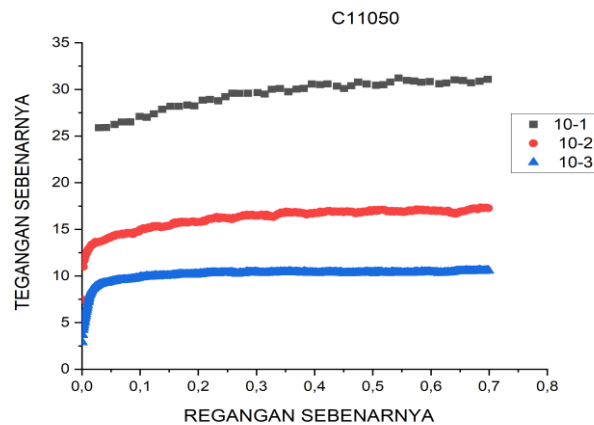


BAB IV

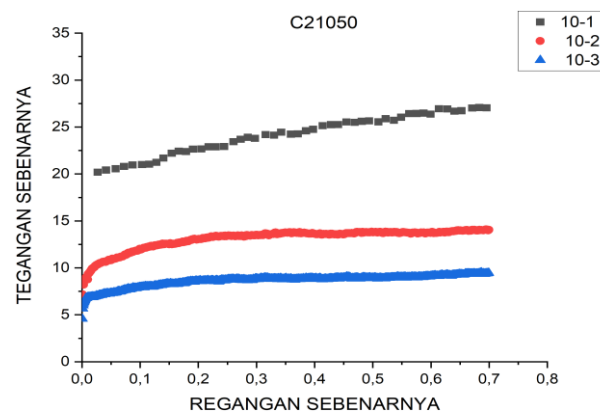
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

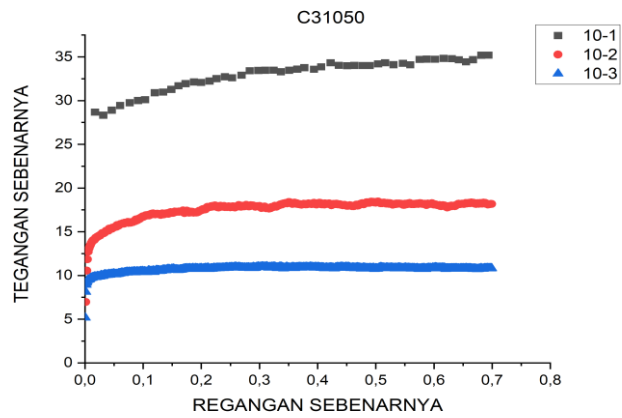
Dibawah ini adalah grafik dari hasil *hot compression test* dengan temperatur 1050 °C dan 1100 °C dan *strain rate* sebesar 10^{-1} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} , dan 10^{-3} s^{-1} yang diaplikasikan pada 3 spesimen yang berbeda, grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.1, Gambar 4.2, Gambar 4.3, Gambar 4.4, Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



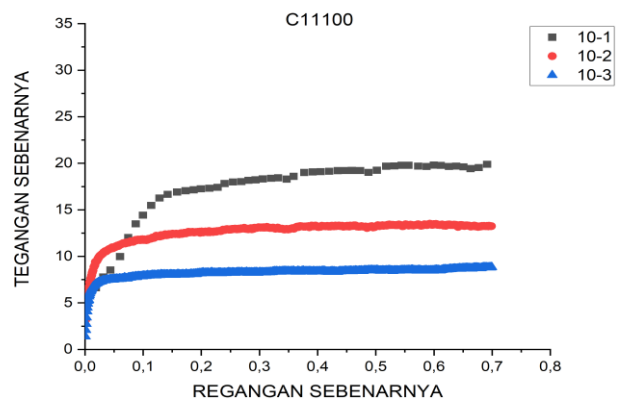
Gambar 4.1 Grafik Hasil *Hot Compression Test* Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



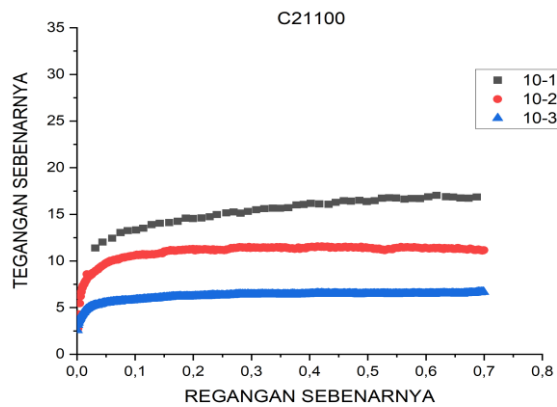
Gambar 4.2 Grafik Hasil *Hot Compression Test* Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



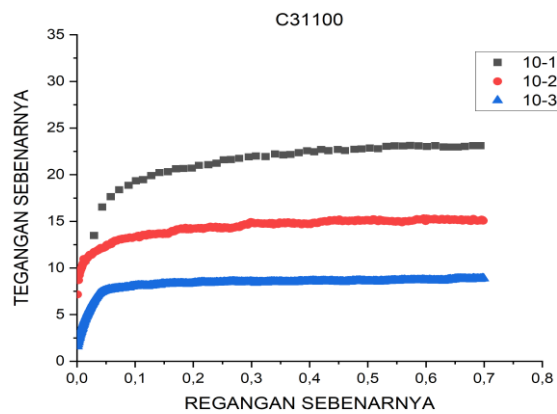
Gambar 4.3 Grafik Hasil *Hot Compression Test* Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10⁻¹ s⁻¹ (b) 10⁻² s⁻¹ (c) 10⁻³ s⁻¹



Gambar 4.4 Grafik Hasil *Hot Compression Test* Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10⁻¹ s⁻¹ (b) 10⁻² s⁻¹ (c) 10⁻³ s⁻¹



Gambar 4.5 Grafik Hasil *Hot Compression Test* Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10⁻¹ s⁻¹ (b) 10⁻² s⁻¹ (c) 10⁻³ s⁻¹



Gambar 4.6 Grafik Hasil *Hot Compression Test* Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10⁻¹ s⁻¹ (b) 10⁻² s⁻¹ (c) 10⁻³ s⁻¹

4.2 Pembahasan Penelitian

4.2.1 Test Machine Hot Compression INSTRON 4507

Hot compression test dilakukan pada 3 spesimen (C₁, C₂ dan C₃) dengan penerapan nilai regangan yang berbeda, yaitu 10⁻¹ s⁻¹, 10⁻² s⁻¹ dan 10⁻³ s⁻¹. Dimana jenis test ini dilakukan untuk mengevaluasi perilaku *creep* pada temperatur tinggi. Dengan temperatur yang digunakan di test ini adalah 1050 °C dan 1100 °C. Baja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja

dengan kandungan 3% Si dengan komposisi kimia lain yang dijelaskan pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.1 Komposisi Sampel Baja Pada *Hot Compression Test*

Spe cim en	Content of Elements, wt.%											
	C	Mn	Si	S	Cr	Cu	Ti	Al	Nb	N	O	Fe
C ₁	0,0	0,2	3,0	0,0		0,04		0,0	0,0		0,0	96,0
	275	898	940	057	0,01	892	0,0	136	024	0,0	459	014
	6	3	4	8	573	1	063	3	6	079	9	8
C ₂	0,0	0,2	3,1	0,0			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,8
	262	626	935	077	0,03	0,48		020	207	023	078	778
	8	4	5	5	051	098	3	6	5	2	0	3
C ₃	0,0			0,0	0,00			0,0	0,0		0,0	95,9
	437	0,2	3,1	066	309	0,48	0,0	227	019	0,0	537	289
	3	624	59	8	8	105	02	5	8	067	9	4

Baja dengan kandungan 3% Si diproduksi di laboratorium pengecoran lewat proses *Electro Slag Remelting (ESR)*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan mesin uji instron 4507 yang dilengkapi dengan kontrol suhu yang dilakukan oleh termokopel tipe-K yang ditempatkan pada permukaan sampel dan tungku pemanas radiasi inframerah RESEARCH INC model E4 dengan output daya 3000 W. Dimana tungku radiasi ini berbentuk segi delapan ini terdiri dari bingkai aluminium dengan bukaan samping dan dilengkapi dengan empat lampu inframerah (I-R) berbentuk tabung dari kuarsa dengan filamen tungsten, yang dikelilingi oleh reflektor berbentuk elips, energi inframerah densitas tinggi terkonsentrasi dalam volume silinder di bagian tengah ruang tungku. Sistem ini mencakup beberapa bagian seperti sirkuit pendingin yang menggunakan air terdeionisasi untuk melindungi dan menjaga seluruh rakitan lampu tetap dingin, tungku ini juga memiliki kabinet kontrol Model 915 yang dihubungkan dengan termokopel tipe K, yang bersentuhan dengan

tabung reaksi, dimana dengan cara ini, suhu akan dibaca dan dikontrol selama pengujian.

Pada mesin ini, dua kabel termokopel tipe-K dilas di tengah sampel sebelum dipanaskan untuk merekam suhu *realtime* spesimen, hal ini dilakukan dengan tujuan untuk membentuk loop umpan balik untuk penyesuaian dan pengontrolan suhu dinamis di bawah bantuan pembebanan arus AC yang dikendalikan umpan balik yang tergabung pada dua termo diujung sampel silinder dan tujuan lainnya yaitu untuk mengontrol laju pemanasan dan pendinginan secara akurat dan mengukur suhu spesimen. Setelah itu, spesimen dipasang tepat di tengah-tengah landasan dengan dua cakram foil grafit yang disisipkan di antara ujung spesimen dan landasan sebagai pelumas untuk mengurangi gesekan antara landasan dan sampel sehingga meningkatkan keakuratan hasil penelitian. Pada proses ini dialiri gas argon yang digunakan sebagai gas pelindung dan pendinginan di dalam mesin dan tujuan lainnya yaitu untuk menghambat dekarburisasi baja dan oksidasi peralatan mesin. Semua sampel yang diuji pertama-tama dipanaskan hingga suhu austenisasi 1100°C dengan laju pemanasan 2°C/detik dan ditahan selama 120 detik agar terjadi homogenisasi struktur mikro, kemudian spesimen didinginkan hingga suhu deformasi dengan kecepatan 10°C/s, selanjutnya spesimen didinginkan hingga suhu uji 1050°C dan 1100°C dan ditahan spesimen diregangkan pada laju regangan sebenarnya yang berbeda yaitu 10^{-1} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} dan 10^{-3} s^{-1} .

4.2.2 Recovery dan Rekristalisasi

Logam dapat dideformasi secara plastis dimana logam tidak akan kembali ke aslinya. Sebagian kecil dari energi yang dihabiskan untuk mendeformasi logam secara plastis tetap disimpan dalam strukturnya dan meningkatkan energi dalamnya. Recovery atau proses pemulihan biasanya terjadi pada suhu rendah dan melibatkan cacat titik serta pemusnahan dan penataan ulang dislokasi yang menghasilkan pembentukan subbutir dan batas subbutir (misalnya, batas kemiringan atau puntiran sudut rendah).

Ciri khas dari proses pemulihan adalah tidak melibatkan perubahan apa pun dalam struktur butiran logam yang dikerjakan secara dingin, satu-satunya perubahan yang terjadi adalah pengaturan dislokasi di dalam butiran yang ada. Perubahan kecil dalam kekerasan yang kadang-kadang diamati selama pemulihan dapat dikaitkan dengan penurunan kerapatan dislokasi dan titik cacat dan pertumbuhan subbutir.

