

BAB IV

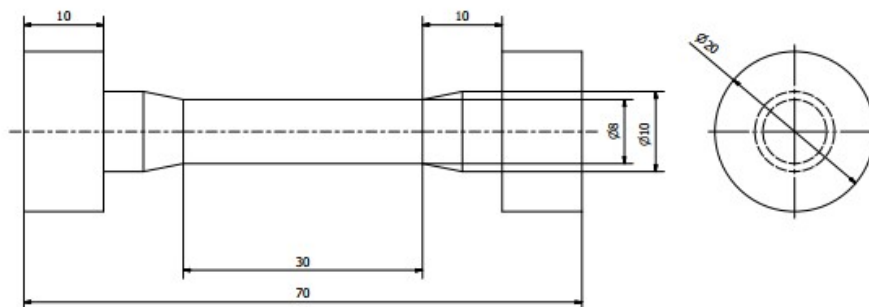
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Proses Pemanasan Spesimen

Pada penelitian ini material yang digunakan adalah baja silikon dengan kadar 3% Si. Baja silikon sendiri merupakan paduan baja medium. Baja ini juga dapat sering disebut dengan nama baja listrik karena memiliki resistivitas yang baik. Nilai *hot ductility* dievaluasi dengan 3 komposisi yang hampir sama pada kandungan silikon, dan terdapat perbedaan pada pengotor atau residu. Masing-masing spesimen diberi nama spesimen C1, spesimen C2, dan spesimen C3. Komposisi dari ketiga spesimen dapat dilihat pada tabel 4.1. Seperti yang dijelaskan pada bab 3, spesimen uji tarik memiliki diameter 8 mm dengan panjang *gauge length* sebesar 30 mm. Pengujian ini sesuai dengan standar ISO 6892-2. Bentuk spesimen uji tarik dapat dilihat pada gambar 4.1

Tabel 4.1 Komposisi Spesimen Baja Silikon 3%Si

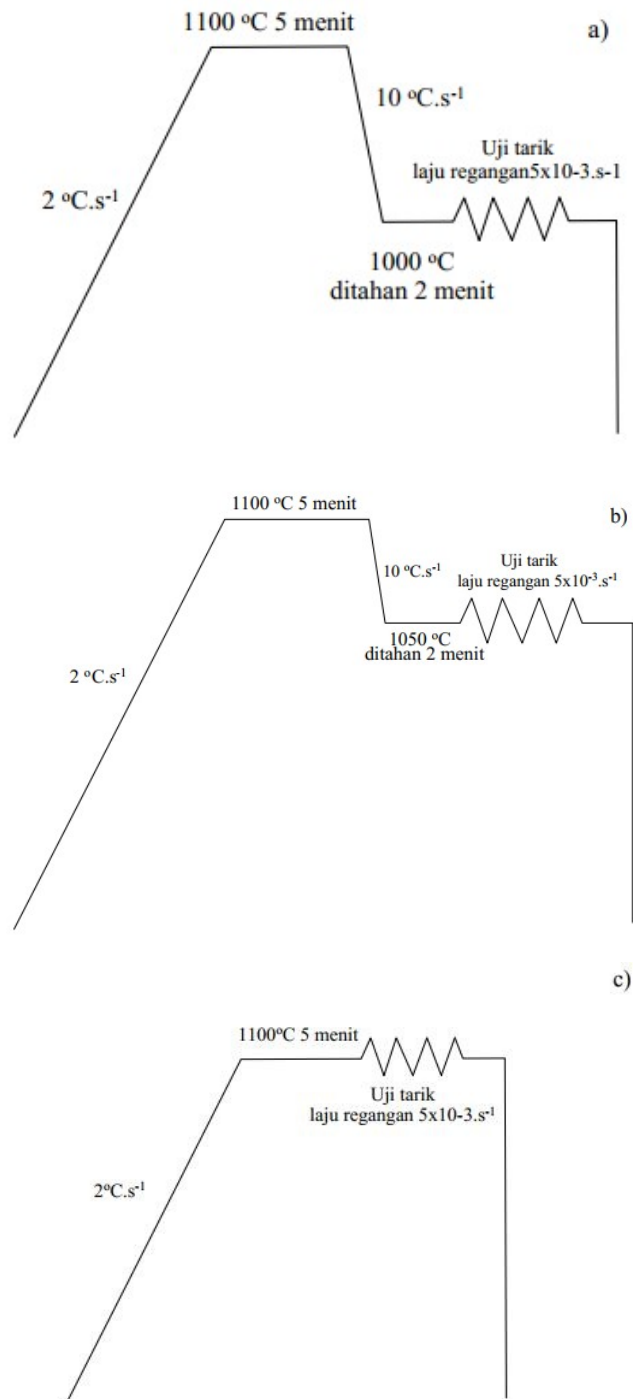
Spesimen	Unsur (%)							
	C	Mn	Si	S	Cr	Ti	Al	Fe
C1	0,028	0,290	3,094	0,006	0,016	0,006	0,014	Balance
C2	0,026	0,263	3,194	0,008	0,031	0,002	0,021	Balance
C3	0,044	0,262	3,159	0,007	0,031	0,002	0,023	Balance



