

BAB II

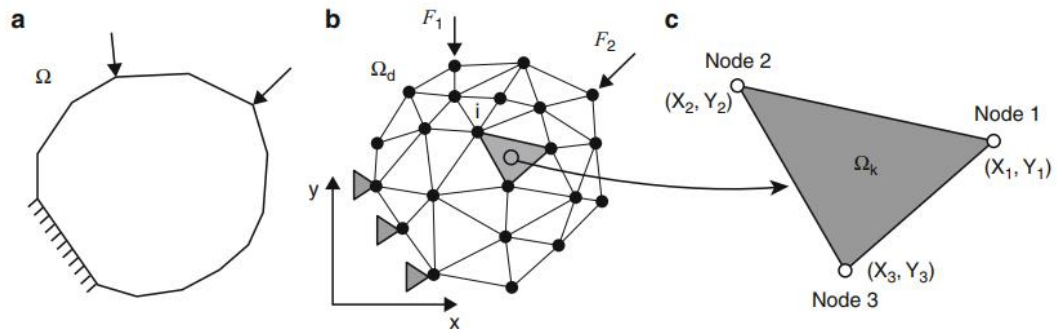
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Analisis Elemen Hingga

Analisis elemen hingga atau *finite element analysis* (FEA) adalah proses simulasi untuk memprediksi perilaku suatu objek berdasarkan perhitungan yang dibuat dengan metode elemen hingga atau *finite element method* (FEM). FEM dapat digunakan untuk memecahkan berbagai masalah mekanika benda padat kompleks yang mengalami pembebanan. Benda padat kompleks yang dimaksud berarti benda memiliki bentuk, beban, dan kondisi batas yang sembarang [8]. Untuk memecahkan masalah kompleks tersebut, FEM akan membagi bagian kompleks menjadi bagian-bagian lebih kecil dengan pola tertentu. Sehingga dapat dilakukan pemecahan masalah untuk mengetahui perilaku benda padat ketika mengalami pembebanan. Keunggulan FEM yaitu memiliki kemampuan untuk mendapatkan nilai analisis mekanika mendekati keadaan aktualnya.

FEA adalah metode komputasi yang digunakan untuk menganalisis perilaku struktur dalam berbagai kondisi. Ini melibatkan membagi struktur kompleks menjadi bagian-bagian yang lebih kecil dan lebih sederhana yang disebut elemen hingga, dan kemudian memecahkan persamaan untuk menentukan perilaku setiap elemen. Hasilnya kemudian digabungkan untuk menentukan perilaku keseluruhan struktur [9]. FEA memiliki berbagai aplikasi, termasuk analisis struktural, analisis perpindahan panas, dan analisis dinamika fluida [10]. FEA biasanya digunakan dalam teknik manufaktur untuk merancang dan mengoptimalkan produk maupun proses. Misalnya, FEA dapat digunakan untuk menganalisis tegangan dan regangan

pada jembatan di bawah beban yang berbeda, atau untuk mengoptimalkan desain mesin mobil untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar [11].



Gambar 2.1 Konsep *Meshing* untuk Elemen Hingga: (a) Geometri Utuh (b) Pemotongan Geometri (c) Komponen Elemen [12]

Meshing adalah bagian dari FEM yang merupakan proses pemecahan geometri kompleks menjadi bagian-bagian yang lebih kecil dan lebih sederhana yang disebut elemen, yang dapat dianalisis menggunakan metode elemen hingga [13]. Tujuan utama dari *meshing* dalam analisis elemen hingga adalah untuk membuat model numerik yang dapat secara akurat mewakili perilaku fisik dari sistem yang dianalisis [14]. Dalam analisis mekanika benda padat, *meshing* dilakukan untuk membagi komponen kompleks menjadi bagian kecil (elemen) agar dapat dilakukan perhitungan secara teoritis secara komputasi oleh model yang telah disediakan. Ukuran elemen dapat mempengaruhi nilai hasil komputasi, sehingga untuk memastikan apakah *meshing* telah dilakukan dengan optimal atau tidak, perlu dilakukan *meshing sensitivity analysis*.

2.2 Tegangan dan Regangan

Mekanika bahan adalah cabang dalam mekanika terapan yang mengkaji bagaimana benda padat berperilaku ketika dikenai berbagai beban. Dalam

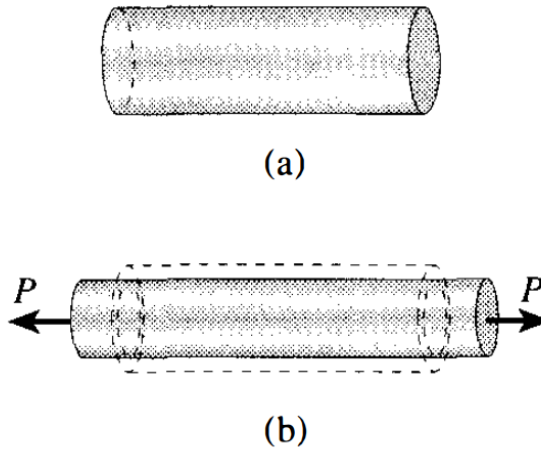
mekanika bahan, dapat digambarkan perilaku mekanis suatu struktur dengan meninjau besaran atau nilai tegangan, regangan, dan peralihan (*displacement*) hingga suatu struktur mengalami kegagalan. Tegangan adalah gaya yang dialami suatu benda per-satuan luas. Tegangan secara garis besar dibagi menjadi tiga jenis, tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan normal. Tegangan tarik (*tensile stress*) adalah tegangan yang dialami suatu benda ketika ditarik dengan suatu nilai gaya. Tegangan tekan (*compressive stress*) yaitu tegangan yang dialami suatu benda ketika diberikan beban ke arah benda itu sendiri. [15].

2.2.1 Tegangan Normal dan Regangan Normal

Tegangan normal (*normal stress*) adalah tegangan ketika arah beban tegak lurus terhadap permukaan potongan benda, sehingga tegangan normal dapat berupa tegangan tarik atau tegangan tekan. Jika diasumsikan tegangan terbagi secara merata di seluruh penampang, tegangan dapat dituliskan dengan rumus sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (2.1)$$

P adalah gaya yang dialami suatu benda ketika diberikan beban, dan A adalah luas penampang benda sehingga nilai tegangan dapat dinyatakan dalam satuan N/mm² atau Pa (Pascal). Apabila beban P tidak bekerja pada pusat penampang, maka perhitungan tegangan menjadi lebih rumit. Namun walaupun tegangan tidak terbagi merata, persamaan tersebut tetap masih banyak digunakan hingga saat ini karena memberikan nilai tegangan rata-rata di penampang [15].



Gambar 2.2 Perpanjangan Aksial dan Kontraksi Lateral pada Benda yang Diberikan Beban Tarik: (a) Sebelum Pembebanan, (b) Setelah Pembebanan [15]

Suatu benda akan mengalami perubahan panjang ketika diberi beban aksial. Beban aksial adalah beban yang diberikan pada suatu benda dengan arah melintang sepanjang arah sumbunya, atau dapat dikatakan gayanya tegak lurus terhadap sumbu. Panjang beban akan bertambah ketika ditarik, dan berkurang ketika ditekan. Rasio antara pertambahan panjang terhadap panjang awal dinamakan dengan regangan [15]. Dengan itu, regangan dapat dituliskan rumusnya sebagai berikut [16].

