

**MEKANISME DEFORMASI, PERGERAKAN (*SENSE SHEAR*)  
DAN PERKEMBANGAN STRUKTUR DALAM PROSES DEFORMASI *DUCTILE***

Fahrudin \*)

*Abstract*

*The deformation mechanisms in ductile – transition zone show microfracture cataclasis activities, intracrystalline deformations, twinning, kinking, solid-state diffusion creep, recovery and recrystallisation. That activities to extend the sense shear indication. Sense shear can see i.e porphyroblast, mica fish, porphyroblast, veins, strain shadow, strain fringe and boudin. Commonly sense shear indications to get the form of ellipsoid geometry. That geometry experience to development the structure along progressive deformations process. The development of inclusion and fabric also occur at that process.*

*Key words: sense shear, ductile deformations, stress, strain*

**Pendahuluan**

Batuan mengalami deformasi oleh tegasan (*stress*), distribusi deformasi tidak homogen, ada bagian batuan (butiran dan matrik) yang mengalami regangan (*strain*) tinggi dan rendah. Deformasi ini disebut sebagai deformasi heterogen. Deformasi heterogen menyebabkan butiran rigid akan bergerak berputar dan tidak berputar sehingga butiran mengalami perpindahan. Dalam konteks mikrotektonik, deformasi tersebut terjadi dalam zona *ductile* di mana materialnya bersifat kental (*viscous*). Zona *ductile* biasanya aktif dalam kondisi metamorfisme (pengaruh suhu dan tekanan).

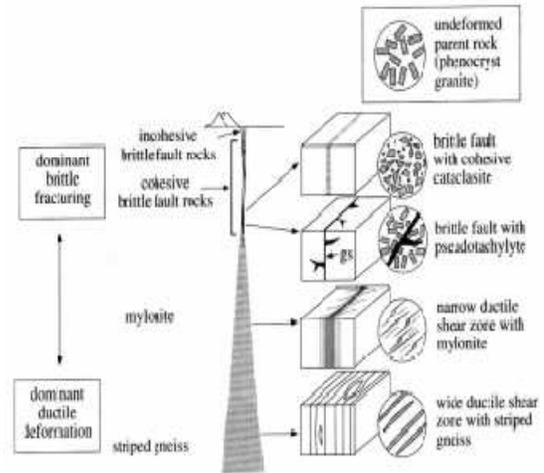
Tulisan ini bertujuan untuk membahas mekanisme deformasi, penentuan pergerakan (*shear sense*) dan perkembangan struktur pada deformasi progresif di dalam konteks mikrotektonik.

**Dasar Teori**

Deformasi yang menyebabkan regangan tinggi di suatu zona disebut sebagai zona hancur. Zona hancur dapat dibagi dalam dua zona yaitu zona *brittle* dan zona *ductile* (Gambar 1).

Di alam terjadi deformasi dan aliran secara inhomogen dalam zona *ductile* yang mengenai material (bagian dari batuan, bisa fabrik, butiran, matrik, inklusi). Model analog digunakan untuk memodelkan bagian kecil tersebut pada deformasi dan aliran homogen. Pola aliran suatu titik ke titik berupa garis lurus dapat dideskripsikan secara numerik. Garis-garis aliran meliputi *stretching rate* (*S*) dan *angular velocity* ( $\omega$ ). Dua garis panjang yang keluar mengalami *stretching rate* dengan nilai maksimum dan minimum disebut *instantaneous stretching axes* (*ISA*). Jika kurva *stretching rate* simetri dengan nilai 0, maka tidak ada perubahan aliran, atau disebut aliran *isochoric*. Pada kasus ukuran berubah, semua *material line* memberikan nilai positif dan negatif. Nilai positif, kurva bergerak ke atas berarti ukuran bertambah sedangkan nilai negatif kurva bergerak ke bawah berarti ukuran berkurang (Gambar 2a). Pada kurva *angular velocity*, nilai  $\omega = 0$ , berarti aliran tidak berputar dikatakan sebagai *coaxial* karena sepanjang

garis *irrational* sejajarkan dengan *ISA* disebut sebagai aliran *pure shear* (Gambar 2b). Jika *material line* pada kurva *angular velocity*,  $\omega$  bergerak ke atas berarti material berputar ke kanan sedangkan jika bergerak ke bawah berarti material berputar ke kiri. Kondisi berputar ini disebut sebagai *noncoaxial* yang artinya garis *irrational* tidak sejajar dengan *ISA*. Kondisi *noncoaxial* bisa menghasilkan aliran *simple shear* (Gambar 2d). Semua aliran *noncoaxial* mempunyai bentuk simetri monoklin. *angular velocity* berkaitan dengan nilai *vorticity*. *Vorticity* ( $W_k$ ) adalah deviasi sumbu dari *angular velocity* yang merupakan karakteristik suatu putaran (*rotasi*). Hubungan nilai parameter numerik dapat dirumuskan sebagai berikut:



Gambar 1. Pembagian zona geser dan karakteristik umum fabrik hasil deformasi.

$$\begin{aligned} \dot{S}_k &= \dot{S}_1 - \dot{S}_2 = \omega_1 - \omega_2 \\ W_k &= (\omega_1 - \omega_2) / \dot{S}_k \\ A_k &= (\dot{S}_1 + \dot{S}_2) / \dot{S}_k \end{aligned}$$

Dimana:  $S_k$  = strain rate,  $S$  = stretching rate,  $\omega$  = angular velocity,  $W_k$  = kinematic vorticity number; terkait dengan kualitas perputaran dan  $A_k$  = kinematic dilatancy number; terkait dengan rata-rata permukaan yang susut atau mengembang suatu butiran.

\*) Staf Pengajar Jurusan Teknik Geologi  
Fakultas Teknik Undip

Deformasi *ductile* juga bisa disebut aliran kental yang dihasilkan karena faktor suhu, tekanan dan proses-proses dinamik. Mekanisme *ductile* meliputi aktifitas deformasi intrakristalin, *twinning*, *kinking*, *solidsate diffusion creep*, *recovery* dan rekristalisasi. Mineral dan batuan yang mengalami deformasi *ductile* terjadi pada suhu dan tekanan yang lebih tinggi daripada deformasi *brittle*. Deformasi ini sangat dipengaruhi oleh reologi batuan. Reologi batuan digambarkan sebagai fungsi dari hubungan antara kecepatan tegasan dan regangan. Tegasan dalam deformasi ini biasanya sebagai *shear stress* ( $\tau$ ) atau *differential stresses* tunggal ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ). Perilaku reologi pada deformasi *ductile* menunjukkan perilaku elastis material, yang mana perubahan regangan sangat dipengaruhi tegasan .

