

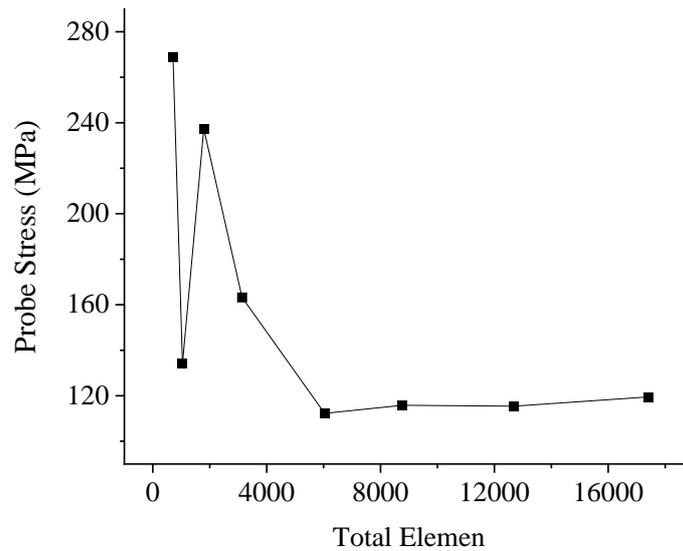
## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Analisa Sensitivitas *Mesh*

Komponen penting dalam penelitian berbasis simulasi yang dilakukan salah satunya adalah *meshing*. *Meshing* merupakan tahap pemotongan geometri kompleks menjadi potongan-potongan kecil untuk memudahkan dan meringankan proses komputasi. Potongan kecil ini selanjutnya akan disebut sebagai elemen yang jumlahnya perlu dipastikan agar dalam kondisi optimum. Kondisi optimum disini merujuk pada kesesuaian jumlah elemen terhadap hasil perhitungan yang didapatkan. Jumlah elemen yang terlalu sedikit dapat menghasilkan simulasi yang kurang akurat, sedangkan jumlah yang terlalu banyak dapat membebani kerja perangkat [13].

Pada penelitian ini digunakan geometri yang terdiri dari *die* dan sampel. *Die* diasumsikan dalam kondisi *rigid*, karena dianggap tidak akan mengalami deformasi selama prosesnya. Hal ini akan meringankan beban komputasi sehingga waktu penyelesaian dapat dipersingkat namun tidak mengurangi keakuratan hasil simulasi. Dengan begitu, *die* hanya akan di-*mesh* pada bagian permukaan *channel*-nya saja sehingga menghasilkan potongan yang halus untuk dapat menangkap detail geometri khususnya bagian sudut laluan dan perilaku fisik sistem. Sampel sebagai objek yang akan diteliti dilakukan *mesh* pada semua bagiannya, sehingga total elemen akan didominasi oleh jumlah elemen pada sampel.



**Gambar 4.1** Validasi Kestabilan *Mesh*

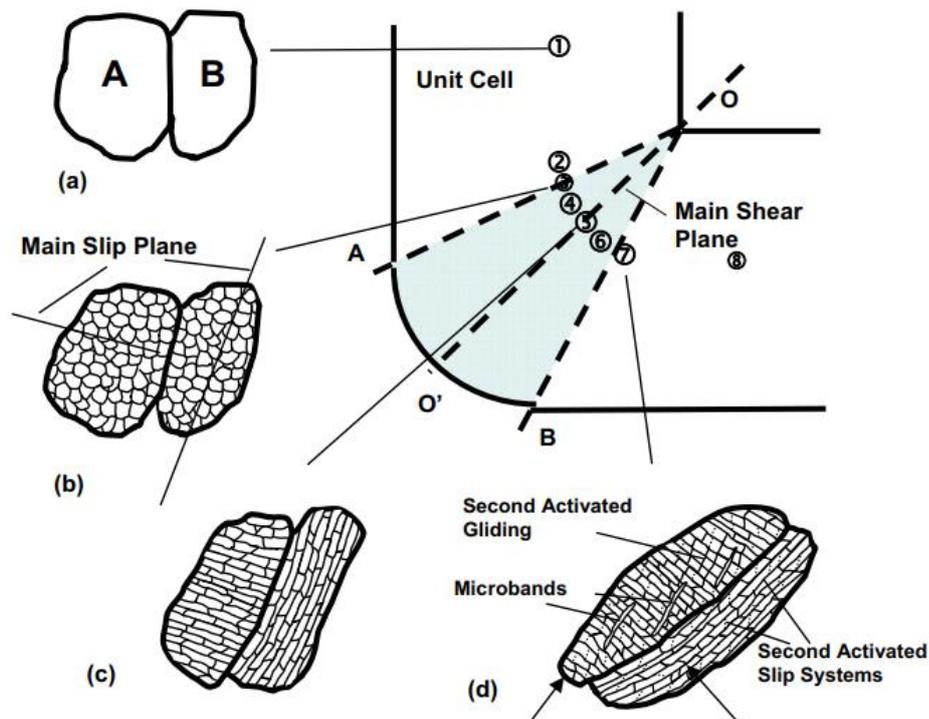
Hasil dari simulasi struktur dapat berubah ketika jumlah elemen belum sesuai. Untuk dapat memastikan keakuratan solusi numerik yang diperoleh, dalam penelitian ini dilakukan studi analisis sensitivitas *mesh* dengan melakukan penyelesaian simulasi sebanyak 8 kali dengan ukuran mesh berbeda sehingga menghasilkan jumlah elemen yang bervariasi. Berdasarkan data yang didapat dari Gambar 4.1, diketahui bahwa nilai *probe stress* mulai stabil pada jumlah elemen sebanyak 6035 dengan nilai *probe stress* 112,24 MPa. Informasi tersebut selanjutnya akan dijadikan sebagai acuan dalam menentukan jumlah elemen untuk semua simulasi.