Gambar 4.1 Spesimen Uji Tarik

Untuk mengevaluasi *hot ductility* pada baja yang berhubungan dengan kondisi ketika dilakukan proses *continuous casting* yang rentan terhadap terjadinya *transverse crack*, maka dipilihlah uji tarik panas atau *hot tensile testing*. Uji tarik panas ini dilakukan dengan menggunakan mesin elektromekanis INSTRON HOT TENSILE 4507 dengan perangkat lunak yang diinstal pada komputer eksternal yang bertugas untuk merekam data. Alat ini dilengkapi dengan tungku pemanas radiasi model E4 yang memiliki ruang pemanas dengan 4 reflektor elips yang memfokuskan energi yang disuplai lampu inframerah. Pada mesin ini juga terdapat mesin pendingin yang berfungsi untuk mendinginkan reflektor. Selain sistem pendingin, terdapat juga termokopel tipe-K yang kontak dengan spesimen uji sehingga temperatur spesimen selama proses pengujian dapat teramati. Rahang pada mesin ini terbuat dari paduan molibdenum (0,5% Ti, 0,1% Zr, dan sisanya molibdenum). Karakteristik dari material tersebut adalah dapat mempertahankan sifat mekaniknya pada temperatur tinggi. Di sisi lain, selain memiliki keunggulan tersebut, material paduan molibdenum memiliki kekurangan dapat menyublim pada temperatur tinggi ketika bersentuhan langsung dengan oksigen, sehingga diperlukan atmosfer lembam dengan menggunakan gas inert. Pada percobaan ini gas yang digunakan adalah gas argon.

Spesimen dipasang pada kedua rahang, kemudian spesimen dilakukan perlakuan austenisasi yang bertujuan untuk menghomogenkan struktur sebelum dilakukan uji tarik panas. Ketiga spesimen dipanaskan hingga temperatur 1100 °C dengan laju pemanasan 2 °C s⁻¹, kemudian spesimen ditahan pada temperatur tersebut selama 120 s agar fasa yang terbentuk benar benar homogen. Setelah itu spesimen kemudian kembali didinginkan hingga temperatur uji dengan laju pendinginan 10 °C.s⁻¹. Seperti yang dibahas pada bab 3, terdapat 3 temperatur yang digunakan untuk pengujian, yaitu 1000 °C, 1050 °C, dan 1100 °C dengan laju regang yang sama sebesar 5x10⁻³.s⁻¹. Oleh karena itu, untuk spesimen temperatur 1100 °C tidak dilakukan pendinginan dan langsung dilakukan pengujian tarik panas setelah dilakukan penahanan. Siklus termal dari pengujian ini dapat dilihat pada gambar 4.2