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dalam rumusnya, regangan merupakan rasio antara pertambahan panjang dengan panjang awal. Sehingga, regangan merupakan besaran yang tidak berdimensi atau bersatuan. Apabila suatu benda diberikan beban berupa tarik maka regangannya disebut sebagai regangan tarik yang bernilai positif, sedangkan beban yang ditekan regangannya disebut regangan tekan yang bernilai negatif. Adapun regangan akan disebut sebagai regangan

normal apabila regangan tersebut dihasilkan dari beban yang berkaitan dengan tegangan normal [15].

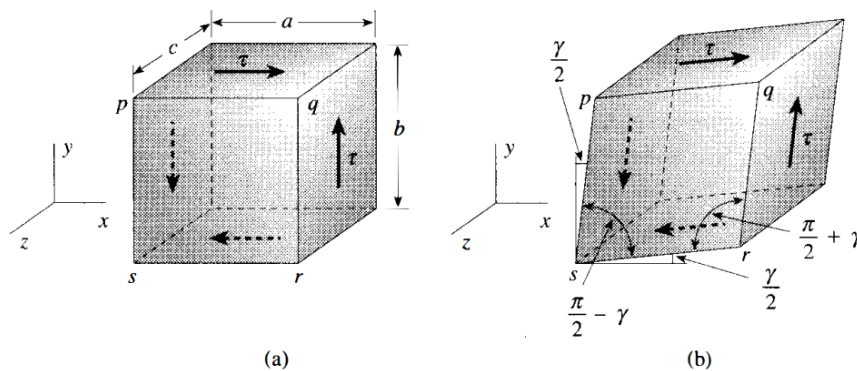
Suatu benda yang diberikan beban tarik, perpanjangan aksialnya akan diikuti dengan kontraksi lateral. Kontraksi lateral adalah kontraksi yang tegak lurus dengan arah pembebanannya. Rasio regangan lateral terhadap regangan aksial disebut sebagai *poisson ratio*. Dengan begitu, rumus *poisson ratio* dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \dots \dots \dots (2.3)$$

Ketika regangan suatu benda menjadi besar karena mengalami deformasi plastis ketika diberikan beban, maka *poisson ratio*-nya menjadi berubah. Sehingga dapat dijelaskan bahwa nilai *poisson ratio* akan tetap konstan hanya ketika benda masih berada di daerah elastis [15].

2.2.2 Tegangan Geser dan Regangan Geser

Tegangan yang bekerja dengan arah tangensial terhadap permukaan benda disebut sebagai tegangan geser. Berikut ini adalah gambar elemen kecil sederhana yang dapat digunakan untuk menggambarkan bagaimana tegangan geser bekerja.



Gambar 2.3 Elemen Kecil dari Bahan yang Mengalami Tegangan dan Regangan Geser [15]

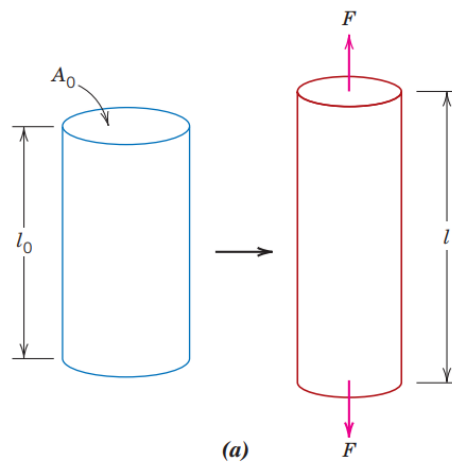
Gambar 2.3 (b) menunjukkan respons bahan yang diberikan beban pada permukaan dengan luas ac . Respon ini terjadi ketika permukaan depan dan belakang tidak bertegangan, dan tegangan geser τ di permukaan atas terbagi rata di seluruh bagian permukaan. Luas permukaan atas dan bawah adalah sama, sehingga tegangan di kedua permukaan tersebut sama besar. Gaya yang bekerja di kedua permukaan tersebut akan membentuk kopel dengan momen τ_{abc} terhadap sumbu z . Karena terjadi kesetimbangan akibat dimensi elemen yang simetris, maka permukaan atas, bawah, samping kiri, dan samping kanan mengalami tegangan yang sama besar namun masing-masing arahnya saling berlawanan [15].

Tegangan geser yang dialami oleh suatu elemen benda akan disertai regangan geser. Dapat dilihat pada Gambar 2.3, digambarkan bahwa regangan geser tidak mengubah panjang elemen dalam arah 3 sumbu. Sebagai gantinya, regangan geser akan merubah bentuk elemen. Sudut γ adalah perubahan bentuk dari elemen dan disebut sebagai regangan geser, sehingga satuan regangan ini dinyatakan sebagai derajat atau radian [15].

2.2.3 Tegangan Tarik

Tegangan normal dapat berupa tarik atau tekan. Apabila suatu bahan ditarik dengan gaya tertentu, maka tegangan yang dialaminya berupa tegangan tarik (*tensile stress*) [15]. Gambar 2.4 mengilustrasikan perilaku mekanis suatu batang prismatis ketika diberi beban F dari dua arah. A_0 digambarkan sebagai luas penampang awal batang sebelum dilakukan pembebanan. Panjang awal batang mula-mula digambarkan sebagai l_0 dan panjang batang ketika menerima beban digambarkan sebagai l .

Pertambahan panjang batang ini merupakan salah satu dari beberapa respon yang diberikan oleh batang ketika diberikan beban mekanis. Selisih dari panjang awal dan panjang ketika diberi pembebanan ini menjadi salah satu besaran yang diperlukan untuk mengetahui nilai regangan yang telah dituliskan pada persamaan 2.2. Adapun perubahan luas penampang yang terjadi akibat pembebanan dapat disebut sebagai kontraksi lateral.

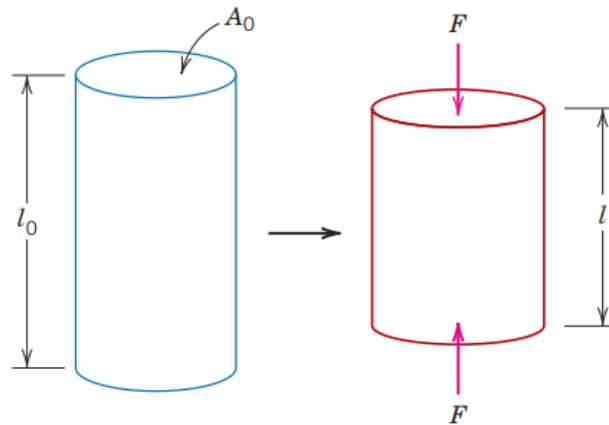


Gambar 2.4 Skema Perilaku Batang Prismatis yang Diberi Tegangan Tarik [16]

2.2.4 Tegangan Tekan

Tegangan tekan dialami oleh suatu benda apabila beban diberikan ke arah titik pusat bahan tersebut [15]. Perbedaan dasar antara tegangan tekan dengan tegangan tarik yang telah dijelaskan adalah arah pembebanan pada bahan. Apabila tegangan tarik disebut sebagai tegangan yang dialami bahan ketika diberi gaya tarik, maka tegangan tekan adalah tegangan yang dialami bahan ketika diberi gaya tekan. Perbedaan perilaku bahan juga dapat dijelaskan pada Gambar 2.5. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa arah beban yang diberikan bukan menjauh dari pusat batang, melainkan ditekan

secara aksial ke arah pusat batang itu sendiri. Perubahan panjang yang dialami batang disini juga terjadi bukan karena pertambahan panjang, melainkan karena adanya pengurangan panjangnya. Selain itu, luas penampang bahan juga mengalami penyempitan.