#### 4.2 Investigasi Evolusi Struktur Mikro Aluminium

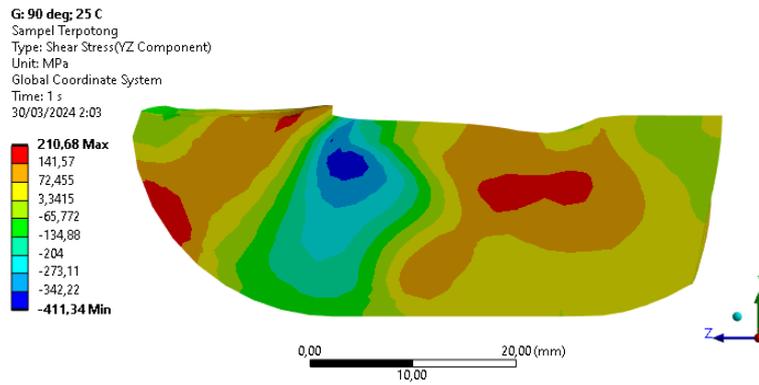
Penekanan dengan proses ECAP menghasilkan mekanisme pergeseran sederhana pada sampel melalui saluran pada cetakan yang akan memaksimalkan regangan. Tegangan geser terjadi pada bidang yang sama ketika melewati sudut

perpotongan pada cetakan ECAP, sehingga arah geser akan berbalik. Sampel mengalami regangan ketika melalui sudut tekuk, kemudian dislokasi menumpuk dan ukuran butir akhirnya mengecil. Mekanisme penghalusan ini merupakan dislokasi berupa *twinning*. Mekanisme *twinning* bekerja pada temperatur rendah, sehingga slip zona atom akan meningkat seiring dengan penurunan temperatur. Hal ini membuat butiran semakin halus hingga tingkat *ultra-fined grain* [30].

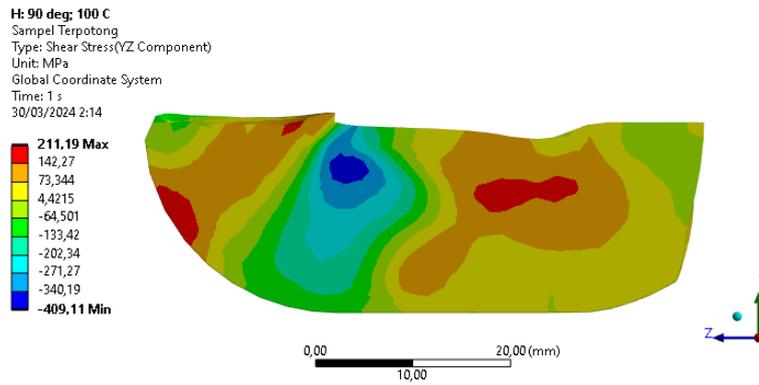
Gambar 4.2 menjelaskan skematis evolusi struktur mikro sampel yang dilakukan proses ECAP. Pada tahap (a), sampel logam polikristalin memiliki butiran kasar dengan orientasi berbeda sebelum melalui. Kemudian pada tahap (b) mulai terjadi pergerakan dislokasi karena konsentrasi tekanan, hingga kemudian pada garis diagonal yang ditunjukkan pada daerah (c) terjadi peluncuran bidang slip yang mengakibatkan dinding dislokasi berubah menjadi mekanisme *twinning*. Pada tahap akhir, di daerah (d) terjadi pergerakan slip sekunder dan *microbands* [30].