Suhu tinggi mempengaruhi perkembangan dislokasi menjadi subbutir, proses ini sebenarnya dapat dimulai pada suhu tinggi sehingga logam mengalami pemulihan dinamis. Kecenderungan dislokasi untuk membentuk sel atau substruktur cukup kuat pada logam murni dan dapat terjadi pada temperatur yang sangat rendah. Pada suhu yang lebih tinggi, penyebab pemulihan dinamis secara alami menjadi lebih kuat, karena mobilitas dislokasi meningkat dengan meningkatnya suhu. Hasilnya adalah sel atau sub-butir cenderung terbentuk pada titik titik kecil, dinding sel menjadi lebih sempit dan tipis dan jelas lebih tajam sehingga ukuran sel menjadi lebih besar.

Pemulihan dinamis memiliki pengaruh yang kuat pada bentuk kurva tegangan-regangan. Dikarenakan adanya pergerakan dislokasi menurunkan energi regangan rata-rata yang terkait dengan dislokasi. Dimana hal ini terjadi untuk membuat lebih mudahnya terjadi nukleasi dislokasi tambahan yang diperlukan untuk lebih meregangkan logam. Pemulihan dinamis dengan demikian cenderung menurunkan tingkat pengerasan kerja. Pemulihan dinamis terjadi paling kuat pada logam dengan energi salah susun tinggi dan juga tidak mudah diamati pada logam dengan energi salah susun yang sangat rendah.

Proses pemulihan yang terjadi pada suhu rendah menghasilkan pemulihan sifat fisik tanpa perubahan struktur mikro yang dapat diamati. Pemulihan ini penting karena dapat digunakan untuk melepaskan tekanan internal pada peralatan penempaan, pengelasan, dan fabrikasi, tanpa mengurangi kekuatan yang diperoleh selama dan pengerjaan. Mekanisme yang beroperasi pada suhu rendah adalah gerak kekosongan. Hal ini

melibatkan migrasi cacat titik ke batas butir dan dislokasi dan kombinasi cacat titik.

Pada suhu menengah mekanismenya adalah gerakan dislokasi tanpa pendakian. Dimana hal ini melibatkan susunan dislokasi yang tidak beraturan, pemusnahan dislokasi dan pertumbuhan butir. Pada suhu tinggi, mekanisme yang terjadi adalah pergerakan dislokasi dengan pendakian, yang melibatkan pendakian dislokasi, hilangnya batas antara dua sub-butir, yang dikenal sebagai penggabungan dan poligonisasi (keadaan antara pemulihan dan rekristalisasi).

Pada proses pemulihan, logam yang diperkeras regangan dipanaskan hingga suhu rendah, distorsi elastis kisi kristal berkurang karena peningkatan amplitudo osilasi termal atom. Pemanasan ini akan menurunkan kekuatan logam yang mengalami pengerasan regangan namun terjadi peningkatan batas elastis dan keuletan logam. Pada keadaan awal, laju pemulihan paling cepat dan menurun dalam waktu yang lebih lama pada suhu tertentu. Oleh karena itu jumlah pemulihan yang terjadi dalam waktu tertentu meningkat seiring dengan meningkatnya suhu.

Proses rekristalisasi terjadi jika peningkatan aktivasi termal tersedia yaitu jika suhu dinaikkan, dimana nukleasi dan pertumbuhan butir bebas regangan dalam matriks yang terdeformasi akan terjadi. Saat butir ini tumbuh, dislokasi dalam matriks dimusnahkan pada batas butir yang baru terbentuk. Kekuatan dan kekerasan menurun drastis dan keuletan meningkat. Suhu terendah di mana butiran bebas tegangan muncul dalam struktur logam yang sebelumnya terdeformasi secara plastis disebut suhu rekristalisasi. Dimana hal ini tergantung pada ukuran butir, tingkat keparahan deformasi plastis, dan keberadaan atom terlarut atau partikel fase kedua. setelah deformasi berat.

Proses rekristalisasi menghilangkan dislokasi dan butiran bebas dislokasi terbentuk di dalam struktur yang terdeformasi atau pulih dan melepaskan energi yang tersimpan. Dimana proses rekristalisasi ini memerlukan deformasi minimum untuk memulai rekristalisasi. Semakin

kecil deformasi, semakin tinggi suhu yang dibutuhkan untuk memulai rekristalisasi dan meningkatkan waktu anil dapat menurunkan suhu yang diperlukan untuk rekristalisasi.

Pada proses ini butir akhir bergantung pada derajat deformasi dan derajat yang lebih kecil pada suhu anil, secara umum semakin kecil semakin besar derajat deformasi maka akan semakin rendah suhu anil. Berlaku juga semakin besar ukuran butir asli, semakin besar jumlah deformasi yang diperlukan untuk memberikan suhu dan waktu rekristalisasi yang sebanding dan jumlah deformasi yang diperlukan untuk menghasilkan pengerasan deformasi yang ekivalen meningkat dengan meningkatnya suhu kerja dan juga, implikasinya, untuk derajat deformasi tertentu, suhu kerja yang lebih tinggi memerlukan ukuran butiran rekristalisasi yang lebih kasar dan suhu rekristalisasi yang lebih tinggi.

Rekristalisasi ini adalah proses di mana butiran logam pengerjaan panas yang terdistorsi digantikan oleh butiran bebas regangan baru selama pemanasan di atas suhu minimum yang disebut suhu rekristalisasi. Selama rekristalisasi, terjadi penurunan tajam dalam kekerasan dan kekuatan serta peningkatan keuletan. Laju pertumbuhan selama rekristalisasi tidak bergantung pada waktu tetapi meningkat seiring dengan derajat deformasi dan suhu anil. Kehadiran pengotor menurunkan laju pertumbuhan, yaitu laju rekristalisasi dan ketika semua butiran logam yang dikerjakan dengan pengerjaan panas telah digantikan oleh butiran struktur kristal bebas regangan, pertumbuhan berhenti dan rekristalisasi dikatakan selesai.

Efek pertama dari pemanasan logam adalah pembentukan adanya butiran-butiran kecil baru dan butiran-butiran ini dengan cepat membesar hingga pertumbuhan lebih lanjut dibatasi oleh pertemuan butiran-butiran lainnya. Rekristalisasi tidak menghasilkan struktur baru namun menghasilkan butiran atau kristal baru dengan struktur yang sama pada logam. Dimana ini terdiri dari atom-atom logam yang terdeformasi mengatasi ikatan kisi yang terdistorsi, pembentukan inti butir-butir yang seimbang dan pertumbuhan selanjutnya dari butir-butir ini karena

perpindahan atom dari kristalit yang terdeformasi ke kristalit yang tidak terdeformasi.

Suhu saat kristalisasi dimulai, yaitu terbentuknya butiran baru, disebut suhu rekristalisasi. Selama pemulihan, beberapa energi regangan internal yang tersimpan dilepaskan melalui gerakan dislokasi karena peningkatan difusi atom pada ketinggian suhu menyebabkan pengurangan jumlah dislokasi. Setelah pemulihan selesai, butiran masih dalam keadaan energi regangan yang relatif tinggi. Rekristalisasi adalah pembentukan sekumpulan butir baru bebas regangan dan uniaksial yang memiliki kerapatan dislokasi rendah dimana kekuatan pendorong ada untuk menghasilkan struktur butiran baru adalah perbedaan energi internal antara material yang terregangkan dan tidak teregangkan.

4.2.3 *Dynamic Recovery (DRV) dan Dynamic Recrystallization (DRX)*

Dynamic recovery (DRV) dan *dynamic recrystallization (DRX)* adalah proses mendasar dalam deformasi plastis logam, di mana energi regangan elastis yang terkait dengan cacat kisi linier yaitu dislokasi diminimalkan dengan reorganisasi cacat tersebut menjadi konfigurasi energi rendah. Selama *dynamic recrystallization (DRX)*, pengerasan regangan karena akumulasi cacat kisi dinetralkan oleh migrasi batas butir dan nukleasi butir rekristalisasi bebas regangan baru. Cacat seperti dislokasi dan antarmuka meningkat selama deformasi yang membuat material termodinamika tidak stabil. Saat mendeformasi logam pada suhu tinggi, secara termal proses yang diaktifkan cenderung menghilangkan cacat ini untuk mengurangi energi bebas sistem. Struktur mikro dan juga sifat-sifatnya sebagian dapat dikembalikan ke nilai aslinya sebelumnya deformasi dengan pemulihan melalui penataan ulang dislokasi. Pemulihan umumnya membawa perubahan struktur mikro yang relatif homogen dan umumnya tidak melibatkan migrasi HAGB antara butiran yang terdeformasi. Proses pemulihan serupa dapat terjadi selama anil atau selama deformasi, yang dikenal sebagai pemulihan dinamis (DRV).

Pembentukan struktur butiran baru dalam material yang terdeformasi oleh pembentukan dan migrasi HAGB yang didorong oleh energi yang tersimpan yang didapatkan dari deformasi plastis disebut sebagai rekristalisasi. Rekristalisasi dapat terjadi secara heterogen dengan nukleasi yang jelas dan tahap pertumbuhan dan dalam hal ini digambarkan sebagai proses terputus-putus. Sebaliknya, itu bisa juga berlangsung secara seragam sehingga struktur mikro berkembang secara progresif tanpa kejelasan nukleasi dan tahap pertumbuhan yang menunjukkan karakter yang berkelanjutan. Rekristalisasi Statis (SRX) yang mengacu pada proses rekristalisasi selama anil sedangkan yang terjadi selama deformasi di suhu tinggi disebut rekristalisasi dinamis (DRX).

Rekristalisasi dinamis (DRX) merupakan fenomena yang terjadi selama regangan logam pada suhu tinggi, yang ditandai dengan laju nukleasi butir kerapatan dislokasi rendah dan laju pertumbuhan posterior yang dapat menghasilkan ukuran butir homogen saat kesetimbangan tercapai. DRX terjadi setelah jumlah regangan kritis, yang bergantung pada jenis jalur regangan, ukuran butir awal, suhu dan laju regangan. Ketika regangan kritis tercapai, pada logam kubik berpusat muka (fcc) dengan energi kesalahan susun sedang hingga rendah, pengerasan regangan dan pemulihan dinamis tidak lagi menjadi mekanisme utama yang bertanggung jawab atas respons regangan tegangan.

Pada tingkat mikrostruktur, DRX dimulai ketika pengerasan regangan ditambah pemulihan tidak dapat lagi menyimpan lebih banyak dislokasi yang tidak bergerak. Butir menjadi jenuh oleh hambatan dislokasi berupa sel-sel dan batas butir menggelembung hingga terbentuk butir baru. Jika kesetimbangan atau keadaan stabil tercapai dalam satu siklus, kurva aliran panas dikatakan memiliki perilaku tegangan monotonik. Setelah tegangan puncak, tegangan turun mengikuti laju kinetik tertentu hingga mencapai tegangan tunak. Jika osilasi tegangan muncul sebelum mencapai kondisi tunak, maka beberapa siklus rekristalisasi dan pertumbuhan butir terjadi dan perilaku tegangan dikatakan sebagai puncak berganda.