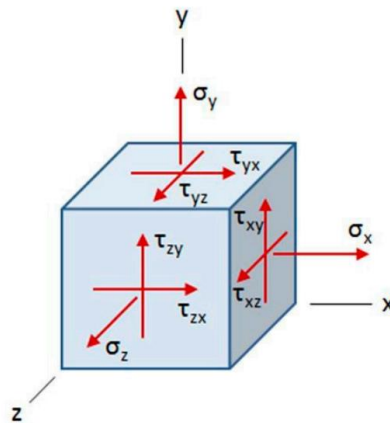
Gambar 2.5 Skema Perilaku Batang Prismatis yang Diberi Tegangan Tekan [16]

2.2.5 Tegangan Ekivalen (*Von Mises*)

Pada analisis kekuatan material, tegangan ekivalen *von mises* digunakan untuk menentukan kapan suatu material akan mengalami deformasi plastis. Tegangan ini adalah ukuran skalar yang didapat dari komponen tegangan *multiaxial*. Pendekatan ini sering digunakan dalam teori kegagalan material karena memberikan hasil yang akurat untuk berbagai jenis material khususnya logam. Berikut adalah persamaan tegangan *von mises* [17].

$$\sigma_{vm} = \sqrt{0,5[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \dots\dots (2.4)$$

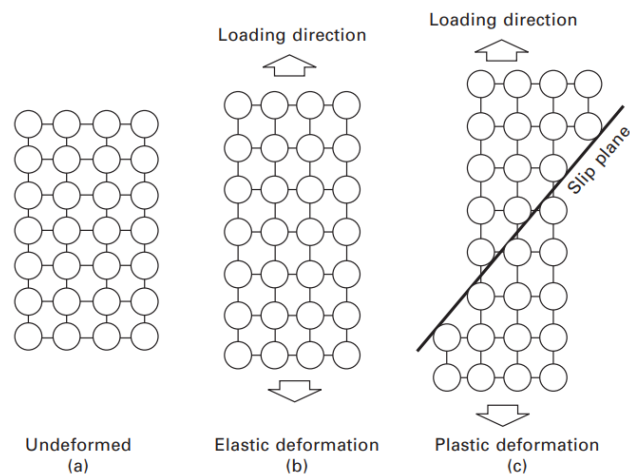
Pada persamaan tersebut, terdapat komponen tegangan normal (σ) dan tegangan geser τ . Untuk memahami arah masing-masing komponen tegangan tersebut terhadap permukaan benda dapat dilihat pada Gambar 2.6. Dengan persamaan ini, dapat diketahui besaran tegangan yang menggabungkan antara kedua tegangan tersebut menjadi satu nilai yang setara.



Gambar 2.6 Arah Komponen Tegangan terhadap Elemen [17]

2.3 Deformasi

Deformasi didefinisikan sebagai perubahan bentuk suatu benda padat ketika menerima suatu gaya. Deformasi dapat dipisahkan menjadi dua, yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis adalah perubahan bentuk suatu benda yang bersifat sementara, sedangkan deformasi plastis bersifat permanen [18]. Deformasi elastis dikatakan perubahan bersifat sementara karena perubahan ini akan hilang atau kembali ke bentuk semula ketika gaya dihilangkan. Adapun deformasi plastis dikatakan sebagai perubahan bentuk secara permanen karena bentuknya tidak kembali seperti semula walaupun gaya dihilangkan.



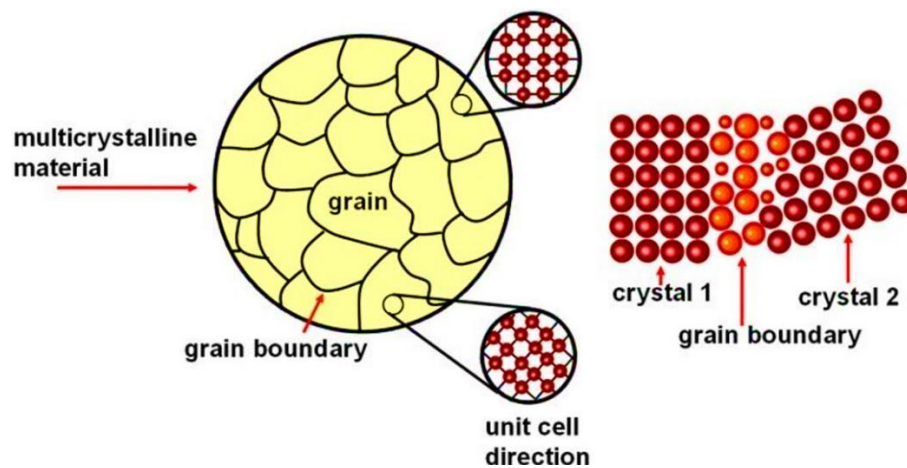
Gambar 2.7 Mekanisme Perubahan antar Bidang Atom ketika Mengalami Deformasi [19]

Deformasi total merupakan kondisi deformasi pada suatu material ketika diberi beban sampai memasuki daerah plastis pada kurva tegangan-regangan, sehingga perubahan bentuk yang terjadi merupakan gabungan antara deformasi elastis dan deformasi plastis [18]. Gambar 2.7 menggambarkan bagaimana perubahan posisi bidang atom ketika belum menerima beban (a), ketika menerima beban dalam daerah elastis (b), dan ketika menerima beban dalam daerah plastis (c). Deformasi plastis dapat membuat perubahan bentuk secara permanen karena adanya mekanisme *sliding* antar bidang atom, dan atau terjadinya pecahan ikatan antar atomnya [18].

2.4 Mekanisme Penguatan Logam

Kekuatan material berbanding terbalik dengan mobilitas salah satu jenis cacat garis, yaitu dislokasi. Dislokasi merupakan cacat garis yang paling banyak dijumpai di dalam kristal. Dislokasi dapat digambarkan sebagai adanya sisipan satu bidang atom tambahan dalam struktur kristal. Material yang mengalami deformasi akan dengan mudah mengakibatkan terjadinya dislokasi [18]. Butir merupakan

struktur kristal yang terbentuk dalam suatu material. Ukuran butir yang lebih besar memiliki batas butir yang lebih sedikit. Adapun batas butir merupakan daerah antarmuka dimana dua atau lebih butir kristal dengan orientasi yang berbeda bertemu.

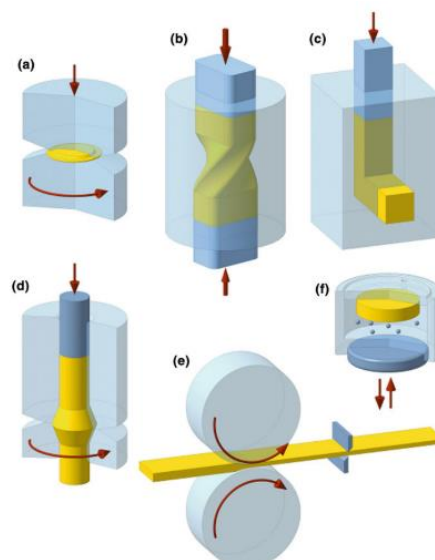


Gambar 2.8 Butir dan Batas Butir pada Material Polikristalin [20]

Kekuatan logam dapat ditingkatkan melalui *grain refining*, yaitu penghalusan bentuk dan ukuran butir. Struktur butir pada material polikristalin memiliki batas-batas butir, yang menjadi hambatan bagi pergerakan dislokasi. Butir yang lebih halus cenderung memiliki batas butir yang semakin banyak, yang membuat pergerakan dislokasi semakin sukar terjadi. Ketika suatu material mengalami deformasi, dislokasi akan bergerak sesuai bidang slip dengan orientasi yang berbeda-beda. Dislokasi dapat melewati batas butir apabila diberikan tegangan yang cukup besar, sehingga dikatakan material dengan ukuran butir sangat halus memiliki sifat mekanik yang lebih unggul [21]. Salah satu cara untuk menghasilkan butir halus adalah dengan melakukan pengerasan regang (*strain hardening*). Pengerasan regang dapat terjadi apabila logam dideformasi plastis sehingga ukuran butir dapat menjadi lebih kecil dan lebih pipih [18].