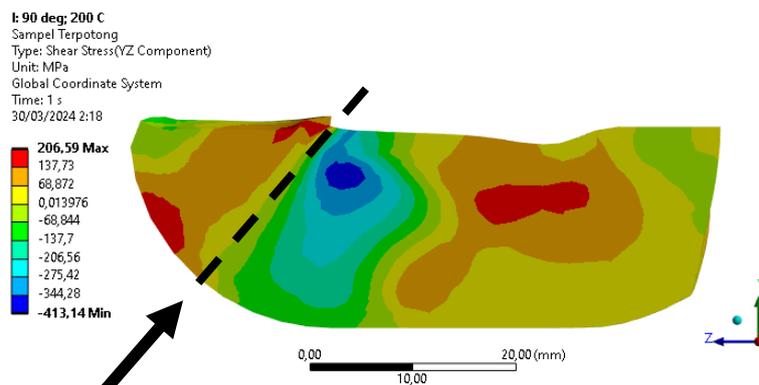
**Gambar 4.2** Skema Evolusi Struktur Mikro Selama Lintasan Pertama ECAP [30]



(a)



(b)



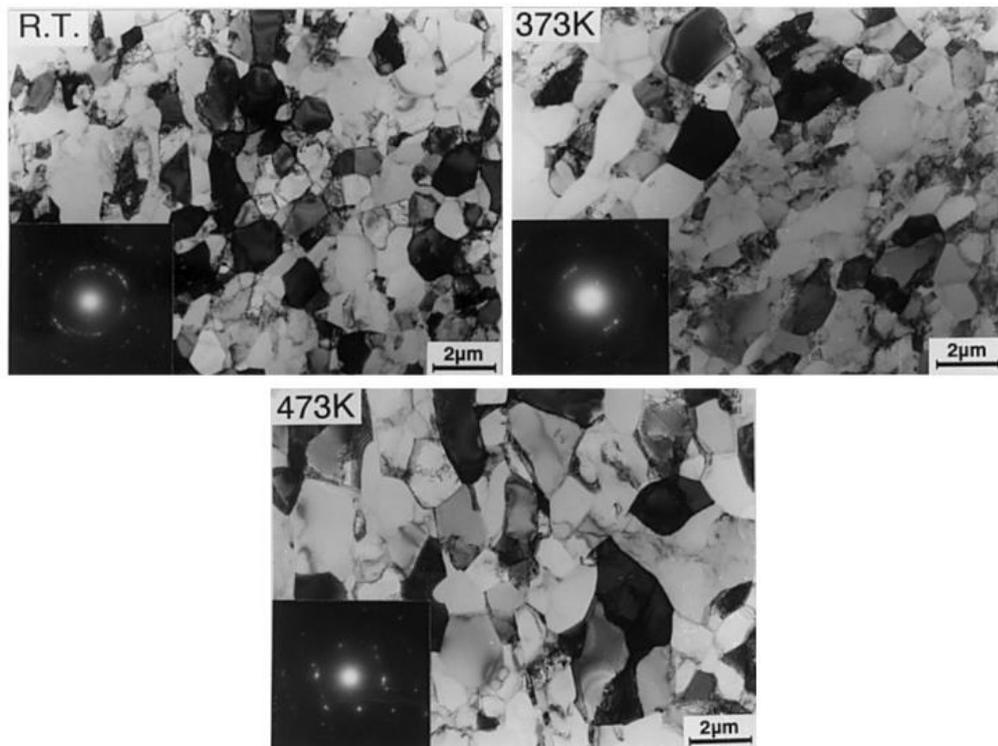
*Shear plane*

(c)

**Gambar 4.3** Citra Tegangan Geser Sudut *Channel* 90° dengan Temperatur (a) 25°C, (b) 100°C, (c) 200°C

Pada Gambar 4.3 diperoleh sebaran angka tegangan geser yang dialami oleh sampel ketika melalui sudut tekuk cetakan. Tegangan geser pada sampel memiliki nilai bervariasi pada rentang yang berbeda-beda karena perbedaan temperatur proses. Angka tegangan geser berubah nilai dari positif menjadi negatif pada titik yang ditandai dengan tanda panah hitam (lihat Gambar 4.3c). Pada titik tersebut sampel mengalami perubahan arah gaya yang menunjukkan adanya pergeseran atom pada sampel yang dapat meningkatkan sifat mekanik [30]. Pada titik ini terjadi mekanisme pergerakan dislokasi yang diakibatkan oleh penyempitan tekanan, hingga meluncurnya bidang *slip* yang membuat dinding dislokasi berubah menjadi pergerakan dislokasi *twinning*. Mekanisme perubahan arah bidang geser ini terjadi pada semua variasi temperatur proses baik 25; 100; dan 200°C pada titik yang sama, yaitu daerah bidang geser (*shear plane*). Adapun daerah berwarna merah pada bagian depan sampel merupakan konsentrasi tegangan geser dalam arah positif. Arah positif ini terjadi karena daerah ini merupakan daerah yang mengalami tegangan geser sebelum sampel belok sempurna menyesuaikan dengan sudut salurannya.