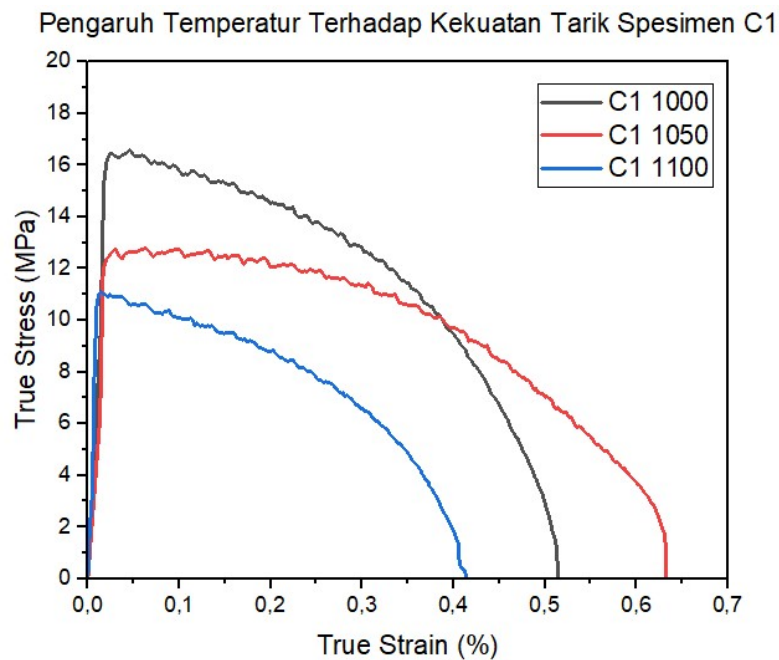


Gambar 4.2 Siklus termal pada spesimen a) Temperatur $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ b) Temperatur $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ c) Temperatur $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.2 Data Uji Tarik

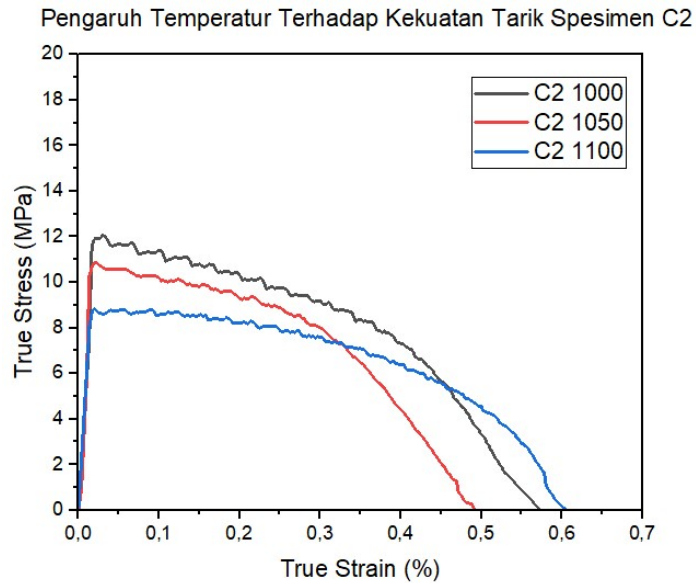
Data pertama yang diperoleh setelah dilakukan pengujian tarik panas atau *hot tensile test* adalah data tegangan-regangan yang langsung didapat dari komputer dalam format *.mul*. Dari data tersebut dapat digunakan untuk membuat kurva tegangan-regangan. Kurva tersebut berguna untuk menunjukkan kekuatan material pada masing-masing temperatur dan komposisi spesimen. Pengolahan data uji tarik dilakukan dengan menggunakan *software OriginLab 2023b*.