2.5 Severe Plastic Deformation

Selama dua dekade terakhir, metode *severe plastic deformation* (SPD) telah berkembang dengan pesat. Metode-metode baru menyederhanakan proses atau memungkinkan produksi bahan dengan sifat mekanik yang tinggi [22]. Proses SPD dapat didefinisikan sebagai proses pembentukan logam di mana regangan plastik yang sangat besar dilakukan pada logam untuk membuat logam dengan butir sangat halus. Tujuan utama dari proses SPD adalah untuk menghasilkan komponen yang memiliki kekuatan tinggi dan ringan dengan keselarasan lingkungan. Berbagai proses SPD telah dikembangkan seperti proses *equal channel angular pressing* (ECAP), *accumulative roll-bonding* (ARB), *high pressure torsion* (HPT), *repetitive corrugation and straightening* (RCS), *cyclic extrusion compression* (CEC), *torsion extrusion*, *severe torsion straining* (STS), *cyclic closed-die forging* (CCDF), dan *super short multi-pass rolling* (SSMR) [23].



Gambar 2.9 Skema Proses Beberapa Metode *Severe Plastic Deformation* [24]

Salah satu tujuan utama dalam penggunaan proses SPD pada sebuah material adalah perbaikan struktur mikronya, yang akan meningkatkan sifat mekaniknya. Logam yang dihasilkan oleh proses SPD memiliki ukuran butir rata-rata kurang dari 1 μm dengan batas butir yang memiliki sudut besar mis-orientasi [23]. Proses SPD dapat meningkatkan kuat luluh material tiga sampai lima kali lipat dibandingkan dengan material yang telah di-anil. SPD dapat mengurangi kemampuan *work hardening*, sehingga peningkatan *ultimate tensile strength* (UTS) biasanya tidak begitu tinggi. Kuat luluh dan nilai UTS meningkat, namun perpanjangan total hingga kegagalan (kekakuan) menurun. Dari perpanjangan total hingga kegagalan, perpanjangan seragam lebih kecil dibandingkan dengan perpanjangan yang tidak seragam [3].

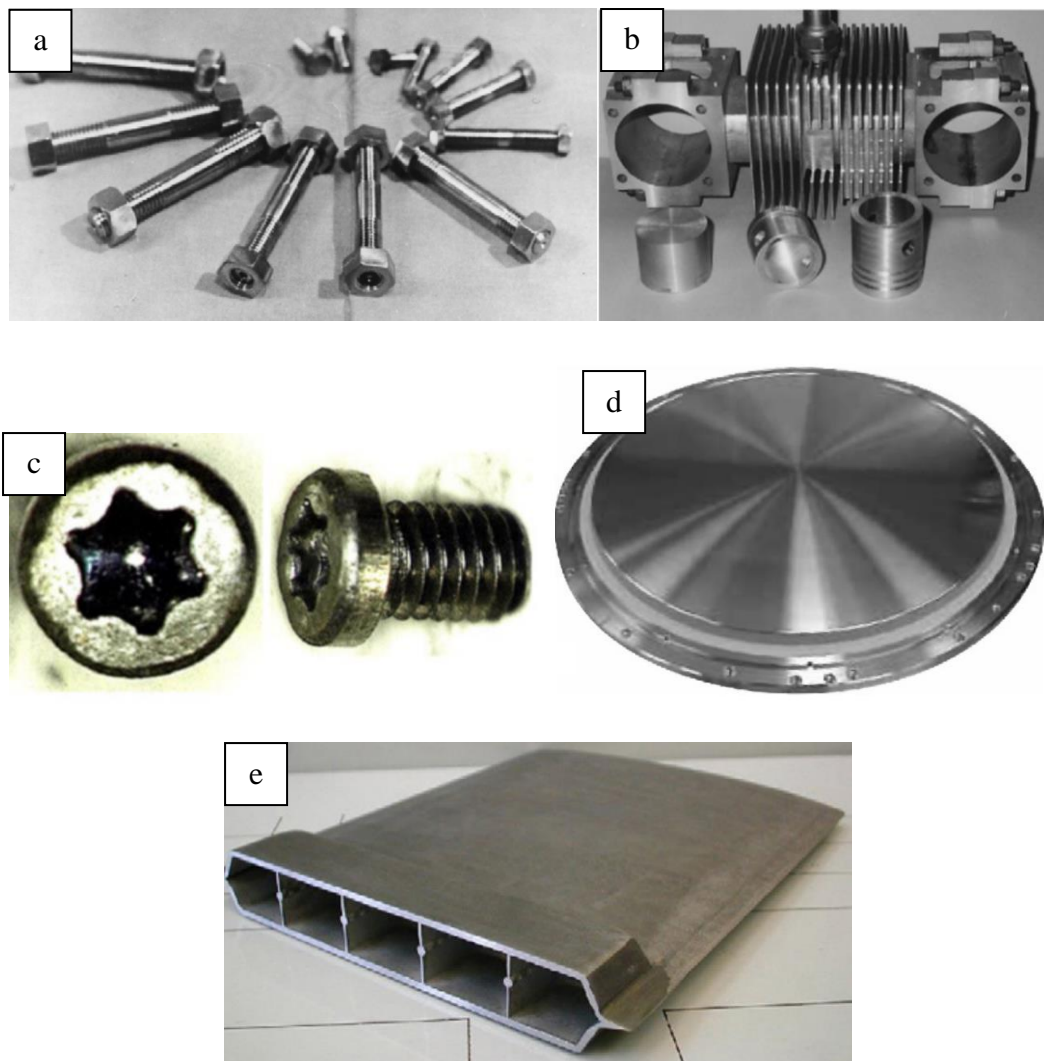
Logam dengan butir yang sangat halus yang dihasilkan melalui proses SPD menunjukkan kekuatan tinggi, dan oleh karena itu proses ini dapat digunakan untuk menghasilkan logam dengan kekuatan ultra tinggi yang ramah lingkungan. Tegangan luluh logam polikristalin berkaitan dengan diameter butir d melalui persamaan Hall–Petch berikut, dimana σ_0 adalah tegangan gesek dan A dianggap konstan [23].

$$\sigma_y = \sigma_0 + Ad^{-1/2} \dots\dots\dots (2.5)$$

Persamaan ini menjelaskan bahwa tegangan luluh meningkat dengan berkurangnya *square root* ukuran butir. Penurunan ukuran butir menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi tanpa mengurangi ketangguhan, yang membuatnya berbeda dari metode penguatan lain seperti proses *heat treatment*.