Proses ECAP untuk sampel yang keras akan lebih mudah dilakukan ketika dalam kondisi temperatur tinggi. Sebuah penelitian eksperimen dilakukan untuk memahami perbedaan struktur mikro ketika sampel dilakukan pemanasan untuk proses ECAP. Perbedaan ukuran butir sampel aluminium murni ECAP dengan temperatur berbeda telah diamati dalam skala mikron [7]. Berikut ini merupakan hasil pengamatan struktur mikro yang dilakukan pada sampel aluminium murni hasil ECAP dengan penekanan pada *die* dengan sudut *channel* 90°.



**Gambar 4.4** Struktur Mikro Aluminium Murni Hasil ECAP pada Temperatur Berbeda [7]

Gambar 4.4 memperlihatkan struktur mikro sampel aluminium murni hasil ECAP dengan penekanan pada temperatur 25, 100, dan 200 °C. Hasilnya terlihat bahwa penekanan pada temperatur 25 dan 100 °C berhasil menghaluskan butir berukuran rata-rata 1 mm hingga ukuran masing-masing  $1,3 \mu\text{m}$  dan  $1,5 \mu\text{m}$  [7]. Pada temperatur 200 °C, terlihat ukuran butir yang lebih besar dan menunjukkan sudut misorientasi yang rendah. Sudut misorientasi merupakan sudut rotasi yang memisahkan orientasi kristal berbeda dari satu butir atau sub-butir terhadap butir lainnya. Sudut misorientasi ini memberikan pengaruh terhadap kuat luluh material. Ini karena ketika sudut misorientasi meningkat, jumlah sistem slip aktif menurun yang mengakibatkan pergerakan dislokasi semakin terhambat [44]. Pada temperatur yang lebih tinggi, penggelinciran batas butir menjadi lebih menonjol

[45]. Hal ini mengurangi tingkat reduksi ukuran butir, karena dengan meningkatnya kemampuan penggelinciran batas butir, deformasi plastis membuat butir-butir cenderung untuk bergeser dibandingkan membuat batas butir baru dari hasil mekanisme *twinning*.

### **4.3 Simulasi Parameter Sudut *Channel* dan Temperatur**

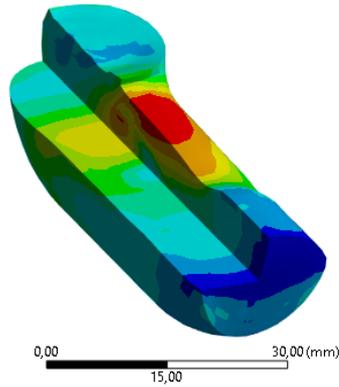
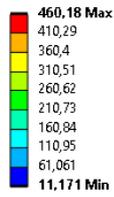
Pada penelitian ini, proses ECAP dilakukan menggunakan 3 cetakan dengan sudut *channel* berbeda dan kondisi temperatur proses berbeda. Cetakan yang digunakan memiliki sudut *channel* 90°, 105°, dan 120°. Sedangkan kondisi temperaturnya adalah 25, 100, dan 200°C. Satu variasi cetakan digunakan oleh tiga sampel dengan tiga variasi temperatur proses sehingga dihasilkan 9 sampel berbeda.

#### **4.3.1 Distribusi dan Pengukuran Tegangan Geser**

Simulasi ECAP ini dilakukan untuk mengetahui respons mekanik pada bagian permukaan maupun pada bagian dalam sampel. Informasi mengenai distribusi nilai tegangan dan regangan yang dialami sampel dapat digunakan untuk memprediksi bagaimana karakteristik sampel setelah perlakuan ECAP berdasarkan parameter yang digunakan.

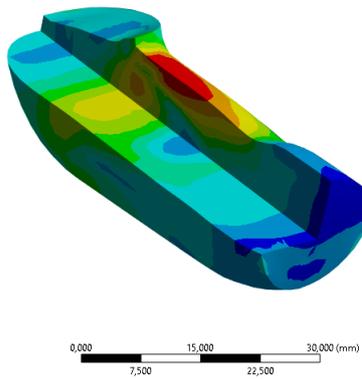
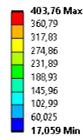
Penelitian simulasi yang telah dilakukan memberikan informasi distribusi tegangan geser pada sampel. Dapat dilihat pada Gambar 4.5 bahwa besarnya tegangan geser yang dialami sampel tidak merata di seluruh bagian sampel. Citra yang menunjukkan warna merah pada sampel artinya mengalami tegangan geser tertinggi sebesar 556,51 MPa pada temperatur 25°C; 460,18 MPa pada temperatur 100°C; dan 328,19 MPa pada temperatur 200°C.