4.2.1 Pengaruh Temperatur Terhadap Kekuatan Tarik



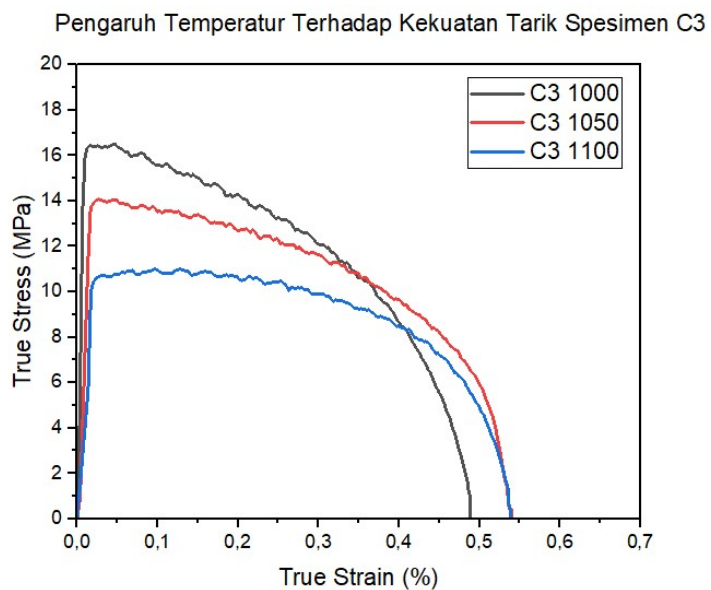
Gambar 4.3 Kurva Tegangan Regangan Spesimen C1

Pada gambar 4.3 terlihat pengaruh temperatur terhadap kurva tegangan-regangan spesimen C1. Berdasarkan gambar 4.3, spesimen yang diuji pada temperatur 1000 °C yang merupakan temperatur uji terendah memiliki nilai kekuatan tarik paling baik jika dibandingkan dengan spesimen pada temperatur lebih tinggi, yaitu 1050 °C dan 1100 °C. Dari gambar tersebut dapat diketahui semakin tinggi temperatur, maka kekuatan tarik akan menurun. Ketiga spesimen juga memiliki daerah elastisitas yang kecil dibanding daerah plastisitasnya.



Gambar 4.4 Kurva Tegangan Regangan Spesimen C2

Kurva tegangan-regangan spesimen C2 dapat dilihat pada gambar C2 dapat dilihat pada gambar 4.4. Pada gambar 4.4 dapat dilihat bahwa semakin tinggi temperatur nilai kekuatan tarik akan semakin menurun. Sama seperti spesimen C1, nilai kekuatan tarik tertinggi pada spesimen C2 adalah pada temperatur 1000 °C. Namun, perbedaan kekuatan tarik ketiga spesimen tidak berbeda jauh jika dibandingkan spesimen C1 dan C3.



Gambar 4.5 Kurva Tegangan Regangan Spesimen C3

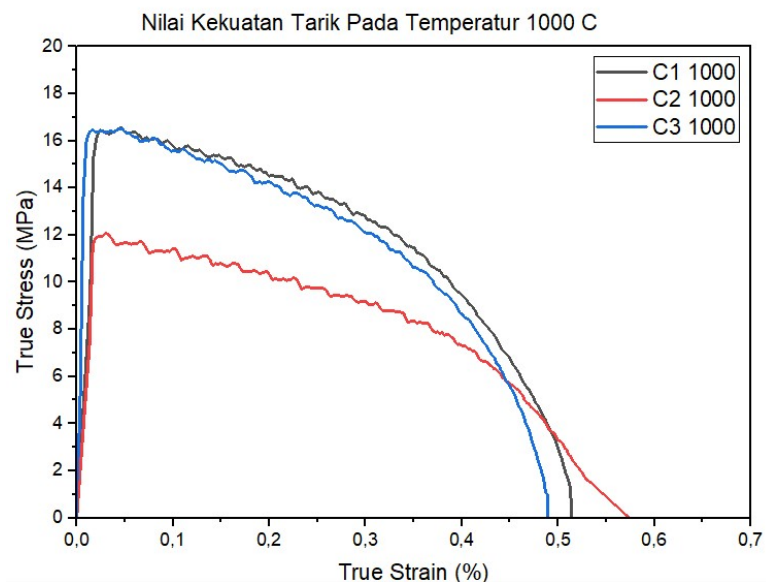
Data pengaruh temperatur terhadap kurva tegangan-regangan spesimen C3 dapat dilihat pada gambar 4.5. Sama seperti spesimen C1 dan C2, nilai kekuatan tarik tertinggi terdapat pada pengujian dengan temperatur 1000 °C. Daerah elastisitas juga memiliki daerah yang kecil dibandingkan daerah plastisitas, dimana setelah mencapai *Ultimate tensile test (UTS)*, terjadi fenomena *necking* yang cukup besar.