Hubungan tegasan dan regangan memberikan terminologi material Newtonian dan Non-Newtonian. Perilaku Newtonian, jika material diberi tegasan maka regangan yang dihasilkan memperlihatkan pola fungsi linear ( $\epsilon \propto \sigma$ ). Sedangkan perilaku Non-Newtonian menunjukkan regangan akan bertambah dengan memperlihatkan fungsi tegasan eksponensial ( $\epsilon \propto \sigma^n$ ). Eksponen tegasan ( $n$ ) diketahui sebagai aliran tegasan dari kesensitivitas *strain rate* dan nilainya 1 untuk perilaku Newtonian dan lebih dari 1 untuk perilaku Non-Newtonian, tetapi biasanya tidak lebih dari 5.

Arah pergerakan pada zona hancur biasanya dapat ditunjukkan dengan adanya subparalel dari striasi, *slickenfibres* dan kumpulan butiran dan lineasi butiran. Arah pergerakan pada zona hancur sangat penting untuk merekonstruksi sejarah tektonik di suatu daerah, tetapi paling penting adalah sense pergerakan, yang mana dapat bergerak secara mengiri atau manganan, normal atau *reverse*.

### Metode Penelitian

Pergerakan dan perkembangan bentuk fabrik selama deformasi progresif dipelajari dengan observasi lapangan, simulasi numerik dan pemodelan analog.

#### 1. Observasi Lapangan dan Pengamatan Mikroskop

Pengamatan lapangan dan pengambilan conto batuan untuk diamati secara mikroskopis. Pengamatan orientasi fabrik batuan dan mikrostruktur berupa lineasi fabrik untuk mengetahui deformasi. Zona aktif berupa milonit, pengamatan porfiroklas, mika *fish*, porfiroblas, urat, regangan bayangan dan boudin untuk mengetahui indikasi pergerakan. conto batuan diambil di zona hancur kemudian diamati secara mikroskopis baik secara nikol paralel dan silang. Pengamatan tekstur, komposisi, dan mikrostruktur berupa lineasi dan kumpulan butiran/mineral.

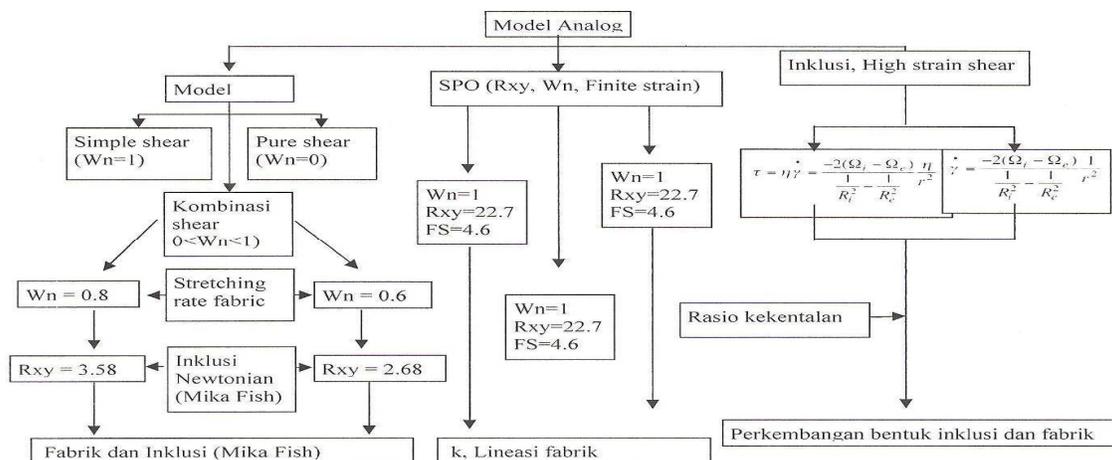
#### 2. Simulasi Numerik

Simulasi numerik menggunakan model sistem Elle, model ini membuat desain evolusi mikrostruktur dua dimensi. Model numerik ini menggunakan masalah nonlinear. Persamaan algoritma dan persamaan diferensial digunakan untuk mendeskripsikan perubahan mikrostruktur berdasarkan proses-proses individu butiran secara simultan. Persamaan yang digunakan dibawah ini dengan asumsi bahwa fabrik merupakan hasil perubahan mikrostruktur dengan proses a, b, c, ...n.

$$\delta f(a, b, \dots, c) = \delta f(a) + \delta f(b) + \dots + \delta f(c)$$

#### 3. Pemodelan Analog

Model analog mengilustrasikan tiga hal yaitu model aliran deformasi, orientasi bentuk objek rigid (SPO) dan model perkembangan bentuk inklusi pada *shear strain* tinggi. Model aliran ada tiga macam yaitu aliran *simple shear* dengan  $W_n = 1$ , kombinasi *shear* (*pure & simple shear*) dengan  $W_n$ ;  $0 < W_n < 1$  dan *pure shear* dengan  $W_n = 0$ . SPO juga dimodelkan sesuai dengan alirannya. Pada model perkembangan bentuk inklusi, rasio kekentalan antara matrik dan inklusi dibuat berbeda. Di bawah disajikan diagram aliran model analog.

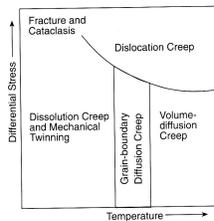


## Hasil dan pembahasan

### 1. Mekanisme Deformasi

Mekanisme deformasi dalam zona transisi (zona antara *brittle* dan *ductile*) yang menghasilkan struktur milonit masih terdapat mekanisme *microfracture cataclasis* ditandai butiran memperlihatkan struktur rekahan mikro. Sedangkan lebih dalam ke arah zona *ductile* terjadi mekanisme deformasi intrakristalin, *twinning*, *kinking*, *solid-state diffusion creep*, *recovery* dan rekristalisasi. Mekanisme deformasi dapat diilustrasikan dalam fungsi *differential stress* dengan temperatur (Gambar 3). Pada suhu tinggi dan tegasan yang relatif lebih sedikit terjadi proses *difusi-creep*.

