
konglomerat 20
konjugasi 12
konsentris 17, 54, 56, 63, 109
konstan 16, 19, 24, 41, 47, 49, 50, 51, 53, 54, 55,
73, 83, 85, 86, 88, 108, 110
kristal 19, 20

L

laminesi 15, 71, 73
lateral 3, 11, 13, 15, 22, 23, 24, 30, 66, 71, 73, 75,
87
leading branch lines 30
leading imbricate fan 24
limb 84
lipatan 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 17, 19, 20, 24,
28, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42,
43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55,
56, 62, 63, 65, 66, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 88, 89,
90, 91, 92, 93, 94, 100, 101, 102, 103, 104, 105,
106, 107, 108, 109
load cast 71
luncuran gravitasi 54

M

magnitude 13
marker 15
mean strain ellipsoid 17
mekanika batuan 9
mineral 9, 17
model 4, 5, 6, 8, 12, 13, 25, 27, 45, 46, 47, 49, 52,
53, 54, 56, 59, 67, 69, 77, 80, 82, 88, 92, 93, 95,
99, 101, 102, 103, 106, 109, 111, 112, 113, 114,
115

O

oblique 23, 30, 56, 60, 93
observasi 7, 8, 64, 71, 72, 107, 112, 115
offset 71, 72, 73, 94, 97, 100, 101
openness 34
orientasi 10, 11, 22, 30, 41, 42
orogen 58, 59, 62
overturned 18, 49, 100, 101, 103

P

panjang perlapisan 53, 55, 56, 59, 60
panjang sayap 34, 38, 54, 91
panjang unit 47, 87
paralel 10, 16, 18, 20, 23, 27, 28, 30, 40, 41, 47, 48,
50, 51, 53, 56, 59, 66, 75, 85, 86, 88, 90, 103, 104,
107, 108
pasif 44, 45
pembebanan 9, 19
penampang 1, 7, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 116, 117
perconto 19
pergeseran internal 58
perlapisan 17, 22, 28, 32, 33, 40, 46, 47, 48, 50, 51,
52, 53, 56, 58, 59, 63, 75, 79, 88, 100, 103, 104,
109
peta 59
Pino Pentaring 100, 101, 107, 108, 115
planar 15, 17, 18, 19, 32, 39, 82, 109, 110
pola pergeseran 49
pressure 9, 10, 11, 99
prolate spheroid 16
propagation folds 44, 50, 60
Pulau Timun 100, 101, 102, 104, 107

Q

quartzite 20

R

ramp 25, 26, 27, 28, 29, 30, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 56, 63, 66, 67, 68, 71, 72, 74, 75, 76, 79, 80, 82, 91, 99, 102, 105, 106, 107
ramping fault 25, 44, 102
reaktivitas struktur 45
rekahan 11, 13, 14, 18, 20, 21, 69, 70, 73, 75
rekognisi 63, 64, 68, 70, 73, 77, 78, 95
rekonstruksi 1, 2, 7, 67, 79, 80, 109, 110, 112, 114, 115
rekristalisasi 20
releasing compressive forces 14
repetition 22, 72
restorasi area 56
restored state 7, 80
reverse fault 14, 24, 45
rezim gaya 11, 22
rifting 63
roof thrust 25
rotasi 10, 14, 99, 105
rotational slip 96, 97, 99
rounded 39, 85, 86, 107

S

sayatan geologi 55, 56, 60
schist 20
sebaran singkapan 64
sekunder 13
serpih 20, 46, 52, 62, 63, 66, 67, 76, 77, 78, 79, 81, 82, 83, 85
sesar detasemen 52
sesar geser 3, 13, 66
sesar minor 76, 80
sesar naik 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 13, 23, 24, 25, 26, 28, 30, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 63, 66, 70, 71, 72, 73, 79, 80, 82, 85, 86, 88, 96, 97, 100, 101, 106
sesar turun 3, 96, 97
shear 10, 11, 48
shortening 16, 22, 24, 44, 72, 89