Sifat logam yang diproses oleh SPD memiliki karakteristik kekuatan, keuletan, dan kelelahan yang tinggi. Oleh karena sifatnya itu, logam UFG digunakan sebagai bahan struktural. Contohnya baut yang banyak digunakan dalam

industri kendaraan dan pesawat, diproduksi dengan titanium paduan yang diproses dengan ECAP. Contoh lain produk SPD diantaranya adalah *micro bolt*, *sputtering target*, piston, dan *hollow blades* [23].



Gambar 2.10 Beberapa Aplikasi Proses SPD seperti (a) *Ti alloys Bolt*, (b) *Piston*, (c) *Micro Bolts*, (d) *Sputtering Target*, dan (e) *Hollow Blades* [23]

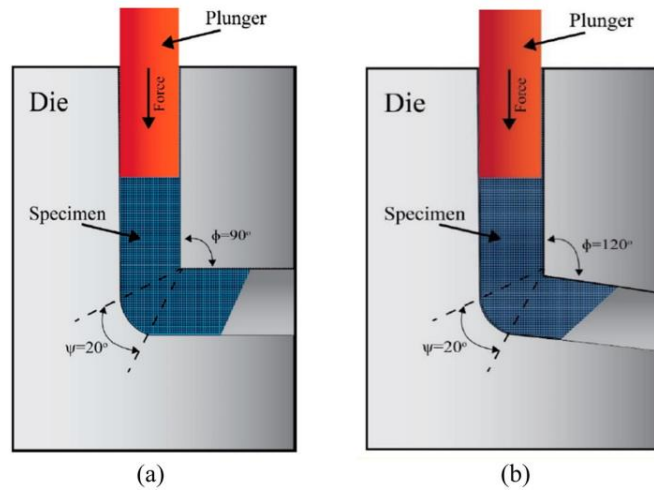
2.6 *Equal Channel Angular Pressing*

Equal channel angular pressing (ECAP) adalah proses yang efektif untuk menghasilkan logam dengan ukuran butir sangat halus. Keunggulan proses ini dibandingkan dengan proses metalurgi konvensional seperti ekstrusi dan *rolling*

yaitu regangan yang sangat tinggi dapat dicapai tanpa adanya perubahan dimensi penampang sampel. Proses ECAP menggabungkan tekanan kompresi dan tegangan tarik dalam cetakan untuk menghasilkan produk dengan deformasi yang sangat tinggi. Deformasi ini akan menghasilkan pepadatan butiran yang signifikan ke dalam sampel besar [25].

Perubahan struktur mikro pada sampel hasil ECAP akan memperbaiki sifat mekanik material seperti kekerasan, kekuatan, dan yang lainnya. Nilai kekerasan material memberikan informasi mengenai homogenitas sifat kekuatan. Ukuran butiran yang lebih halus mampu meningkatkan kekuatan secara signifikan pada proses ECAP, seiring dengan peningkatan deformasi plastis yang cukup besar selama penekanan [26]. Struktur mikro yang dihasilkan oleh hasil proses ECAP sangat tergantung pada sejumlah faktor eksperimental, termasuk sifat sistem geser yang dilakukan saat penelitian ECAP dan regangan total yang diberikan pada sampel [27]. Prinsip dasar dari *equal channel angular pressing* (ECAP) adalah melakukan deformasi pada sebuah logam melalui proses *shearing* sederhana yang mana geser terjadi tanpa adanya perubahan luas penampang sampel [28].

Parameter dalam proses ECAP salah satunya adalah temperatur proses. Struktur mikro suatu material logam akan mengalami pertumbuhan kristal ulang ketika mencapai temperatur rekristalisasi. Dalam proses rekristalisasi, kekerasan akan menurun secara drastis, dan penurunan kekerasan ini disebabkan oleh pertumbuhan butiran pada tahap pemanasan kedua yang menghasilkan butiran yang kasar. Ini akan diikuti oleh peningkatan ketangguhan. Peningkatan ketangguhan disebabkan oleh pertumbuhan butiran berbentuk *equiaxial* dan mengakibatkan hilangnya jaringan dislokasi [26].



Gambar 2.11 Skema Proses ECAP dengan Sudut Channel (a) 90° dan (b) 120° [29]

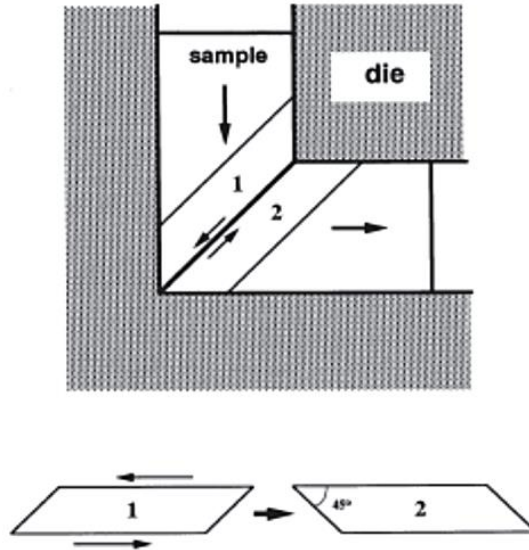
Skema proses ECAP ditunjukkan pada Gambar 2.11 dimana sampel diekstrusi dari sisi melalui zona *shear deformation* dengan *dead zone* di sudut luar *channel*. Ketika benda kerja dikeluarkan dari sisi melalui saluran, dapat dituliskan rumus total regangan sebagai berikut [23].

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ 2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right\} \dots\dots\dots (2.6)$$

Nilai ϕ adalah besaran sudut perpotongan dua *channel*, dan ψ adalah sudut yang dibentuk oleh lengkungan terluar *channel* pada titik potong. Nilai regangan yang dihasilkan dari proses ECAP ini ditulis dalam satuan derajat atau rad karena dalam prosesnya sampel mengalami tegangan geser.

Adanya penghalusan butir dalam proses ECAP terjadi karena adanya pergeseran atom material. Pergeseran ini terjadi karena adanya bidang geser akibat pembelokan sampel oleh cetakan. Dapat dilihat pada Gambar 2.12, terjadi perubahan arah gaya tekanan. Pada perpotongan nomor 1, sampel mula-mula mengalami tegangan kompresi. Kemudian perpotongan nomor 2 berubah menjadi

tegangan tarik [30]. Tegangan tarik ini terjadi karena sampel mengalami ekspansi dan relaksasi setelah mengalami deformasi geser yang signifikan.

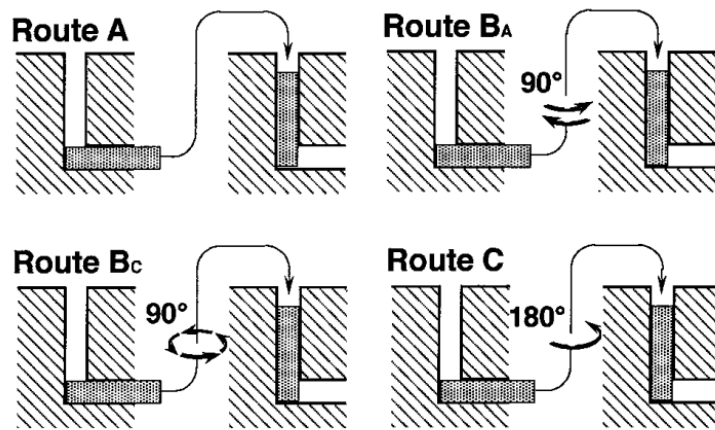


Gambar 2.12 Bidang Geser pada Cetakan ECAP [30]

Sampel yang dilakukan *pressing* berulang kali menggunakan proses ECAP, karakteristik potongan dalam sampel kristalin akan berubah dengan merotasi sampel ketika transisi setiap sebelum memasuki *inlet channel*. Terdapat tiga rute dalam proses ECAP, diantaranya sebagai berikut [28].