G: 90 deg; 25 C  
 Maximum Shear Stress  
 Type: Maximum Shear Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1 s  
 28/04/2024 17:54



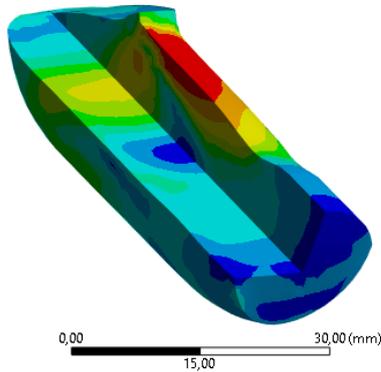
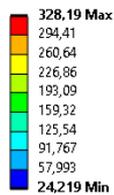
(a)

D: 105 deg; 25 C  
 Maximum Shear Stress 2  
 Type: Maximum Shear Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1 s  
 31/05/2024 19:01



(b)

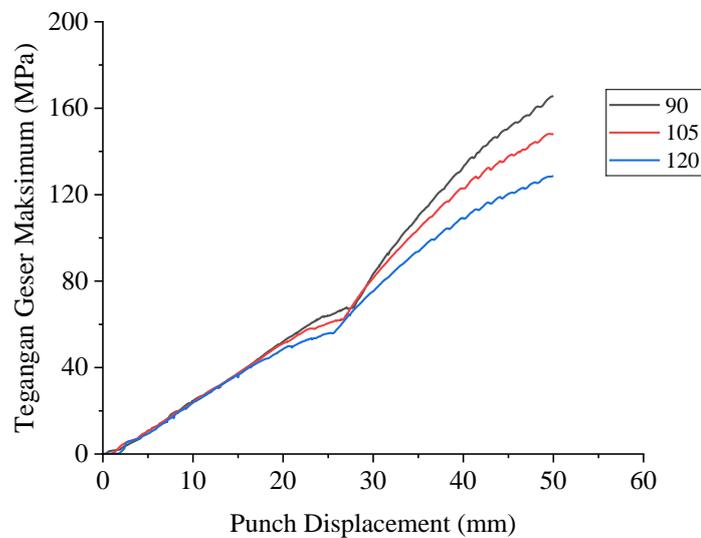
D: 120 deg; 25 C  
 Maximum Shear Stress  
 Type: Maximum Shear Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1 s  
 28/04/2024 18:04



(c)

**Gambar 4.5** Citra Tegangan Geser Maksimum Pada Temperatur 25°C dengan Variasi Sudut *Channel* (a) 60°, (b) 90°, (c) 120°

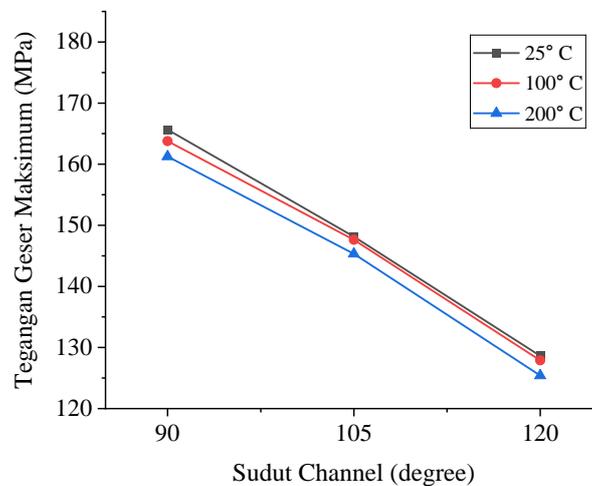
Tegangan tinggi ini terjadi di daerah yang kontak dengan permukaan sudut *channel* karena daerah tersebut memiliki ruang sempit dan menekan permukaan sampel sehingga mengalami tegangan lebih besar. Daerah berwarna biru tua mengindikasikan titik tersebut mengalami tegangan terkecil, sebagian besar terjadi pada daerah depan sampel. Ini terjadi karena mula-mula sampel tidak langsung menyentuh permukaan sudut *channel* melainkan terus bergerak turun dan baru berdeformasi setelah daerah di seberangnya mulai menyentuh sudut *corner*.



**Gambar 4.6** Kurva Peningkatan Nilai Tegangan Geser Maksimum pada Temperatur 25 °C

Gambar 4.6 merupakan kurva yang menunjukkan peningkatan nilai tegangan geser maksimum pada temperatur ruang yang membandingkan 3 sampel ketika dilakukan penekanan dengan sudut *channel* berbeda. Terdapat persamaan pola pada ketiga garis yang menunjukkan adanya peningkatan secara signifikan pada titik tertentu. Peningkatan tersebut terjadi ketika sampel harus melewati bidang geser, sehingga tegangan geser

mulai terkonsentrasi pada bagian tertentu. Titik tersebut terletak pada *displacement* berbeda, hal ini terjadi karena perbedaan geometri akibat variasi sudut *channel*. Perbedaan utamanya terletak pada ketajaman peningkatannya, yang mana pada sampel dengan penekanan sudut 90° naik paling signifikan dibandingkan dengan sudut 105° dan 120°. Hal ini dapat terjadi karena sampel memerlukan gaya lebih besar saat harus berdeformasi pada sudut yang lebih tajam, sehingga tegangan yang dialami lebih besar juga. Titik akhir garis peningkatan menunjukkan besarnya tegangan geser ketika sampel telah melewati pembelokan sepenuhnya.