Rekahan mikro merupakan bidang planar diskontinu dalam butiran. Rekahan mikro mengalami propagasi secara lateral oleh perpindahan material di sekeliling yang saling berinteraksi. Rekahan terjadi bisa dikarenakan regim tarik, geser, atau kombinasi keduanya. Rekahan mikro bisa juga tersusun atas bentuk kurva jika tegasan antara butiran dengan material di sekeliling dalam kondisi deformasi inhomogen contohnya inklusi.



Gambar 3. Hubungan antara temperatur vs tegasan dengan mekanisme deformasi

Mekanisme deformasi dalam batuan yang tersusun atas fluida intergranular dan terjadi pada suhu rendah disebut *pressure solution*. *Pressure solution* terjadi di mana tegasan di sekitar butiran sangat tinggi sehingga menyebabkan daerah di

batas butiran menjadi tidak stabil, butiran akan larut akibat tegasan dan aktifitas fluida antara butiran. Butiran yang saling interaksi dan kontak dengan permukaan dalam sudut tinggi secara terus-menerus akan mengalami pemendekan. Kontak antar butir menyebabkan densitas *crystal defect* lebih tinggi daripada tidak di batas kontak karena tegasan di daerah kontak antara butiran lebih tinggi.

Kristal dapat terdeformasi secara internal tanpa mengalami proses rekahan oleh pergerakan yang disebut sebagai *lattice defect*, proses ini dikenal sebagai mekanisme deformasi intrakristalin. *Lattice defect* dalam kristal dapat dikelompokkan dalam *defect titik* dan *defect garis (dislocation)*.

*Defect titik* dicontohkan proses *vacancies* dan *interstitials*. Sedangkan *defect garis* meliputi *edge dislocation* dan *screw dislocation*. Proses intrakristal dalam mikroskopis mudah dikenali yaitu adanya pepadaman bergelombang suatu mineral. Deformasi intrakristalin oleh dislokasi terbang disebut sebagai *glide dislocation*. *Glide dislocation* terjadi pada suhu rendah dan *stress differential* tinggi. Mekanisme *glide dislocation* dengan diikuti dislokasi tanjakan disebut mekanisme *dislocation creep*. Deformasi kristal plastis biasanya mengikuti mekanisme *dislocation creep*. *Dislocation creep* terjadi pada suhu tinggi dan *stress differential* tinggi.

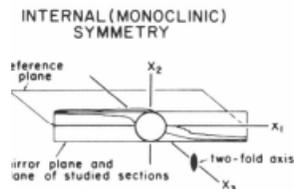
Mekanisme *twinning* terjadi pada regangan tinggi. Mekanisme deformasi *twinning* umumnya terjadi secara gradual dalam zona yang sempit, sehingga tumbuh *twin* yang lurus dan bertahap, umumnya terjadi pada mineral plagioklas. Mineral telah mengalami deformasi dislokasi kemudian densitas dislokasi dari mineral tersebut berkurang, mekanisme ini disebut sebagai mekanisme *recovery*. Kemudian proses pembentukan kembali mineral setelah mengalami deformasi disebut sebagai rekristalisasi.

### 2. Penentuan Pergerakan (*shear sense*)

Penentuan pergerakan akibat deformasi *ductile* dapat dikenali dari bentuk butiran dan matrik suatu fabrik yang berubah. Umumnya bentuk butiran atau fabrik memberikan bentuk elipsoid. Penentuan pergerakan ini dapat diketahui dari porfiroklas, mika *fish*, porfiroblas, urat, regangan bayangan, regangan pinggir, dan boudin.

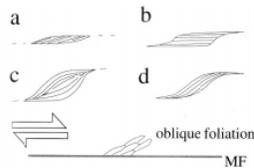
Porfiroklas, Mika *fish* dan Porfiroblas.

Porfiroklas adalah kristal tunggal yang ukurannya melebihi ukuran butir rata-rata di sekitar matrik dan jenis dari milonit. Porfiroklas dapat dibedakan berdasarkan pada geometri dari sistem porfiroklas: tipe  $\Theta$ , tipe  $\Phi$ , tipe  $\sigma$  (tipe  $\sigma$  dan tipe  $\sigma_b$ ), tipe  $\delta$ , dan objek kompleks. Tipe  $\Theta$  mempunyai sistem internal dan tipe  $\Phi$  mempunyai sistem ortorombik, kedua tipe menunjukkan indikator pergerakan aliran *pure shear*. Sedangkan tipe  $\sigma$ , tipe  $\delta$ , dan objek kompleks mempunyai sistem monoklin yang menunjukkan indikator pergerakan aliran *simple shear*. Tipe  $\sigma_a$ , tipe  $\sigma_b$ , tipe  $\delta$ , dan kompleks dapat digunakan sebagai indikator pergerakan menggunakan asimetrik internal porfiroklas, dan *stair stepping* dari sayap; sayap maju ke depan dalam arah perpindahan blok bagian atas. Untuk mendeterminasi simetri *stair stepping*, suatu bidang referensi (Gambar 4) tersusun atas sumbu simetri porfiroklas (x3) dan bidang normal (x1) sejajar dengan jejak planar yang relatif dari ekor bagian luar daerah kompleks deformasi berbatasan dengan pusat porfiroklas.



Gambar 4. Bagian sistem monoklin internal

Mika kristal tunggal dalam matrik milonit berbutir halus disebut mika *fish*. Mika *fish* banyak terdapat dalam milonit kuarsit micaceous dan ultramilonit. Karakteristik mika *fish* adalah bentuk tablet dan bentuk simetrik monoklin dengan salah satu kurva dan planar (Gambar 5), mirip porfiroklas tipe  $\sigma_a$ . Mika *fish* menunjukkan deformasi kuadran ekstensional dengan sumbu panjangnya dan menunjukkan inklinasi fabrik yang curam, yang mana dapat digunakan sebagai indikator pergerakan bersama dengan bentuk asimetrinya. *Stair stepping* ekor dari fragmen mika kecil, umumnya meluas dalam matrik di beberapa kasus, mineral lain seperti kyanit dan feldspar dapat menunjukkan geometri serupa mika *fish*.