Pemulihan dinamis (DRV) dapat dikaitkan dengan mekanisme penurunan tekanan dengan peningkatan slip silang yang mengarah ke pemusnahan dislokasi yang lebih tinggi ketika dislokasi ulir dengan tanda yang berlawanan membatalkan satu sama lain atau ketika dislokasi mencapai batas butir atau permukaan. Istilah rekristalisasi dinamis mengacu pada semua fenomena rekristalisasi yang terjadi melalui deformasi plastis. Rekristalisasi dinamis sering bersifat eksperimental selama deformasi panas paduan yang disiapkan. Tampaknya cukup sebanding dengan proses yang terjadi pada logam dan dapat diprediksi pada material yang pemulihannya lambat dan terdapat pemeliharaan sejumlah besar energi yang tersimpan.

4.2.4 Kurva Regangan dan Tegangan Sebenarnya

Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah baja dengan kandungan 3% Si, sampel baja ini banyak digunakan pada pembuatan peralatan industri contohnya yaitu digunakan sebagai bahan baku pembuatan tenaga listrik. Elemen paduan dalam baja membuatnya memiliki kekuatan dan ketahanan korosi yang tinggi. Namun, sifat mampu bentuk pada suhu kamar baja membatasi aplikasinya dalam bidang teknik. Proses pembuatan baja biasanya dilakukan pada suhu tinggi untuk mendapatkan sifat mampu bentuk yang lebih baik.

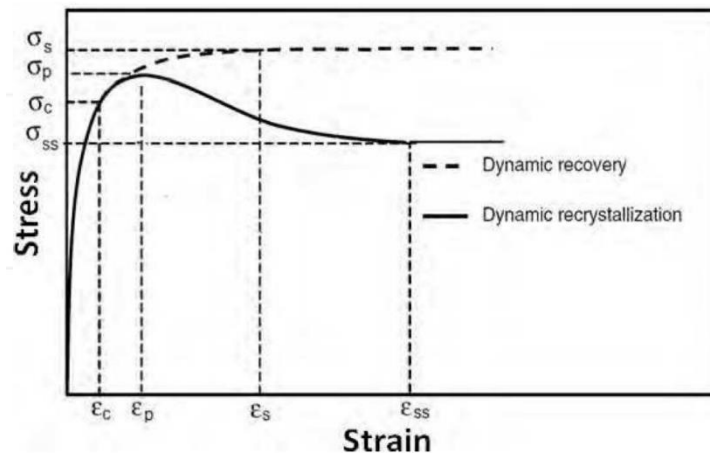
Jenis tegangan yang terjadi pada kurva regangan dan tegangan sebenarnya hasil dari *hot compression test* adalah tegangan tekan. Tegangan tekan adalah keadaan dimana gaya yang diterapkan cenderung akan memampatkan atau menekan material sepanjang sumbu gaya yang diterapkan. Setelah diberikan tegangan, suatu material cenderung mengecil pada arah sejajar dengan arah gaya tekan dan membesar pada arah tegak lurus terhadap penerapan beban tekan. Saat tegangan tekan diterapkan, atom-atom dalam struktur kristal material terdorong semakin berdekatan. Ketika atom-atom dalam struktur kristal bergerak, mereka mendorong atom-atom lain. Karena atom tidak dapat menempati ruang yang sama, atom yang dipindahkan cenderung bergerak tegak lurus terhadap gaya yang

diberikan. Hal ini menyebabkan material menggebu, atau menjadi lebih tebal, ke arah tersebut. Ketika tegangan tekan meningkat, terjadi kegagalan tekuk atau pembengkokan atau puntiran material secara tiba-tiba. Besarnya tegangan tekan yang menyebabkan terjadinya deformasi plastis adalah tegangan luluh, sedangkan besarnya tegangan pada saat keruntuhan adalah kuat tekan. Tegangan tekan ini disebabkan oleh dislokasi atom. Dimensi suatu material cenderung bertambah dalam arah tegak lurus terhadap arah penerapan gaya tekan. Ketika gaya tekan diterapkan, atom-atom terdislokasi di sekitar bidang slip atau bidang imajiner melalui struktur mikro material. Atom-atom yang berada di atas bidang slip terkompresi sedangkan atom-atom yang berada di bawah bidang slip mengalami tegangan.

Selama proses pembentukan panas, baja akan mengalami variasi suhu dan laju regangan yang akan menghasilkan perubahan perilaku mekanis dan perubahan mikrostruktur. Sampel baja yang digunakan pada percobaan ini adalah baja yang berasal dari proses *rolling*, dimana proses *rolling* ini merupakan salah satu proses dalam pengerjaan panas, di mana dalam proses ini material mengalami siklus termal di bawah regangan variabel untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Tegangan aliran material adalah salah satu hal yang paling penting dalam pengerjaan panas, dimana hal ini dilakukan untuk meningkatkan efisiensi produksi dan kualitas baja. Pada regangan rendah, austenit FCC dan ferit BCC mengalami pengerasan regangan dan dengan meningkatnya regangan dan suhu secara bertahap, dua proses restorasi akan terjadi secara kompleks sebagai kombinasi pemulihan dinamis (DRV) dan rekristalisasi dinamis (DRX). Karena energi patahan susun (SFE) yang lebih tinggi, proses restorasi dengan DRV ditemukan secara dominan pada ferit, sedangkan DRX sangat penting dan mempercepat pelunakan tegangan aliran pada austenite karena memiliki SFE yang lebih rendah.

Pemulihan dinamis dan rekristalisasi dinamis terjadi selama operasi pengerjaan panas seperti proses *rolling*. Proses ini penting karena menurunkan tegangan aliran material, sehingga memungkinkannya untuk

dideformasi dengan lebih mudah dan juga memiliki berpengaruh pada tekstur dan ukuran butir material yang dikerjakan. Deformasi panas industri yang dilakukan pada kisaran temperatur kestabilan fasa austenite akan menghasilkan kurva mekanisme pelunakan dinamis seperti pemulihan dinamis (DRV) dan pemulihan dinamis rekristalisasi (DRX). Pemulihan dinamis (DRV) dan rekristalisasi dinamis (DRX) merupakan fenomena restorasi yang secara signifikan mempengaruhi perilaku aliran dimana hal ini dapat dilihat dari kurva yang dihasilkan, hal ini terjadi karena energi patahan susun yang rendah dari austenit, kinetika DRV akan lambat dan karenanya proses DRX biasanya terjadi selama pembentukan baja panas, yang dimulai pada regangan kritis, dimana contoh skema grafik DRV dan DRX dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Skema Grafik DRV dan DRX

Dalam proses pengerjaan panas, perilaku aliran material terjadi mekanisme fisik yang terjadi seperti pemulihan dinamis (DRV) dan rekristalisasi dinamis (DRX), yang dipengaruhi oleh komposisi kimia logam dan paduan. suhu deformasi, derajat deformasi dan laju regangan. Dimana DRX adalah mekanisme pelunakan yang dominan pada rentang $\alpha + \beta$ fasa ganda, sedangkan DRV adalah mekanisme pelunakan utama pada rentang β fasa tunggal. Dari hasil percobaan ini, didapatkan grafik dengan jenis mekanisme pelunakan yang akan dijelaskan dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Mekanisme Pelunakan Material Pada *Hot Compression Test*

Temperatur (°C)	Laju Regangan (s ⁻¹)	Mekanisme Pelunakan
Sampel 1 1050 °C	10 ⁻¹	DRV
	10 ⁻²	
	10 ⁻³	
Sampel 2 1050 °C	10 ⁻¹	DRV
	10 ⁻²	
	10 ⁻³	
Sampel 3 1050 °C	10 ⁻¹	DRV
	10 ⁻²	
	10 ⁻³	
Sampel 1 1100 °C	10 ⁻¹	DRV
	10 ⁻²	
	10 ⁻³	
Sampel 2 1100 °C	10 ⁻¹	DRV
	10 ⁻²	
	10 ⁻³	
Sampel 3 1100 °C	10 ⁻¹	DRV
	10 ⁻²	
	10 ⁻³	

4.2.5 Fenomena DRV Pada Kurva Regangan dan Tegangan Sebenarnya

Kurva tegangan-regangan yang khas dengan adanya DRV ditandai dengan peningkatan tegangan yang sebenarnya hingga nilai maksimum yang diikuti dengan tahap akhir nilai konstan yang berbentuk seperti dataran tinggi untuk deformasi yang lebih tinggi. Pada nilai regangan tertentu, pengerasan regangan dan kinetika DRV mencapai kesetimbangan dinamis dan kerapatan dislokasi tetap konstan. Semua ini menghasilkan tegangan

aliran kondisi tunak, yaitu sebanyak dislokasi yang dihasilkan dan dimusnahkan, substruktur dislokasi yang stabil berkembang.

Pada kurva DRV, tegangan aliran meningkat dengan regangan pada tahap awal deformasi dan kemudian mencapai kondisi *steady state* sebagai hasil dari pencapaian keseimbangan antara tingkat pengerasan dan pelunakan kerja. Pada tahap awal deformasi, efek pengerasan kerja lebih jelas daripada efek pelunakan yang disebabkan oleh pemulihan dinamis, efek pelunakan meningkat secara bertahap dengan meningkatnya deformasi, yang dapat menghalangi peningkatan tegangan dengan meningkatnya deformasi. Ketika efek pelunakan yang disebabkan oleh pemulihan dinamis mencapai keseimbangan dinamis dengan pengerasan kerja, nilai tegangan aliran secara umum tetap stabil.

Pemulihan dinamis DRV adalah satu-satunya mekanisme pelunakan paduan yang terjadi pada percobaan ini, contohnya ketika deformasi panas yang dilakukan pada temperatur 1050 hingga 1100 °C dengan berbagai laju regangan antara satu dan 10^{-1} sampai 10^{-3} s^{-1} . Tingkat pemulihan dinamis meningkat dengan meningkatnya suhu dan dengan penurunan laju regangan. Pada laju regangan tinggi 10^{-3} s^{-1} , pelepasan panas selama deformasi memainkan peran penting dalam penurunan tegangan aliran, yang menyebabkan pelunakan termal yang signifikan. Pada laju regangan rendah 10^{-1} hingga 10^{-2} s^{-1} dengan temperatur 1050 hingga 1100 °C, penggabungan presipitasi dinamis, disertai dengan peningkatan pemulihan dinamis, menghasilkan penurunan tegangan aliran yang cukup besar.

Dengan membandingkan kurva dengan temperatur 1050 °C dan 1100 °C pada hasil percobaan ini, terlihat bahwa untuk laju regangan tertentu, tegangan aliran menurun seiring adanya peningkatan temperatur. Alasan di balik fenomena ini adalah yang pertama, peningkatan suhu mampu meningkatkan efek energi aktivasi yang mengakibatkan peningkatan energi kinetik dan penurunan tegangan geser kritis di antara atom. Kedua, efek pelunakan yang disebabkan oleh DRV juga meningkat seiring dengan peningkatan suhu. Ketiga, beberapa evolusi tekstur dapat

terjadi misalnya, beberapa kisi berubah menjadi bentuk plastisitas yang menguntungkan. Keempat, tahanan geser antar kristal menurun secara signifikan yang menyebabkan mudahnya slip antar kristal, dan akibatnya, konsentrasi tegangan akibat deformasi yang tidak homogen antara butir yang berdekatan dilepaskan. Di sisi lain, untuk temperatur yang sama, tegangan aliran umumnya meningkat mengikuti peningkatan laju regangan. Dengan peningkatan laju regangan, waktu efek pelunakan berkurang karena deformasi yang lebih cepat, yang mengarah pada peningkatan ketahanan deformasi.