Dari ketiga spesimen menunjukkan tren yang sama, yaitu semakin tinggi temperatur maka akan semakin kecil nilai kekuatan tarik. Hal tersebut sesuai dengan literatur (López-Chipres dkk., 2007), dimana semakin tinggi temperatur, maka nilai kekuatan tarik pada baja akan menurun. Pada penelitian tersebut menggunakan baja mikroalloy boron, yang menggunakan temperatur uji 700 °C-1000 °C. Hasilnya nilai kekuatan tarik baja paling rendah berada pada temperatur uji 1000 °C. Pada penelitian lainnya juga menunjukkan hal yang sama (Salas-Reyes dkk., 2014), dimana pada penelitian tersebut menggunakan baja Mangan tinggi asutenitik TWIP dengan temperatur uji 700 °C-1100 °C, dan hasilnya baja yang memiliki kekuatan tarik terendah adalah pada temperatur uji 1100 °C. Penurunan kekuatan tarik tersebut disebabkan karena semakin tinggi temperatur dapat menyebabkan jarak rata-rata antara atom meningkat, sehingga penurunan kekuatan tarik terjadi. Selain itu, dari gambar 4.3, gambar 4.4 dan gambar 4.5 juga menunjukkan daerah elastisitas yang kecil, berdasarkan (Wang dkk., 2013), elastisitas baja menurun karena semakin tinggi temperatur, ikatan antar kristal menjadi lemah, sehingga ketika beban diberikan pada baja, akan menghasilkan regangan yang lebih besar dan kristal tidak tertarik kembali ke posisi yang sama sehingga elastisitas akan menurun (Solek, 2017).

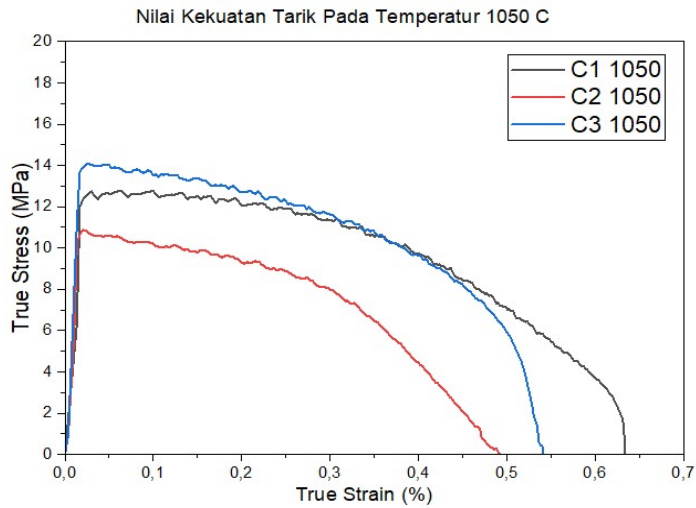
Jika dibandingkan dengan penelitian lainnya yang menggunakan spesimen dengan spesifikasi yang sama serta variabel penelitian seperti laju pemanasan, laju pendinginan, laju regangan dan waktu pemanasan yang sama, tetapi menggunakan temperatur yang berbeda, yaitu 700 °C, 750 °C, 800 °C, 850 °C, 900 °C, dan 950 °C menunjukkan hal yang sama, yaitu semakin