Gambar 5. Skema tipe mika *fish* dan orientasinya terhadap foliasi milonit (MF).

Dibandingkan porfiroklas, porfiroblas relatif lebih besar, kristal tunggal di dalam matrik butiran halus. Porfiroblas (dari blastik – tumbuh) telah terbentuk oleh proses pertumbuhan metamorfisme dari kristal mineral spesifik sehingga kristal di dalam matrik tidak tumbuh dengan ukuran yang sama besar. Geometri porfiroblas memberikan indikasi pergerakan; Inklusi *elongate* membentuk kelurusan permukaan dengan porfiroblas sebagai Si (i untuk internal) mengingat bagian luar foliasi porfiroblas disebut Se (e untuk eksternal) (Gambar 6). Klasifikasi porfiroblas berdasarkan pada hubungan matrik porfiroblas, menjelaskan hubungan waktu antara pertumbuhan porfiroblas dan fase deformasi, istilah pre, inter, syn dan post-tekonik dipakai Passchier dan Trouw 1998, 4 tipe porfiroblas dapat dijelaskan dengan singkat sebagai berikut:

- Pre-tekonik porfiroklas tumbuh di dalam batuan yang bebas deformasi, di bawah kondisi metamorfisme kontak (metamorfisme temperatur tinggi – tekanan rendah). Inklusi mempunyai orientasi random (A,B Gambar 7) atau menunjukkan bagian zoning.

- Inter-tekonik porfiroklas tumbuh diinterpretasikan sebagai akhir pertumbuhan foliasi sekunder. Porfiroklas dikelilingi oleh matrik memberikan efek fase deformasi akhir yang tidak meninggalkan rekaman pola inklusi porfiroblas (C,D Gambar 7)
- Syn-tekonik porfiroblas paling banyak dijumpai dan telah tumbuh ketika fase deformasi tunggal. Berbagai macam mikrostruktur dapat terbentuk di kelompok ini (E,F Gambar 7). Pola inklusi umumnya membentuk kurva termasuk lipatan yang dikenal sebagai lipatan *helicitic*.
- Porfiroblas tumbuh setelah post-tekonik, deformasi porfiroblas diartikan oleh ketidakhadiran defleksi Se, regangan bayangan, *undulose extinction* atau kejadian lain dari ketiga deformasi tersebut.

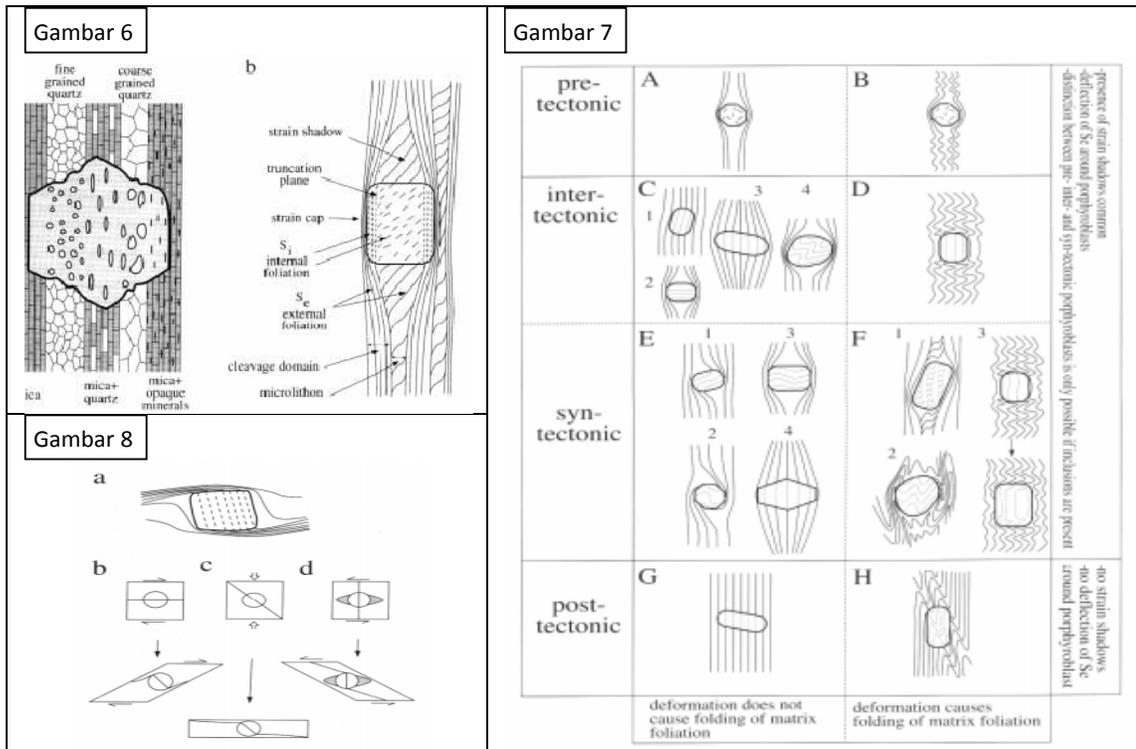
Intertektonik dan syntektonik digunakan untuk indikator pergerakan. Objek rigid dalam rotasi matrik terdeformasi sehingga sumbu *stretching* (ISA) bergerak. Indikator pergerakan ada dua tipe porfiroblas Si oblique dan Si spiral. Porfiroblas dapat terbentuk di dalam aliran *noncoaxial* dekstral menyebabkan rotasi dekstral dengan mengenai Se stabil dan aliran ISA (Gambar 8b). Sedangkan rotasi sinistral Se dengan mengenai ISA dan tempat porfiroblas dalam aliran *non-coaxial* sinistral (Gambar 8d)

Urut, Regangan bayangan, Regangan pinggir dan Boudin.