Kenaikan tegangan aliran dengan meningkatnya regangan dapat dikaitkan dengan penurunan laju proses restorasi dan peningkatan pekerjaan tingkat pengerasan. Selain itu, laju DRV juga menurun dengan meningkatnya laju regangan. Hal ini telah disimpulkan bahwa pembentukan inti DRX bergantung pada substruktur DRV, oleh karena itu regangan kritis untuk inisiasi DRX meningkat dengan meningkatnya laju regangan. Dari hasil kurva yang didapat juga menunjukkan bahwa kurva tegangan-regangan aliran sangat berpengaruh terhadap kondisi deformasi. Pada laju regangan tertentu, tegangan aliran meningkat seiring dengan menurunnya suhu deformasi dan sebaliknya. Pada suhu konstan, tegangan aliran meningkat seiring dengan meningkatnya laju regangan dimana kurva tegangan-regangan aliran memiliki dua tahap utama yaitu pengerasan kerja dan pelunakan dinamis dan kurva tegangan-regangan aliran memiliki titik-titik karakteristik yang mengindikasikan adanya perubahan mekanisme deformasi.

Dari kurva yang didapat terlihat bahwa tegangan aliran meningkat dengan cepat akibat pengerasan kerja hingga kondisi *steady-state* tercapai yang disebabkan oleh adanya mekanisme pelunakan (DRV). Kurva tegangan-regangan aliran ini digunakan untuk semua kondisi deformasi menunjukkan peningkatan adanya tegangan aliran yang cepat. Peningkatan tegangan aliran yang cepat menunjukkan adanya konsumsi energi yang tinggi untuk pembentukan dislokasi. Pengerasan kerja yang disebabkan oleh

adanya kepadatan dislokasi akumulatif menghalangi deformasi yang menghasilkan tegangan aliran yang lebih tinggi.

Peningkatan suhu dan penurunan laju regangan mengurangi ketahanan deformasi logam, dimana hal ini dikarenakan dalam kurva tegangan-regangan aliran, karakteristik pemulihan dinamis ditemukan dalam kondisi deformasi panas. Kurva tegangan-regangan aliran sesuai dengan karakteristik pemulihan dinamis yang khas pada suhu rendah dan laju regangan tinggi. Di sisi lain, kurva tegangan-regangan aliran memiliki karakteristik rekristalisasi dinamis yang jelas ketika kondisi deformasi adalah suhu tinggi dan laju regangan rendah.

Kurva aliran mencerminkan perubahan mikrostruktur yang terjadi selama deformasi, yang berkaitan erat dengan mekanisme deformasi yang mengendalikan tegangan aliran. Mekanisme deformasi seperti pengerasan kerja (WH) dan mekanisme pelunakan DRV bergantung pada parameter pembentukan. Dimana sampel baja yang digunakan dalam percobaan ini memiliki energi patahan susun yang tinggi, sehingga menunjukkan perilaku pelunakan aliran DRV. Alasannya adalah karena baja tersebut mudah tersusun kembali menjadi struktur sub-butir poligonal melalui slip silang dan dislokasi pendakian selama proses pembentukan. DRV menjadi lebih jelas ketika suhu meningkat karena dislokasi yang tinggi dan pergerakan batas butir terjadi.

Efek pengerasan kerja dan pelunakan dinamis telah dianggap saling bergantung karena fakta bahwa kekuatan pendorong untuk pelunakan dinamis disediakan oleh energi distorsi dari proses pengerasan kerja, sementara efek pelunakan membuat regangan terus menerus cenderung menginduksi pengerasan berikutnya. Terdapat hal dinamis antara pengerasan kerja yang dihasilkan dari reduplikasi dislokasi, dan pelunakan yang dihasilkan dari DRV. Pada daerah fase tunggal β dengan struktur kristal kubik berpusat tubuh (*body-centered cubic* atau BCC) pada suhu tinggi di atas β transisi, sistem slip basal adalah $\{110\}$, $\{112\}$, $\{123\}$, semuanya dengan vektor Burger tunggal yang terdefinisi dengan baik

sebesar $\langle 111 \rangle$. Dimana dalam hal ini, variasi *stacking fault energy* (SFE) dari berbagai jenis struktur kristal memainkan peran penting dalam deformasi metalik karena pengaruhnya terhadap mobilitas dan morfologi dislokasi, sehingga secara signifikan mempengaruhi perilaku pelunakan dinamisnya selama deformasi panas. Untuk fasa bcc β dengan SFE tinggi, penataan ulang dan eliminasi dislokasi yang cukup akan memusnahkan sebagian besar struktur dislokasi yang terbentuk pada deformasi plastis, yang menyebabkan kurangnya kekuatan pendorong untuk rekristalisasi dan akibatnya kesulitan yang lebih besar dalam terjadinya DRV. Dimana dalam konteks tersebut, proses DRV merupakan proses restorasi yang paling menonjol karena mobilitas non-konservatif dan laju slip silang yang tinggi yang memungkinkan penyusunan ulang dislokasi dan pembentukan subgrain.

Dimana apabila pemulihan mengurangi energi elastis internal hingga tingkat yang sangat besar, misalnya laju deformasi sangat rendah atau dalam kasus di mana dislokasi sangat bergerak dan karenanya dapat disusun ulang dengan sangat efisien, rekristalisasi bahkan dapat ditekan sepenuhnya. Dalam fase hcp α dengan SFE rendah (selip silang dan pemulihan dinamis dan statis terhambat), kepadatan dislokasi meningkat menjadi tinggi tingkat, dan akhirnya variasi kerapatan dislokasi lokal adalah cukup tinggi untuk memungkinkan terjadinya nukleasi butir-butir baru, diikuti oleh migrasi jarak jauh dari batas sudut tinggi (*high angle boundaries* atau HAB) dimana hal ini dapat berpengaruh terhadap kekuatan material baja yang dihasilkan.

Terlihat juga pada hasil kurva dengan peningkatan regangan lebih besar, kemiringan kurva tegangan-regangan aliran menurun hingga tegangan aliran mencapai kondisi tunak. Perilaku aliran ini menunjukkan bahwa pelunakan dinamis telah terjadi. Selama tahap ini, kurva aliran menunjukkan bahwa pengerasan kerja dan pemulihan dinamis berada dalam kesetimbangan, sehingga menghasilkan kerapatan dislokasi yang relatif konstan. Sehingga dari semua karakteristik kurva tegangan regangan aliran

yang dihasilkan dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi laju regangan dan temperatur deformasi, semakin cepat proses DRV dan hal ini mengindikasikan bahwa pemulihan dinamis pada percobaan ini didominasi oleh DRV pada setiap semua kondisi deformasi.

4.2.6 Parameter Zenner Hollomon

Parameter material yang penting untuk menjelaskan model kinetik DRV yang merupakan jenis mekanisme pelunakan pada percobaan ini dapat ditentukan dengan serangkaian analisis regresi pada data tegangan-regangan. Selain itu, analisis regresi pada parameter zenner hollomon diawali dengan proses pemecahan persamaan tipe Arrhenius yang dijelaskan pada persamaan 4.1. Dimana persamaan ini menggambarkan hubungan interaksional material logam antara tegangan aliran (σ), suhu (T) dan laju regangan ($\dot{\epsilon}$).

$$\dot{\epsilon} = AF(\sigma)\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots 4.1$$

Dimana A adalah faktor frekuensi konstan, $F(\sigma)$ adalah fungsi dari tegangan aliran yang ditentukan oleh persamaan 4.2.

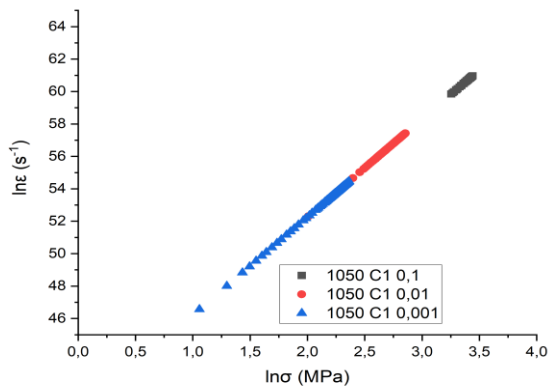
$$\begin{aligned} F(\sigma) &= \sigma^n = \alpha\sigma < 0.8 \\ F(\sigma) &= \exp(\beta\sigma) = \alpha\sigma > 1,2 \\ F(\sigma) &= [\sinh(\alpha\sigma)]^n = \text{untuk semua } \sigma \dots\dots\dots 4.2 \end{aligned}$$

Dimana σ adalah tegangan sebenarnya (MPa) untuk variabel lainnya seperti A, α , n' dan n termasuk kedalam konstanta material, dimana khusus untuk α didapat dari persamaan $\alpha = \beta/n'$.

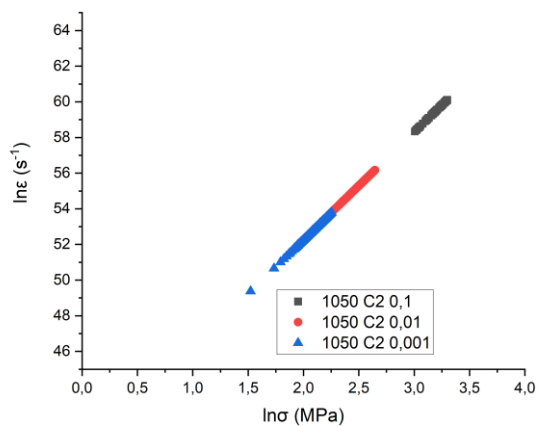
Efek suhu dan laju regangan pada perilaku deformasi biasanya dijelaskan oleh parameter Zener-Hollomon, dimana parameter ini mewakili adanya pengaruh suhu dengan laju regangan kompensasi. Selanjutnya, hukum hiperbolik dalam rumus Arrhenius akan diturunkan sehingga dapat memberikan perkiraan yang lebih baik dan menjelaskan hubungan antara

parameter Z dan tegangan aliran, dimana tegangan aliran (σ) juga dapat didefinisikan sebagai fungsi dari parameter Z , dimana parameter Z ini ditunjukkan pada persamaan 4.3 di mana $\dot{\epsilon}$ adalah laju regangan (s^{-1}), R adalah konstanta gas ($8,31 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$), T adalah temperatur (K) dan Q adalah energi aktivasi semu untuk deformasi (KJmol^{-1})

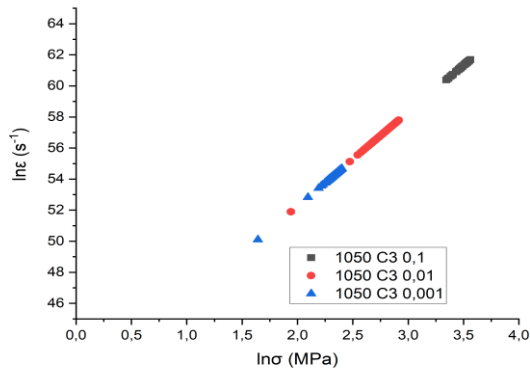
$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots 4.3$$



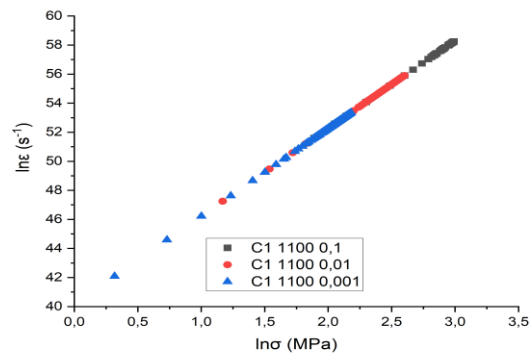
Gambar 4.8 Grafik $\ln \sigma$ vs $\ln \dot{\epsilon}$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