tinggi temperatur pengujian yang digunakan maka kekuatan tarik akan semakin menurun. Contohnya nilai kekuatan tarik yang didapat pada temperatur 700 °C pada spesimen yang memiliki komposisi yang sama dengan spesimen C1 memiliki kekuatan tarik 87,5096 Mpa dan terus menurun hingga 11,1311 Mpa pada temperatur 1100 °C. Begitu juga dengan spesimen yang memiliki spesifikasi yang sama dengan spesimen C2 dan C3. Seperti yang dibahas diatas bahwa hal tersebut disebabkan karena semakin tinggi temperatur, jarak rata-rata antar atom akan semakin meningkat sehingga kekuatan suatu material akan semakin menurun. Jika dilihat dari aspek mikroskopis, penurunan nilai kekuatan spesimen baja silikon seiring bertambahnya temperatur juga disebabkan karena semakin tinggi temperatur, viskositas dari baja juga akan semakin menurun, viskositas yang rendah dapat menyebabkan turunnya kekuatan tarik yang disebabkan karena dengan viskositas yang rendah baja menjadi lebih mudah mengalir yang membuat baja menjadi lebih mudah terdeformasi dan menurunkan kekuatan tarik (Solek, 2017).

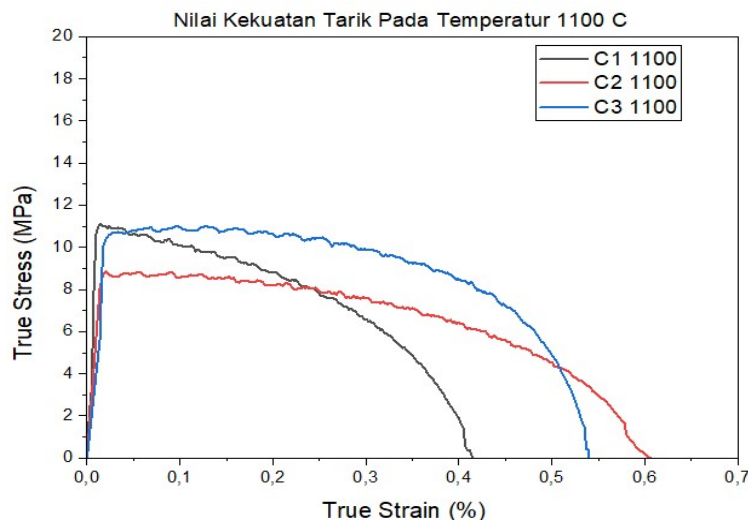
4.2.2 Pengaruh Komposisi Terhadap Kekuatan Tarik



Gambar 4.6 Kurva Tegangan Regangan Temperatur 1000 °C



Gambar 4.7 Kurva Tegangan Regangan Temperatur 1050 °C



Gambar 4.8 Kurva Tegangan Regangan Temperatur 1100 °C

Pada gambar 4.6, gambar 4.7, dan gambar 4.8 terlihat pengaruh komposisi terhadap kurva tegangan regangan masing-masing pada temperatur 1000 °C, 1050 °, dan 1100 °C. Berdasarkan gambar 4.6 nilai kekuatan tarik terendah diperoleh dari spesimen C2, dimana nilai *ultimate tensile strength* sebesar 12,0792 Mpa, sedangkan untuk spesimen C1 dan C2 memiliki kekuatan tarik yang sama dengan nilai *ultimate tensile strength* masing-masing sebesar 16,5839 MPa dan 16,5152 . Sama seperti gambar 4.6, pada gambar 4.7 yang menunjukkan kekuatan tarik pada temperatur 1050 °C,