Sistem urat menyerat hanya hadir pada anchimetamorfisme sampai fasies sekis hijau menengah. Passchier & Trouw (1998) membedakan urat menjadi empat berdasarkan geometri urat & pergerakan/pertumbuhan urat meliputi *syntaxial*, *antitaxial composite* dan *ataxial*. Kedudukan urat dapat menunjukkan pergerakan. Urat yang teletak pada daerah pemendekan regangan elipsoid akan terlipat, sedangkan pada arah bukaan maksimum akan menipis dan *boudinaged*. Tetapi pendekatan ini tidak selalu tepat, karena urat terlipat juga dihasilkan oleh *pure shear flattening*. Pada zona geser *ductile* (kenyal), kekar tarik terbentuk pada seperangkat urat yang merencong (*en echelon*) dan membentuk rekahan yang terbentuk tegak lurus arah bukaan maksimum. Perubahan arah pembukaan urat menghasilkan kurva pertumbuhan serat yang dapat digunakan untuk merekonstruksi sejarah deformasi. Pada deformasi berlanjut *non-coaxial*, bagian pusat urat yang lebih tua berputar, sedangkan kekar tarik masih terus terbentuk ke arah luar dan yang termuda, bagian luarnya lebih sedikit berputarnya. Bentuk kekar tarik S dan Z menunjukkan pergerakan mengiri dan menganan. Jika serat hadir pada kekar tarik melengkung, bentuknya yang kompleks juga dapat digunakan untuk menebak pergerakan. Serat antitaxial menunjukkan kurva dengan *sense* yang

sama dengan bentuk luar kekar tarik, sedangkan serat syntaxial sebaliknya. Regangan bayangan adalah wilayah regangan rendah yang terlindung dari deformasi oleh obyek rigid atau kompeten di dalam batuan dengan kompetensi rendah. Hal itu terbentuk oleh penyesuaian material sebagai respon terhadap deformasi inhomogen terhadap massa dasar yang dekat obyek rigid atau kompeten. Regangan pinggir adalah jenis regangan bayangan yang tersusun atas material menyerat dan terendapkan dekat

dengan obyek rigid. Biasanya tersusun atas material yang berbeda dengan obyek rigid. Obyek rigid ini mengacaukan pola dan aliran tegasan. Pada deformasi suhu rendah dan tekanan fluida tinggi, peningkatan tekanan larutan dapat terjadi di dekat obyek rigid di sisi sumbu tertarik memendek (*shortening stretched axis*), sedangkan *extensional gashes* bisa terbuka pada sisi sumbu *extensional stretching*. Pada kekar ini material kristalin baru terendapkan dan



Gambar. 6. Diagram ilustrasi bagaimana porfiroklas tumbuh.

Gambar. 7. klasifikasi pertumbuhan porfiroblas.

Gambar. 8. a. Porfiroblas intertektonik dengan S<sub>i</sub> lurus, S<sub>e</sub> oblique; b. Rotasi dekstral porfiroblas dengan pengaruh rotasi foliasi sedikit di dalam aliran non-coaxial dekstral; c. Rotasi foliasi disekitar

membentuk regangan pinggir. Regangan pinggir dapat memberi informasi aliran dan sejarah deformasi pada bentuk dalam dan luar serta bermanfaat sebagai penunjuk kinematik.

Pada leher boudin struktur yang terbentuk menunjukkan kemiripan dengan regangan bayangan dan urat extensional. Kondisi metamorfik selama *boudinaged* dapat diperkirakan dengan perubahan kelimpahan mineral pada leher boudin. *Microboudinage* dapat digunakan sebagai sebuah *strain gauge* misalnya untuk mendapatkan nilai terkecil penarikan sepanjang sumbu panjang butiran *boudinaged*, tetapi sumbu ini bukan merupakan arah maksimum penarikan batuan. Bahkan panjang fragmen boudin dapat digunakan untuk memperkirakan *differential stress*.

### 3. Perkembangan Struktur dalam Proses Deformasi yang Progresif

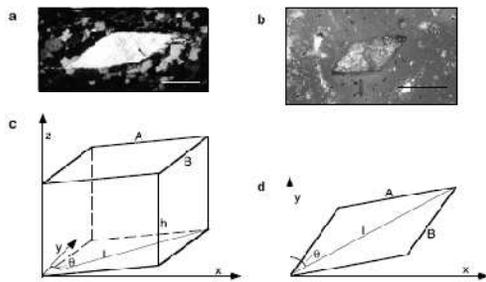
#### Fabrik material Newtonian

Regim aliran pada deformasi homogen suatu percobaan dengan kombinasi aliran *simple shear* paralel dengan bidang xy dan *pure shear* paralel dengan sumbu x, y dan z. Percobaan untuk mengetahui perilaku fabrik material Newtonian (PDMS dan rhodorsil gomme) akibat deformasi. Perilaku ini merupakan bagian dari indikasi proses deformasi progresif. Dengan Kinematik *vorticity* (W<sub>n</sub>) yang berbeda. W<sub>n</sub> = 0.8 menghasilkan pola aliran *apophyses* pada bidang regangan mempunyai sudut 37° sedangkan W<sub>n</sub> = 0.6 menghasilkan sudut 53°. Dengan rata-rata *stretching* pada sumbu x = 2.10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>, 3.3.10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>

dan  $4.7 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Selain deformasi homogen pada zona sempit yang berdekatan dengan dinding terjadi aliran inhomogen. Untuk material PDMS lebar aliran inhomogen 0.8 - 1.3 cm, sedangkan rhodorsil gomme 0.6 - 1.1 cm.

#### Inklusi (Mika *fish*)

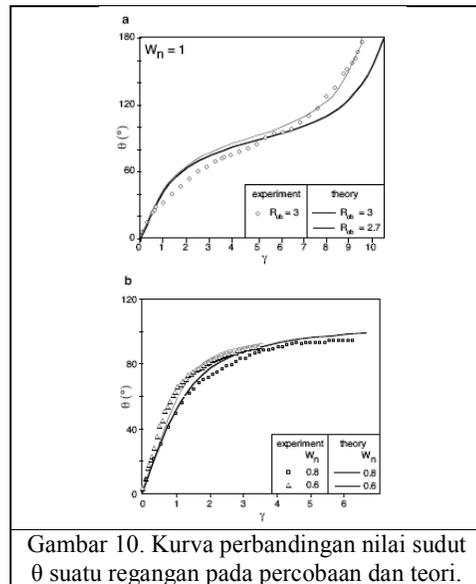
Ghosh dan Ramberg (1976) menunjukkan bahwa di dalam aliran homogen dua dimensi dengan kinematik *vorticity*; kecepatan rotasi partikel rigid elips di dalam fluida Newtonian bergantung pada orientasi rotasi dan sumbu ( $R_{ob}$ ) suatu inklusi. Aspek rasio suatu objek ( $R_{ob}$ ) dalam tiga bidang  $xy$ . Sudut  $\theta$  antara sumbu panjang inklusi dan arah referensi  $y$ . Sudut diputar searah jarum jam. Sudut antara A dan B adalah  $135^\circ$ . Percobaan, nilai  $R_{xy}$  maksimum pada  $W_n = 0.8$  mempunyai nilai 3.58 dan pada  $W_n = 0.6$  nilai  $R_{xy} = 2.68$ . Nilai  $R_{xy}$  adalah sumbu panjang ( $l$ ) dari mika *fish* pada bidang  $xy$  (Gambar 9).