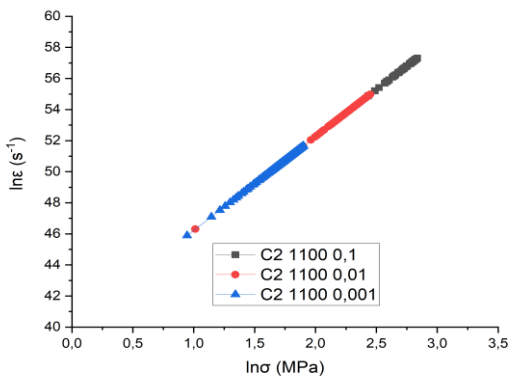
Gambar 4.9 Grafik $\ln \sigma$ vs $\ln \dot{\epsilon}$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



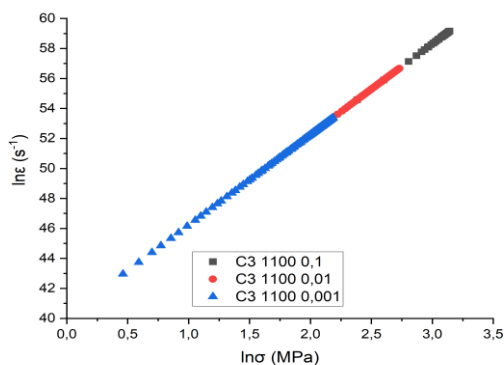
Gambar 4.10 Grafik $\ln \sigma$ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



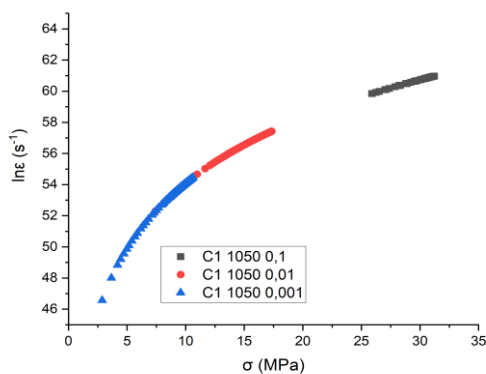
Gambar 4.11 Grafik $\ln \sigma$ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1100°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



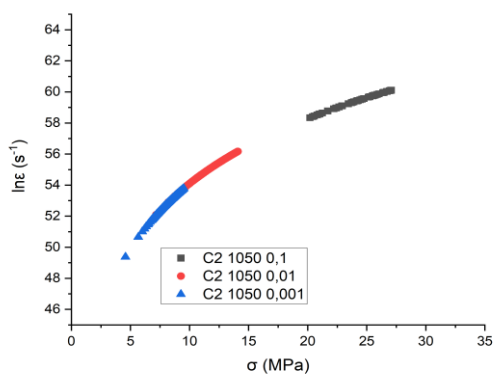
Gambar 4.12 Grafik $\ln \sigma$ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1100°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



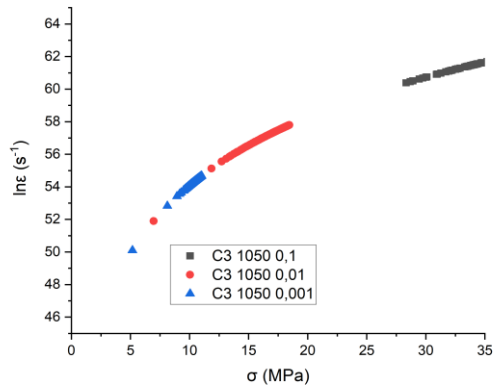
Gambar 4.13 Grafik $\ln\sigma$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1100°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



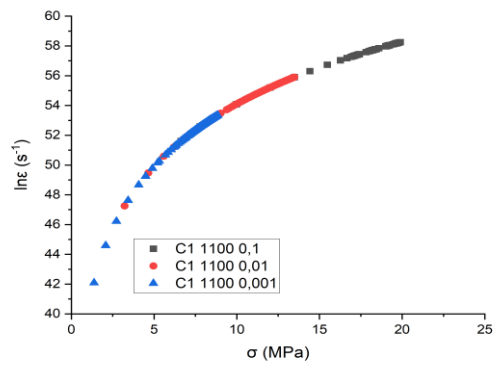
Gambar 4.14 Grafik σ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



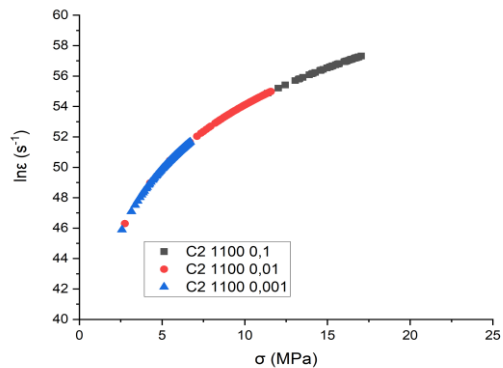
Gambar 4.15 Grafik σ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



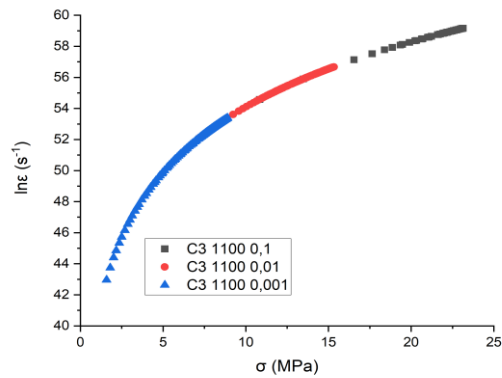
Gambar 4.16 Grafik σ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



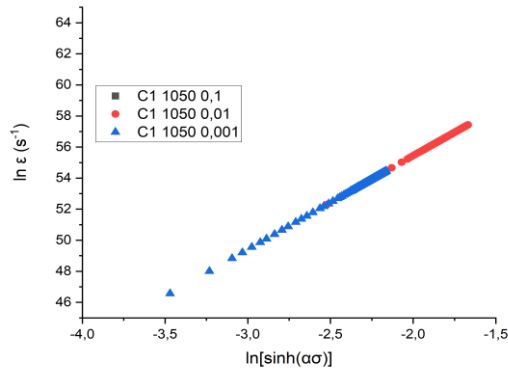
Gambar 4.17 Grafik σ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1100°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



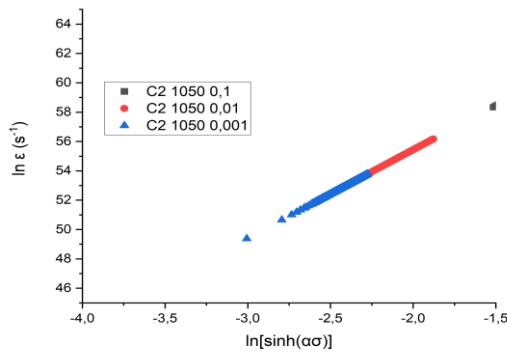
Gambar 4.18 Grafik σ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1100°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



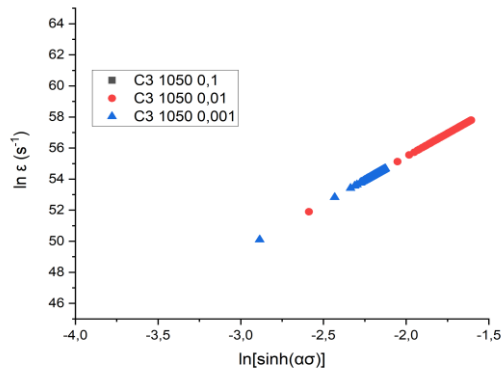
Gambar 4.19 Grafik σ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



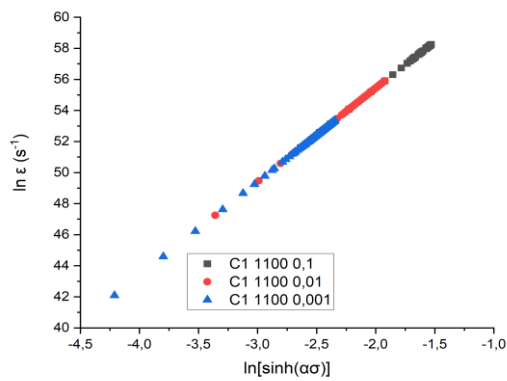
Gambar 4.20 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



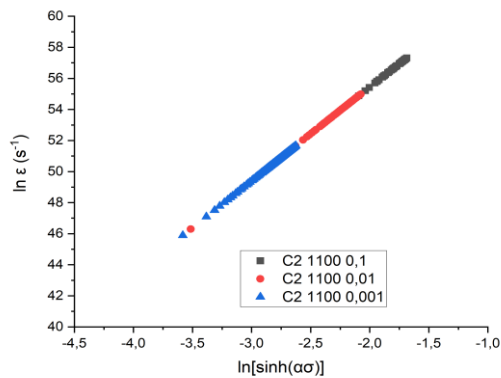
Gambar 4.21 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



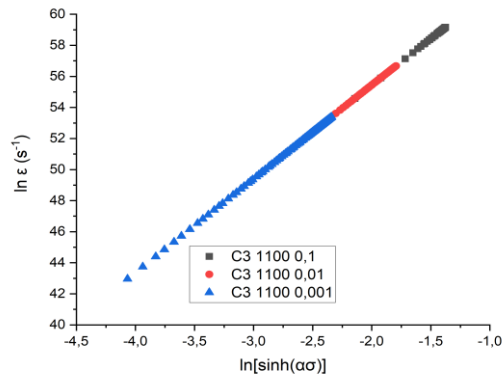
Gambar 4.22 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



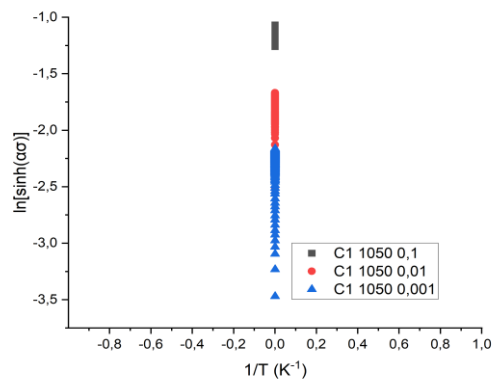
Gambar 4.23 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1100°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



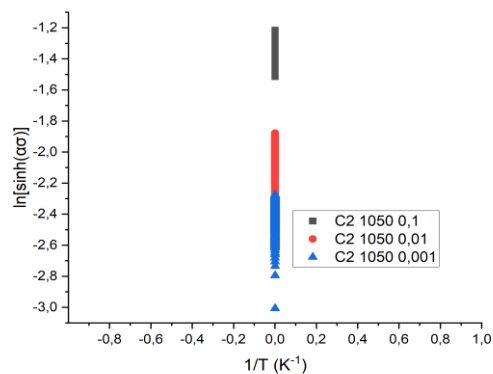
Gambar 4.24 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1100°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



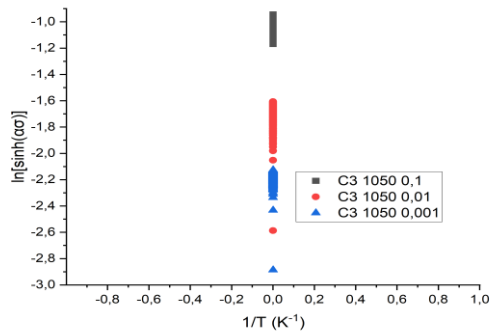
Gambar 4.25 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