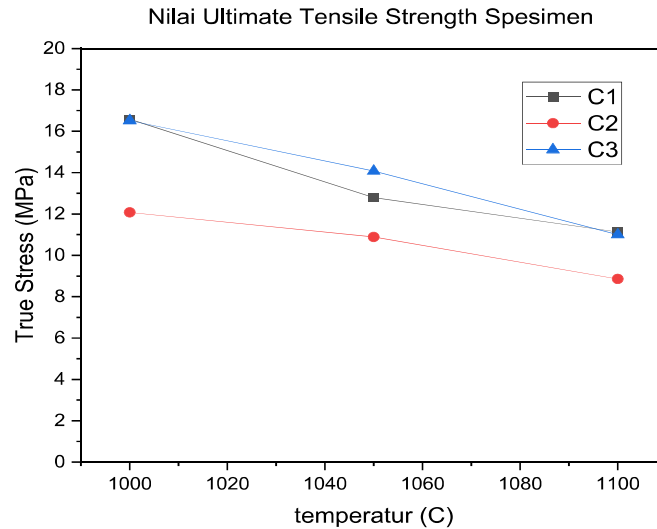
nilai kekuatan tarik terendah diperoleh dari spesimen C2 dengan nilai *ultimate tensile strength* sebesar 10,8861 MPa, sedangkan nilai kekuatan tarik tertinggi pada spesimen C3 sebesar 14,0772 MPa. Berbeda dengan temperatur 1000 °C yang memiliki nilai regangan yang tidak jauh berbeda dari setiap spesimen, pada temperatur 1050 °C memiliki nilai regangan yang bervariasi dimana nilai regangan tertinggi diperoleh dari spesimen C1 dan regangan terendah diperoleh dari dari spesimen C2. Gambar 4.8 menunjukkan kurva tegangan regangan pada temperatur 1100 °C yang menunjukkan kecenderungan yang sama dengan gambar 4.6, yaitu nilai kekuatan tarik terendah diperoleh pada spesimen C2, sedangkan spesimen C1 dan C3 memiliki nilai yang hampir sama.

Tabel 4.2 Nilai *Ultimate Tensile Strength* (MPa)

Spesimen	Temperatur	<i>Ultimate Tensile Strength</i> (MPa)
C1	1000 °C	16,5839
	1050 °C	12,789
	1100 °C	11,1311
C2	1000 °C	12,0792
	1050 °C	10,8861
	1100 °C	8,85732
C3	1000 °C	16,5152
	1050 °C	14,0772
	1100 °C	10,9968

Tabel 4.3 *Yield Strength* (MPa)

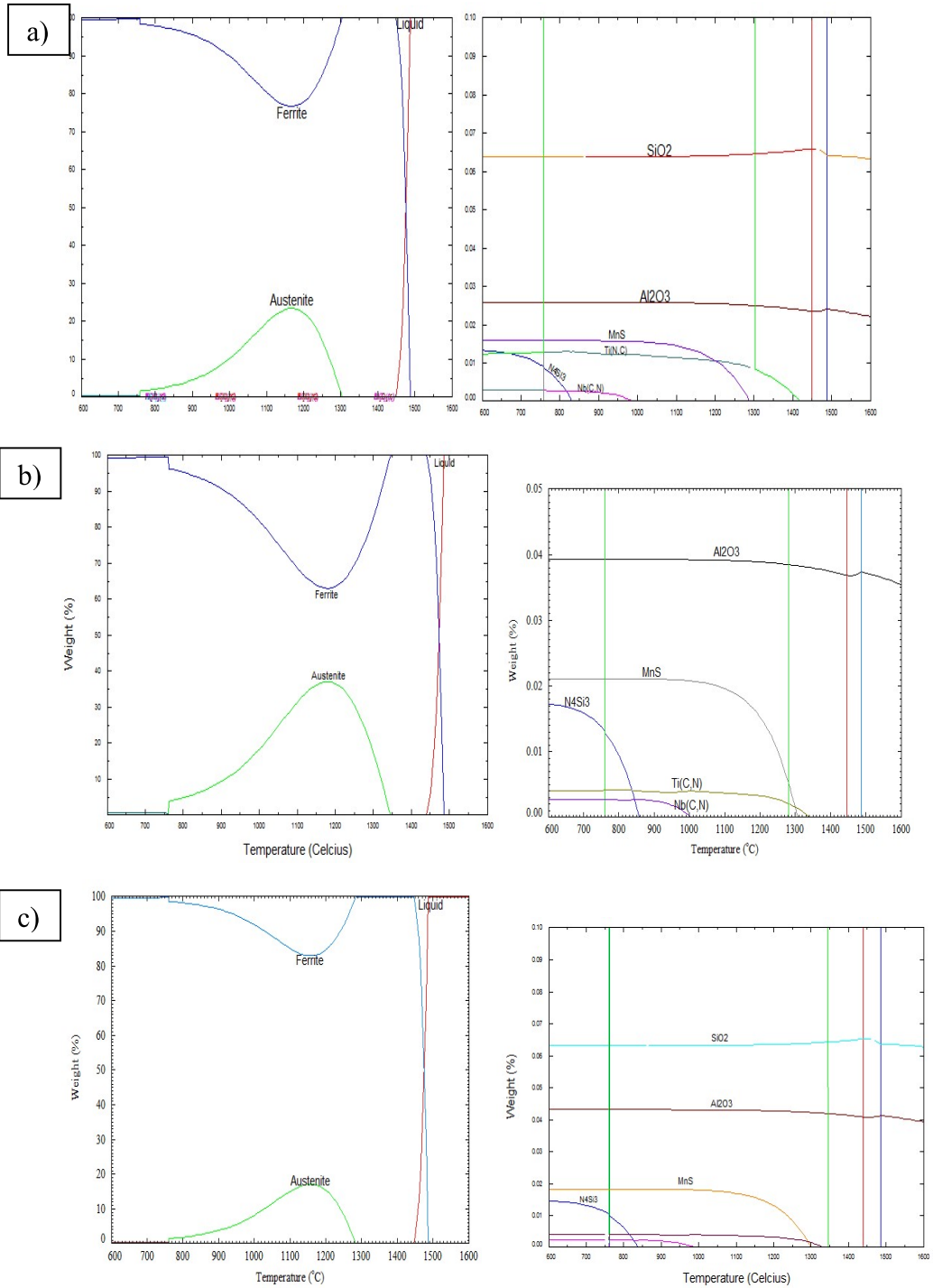
Spesimen	Temperatur	<i>Yield Strength</i> (Mpa)
C1	1000 °C	15,9217
	1050 °C	11,9969
	1100 °C	8,32207
C2	1000 °C	11,6024
	1050 °C	10,2752
	1100 °C	8,04533
C3	1000 °C	15,9466
	1050 °C	13,6775
	1100 °C	10,0224