Gambar 9. Geometri dari mika *fish* dalam matrik Newtonian.

Percobaan menunjukkan suatu penyimpangan dalam orientasi objek lozenge dari nilai teori elips. Dalam *simple shear* ada perbedaan kurva rotasi antara objek dengan teori pada nilai  $R_{ob} = 3$  (Gambar 10a). Tetapi kurva rotasi objek penelitian lebih mirip dengan kurva rotasi teori dengan nilai  $R_{ob} = 2.7$  (Gambar 10a). Di dalam aliran monoklin dengan eksperimen  $W_n = 0.8$  dan  $W_n = 0.6$  hasil menunjukkan bahwa objek mencapai suatu posisi semi stabil. Posisi  $95^\circ$  di  $W_n = 0.8$  dan  $90^\circ$  di  $W_n = 0.6$  (Gambar 10b). Nilai teori untuk elips dg  $R_{ob} = 2.7$  menunjukkan penyimpangan yang lebih kuat daripada hasil eksperimen. Kita berpendapat bahwa penyimpangan observasi dari teori merupakan akibat bentuk objek rigid. Antara rasio sumber objek dan bentuk seperti elips, rektangular, lozenge mempengaruhi perilaku objek dalam aliran monoklin. Hasil percobaan menunjukkan bahwa aliran homogen di dalam bidang regangan kecuali pada zona sempit (inhomogen),  $R_{xy}$  dan rate rotasi dari sphere dapat dibandingkan dengan nilai secara teori dalam zona hancur monoklin. Percobaan, rasio sumbu regangan maksimum dalam bidang  $xy$  nilai  $R_{xy}$  kurang dari 4 untuk semua tipe aliran

monoklin yang dapat dimodelkan oleh peralatan tersebut. Secara teknik dibatas ketebalan material antara  $10^3 - 10^6 \text{ Pa}$  s. Kisaran *strain rate* yang dapat dicapai dengan kuat bergantung pada material yang digunakan.



Gambar 10. Kurva perbandingan nilai sudut  $\theta$  suatu regangan pada percobaan dan teori.

#### Lineasi fabrik dari nilai SPO (k)

Beberapa parameter untuk determinasi SPO meliputi bentuk individu objek, tipe aliran. *Finite strain*, bergerak pada permukaan objek, reologi matrik dan berat jenis populasi objek. Di dalam studi ini, efek berbeda dari kombinasi *pure* dan *simple shear*, reologi matrik, rasio objek, interaksi partikel dan gangguan aliran pada perkembangan SPO selama deformasi. SPO dari fabrik dapat dikuantifikasikan menggunakan parameter  $k$  dari distribusi von Mises (Masuda et al 1999) dan sudut  $\beta$  dari orientasi rata-rata dari panjang sumbu objek  $R$ .  $R$  mempunyai kisaran dari 0 - 1 sedangkan  $k$  dari 0 (tidak ada kelurusan) sampai tak terbatas (kelurusan sempurna). Nilai  $k$  semakin besar berarti orientasi lineasi semakin baik. Nilai  $k = 10$ , artinya lineasi yang sangat baik.

$R_{xy}$  gelap menunjukkan regangan tinggi sedangkan  $R_{xy}$  terang menunjukkan regangan kecil (Gambar 11). Dengan penambahan  $W_n$  menunjukkan zona hancur dengan regangan tinggi, jumlah perilaku rotasi dari individu objek dari populasi dengan rasio objek tinggi menghasilkan SPO tinggi, untuk orientasi rata-rata dari sumbu terpanjang objek membentuk sudut kecil dengan bidang geser. Populasi objek dengan rasio rendah ( $R_{ob} = 2$ ) menghasilkan intensitas SPO rendah (nilai  $k$  rendah) dalam semua percobaan. Dalam percobaan, *pure shear* mendominasi zona dengan nilai  $R_{xy}$  rendah yang menutup objek rigid dan *simple shear* regangan tinggi dicirikan oleh nilai  $R_{xy}$  tinggi anastomos di sekitar objek. Ketika deformasi progresif, objek yang asli mempunyai

orientansi dengan sudut tinggi terhadap bidang geser, kemungkinan menutup *simple shear* regangan tinggi, oleh sebab itu, objek akan berputar dengan kecepatan tinggi maju ke bidang geser. Objek yang mempunyai orientansi sudut rendah terhadap bidang geser, kemungkinan diposisikan dengan regangan rendah,  $W_n$  rendah, oleh sebab itu objek berputar dengan pelan dan objek akan cenderung sumbu panjang di sudut rendah terhadap bidang geser. Sekat dari objek yang berputar lebih tegas untuk populasi rasio SPO tinggi ( $k$  tinggi). Dalam percobaan dengan material non newtonian, sekat antara *simple shear* regangan tinggi dengan *pure shear* regangan ren-