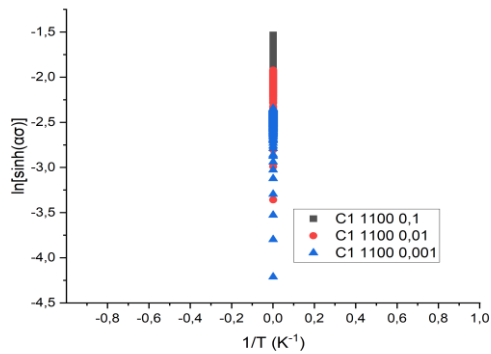
Gambar 4.26 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



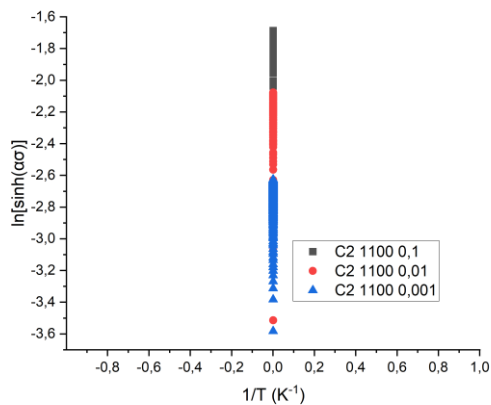
Gambar 4.27 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



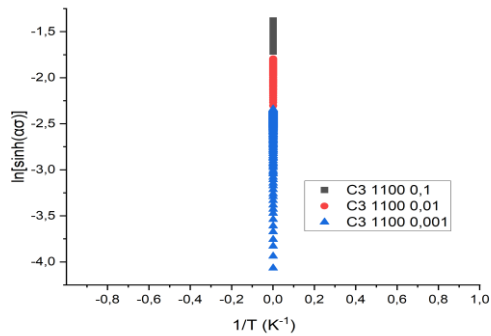
Gambar 4.28 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



Gambar 4.29 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



Gambar 4.30 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



Gambar 4.31 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}

T (°C)	ΣQ (KJ.mol ⁻¹)	ΣZ	$\Sigma\sigma$ (Laju DRV MPa)
C1 1050 0,1	245,36921	$2,2598 \times 10^{26}$	443,45344
C1 1050 0,01	245,36699	$6,15721 \times 10^{24}$	376,75517
C1 1050 0,001	245,36188	$3,60076 \times 10^{23}$	324,23702
C2 1050 0,1	245,38941	$7,3324 \times 10^{25}$	422,61343
C2 1050 0,01	245,37984	$1,76416 \times 10^{24}$	353,62551
C2 1050 0,001	245,34933	$1,38564 \times 10^{23}$	306,59125
C3 1050 0,1	245,39674	$4,46147 \times 10^{26}$	1200,5264
C3 1050 0,01	245,37608	$9,95306 \times 10^{24}$	1130,10479
C3 1050 0,001	245,37605	$4,90085 \times 10^{23}$	1074,34445
C1 1100 0,1	245,38782	$1,24263 \times 10^{25}$	1134,21471
C1 1100 0,01	245,37114	$1,43231 \times 10^{24}$	1094,20495
C1 1100 0,001	245,36542	$1,01531 \times 10^{23}$	1045,19228
C2 1100 0,1	245,39017	$4,83136 \times 10^{24}$	1116,7205
C2 1100 0,01	245,37987	$6,08104 \times 10^{23}$	1078,3402
C2 1100 0,001	245,37922	$1,9425 \times 10^{22}$	1014,56637
C3 1100 0,1	245,39757	$3,53748 \times 10^{25}$	1253,58845
C3 1100 0,01	245,39627	$3,00015 \times 10^{24}$	1207,89704
C3 1100 0,001	245,39001	$1,1155 \times 10^{23}$	1266,93506

Tabel 4.3 Nilai Parameter Zenner Hollomon Pada Setiap Spesimen

Seperti yang dijelaskan pada Tabel 4.2 di atas, pada temperatur 1050 °C dan 1100 °C dengan laju regangan $0,1 - 0,001 \text{ s}^{-1}$, proses DRV bertindak sebagai mekanisme pelunakan yang dominan. Pada DRV, dislokasi atom hanya dapat berinteraksi satu sama lain dengan tujuan untuk mengurangi distorsi *cross-slipping* dan *climbing*. Akibatnya, tegangan aliran cenderung meningkat hingga tegangan jenuh yang didominasi oleh DRV mencapai keseimbangan. Tegangan jenuh (*flow stress*) didefinisikan sebagai efek pengerasan maksimum selama proses deformasi dengan mekanisme pelunakan DRV, dimana pada proses DRV meningkat dengan meningkatnya regangan. Hal ini terjadi karena berkurangnya energi yang tersimpan yang disebabkan oleh dominasi pengerasan kerja pada tahap awal deformasi, sehingga semakin tinggi laju regangan dan temperatur deformasi maka akan semakin cepat juga proses DRV.

Perilaku mulur pada suhu tinggi dapat memengaruhi sifat mekanis suatu bahan. Dimana dampak dari perilaku mulur ini dapat dilihat pada kurva tegangan-regangan aliran yang merupakan hasil dari penelitian ini dengan mekanisme pelunakan jenis DRV. Pada DRV, pada tahap awal deformasi, efek pengerasan kerja lebih jelas daripada efek pelunakan yang disebabkan oleh pemulihan dinamis. Efek pelunakan meningkat secara bertahap dengan meningkatnya deformasi, yang dapat menghalangi tren peningkatan tegangan dengan meningkatnya deformasi. Ketika efek pelunakan yang disebabkan oleh pemulihan dinamis mencapai keseimbangan dinamis dengan pengerasan kerja, nilai tegangan aliran secara umum tetap stabil.

Dengan meningkatnya deformasi, efek pelunakan yang disebabkan oleh DRV secara bertahap menjadi jelas, yang tercermin dalam penurunan laju pengerasan kerja. Ketika efek pelunakan dari pemulihan dinamis diimbangi dengan pengerasan kerja, tegangan aliran mendekati nilai konstan. Pada kurva aliran di atas menunjukkan bahwa tegangan aliran menurun dengan meningkatnya temperatur deformasi atau menurunnya laju regangan. Penurunan tegangan aliran dengan suhu deformasi dapat

dikaitkan dengan peningkatan laju proses restorasi dan penurunan laju pengerasan regangan. Karena pembentukan inti DRV menjadi lebih mudah pada temperatur deformasi yang lebih tinggi, maka regangan kritis untuk inisiasi DRV menurun. Selain itu, mobilitas batas butir meningkat dengan meningkatnya suhu deformasi dan karenanya laju DRV meningkat. Oleh karena itu, baik regangan puncak maupun kondisi tunak menurun dengan temperatur deformasi. Peningkatan tegangan aliran dengan laju regangan dapat dikaitkan dengan penurunan laju proses restorasi dan peningkatan laju pengerasan regangan.

Ketika dislokasi terus meningkat, *work hardening* terus menguat. Ketika dislokasi yang meningkat melebihi nilai kritis, DRV akan dihasilkan, menghasilkan efek pelunakan. Ketika regangan terus meningkat, derajat DRV terus meningkat. Ketika efek pelunakan meningkat, tegangan berkurang. Tegangan menurun secara signifikan ketika deformasi T meningkat dan ϵ' menurun. Temperatur yang rendah dapat mempercepat migrasi batas butir, meningkatkan laju difusi kekosongan, dan mempercepat migrasi batas butir. Proses-proses ini memungkinkan peningkatan DRV. Efek pelunakan diperkuat, dan tegangan pun berkurang. Kondisi ini memberikan lebih banyak waktu bagi butiran rekristalisasi dinamis untuk tumbuh. Penguatan DRV juga melemahkan efek pengerasan kerja yang menyebabkan tegangan aliran berubah dengan T dan ϵ' .

Pada tahap awal deformasi, tegangan aliran meningkat dengan cepat akibat pengerasan kerja hingga kondisi *steady-state* tercapai yang disebabkan oleh mekanisme pelunakan seperti *dynamic recovery* (DRV). Kurva tegangan-regangan aliran untuk semua kondisi deformasi menunjukkan peningkatan tegangan aliran yang cepat. Peningkatan tegangan aliran yang cepat menunjukkan konsumsi energi yang tinggi untuk pembentukan dislokasi. Pengerasan kerja yang disebabkan oleh kepadatan dislokasi akumulatif menghalangi deformasi yang menghasilkan tegangan aliran yang lebih tinggi. Peningkatan tegangan aliran yang cepat pada tahap awal deformasi disebabkan oleh pembentukan dan penggandaan dislokasi.

Pengerasan kerja merupakan mekanisme deformasi yang dominan selama deformasi awal. Dengan peningkatan regangan, kemiringan kurva tegangan-regangan aliran naik hingga tegangan aliran mencapai kondisi tunak. Perilaku aliran ini menunjukkan bahwa pelunakan dinamis telah terjadi. Selama tahap ini, kurva aliran menunjukkan bahwa pengerasan kerja dan pemulihan dinamis berada dalam kesetimbangan, sehingga menghasilkan kerapatan dislokasi yang relatif konstan. Perilaku karakteristik kurva tegangan regangan aliran ini menunjukkan bahwa mekanisme pelunakan yang dominan adalah pemulihan dinamis (DRV). Kurva tegangan-regangan aliran juga menunjukkan bahwa proses deformasi dipengaruhi oleh pengerasan kerja dan pemulihan dinamis (pelunakan). Tegangan aliran menurun dengan peningkatan suhu deformasi sehingga terjadi penurunan laju regangan.

Pada temperatur deformasi dan laju regangan yang sama pada Tabel 4.2 tegangan aliran meningkat seiring dengan meningkatnya nilai Q , yang berarti bahwa material dengan nilai Q yang lebih rendah dapat lebih mudah terdeformasi dengan laju yang lebih rendah. Nilai Q yang diperoleh dalam penelitian ini lebih tinggi, hal ini dikarenakan adanya kandungan Si yang dapat meningkatkan energi patahan susun baja. Energi yang lebih tinggi mempengaruhi disosiasi dislokasi, sehingga mempengaruhi kemampuan slip silang dislokasi. Energi aktivasi yang lebih tinggi juga dapat disebabkan oleh nilai eksponen tegangan yang tinggi. Eksponen tegangan dipengaruhi secara signifikan oleh peningkatan tegangan aliran. Saat tegangan aliran meningkat, energi aktivasi meningkat.

Adanya kandungan Si menghambat gerakan dislokasi, sehingga meningkatkan eksponen tegangan. Peningkatan eksponen tegangan meningkatkan energi aktivasi. Oleh karena itu, hal ini menyebabkan terbentuknya banyak endapan yang mencegah pergerakan dislokasi selama deformasi yang menghasilkan energi aktivasi yang lebih tinggi. Adanya penambahan Si mengurangi energi aktivasi karena mereka meningkatkan difusi sementara elemen paduan substitusi meningkatkan Q .

Peningkatan jumlah elemen paduan substitusi menyebabkan peningkatan energi aktivasi karena akumulasi energi yang tersimpan secara internal. Variasi energi aktivasi dapat disebabkan oleh efek elemen paduan, dimana pada penelitian ini Si digunakan sebagai elemen paduan pada baja yang digunakan pada sampel penelitian ini, dimana Si ini berkontribusi pada nilai Q yang tinggi.