**Gambar 4.7** Kurva Sudut *Channel* terhadap Tegangan Geser Maksimum

Nilai tegangan geser maksimum pada akhir *displacement* dibandingkan berdasarkan parameter sudut *channel* dan temperatur proses ECAP, yang datanya dapat dilihat pada Gambar 4.7. Dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan besar tegangan geser yang dialami oleh sampel sebagai pengaruh dari parameter proses ECAP. Kurva tersebut menjelaskan bahwa parameter simulasi memberikan pengaruh semakin kecil sudut *channel*

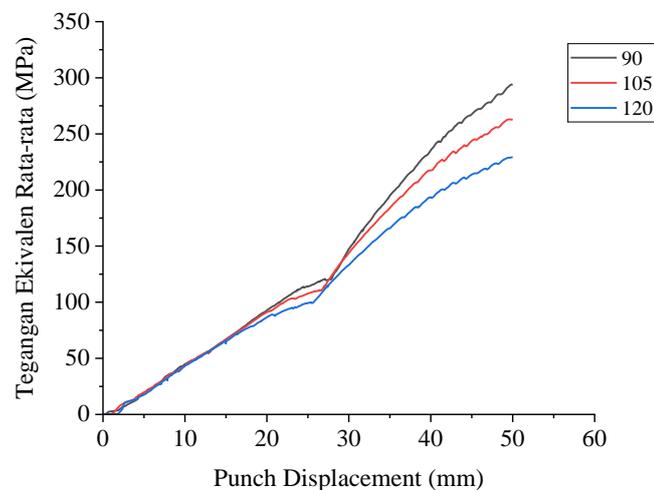
membuat sampel mengalami tegangan geser yang lebih tinggi. Sedangkan temperatur proses yang lebih tinggi memberikan tegangan yang lebih rendah. Selain itu, diketahui bahwa sudut *channel* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai tegangan geser dibandingkan dengan temperatur proses. Tegangan geser tertinggi dialami oleh sampel dengan temperatur 25°C dan sudut *channel* 90° yaitu sebesar 165,65 MPa. Sedangkan tegangan geser paling rendah dialami oleh sampel dengan temperatur 200°C dan sudut *channel* 120° yaitu sebesar 125,4 MPa.

Tegangan geser pada sampel hasil ECAP akan memaksa pergeseran atom hingga melewati batas butir. Atom-atom yang melewati batas butir akan membentuk dislokasi berupa *twinning* yang membuat batas butir yang baru. Tegangan yang lebih besar, akan mengakibatkan terjadinya konsentrasi dislokasi pada suatu titik. Pada hasil simulasi, tegangan geser lebih besar dialami oleh sudut *channel* yang lebih kecil. Sampel yang dibelokkan lebih tajam membuat sudut misorientasi pada atom semakin besar sehingga sisi tajam batas butir yang dihasilkan semakin besar. Sisi tajam batas butir inilah yang merupakan sumber dislokasi yang efektif [45]. Dislokasi *twinning* yang menumpuk akan memberikan batas butir dalam jumlah banyak sehingga ukuran butir semakin halus.

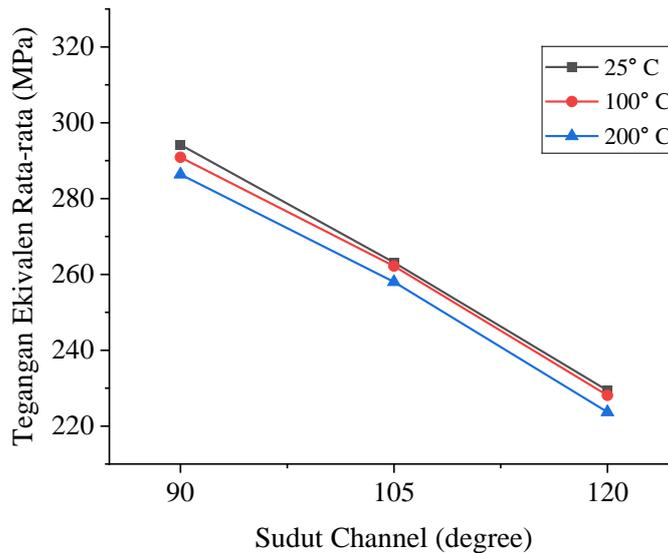
#### **4.3.2 Pengukuran Tegangan Ekuivalen**