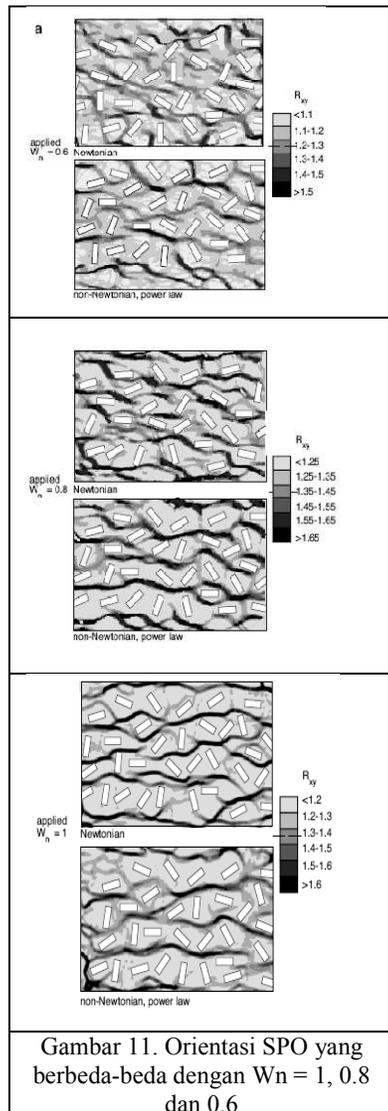
dah mendominasi zona yang nyata (tegas). Oleh sebab itu, intensitas SPO lebih tinggi daripada material newtonian. Dengan berkurangnya jumlah kinematik vorticity, daerah regangan rendah, bertambahnya  $W_n$  rendah, menyebabkan intensitas SPO bertambah.

Tiga rasio populasi objek dapat digunakan untuk analisa kinematik meliputi determinasi tipe deformasi dan pergerakan dan analisis regangan. Analisa SPO dari populasi dengan 2 rasio objek bisa menghasilkan kesalahan dalam mengartikan regangan dan intensitas SPO tidak mengindikasikan *finite strain* atau tipe deformasi. Perkembangan intensitas SPO bertambah dengan bertambahnya komponen *pure shear*. Dalam matrik Newtonian, intensitas SPO lebih tinggi daripada Newtonian. Dalam matrik *simple shear* regangan tinggi contohnya perkembangan *shear bands*.

Berdekatan *pure shear* regangan rendah mendominasi zona contohnya mikroliton, yang dicirikan oleh objek rigid berorientasi kereta yang relatif stabil mempunyai orientansi sudut rendah terhadap bidang geser. Batas antara *simple shear* regangan tinggi dan *pure shear* regangan rendah mendominasi aliran yang nyata dalam material non Newtonian.

Proses deformasi yang progresif mengenai suatu fabrik batuan akan memberikan respon berupa perubahan struktur yaitu bentuk inklusi yang akan berbeda-beda. Perkembangan bentuk inklusi ini sangat bergantung pada rasio kekentalan antara matrik dengan inklusi. Percobaan menunjukkan bahwa ada hubungan umum antara perkembangan tipe bentuk inklusi, tipe deformasi semu dalam *sense flattening*, kontraksi dan bidang regangan, *shear stress* dan *rate shear strain* dan propertis material. Subkelompok tipe 2a (Gambar 12b) terjadi jika rasio kekentalan di bawah 1, berarti inklusi kurang kompeten daripada matrik. Di rasio kekentalan 1 (subkelompok 2b) tipe regangan semu menunjukkan pada diagram Flinn bidang regangan berarti sama dengan tipe regangan yang sebenarnya. Jika rasio kekentalan sedikit lebih tinggi dari 1 (sub kelompok 2c) menghasilkan tipe deformasi kontraksi ( $k > 1$ ). Weijermars (1993, 1997) memperkirakan bahwa perkembangan bentuk berdetak (*pulsating*) dari inklusi seharusnya nampak di rasio kekentalan antara 1 dan 5. hasilnya menunjukkan rasio kekentalan di atas 2 perkembangan bentuk tidak berdetak tetapi *stretching* permanen bundar atau elips, hanya kekentalan 180 – 660 menunjukkan perilaku berdetak.

Diprediksi bahwa bentuk inklusi terdeformasi hanya sama dengan bentuk elips *finite strain* dan batuan induk terdeformasi, jika a. Propertis reologi inklusi dan batuan induks sama ketika deformasi (deformasi homogen). b. Bentuk inklusi bundar sebelum deformasi.



Gambar 11. Orientasi SPO yang berbeda-beda dengan  $W_n = 1, 0.8$  dan  $0.6$

Jika kekentalan objek dan matrik berbeda satu dengan yang lain, analisa regangan dan tipe deformasi harus dilakukan dalam rasio kekentalan objek dan inklusi. Menurut percobaan menghasilkan 4 skenario yang berbeda antara lain:

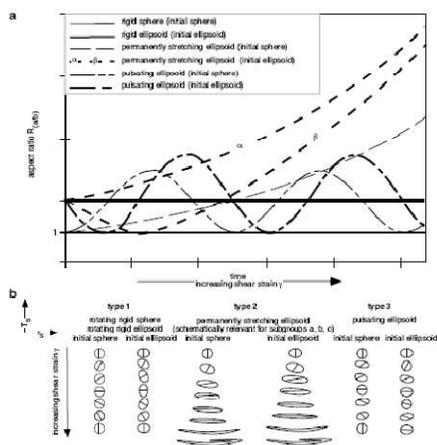
- Rasio kekentalan lebih tinggi 1200
- Rasio kekentalan antara 5 – 1200
- Rasio kekentalan antara 1 – 5
- Rasio kekentalan di bawah 1

Percobaan, inklusi dan matrik kental yang ter-deformasi dengan *simple shear* regangan tinggi menunjukkan bahwa perkembangan bentuk dan bentuk *finite* suatu inklusi dengan kuat yang dikontrol oleh rasio kekentalan efektif antara matrik dan inklusi, propertis material dan juga di-

pengaruhi oleh kecepatan meregang dan tegasan. Ada 5 deformasi yang dihasilkan, bergantung pada rasio kekentalan efektif :

- Rotasi dari objek rigid bundar dan elips (rasio kekentalan > 1200)
- Pulsating elips (rasio kekentalan :  $5/100 < \eta < 1200$ )
- Stretching elips dengan permanen yang nilai rasio jatuh dalam deformasi kontraksi (rasio kekentalan :  $1 < \eta < 5/100$ )
- Stretching elips dengan permanen ( rasio kekentalan = 1)
- Stretching elips dengan permanen yang nilai rasio jatuh dalam deformasi *flattening* (rasio kekentalan < 1)

Jika matrik atau inklusi, atau keduanya, deformasi menunjukkan rasio kekentalan non newtonian akan berganti dari bagian luar ke bagian dalam dari zona geser, dan menghasilkan perkembangan bentuk inklusi yang lebih.