Faktor Zener-Hollomon dapat digunakan untuk merepresentasikan efek kombinasi suhu dan laju regangan pada perilaku deformasi pada suhu tinggi dan peningkatan suhu dan penurunan laju regangan mengurangi ketahanan deformasi logam. Sehingga dapat disimpulkan bahwa koefisien pemulihan dinamis meningkat dengan meningkatnya parameter Zener-Hollomon, dimana dalam proses DRV meningkat dimana tegangan meningkat seiring dengan regangan.

4.2.7 Standar ASTM

Standar ASTM yang digunakan untuk pembuatan transformator atau trafo yang terbuat dari baja silikon adalah menggunakan ASTM A 876. Dimana untuk ASTM A 876 baja ini digunakan terutama pada inti transformator yang beroperasi pada suhu sedang hingga tinggi dengan nilai induksi pada frekuensi daya komersial sekitar 50 dan 60 Hz. Baja yang digunakan yaitu baja dengan kandungan silikon kira-kira sampai 3,2 % dengan nilai kehilangan inti rendah dan permeabilitas tinggi. Untuk nilai permeabilitas, permeabilitas pada semua induksi harus setinggi mungkin. Pengendalian kualitas tingkatan ini biasanya didasarkan pada pengukuran permeabilitas puncak relatif (μ_p) dan kekuatan medan magnet ac puncak sebesar 796 A/m. Untuk nilai berorientasi butir konvensional, nilai μ_p relatif pada 796 A/m umumnya di atas 1800 dan untuk kadar permeabilitas tinggi, biasanya di atas nilai 1880 dengan dimensi ukurannya yaitu 0.03-16 x 1200 mm.

Pemilihan kedua temperatur yaitu 1050 °C dan 1100°C adalah untuk mengetahui pengaruh kenaikan temperatur terhadap kinerja baja

listrik 3% Si dan didapatkan hasil bahwa kenaikan temperatur memberikan efek peningkatan kekuatan mekanik pada baja, dimana pada temperatur 1100 °C tidak ditemukan retakan pada hasil akhir baja sehingga hal ini tidak akan menghambat proses produksi dan akan meningkatkan kualitas dari baja itu sendiri. Perbandingan kualitas baja antara baja dari temperatur 700 °C – 1100 °C disimpulkan bahwa kualitas baja yang baik yaitu baja dengan temperatur tertinggi yaitu 1100 °C. Hal ini didukung dengan aspek nilai laju DRV, dimana antara temperatur 700 – 1100 °C memiliki laju DRV yang berbeda beda dan temperatur 1100 °C memiliki laju DRV yang paling tinggi, hal inilah yang mendukung kesimpulan bahwa baja temperatur 1100 °C memiliki sifat mekanik yang paling baik karena laju DRV yang tinggi dapat meningkatkan kualitas sifat mekanik pada baja khususnya pada nilai kekerasan baja yang meningkat.

Selanjutnya dilihat dari sampel dengan kandungan Si tertinggi ditemukan pada spesimen C2 dan kandungan Si terendah ditemukan pada spesimen C1. Kandungan Si ini berpengaruh terhadap kekuatan baja, dimana spesimen C2 memiliki nilai kekuatan yang terendah dikarenakan memiliki kandungan Si yang paling tinggi, hal ini dikarenakan kandungan Si yang tinggi dapat mendorong terjadinya fasa alfa ferit yang akan menurunkan nilai kekuatan dari suatu material dan untuk alasan lainnya adalah karena spesimen C2 pada temperatur 1050 °C memiliki kandungan S paling tinggi diantara 3 spesimen lainnya, hal ini dikarenakan S dapat bergabung dengan Mn menjadi MnS, dimana apabila kandungan MnS dalam suatu spesimen tinggi maka akan meningkatkan keretakan pada baja tersebut dan karena alasan inilah dapat disimpulkan bahwa spesimen dengan kekuatan terendah atau spesimen dengan sifat mekanik yang kurang baik adalah spesimen C2 dan untuk spesimen yang memiliki kekuatan tertinggi dan memiliki sifat mekanik yang sangat baik adalah spesimen C3 1100 °C karena kandungan Si yang paling rendah diantara 3 spesimen lainnya dan memiliki nilai DRV yang terbesar diantara 3 spesimen lainnya hal ini dikarenakan nilai DRV yang tinggi akan tidak akan menghasilkan

pertumbuhan butir baru sehingga sifat mekanik dari baja tidak akan mengalami penurunan.

4.2.8 Test Machine Hot Tensile INSTRON 4507

Hot tensile test dilakukan pada 3 spesimen (C₁, C₂ dan C₃) dengan penerapan nilai regangan yang berbeda, yaitu 10⁻¹ s⁻¹, 10⁻² s⁻¹ dan 10⁻³ s⁻¹. Dengan temperatur yang digunakan di test ini adalah 1050 °C dan 1100 °C. Penelitian ini dilakukan pada 3 spesimen yang berbeda dimana jenis test ini dilakukan untuk mengevaluasi keuletan baja pada temperatur tinggi. Baja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja dengan kandungan 3% Si dengan komposisi kimia lain yang dijelaskan pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.4 Komposisi Sampel Baja Pada *Hot Tensile Test*

Spe cim en	Content of Elements, wt.%											
	C	Mn	Si	S	Cr	Cu	Ti	Al	Nb	N	O	Fe
C ₁	0,0	0,2	3,0	0,0	0,01	0,04	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	96,0
	275	898	940	057	573	892	063	136	024	079	459	014
	6	3	4	8		1		3	6		9	8
C ₂	0,0	0,2	3,1	0,0	0,03	0,48	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,8
	262	626	935	077	051	098	020	207	023	078	778	875
	8	4	5	5			3	6	5	2	0	3
C ₃	0,0	0,2	3,1	0,0	0,00	0,48	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,9
	437	624	59	066	309	105	02	227	019	067	537	289
	3			8	8			5	8		9	4

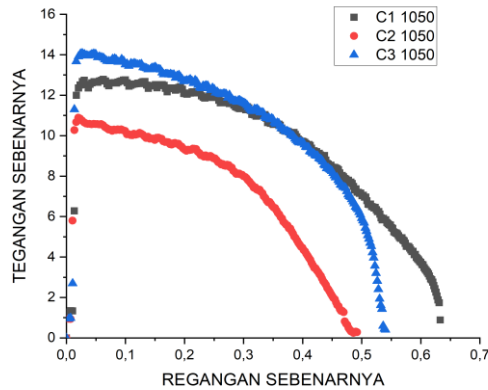
Baja dengan kandungan 3% Si diproduksi di laboratorium pengecoran lewat proses *Electro Slag Remelting (ESR)*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan mesin uji instron 4507 yang dilengkapi dengan dilatometer BAHR DIL 805A/D. Mesin ini dapat beroperasi dalam dua mode yang berbeda yaitu mode dilatometer dan mode deformasi. Mesin

ini juga dilengkapi dengan batang penekan silika dan alumina, atmosfer Ar dan sistem pendingin He.

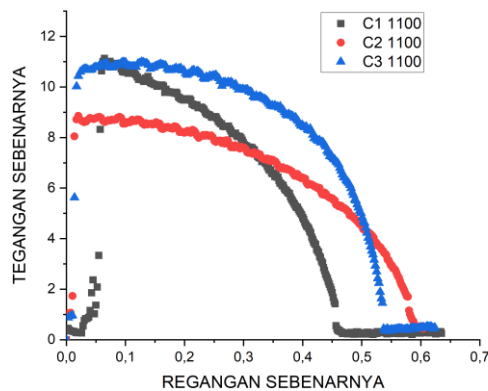
Kurva dilatasi diperoleh dengan menggunakan spesimen silinder padat, menggunakan termokopel tipe-K yang dilas di bagian tengah spesimen. Peralatan yang beroperasi dalam mode dilatometer ini memiliki suhu operasi maksimum 1500 °C, pemanasan induksi (koil berpendingin dengan enam koil berpenampang persegi, atmosfer lembam, vakum atau gas, dilatasi dengan resolusi suhu 0,05°C dan 0,05µm, laju pemanasan hingga 4000 Ks⁻¹ dengan laju pendinginan 2500 Ks⁻¹, dan spesimen silinder padat berongga dengan panjang Ø4 mm dan 10 mm. Semua peralatan beroperasi secara digital dan dengan sistem prosesornya sendiri untuk mengontrol generator frekuensi tinggi (HF), sistem hidrolis, perekaman data pengukuran, suplai gas, unit vakum dan perangkat keselamatan. Selain itu, pengujian ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak komersial FactSageT dengan temperatur transformasi pada kondisi ekuilibrium yang telah ditentukan untuk semua paduan. Perangkat ini digunakan karena perangkat lunak ini memiliki basis data yang diperbarui dan ekstensif, sehingga memungkinkan bahwa hasil penelitian ini lebih akurat dan tepat daripada yang ditentukan dengan menggunakan ekspresi aljabar.

4.2.9 Hasil Penelitian *Hot Tensile INSTRON 4507*

Dibawah ini adalah grafik dari hasil penelitian *hot tensile test* dengan 3 spesimen yang berbeda yaitu spesimen (C₁, C₂ dan C₃) dengan penerapan nilai regangan yang berbeda yaitu 10⁻¹ s⁻¹, 10⁻² s⁻¹ dan 10⁻³ s⁻¹. Dengan temperatur yang digunakan di test ini adalah 1050 °C dan 1100 °C. Dengan temperatur yang digunakan adalah 1050 °C dan 1100 °C yang diaplikasikan pada 3 spesimen yang berbeda. Grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.32 dan Gambar 4.33.



Gambar 4.32 Grafik Hasil *Hot Tensile Test* Pada Temperatur 1050 °C Pada Spesimen (a) C1 (b) C2 (c) C3



Gambar 4.33 Grafik Hasil *Hot Tensile Test* Pada Temperatur 1100 °C Pada Spesimen (a) C1 (b) C2 (c) C3

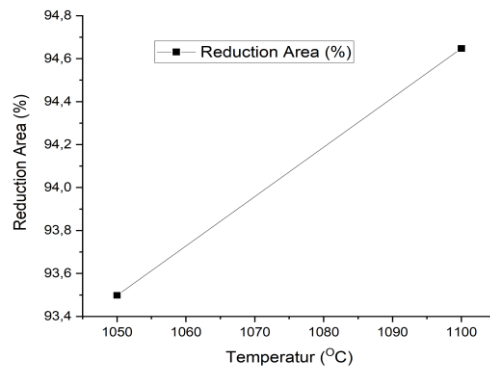
Jenis tegangan yang terjadi pada kurva regangan dan tegangan sebenarnya hasil dari *hot tensile test* adalah tegangan tarik. Tegangan ini menggambarkan keadaan di mana gaya yang diterapkan cenderung memanjangkan material sepanjang sumbu gaya yang diterapkan. Hal ini dapat direpresentasikan secara numerik sebagai rasio besarnya gaya yang diterapkan terhadap luas penampang. Ketika suatu gaya diterapkan pada suatu bahan yang cenderung menarik atom-atom bahan tersebut, maka bahan tersebut akan menolak, karena ikatan antar atom begitu kuat.

Tegangan tarik disebabkan oleh gerakan dislokasi atom-atom dalam struktur mikro suatu material ketika suatu gaya diterapkan. Dislokasi biasanya terjadi searah dengan gaya yang diberikan. Gaya regangan total tersebar ke seluruh atom pada suatu bidang penampang, yang kesemuanya melawan gaya yang diberikan. Gaya regangan per satuan luas penampang disebut dengan “tegangan tarik”. Tingkat tegangan tarik yang menyebabkan terjadinya deformasi plastis bervariasi tergantung pada komposisi kimia bahan, detail mikrostruktur, dan kondisi lingkungan seperti suhu. Faktor-faktor ini sebagian besar mengendalikan sifat mekanik material.