Selain tegangan geser, nilai rata-rata tegangan ekuivalen juga diketahui berdasarkan simulasi. Gambar 4.8 merupakan peningkatan tegangan ekuivalen rata-rata yang dialami sampel ketika melalui sudut *channel* berbeda pada temperatur ruang. Pola garis menunjukkan adanya

persamaan perilaku antara peningkatan tegangan geser dengan tegangan ekuivalen. Adapun Gambar 4.9 juga menunjukkan bahwa rata-rata nilai tegangan memiliki tren garis yang sama seperti kurva pada Gambar 4.7 dengan nilai yang berbeda. Nilai tertinggi didapat pada sampel dengan parameter temperatur 25°C dan sudut *channel* 90° yaitu sebesar 294,19 MPa. Sedangkan nilai terendah yaitu 223,67 MPa yang dialami oleh sampel dengan parameter temperatur 200°C dan sudut *channel* 120°. Dengan data ini, disimpulkan bahwa sudut *channel* yang semakin besar akan memperkecil rata-rata tegangan ekuivalen. Sedangkan parameter temperatur tidak berpengaruh besar terhadap tegangan yang dialami sampel. Adapun distribusi sebaran tegangan ekuivalen cenderung sama seperti sebaran untuk tegangan geser yang telah disajikan pada Gambar 4.5 namun dengan rentang nilai yang berbeda.



**Gambar 4.8** Kurva Peningkatan Nilai Tegangan Ekuivalen Rata-rata pada Temperatur 25 °C



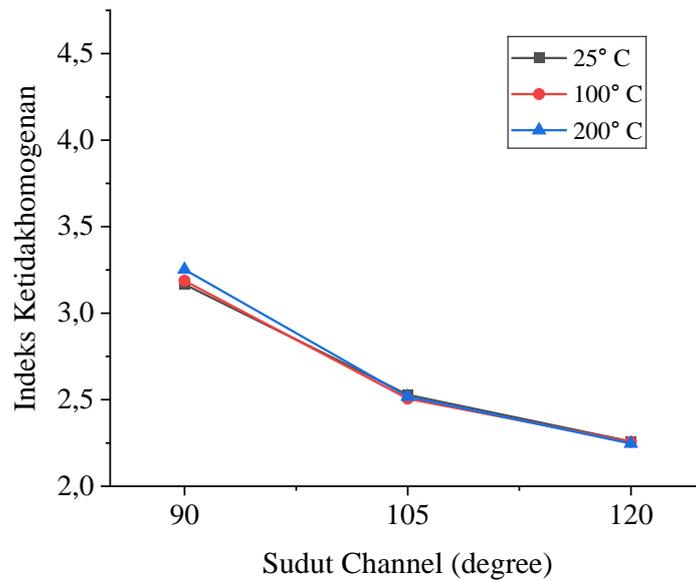
**Gambar 4.9** Kurva Sudut *Channel* terhadap Rata-rata Tegangan Ekuivalen

#### 4.4 Homogenitas Regangan

Homogenitas regangan penting dalam perancangan proses ECAP. Pengaruh parameter proses ECAP terhadap homogenitas regangan secara keseluruhan dapat diukur secara langsung dengan mengukur tingkat ketidakhomogenan. Tingkat ketidakhomogenan yang rendah menunjukkan homogenitas yang baik. Tingkat ketidakhomogenan dapat diukur dengan dua metode berbeda, yaitu menggunakan indeks ketidakhomogenan atau dengan koefisien variasi. Indeks ketidakhomogenan dapat ditentukan dengan nilai regangan plastis ekuivalen yang dituliskan pada persamaan berikut [46]:

$$SII = \frac{(Max \varepsilon_p - Min \varepsilon_p)}{Avg \varepsilon_p} \dots\dots\dots(4.1)$$

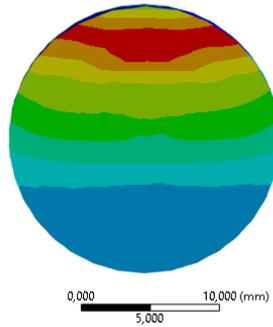
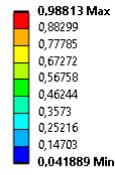
Simbol  $\varepsilon_p$  merupakan regangan plastis ekuivalen pada sampel hasil ECAP. Untuk membandingkan indeks ketidakhomogenan berdasarkan parameter yang diteliti, dapat dilihat pada Gambar 4.10 kurva berikut.