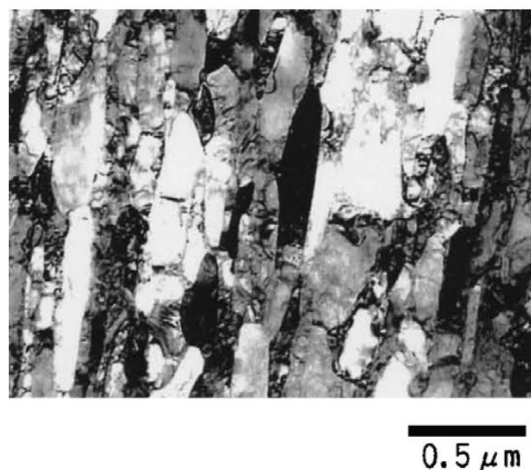
- a. Rute A, sampel tidak diputar antara tekanan berulang
- b. Rute B, sampel diputar sebesar 90 derajat antara setiap tekanan
- c. Rute C, sampel diputar sebesar 180 derajat antara setiap tekanan.

Rute B dapat digolongkan menjadi dua jenis, B_A dan B_C. Rute B_A dilakukan dengan memutar sampel sebesar 90° secara bergantian antara setiap *passes*. Sedangkan rute B_C dilakukan dengan memutar sampel sebesar 90 derajat ke arah yang sama antara setiap *passes*. Gambaran dari empat rute berbeda ini diilustrasikan secara skematis pada Gambar 2.13.



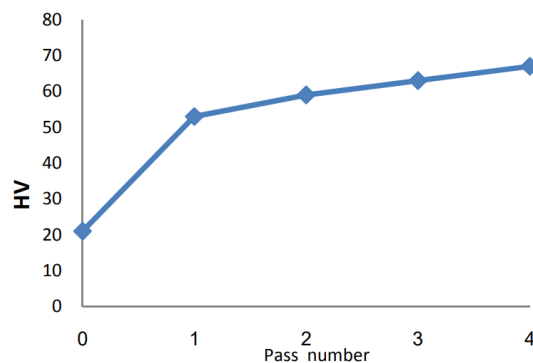
Gambar 2.13 Jenis Rute *Passes* Proses ECAP [28]

Penelitian mengenai proses ECAP dilakukan pada sampel baja *ultra low carbon* [31], hasilnya didapatkan ukuran butir yang sangat halus dengan panjang sumbu utama $0,5 \mu\text{m}$ dan panjang sumbu minor $0,2 \mu\text{m}$ dikembangkan dengan 10 *passes* ekstrusi samping berulang pada temperatur ruang, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.14. Dengan penghalusan ukuran butir, baja ini memiliki kuat luluh yang lebih tinggi dibandingkan sebelumnya dan terus meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah *passes*.



Gambar 2.14 TEM Micrograph pada Sampel Baja *Ultra Low Carbon* setelah Dilakukan Proses ECAP 10 *Passes* [31]

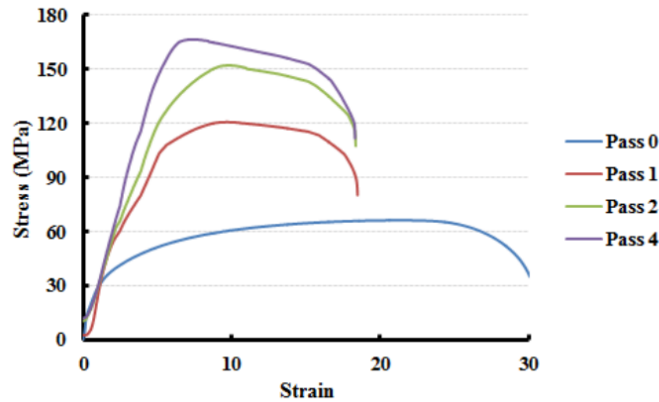
Peningkatan sifat mekanik material setelah proses ECAP telah dibuktikan dengan banyaknya penelitian terdahulu. Aluminium murni yang dikenal memiliki kekuatan rendah bahkan dapat ditingkatkan berkali lipat dengan proses ini. Al-Mufadi dan Djavanroodi dalam penelitiannya melakukan proses ECAP pada sampel aluminium murni sebanyak 4 siklus. Penekanan dilakukan pada sudut *channel* 90° dalam temperatur ruang. Sampel hasil ECAP kemudian dipotong menyesuaikan standar untuk berbagai pengujian mekanik. Hasilnya ditemukan bahwa proses ECAP dapat meningkatkan sifat mekanik kekerasan, kuat tarik, dan menurunkan keuletan. Dapat dilihat pada Gambar 2.15 bahwa satu siklus ECAP dapat meningkatkan kekerasan aluminium murni hingga 2,5 kali lipat. Peningkatan ini diakibatkan oleh formasi dari struktur butir sangat halus dan meningkatnya kepadatan dislokasi. Siklus selanjutnya, kenaikan kekerasan naik lebih sedikit dibandingkan dengan yang pertama [32].



Gambar 2.15 Perubahan Kekerasan Aluminium Murni Setelah diproses ECAP [32]

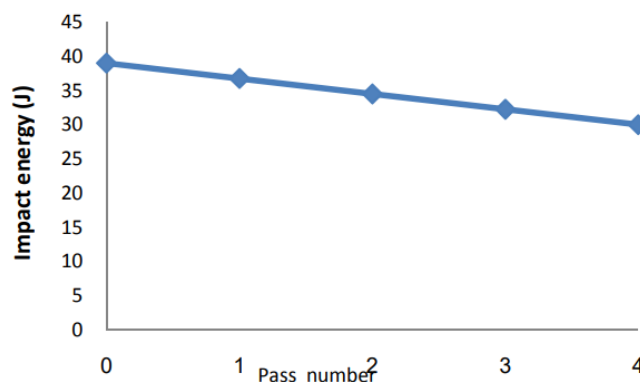
Sampel aluminium murni sebelumnya dilakukan pengujian tarik untuk mengetahui kondisi awalnya. Dapat diketahui bahwa sampel memiliki keuletan yang tinggi dibandingkan dengan sampel hasil proses ECAP yang memiliki kekuatan lebih besar. Kuat luluh mula-mula aluminium murni ditingkatkan hingga

180% pada siklus penekanan pertama dan 330% setelah siklus keempat. Seperti pada hasil pengujian kekerasan, peningkatan ini terjadi karena berkurangnya ukuran butir dan meningkatnya kepadatan dislokasi [32].