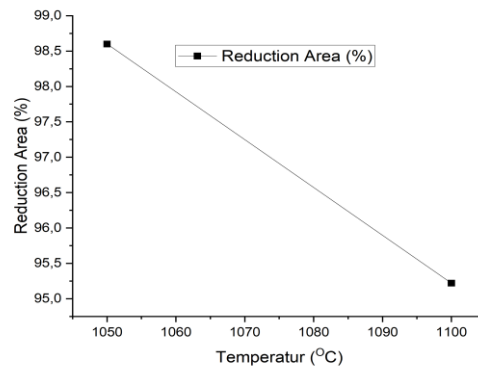
Meningkatnya suhu membuat deformasi meningkat sehingga membuat ukuran butir dalam material menjadi lebih esar sehingga aktivitas molekul meningkat, akibatnya gaya kohesif molekul menurun dan kerapatan dislokasi menurun dan kerapatan dislokasi menurun sehingga menyebabkan tegangan menurun. Pada suhu yang tinggi mobilitas atom dan gerakan dislokasi akan lebih besar didalam material sehingga material mudah mengalami deformasi yang mengakibatkan grafik regangan tegangan menurun sehingga dapat disimpulkan bahwa dari grafik hasil hot tensile test dengan meningkatnya suhu akan menurunkan nilai tegangan dan regangan sebenarnya.

Tabel 4.5 Hasil Penelitian *Hot Tensile Test* Pada Setiap Spesimen

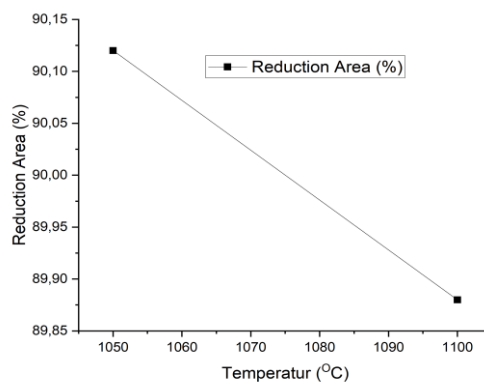
Temperatur (°C)	D0	(D0) ²	A0	A1	%RA	UTS (MPa)
C1 1050	8,21	67,404	52,939	3,442	93,4982	5404,25367
C1 1100	8,18	66,912	52,553	2,813	94,6473	2917,30475
C2 1050	8,19	67,0761	52,68	0,735	98,60	4515,68123
C2 1100	8,17	66,7489	52,42	2,508	95,22	3723,8121
C3 1050	8,23	67,7329	53,20	5,254	90,12	6350,93806
C3 1100	8,19	67,0761	52,68	5,33	89,88	4394,03027



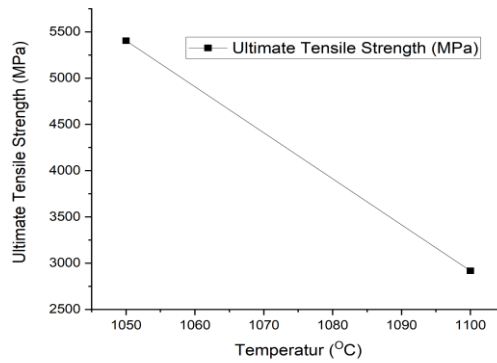
Gambar 4.34 Grafik Temperatur vs *Reduction Area* Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C



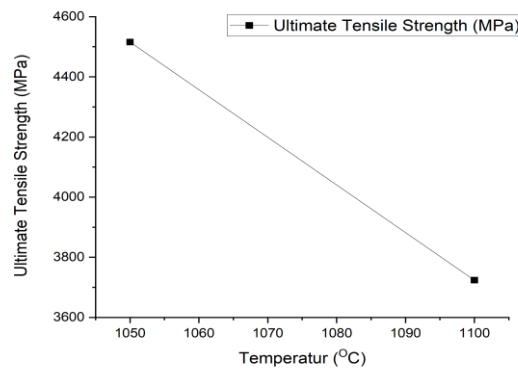
Gambar 4.35 Grafik Temperatur vs *Reduction Area* Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C



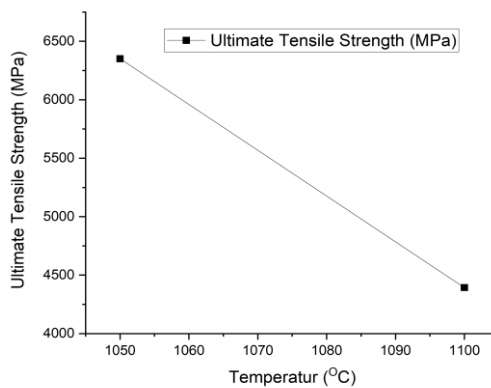
Gambar 4.36 Grafik Temperatur vs *Reduction Area* Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C



Gambar 4.37 Grafik Temperatur vs *Ultimate Tensile Test* Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C



Gambar 4.38 Grafik Temperatur vs *Ultimate Tensile Test* Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C



Gambar 4.39 Grafik Temperatur vs *Ultimate Tensile Test* Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C

Baja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja dengan kandungan silikon tinggi, yaitu yang mengandung 3,0 % berat silicon. Dimana baja ini diproduksi melalui pengerolan panas. Salah satu aplikasinya lembaran baja silikon tinggi yang dihasilkan dari proses ini berfungsi sebagai bahan penting untuk meningkatkan efisiensi transformator dan motor. Alasannya adalah karena memiliki medan magnet yang sangat efisien ketika dialiri aliran listrik.

Uji tarik yang dilakukan pada percobaan ini dilakukan dengan cara memberikan gaya atau tegangan tarik kepada material, dimana tujuan dari percobaan ini adalah untuk mengetahui atau mendeteksi kekuatan dari suatu material. Tegangan tarik yang digunakan adalah tegangan aktual eksternal atau perpanjangan sumbu benda uji. Uji tarik dilakukan dengan cara penarikan uji dengan gaya tarik secara terus menerus, sehingga material dihitung perpajangannya terus menerus meningkat dan teratur sampai putus, dengan tujuan menentukan nilai tarik. Untuk mengetahui kekuatan tarik suatu bahan dalam pembebanan tarik, garis gaya harus berhimpit dengan garis sumbu bahan sehingga pembebanan terjadi beban tarik lurus, dimana hasil uji tarik ini menggambarkan hubungan antara tegangan regangan yang terjadi selama proses uji tarik dilakukan.

Dari grafik diatas terlihat secara umum tegangan aliran meningkat hingga maksimum pada awal regangan sebelum turun ke tingkat kondisi tunak. Daktilitas panas dievaluasi dengan mengukur pengurangan luas area (RA) setelah pengujian tarik statis pada suhu 1050 °C hingga 1100 °C. Terlihat pada gambar diatas, nilai RA sampel pada suhu 1050 °C lebih tinggi dibandingkan dengan sampel pada suhu 1100 °C. Hasil daktilitas panas yang ditentukan oleh pengurangan luas untuk suhu pengujian tertentu dari 1050 °C menjadi 1200 °C terlihat bahwa suhu austenitisasi mempengaruhi pergeseran kisaran suhu penurunan plastisitas.

Penambahan silikon memiliki dua efek yang bertentangan pada sifat mekanik baja. Silikon dapat meningkatkan kekuatan dan ketangguhan karena penyempurnaan ukuran butir dan efek pengerasan larutannya. Pada

saat yang sama. Si adalah elemen pembentuk ferit dan penambahan silikon yang berlebihan akan mengurangi zona fase tunggal austenit dan membentuk δ -ferit dengan mudah di proses austenitisasi dan selanjutnya mempengaruhi struktur mikro dan sifat mekanik baja.

Dengan meningkatnya suhu, kekuatan tarik akhir (UTS) dan kekerasan sedikit menurun, sedangkan pengurangan luas dan perpanjangan meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa keuletan meningkat seiring dengan suhu yang tinggi. Kandungan Si dapat meningkatkan kekuatan, keuletan, kekakuan baja percobaan, namun tidak berpengaruh signifikan terhadap ketangguhan. Pada saat yang sama, UTS mengalami penurunan yang signifikan. Hal ini terkait dengan agregasi dan pengerasan karbida sekunder serta dekomposisi martensit yang disebabkan oleh peningkatan suhu.

Pada kisaran suhu 1050°C hingga sekitar 1100°C, sifat mampu bentuk dipengaruhi secara negatif oleh pengendapan partikel karbida pada batas butir. Ketika suhu naik hingga 1100°C, partikel partikel ini terlarut mengakibatkan peningkatan sifat mampu bentuk. Peningkatan suhu lebih lanjut mengakibatkan penurunan kemampuan mampu bentuk yang relatif tajam yang disebabkan oleh panas berlebih pada material. Ketika suhu semakin meningkat, kemampuan mampu bentuk menurun tajam.

Kandungan silikon yang lebih tinggi, yang dilarutkan dalam austenit, secara bertahap menurunkan sifat mampu bentuk sepanjang suhu pembentukan panas, dan efek ini terutama terlihat pada kandungan Si di atas 1%. Silikon adalah salah satu elemen terpenting dari baja silikon non-orientasi, yang secara efektif dapat mengurangi kehilangan besi. Namun, peningkatan kandungan Si menyebabkan peningkatan distorsi kisi dan fase yang teratur, yang pada gilirannya menghambat gerakan dislokasi. Oleh karena itu, ketika kandungan Si meningkat, rekristalisasi dinamis baja silikon non-orientasi bermutu tinggi terhambat, rasio rekristalisasi lapisan permukaan lembaran canai panas menurun dan ukuran rekristalisasi menurun, selain itu dengan peningkatan dalam kandungan Si, energi aktivasi deformasi panas dari lembaran canai panas meningkat.

Si menghambat rekristalisasi dan meningkatkan ketahanan deformasi. Ketika kandungan Si menurun, rasio rekristalisasi, ukuran butir rekristalisasi, dan intensitas tekstur Goss pada lapisan permukaan lembaran canai panas baja silikon nonberorientasi bermutu tinggi meningkat, tetapi intensitas tekstur serat α pada lapisan tengah berkurang. Kandungan Si yang lebih rendah dan suhu normalisasi yang lebih tinggi pada lembaran canai dingin memiliki lebih banyak pita geser yang berinti lebih awal, tetapi proses rekristalisasi lebih lambat, sehingga menghasilkan distribusi ukuran butiran yang lebih heterogen pada lembaran anil akhir. Pada semua suhu pengujian, saat laju regangan menurun, daktilitas panas juga menurun karena mekanisme pertumbuhan rongga mendominasi kekosongan nukleasi, memberikan waktu bagi retakan berinti untuk tumbuh.

Pada suhu yang sangat tinggi, 1050-1100 °C, baja mempunyai keuletan yang sangat tinggi, mendekati 100% RA, karena tidak ada hambatan pada proses deformasi dan aliran difusi tinggi. Pada temperatur 1050-1100 °C, ketika laju regangan menurun, keuletan panas juga menurun karena mekanisme pertumbuhan rongga lebih mendominasi daripada nukleasi rongga, memberikan waktu bagi retakan untuk tumbuh, yang pada akhirnya menyebabkan kegagalan cata strophic.