sidewalls 30

sikuen 1, 4, 5, 7, 12, 17, 20, 22, 26, 43, 45, 55, 56, 59, 62, 63, 65, 66, 67, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 86, 87, 88, 89, 94, 95, 100, 101, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 114
simetri 16, 33, 38, 39, 40, 44, 92, 93, 104, 108, 109
similar 40, 41, 54, 56, 63
sinform 31, 66, 72, 73, 74, 82, 87, 94, 107, 108
sinistral fault 13, 14
sinklinorium 63
slaty cleavage 17
slickensides 23
soft rock 62
specimen 19, 20
spektrum 53
spheroid oblate 16
stabil 19, 20
staircase 28, 29, 46, 50
steady-state creep 20
strain 2, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 33, 40, 54, 74, 75, 82, 88, 91, 93, 102, 107, 109, 110
stress field 10
strike 12, 24, 30, 42, 65, 66, 67, 97, 98, 100
struktur 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 17, 19, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 32, 33, 34, 38, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 76, 77, 78, 79, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 100, 101, 102, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117
sumbu lipatan 18, 42, 63, 92
sumur bor 55, 59
synthetic strike-slip fault 13, 14

T

tectonic forces 9, 77
tegasan 1, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 18, 19, 21, 22, 43, 45, 75, 76, 81, 82, 84, 104, 108, 109, 110

tekanan 9, 10, 14, 18, 19, 99
tektonik 1, 5, 7, 8, 9, 10, 17, 20, 24, 26, 30, 32, 43,
45, 50, 53, 62, 63, 64, 67, 68, 72, 73, 74, 76, 77,
79, 80, 88, 89, 95, 96, 102, 105
temperatur 9, 18, 19, 20
tension 10, 11, 99
terain 44, 55, 56, 62
terminologi 1, 20, 23, 30, 69, 70, 96
the latest movement 23
thickened forelimb 49
thickening 17, 22, 47, 72
thinned forelimb, 49
thrust 23, 24, 26, 27, 28, 43, 46, 52, 58, 66, 71, 72,
76, 85, 88, 99, 100, 101, 102, 107
tight fold 17, 108
tighten 33
tightness 34, 92
titik lebur 20
total pemendekan 58
trailing imbricate fan 25
trailing line 24
transform 10
transient creep 20
transisi 18
triaxial ellipsoid 17

truncation antiform 50
turbidit 62, 65

U

undeformed 14, 16, 116
unit inkompeten 79, 89
unit kompeten 20, 52, 54
unstrained position 55
uplift 63
upright fold 49, 108

V

validitas 60
vektor 12, 14, 15, 16
vertikal 11, 15, 22, 23, 35, 37, 41, 42, 55, 59, 71,
73, 100, 101, 102
volume 9, 16, 17, 47, 49, 50, 56, 59, 109

W

wrench system 13

Z

zona kompresi 50
zona sesar 24, 5



Edy Sutriyono dilahirkan pada tanggal 26 Desember 1958 di Demak, dan menempuh pendidikan mulai dari jenjang Sekolah Dasar hingga Sekolah Menengah Atas di Blora, Jawa Tengah. Pendidikan jenjang Sarjana ditempuh di Program Studi Teknik Geologi Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta pada tahun 1978, dan memperoleh gelar akademik Insinyur (Ir). Meniti karir sebagai Dosen bermula di Jurusan Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada tahun 1987. Penulis mendapat beasiswa dari pemerintah New Zealand pada tahun 1990 untuk menempuh pendidikan jenjang Magister, dan memperoleh gelar akademik *Master of Science (MSc)* dari *Waikato University* di Hamilton pada tahun 1992. Bidang ilmu yang didalami dan dilakukan dalam penelitian untuk tesis yaitu termokronologi dengan analisis *fission track*.

Selanjutnya, penulis mendapat beasiswa dari pemerintah Australia pada tahun 1995 untuk menempuh pendidikan jenjang Doktor, dan memperoleh gelar akademik *Doctor of Philosophy (PhD)* dari *La Trobe University* di Melbourne pada tahun 2000. Penelitian untuk disertasi mencakup dua bidang kajian, yaitu struktur dan termokronologi. Hasil kajian bidang kedua telah diterbitkan dalam bentuk buku referensi dengan judul “TERMOKRONOLOGI JEJAK BELAH APATIT Teori dan Aplikasi”. Penulis memperoleh jabatan akademik Profesor pada tahun 2009, selanjutnya merintis bersama-sama dosen dengan latar belakang keilmuan Teknik Geologi untuk membuka Program Studi Teknik Geologi (PSTG) di Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Alhamdulillah, atas ijin Allah SWT PSTG telah melaksanakan kegiatan pendidikan sejak tahun 2013. Alamat e-mail penulis edy_sutriyono@unsri.ac.id



ISBN 978-623-399-124-7