**Gambar 4.10** Kurva Indeks Ketidakhomogenan

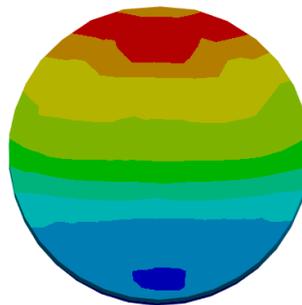
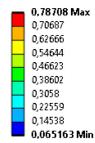
Pada Gambar 4.10 dapat dilihat kurva tingkat ketidakhomogenan untuk ketiga sudut *channel* dan temperatur proses berbeda. Tingkat ketidakhomogenan menyatakan sejauh mana sampel hasil ECAP memiliki nilai regangan plastis ekuivalen dengan gradien yang tinggi. Sehingga dapat dinyatakan bahwa indeks ketidakhomogenan yang rendah memiliki distribusi regangan yang lebih merata pada semua bagian sampel. Sudut *channel* 90° dengan temperatur 200°C memiliki indeks ketidakhomogenan paling tinggi sebesar 3,25. Sedangkan indeks paling rendah dihasilkan oleh parameter sudut *channel* 120° dengan temperatur 200°C dengan nilai 2,25. Perbedaan nilai indeks ini terjadi karena adanya perbedaan selisih yang tinggi antara nilai regangan plastis tertinggi dengan yang terendah pada masing-masing parameter. Berdasarkan hasil simulasi ini, dapat dinyatakan bahwa parameter sudut *channel* 120 dengan temperatur 200°C menghasilkan distribusi regangan plastis ekuivalen paling homogen.

G: 90 deg; 25 C  
 Equivalent Plastic Strain 2  
 Type: Equivalent Plastic Strain  
 Unit: mm/mm  
 Time: 1 s  
 30/04/2024 9:41



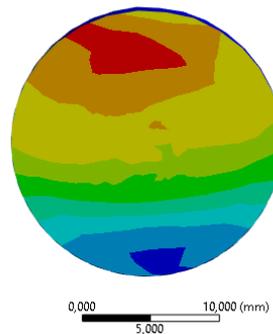
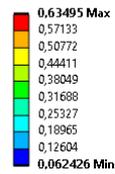
(a)

D: 105 deg; 25 C  
 Equivalent Plastic Strain  
 Type: Equivalent Plastic Strain  
 Unit: mm/mm  
 Time: 1 s  
 31/05/2024 19:02



(b)

D: 120 deg; 25 C  
 Equivalent Plastic Strain  
 Type: Equivalent Plastic Strain  
 Unit: mm/mm  
 Time: 1 s  
 30/04/2024 9:33



(c)

**Gambar 4.11** Distribusi Regangan Plastik Ekuivalen dengan Sudut *Channel*  
 (a) 90°, (b) 105°, (c) 120°

Untuk dapat mengetahui distribusi regangan plastis yang representatif, perlu melihat potongan sampel yang bagian tengah setelah diproses ECAP. Hal ini karena bagian depan sampel tidak mengalami tekanan yang sama seperti bagian lainnya. Dapat dilihat pada Gambar 4.11, sebaran regangan plastis baik pada sudut *channel* 90, 105, maupun 120° memiliki kecenderungan yang sama dimana regangan bernilai lebih besar dibagian atas pada sampel, kemudian semakin turun pada daerah bawah sampel. Gambar citra ini juga menjelaskan mengapa sudut *channel* 120° menghasilkan sampel dengan regangan lebih homogen. Dibandingkan dengan Gambar 4.11 (a) dan (b), Gambar 4.11 (c) didominasi oleh warna jingga dan kuning yang mengindikasikan bahwa pada daerah tersebut nilai regangan plastis ekuivalen mendekati rata-rata dari nilai itu sendiri. Hal itu membuat indeks ketidakhomogenan lebih rendah yang artinya sampel lebih homogen.

Parameter sudut *channel* memberikan pengaruh terhadap homogenitas regangan plastis dibandingkan dengan parameter temperatur. Hal ini terjadi karena regangan plastis dialami secara langsung oleh sampel akibat deformasi ketika melewati saluran, dibandingkan parameter temperatur yang memberikan pengaruh dari sisi pergerakan atom. Tingkat homogenitas penting untuk diperhatikan untuk mendapatkan karakteristik sampel yang lebih seragam. Homogenitas regangan plastis dapat lebih terdistribusi merata dengan meningkatkan jumlah laluan [46].

Berdasarkan pembahasan yang telah dijelaskan, dapat diketahui bahwa model dan hasil simulasi pada penelitian ini dapat digunakan sebagai pendekatan awal sebelum dilakukannya proses ECAP. Simulasi yang dilakukan masih memiliki kekurangan akibat dari keterbatasan baik dalam prosedur bahkan pada penggunaan *software* simulasi ANSYS yang masih memanfaatkan lisensi siswa. Proses ECAP

merupakan proses yang kompleks karena memiliki banyak parameter yang menghasilkan perbedaan antara pengerjaan sebenarnya dengan hasil simulasi. Beberapa parameter tersebut diantaranya yaitu perbedaan kecepatan penekanan [47], koefisien gesek [48], serta desain cetakan yang digunakan [49]. Selain parameter tersebut, juga terdapat parameter lain yang tidak dijadikan fokus penelitian disini seperti jumlah *passes*, dan rute *passes* yang digunakan [50].