Gambar 12. Skema grafik yang menunjukkan perkembangan bentuk inklusi yang berbeda-beda. a. Grafik rasio  $R(a/b)$  vs penambahan shear strain dengan penambahan waktu percobaan. b. Perkembangan bentuk inklusi selama deformasi yang progresif.

## Kesimpulan

Mekanisme deformasi *ductile* dapat dijelaskan dengan mekanisme deformasi intrakristalin, *twinning*, *kinking*, *solid-state diffusion creep*, *recovery* dan rekristalisasi. Deformasi pada batuan menyebabkan pergerakan butiran, inklusi dalam matrik batuan sehingga butiran dan matrik memberikan indikasi pergerakan. Indikasi pergerakan dalam mekanisme *ductile* dapat dikenali dari porfiroklas, mika *fish*, porfiroblas, urat, regangan bayangan, regangan pinggir dan boudin.

Perkembangan bentuk fabrik selama proses deformasi progresif melalui studi lapangan zona hancur tingkat sedang sampai rendah dalam litologi yang berbeda menunjukkan intensitas bentuk fabrik hanya di beberapa kasus dengan langsung dicirikan *finite strain* tertentu (Gambar 12.a1). Ada tiga perbedaan yang dijumpai untuk menjelaskan kenampakan tersebut yaitu:

- Intensitas bentuk fabrik dengan kuat dipengaruhi oleh derajat semu rekristalisasi (Gambar 13.a2)
- Intensitas bentuk fabrik dengan positif berhubungan dengan rasio ukuran butir aslinya ( $R_{\phi}$ ) (Gambar 13.a3)
- Kelurusan elongate objek rigid dengan positif berhubungan dengan *finite strain*. (Gambar 13.a4)

Model numerik rekristalisasi dinamik menunjukkan bahwa intensitas bentuk fabrik umumnya bertambah dengan bertambahnya regangan, meskipun di  $R_{\phi}$  rendah intensitas bisa berkurang (Gambar 13.b1). Bertambahnya derajat rekristalisasi, yang mana dengan inversi sebanding dengan energi yang melewati nilai rekristalisasi oleh inti ( $RX_{nuct}$ ), menghasilkan bertambahnya intensitas fabrik jika  $R_{\phi}$  tinggi (Gambar 15.b2). Dengan bertambahnya mobilitas batas butiran (GBMob) intensitas fabrik berkurang dengan  $R_{\phi}$  (Gambar 13.b3).

Model analog SPO dari populasi objek rigid menyebarkan dalam matrik kental menunjukkan suatu ketergantungan intensitas bentuk fabrik pada rasio objek rigid ( $R_{ob}$ ), tipe aliran dan hukum aliran matrik. Dengan  $R_{ob} = 3$  intensitas bentuk fabrik lebih tinggi daripada  $R_{ob} = 2$  (Gambar 13.c1). Bertambahnya  $W_n$  menghasilkan bertambahnya intensitas bentuk fabrik (Gambar 13.c2). Bentuk fabrik berkembang dalam matrik non newtonian menunjukkan intensitas lebih tinggi dan regangan lebih tegas daripada matrik newtonian (Gambar 13.c3). Model analog bentuk fabrik dalam *simple shear* regangan tinggi menampakkan bahwa perkembangan bentuk 3 dimensi dari inklusi kental melekat dalam matrik kental bergantung pada *finite strain* dan rasio kekentalan antara inklusi dengan matrik (Gambar 13.d1).

## Ucapan Terima Kasih

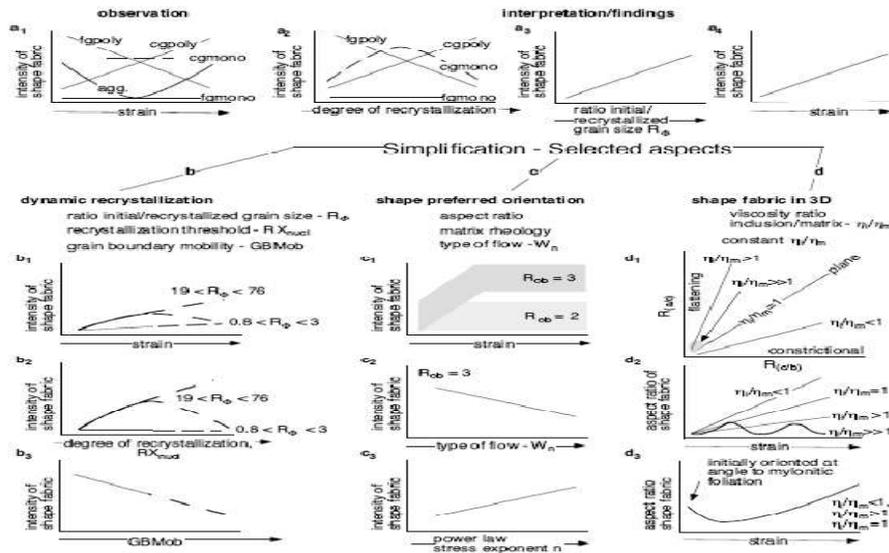
Terima kasih ditujukan kepada Ir. Benyamin Sapie Ph.D, dosen Teknik Geologi Institut Teknologi Bandung atas bimbingannya.

**Daftar Pustaka**

1. Fischer, Yvonne. 2001. *Shear Sense Indicators : Ductile Rocks (veins, strain shadows, striae fringes, boudins)*. Oberseminar-Vortrag 12-04-2001.
2. Siegers, Ingrid. ----. *Shear Sense Indicator I : Ductile Rocks (Porphyroclasts, mica fish, porphy-*

*roblast)*. Institute of Geology, TU Bergakademie Freiberg.

3. Passchier, CW & Trouw, RA. 1996. *Microtectonics*. Springer.
4. Piazzolo, S.C. 2000. *Shape Fabric Development During Progressive Deformation*. Disertasi. Ulm, Mainz.



Gambar 13. Perkembangan intensitas fabrik, berkaitan dengan sifat aliran, material, rasio kekentalan selama proses deformasi yang progresif