Gambar 2.16 Kurva Tegangan Regangan Spesimen Hasil Produk ECAP [32]

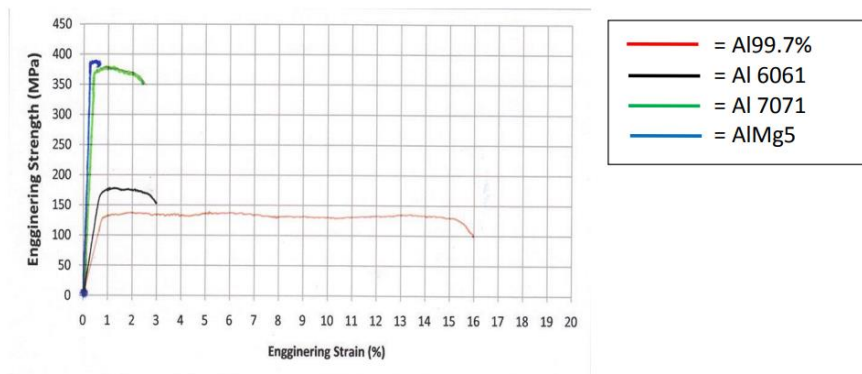
Sebagian sampel yang dilakukan ECAP juga dipotong untuk dibuat spesimen pengujian impact. Diketahui bahwa energi impact terus berkurang seiring dengan dilakukannya pengulangan siklus. Sampel awal sebelum dilakukan ECAP memiliki energi impact sebesar 39 joule. Selanjutnya setelah dilakukan penekanan ulang, energi impact menjadi sebesar 30 joule pada siklus keempat [32].



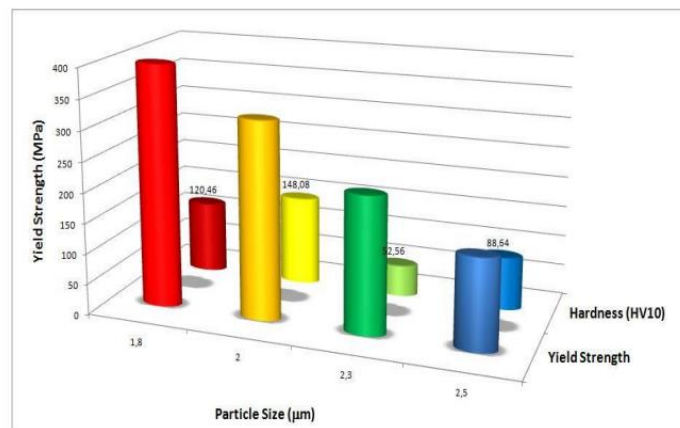
Gambar 2.17 Tren Energi Impact Spesimen Hasil Produk ECAP [32]

Metode ECAP saat ini sudah dikembangkan untuk mendapatkan tingkat efisiensi dalam proses yang seringkaskas mungkin. Salah satu metodenya adalah *equal*

channel angular pressing consolidation (ECAP-C). ECAP-C adalah metode manufaktur untuk menghasilkan paduan dengan kekuatan tinggi dengan konsolidasi [33]. Proses ini menggabungkan tegangan tekan dan tarik dalam cetakan untuk menghasilkan produk dengan deformasi tinggi. Agus Pramono, dalam penelitiannya pada tahun 2014 mengenai ECAP-C melakukan metode ini pada serbuk aluminium yang sebelumnya telah dilakukan preparasi. Jenis aluminium yang digunakan diantaranya Al murni 99,7%, Al Mg₅, Al 6061, dan Al 7075 menghasilkan ukuran butir masing-masing 2,3; 2; 2,5; dan 1,8 μm . Selain itu, ditemukan bahwa Al Mg₅ memiliki kuat luluh dan kekerasan tertinggi yaitu 398 MPa dan 148 Hv [34]. Kurva tegangan-regangan dan masing-masing kuat luluh serta kekerasan dapat dilihat pada Gambar 2.18 dan 2.19.

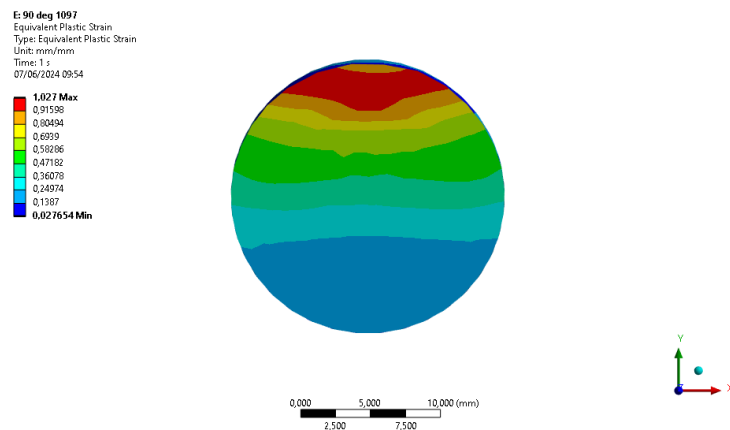


Gambar 2.18 Kurva Tegangan-Regangan Beberapa Material Hasil ECAP-C [34]



Gambar 2.19 Hubungan Ukuran Butir dengan Kuat Luluh dan Kekerasan [34]

Proses ECAP pada Al 99,7% yang dilakukan 1 kali penekanan menghasilkan tegangan geser dan ekuivalen pada sampel rata-rata sebesar 160,46 MPa dan 285,39 MPa. Tegangan ini terkonsentrasi pada bagian permukaan sampel yang kontak dengan sudut kanal dalam. Distribusi besaran regangan plastis pada arah longitudinal dapat dilihat pada Gambar 2.20 dengan rata-rata sebesar 0,289.



Gambar 2.20 Regangan Plastis Ekuivalen Sampel Al 99,7%

2.7 Aluminium

Indonesia memiliki sumber daya mineral logam aluminium dalam jumlah besar. Bauksit merupakan bahan utama dalam pembuatan aluminium. Proses produk aluminium dari bijih bauksit melalui 2 proses utama, yaitu proses *refining* dan *smelting*. *Refining* merupakan proses yang dilakukan untuk memurnikan bauksit menjadi alumina menggunakan proses Bayer. Sedangkan peleburan alumina menjadi aluminium melalui proses Hall-heroult [35].

Aluminium adalah logam ringan yang memiliki ketahanan korosi yang baik, konduktivitas listrik yang tinggi, dan sifat logam lainnya yang unggul. Selain itu, kekuatan mekaniknya dapat ditingkatkan secara signifikan dengan penambahan unsur paduan seperti Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni. Material ini memiliki beragam

aplikasi, tidak hanya dalam peralatan rumah tangga, tetapi juga dalam industri penerbangan, otomotif, maritim, dan konstruksi. Kelebihan lainnya adalah ketersediaan dan harga yang terjangkau, sehingga penggunaan aluminium sebagai bahan dasar terus meningkat dari waktu ke waktu. Beberapa contoh produk sehari-hari yang terbuat dari aluminium meliputi kaleng minuman ringan, peralatan rumah tangga, velg, dan blok mesin [36].

Selain aluminium paduan, jenis lainnya dari logam aluminium adalah aluminium murni. Salah satu aluminium murni adalah aluminium AA1100. Aluminium AA1100 adalah aluminium kelas komersial umum. Seperti nilai *aluminium unalloyed* lainnya, aluminium jenis ini digunakan untuk produk dengan kebutuhan mampu bentuk dan ketahanan korosi namun tidak berkekuatan tinggi. Contoh aplikasi termasuk alat kimia dan makanan, lembaran logam, *heat exchanger*, dan perangkat pencahayaan [37]. Diketahui bahwa unsur paduan pada aluminium dapat mempengaruhi sifat mekaniknya. Penelitian mengenai pengaruh penambahan unsur silikon dan magnesium sebagai paduan aluminium telah dilakukan [38], didapatkan bahwa penambahan unsur tersebut dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan namun menurunkan konduktivitas listrik. Penelitian lainnya [39] menunjukkan bahwa penambahan unsur titanium dan boron dapat memperbaiki struktur butir dan meningkatkan sifat mekaniknya berupa kekerasan dan kekuatan tariknya.

Tabel 2.1 Komposisi Material Properties Aluminium AA1100 [37]

Elemen	Kandungan (%)
Aluminium	≥ 99
Berilium	$\leq 0,0008$

Tembaga	0,05 – 0,2
Mangan	≤ 0,05
Si+Fe	≤ 0,95
Seng	≤ 0,1

Aluminium AA1100 memiliki kadar aluminium di atas 99% yang membuatnya memiliki sifat mekanik berbeda dari aluminium paduan. Sebagai hasil dari karakterisasi material, berikut ini adalah sifat mekanik aluminium AA1100.

Tabel 2.2 Material Properties Aluminium AA1100 [37]

<i>Properties (unit)</i>	Nilai
<i>Density (g/cm³)</i>	2,71
<i>Ultimate tensile strength (MPa)</i>	75
<i>Yield strength (MPa)</i>	20
Modulus elastisitas (GPa)	68,9
<i>Poisson's Ratio</i>	0,33
<i>Shear modulus (GPa)</i>	26
<i>Shear strength (GPa)</i>	62,1
<i>Heat of fusion (J/g)</i>	390
<i>Specific heat capacity (J/g.°C)</i>	0,904
<i>Thermal conductivity (W/m.K)</i>	222

2.8 ANSYS

ANSYS adalah perangkat lunak (*software*) yang digunakan untuk simulasi teknik dan desain 3D. *Software* ini banyak digunakan dalam konteks ilmiah dan industri untuk memberikan wawasan dan informasi mengenai hal yang disimulasikan. ANSYS dapat digunakan untuk analisis elemen hingga struktur,

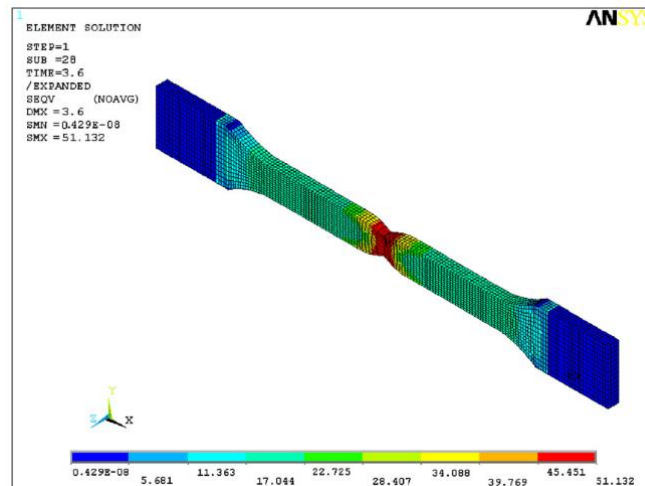
hingga masalah komputasi fluida. ANSYS menyediakan berbagai alat untuk simulasi, termasuk analisis struktural, dinamika fluida, dan elektromagnetik [40]. *Software* ini adalah perangkat yang dapat digunakan untuk mensimulasikan dan mengoptimalkan desain sebelum dibangun, mengurangi kebutuhan akan prototipe fisik yang mahal. Beberapa sistem analisis yang disediakan oleh *software* ANSYS diantaranya adalah sebagai berikut [41].

- a. *Static analysis*, merupakan jenis analisis dalam ANSYS yang menentukan perpindahan, tekanan, regangan, dan gaya pada struktur atau komponen yang disebabkan oleh beban yang tidak menyebabkan efek inersia dan redaman yang signifikan.
- b. *Transient analysis*, merupakan jenis analisis dalam ANSYS yang melibatkan studi tentang perilaku objek yang bergantung pada waktu dari sistem atau struktur fisik. Sistem ini digunakan untuk menganalisis respons objek pada kondisi pembebanan dinamis seperti benturan, getaran, atau perubahan beban secara tiba-tiba.
- c. *Mode-Frequency analysis*, merupakan jenis analisis di ANSYS yang digunakan untuk menentukan *natural frequency* dan bentuk mode suatu struktur. *Natural frequency* adalah frekuensi di mana struktur akan beresonansi, dan bentuk mode adalah bentuk yang diambil struktur ketika bergetar pada frekuensi ini.
- d. *Harmonic response analysis*, digunakan untuk menentukan respons *steady-state* dari struktur yang mengalami beban yang sinusoidal dengan waktu yang berbeda dari analisis dinamis transien. Analisis harmonik tidak memecahkan respons riwayat waktu struktur, namun memperlakukan perilaku dinamis struktur dalam domain frekuensi. Oleh

karena itu, interpretasi hasil analisis harmonik menjadi sangat berbeda dari *static analysis* dan *transient analysis*.

- e. *Buckling analysis*, merupakan jenis analisis di ANSYS yang memprediksi titik di mana struktur menjadi tidak stabil dan mulai berubah bentuk di bawah beban tekan.
- f. *Fluent*, merupakan sistem analisis untuk memecahkan masalah *computational fluid dynamic* (CFD) yang digunakan untuk menganalisis berbagai fenomena fluida.
- g. *Fluid-structure interaction* (FSI), digunakan untuk menganalisis interaksi antara fluida dengan sebuah struktur.
- h. *Multiphase flow*, digunakan untuk mensimulasikan dan menganalisis aliran multifase yang kompleks yang meliputi aliran gas-cair, cair-cair, maupun padat-cair.

Salah satu sistem analisis yang disediakan ANSYS adalah *static structural*. Analisis *static structural* adalah jenis analisis yang dilakukan dalam perangkat lunak ANSYS untuk mengevaluasi perilaku struktural suatu komponen atau sistem di bawah beban statis. Ini melibatkan analisis tekanan, regangan, dan deformasi struktur ketika mengalami beban statis. Analisis dilakukan dengan menggunakan teknik FEA, yang melibatkan pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil dan menganalisis setiap elemen secara terpisah. Hasil analisis dapat digunakan untuk mengoptimalkan desain struktur dan memastikan bahwa struktur dapat menahan beban yang diharapkan. Salah satu contoh simulasi yang dilakukan dengan sistem *static structural* adalah analisis *total deformation* yang dialami *spur gear* dan analisis fenomena *necking* pada spesimen uji tarik.



Gambar 2.21 Simulasi Fenomena *Necking* pada Spesimen *Thermoplastic* ketika Dilakukan Pengujian Tarik [42]

Fenomena *necking* merupakan perubahan luas penampang pada suatu material ulet yang terjadi ketika diberikan beban tegangan yang telah melampaui titik *ultimate tensile stress*. Fenomena *necking* terjadi dalam waktu yang singkat, karena sesaat setelah fenomena *necking* akan terjadi kegagalan material. Lokasi terjadinya perpatahan ditentukan oleh distribusi tegangan yang dialami spesimen tersebut. Simulasi pengujian uji tarik dilakukan pada spesimen thermoplastic untuk mengamati fenomena *necking* [42]. Hasil simulasi ini menunjukkan sebaran tegangan yang dialami oleh spesimen sehingga dapat diketahui titik terjadinya fenomena *necking*. Selain itu, dalam simulasi ini juga memberikan informasi mengenai besaran beban yang perlu diterima oleh spesimen untuk mengalami setiap besaran deformasi hingga terjadinya perpatahan.