Gambar 4.9 Nilai *Ultimate Tensile Strength* Setiap Spesimen

Berdasarkan gambar 4.8 yang menunjukkan nilai UTS masing-masing spesimen dan ketiga kurva yang ditunjukkan gambar 4.9 menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik terendah ditunjukkan oleh spesimen C2, dan untuk spesimen C1 dan C3 memiliki nilai yang hampir sama pada temperatur 1000 °C dan 1100 °C, dan pada temperatur 1050 °C, nilai UTS spesimen C3 paling tinggi jika dibanding spesimen C1 dan C2. Jika dilihat pada tabel komposisi spesimen seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.1, rendahnya nilai UTS pada spesimen C2 berkaitan dengan presentase dari unsur silikon yang paling besar jika dibandingkan dengan spesimen C1 dan C3, dimana presentase silikon pada spesimen C2 yaitu 3,194%, dibanding C3 sebesar 3,159% dan C1 sebesar 3,094%. Menurut literatur (J. Liu dkk., 2020), semakin tinggi silikon dalam suatu baja, akan menyebabkan daerah fasa austenit berkurang dan fasa α -ferit akan mudah terbentuk dimana dari penelitian tersebut menyebutkan bahwa fasa α -ferit yang bersifat lunak dan memiliki butir yang halus dapat menurunkan nilai UTS dan *yield strength*. Pada tabel 4.3 juga dapat dilihat nilai *yield strength* menunjukkan tren menurun seiring bertambahnya temperatur. Jika dibandingkan dengan material ASTM A867 yang umum digunakan untuk transformator, nilai *yield strength* yang dihasilkan lebih tinggi seperti yang dapat dilihat pada tabel 2.4 (ATI, 2012). Hal ini sesuai

dengan data diagram fasa yang didapat pada penelitian ini seperti yang dapat dilihat dalam gambar 4.10



Gambar 4.10 Diagram Fasa a) Spesimen C1 b) Spesimen C2 c) Spesimen C3

Gambar 4.10 menunjukkan diagram fasa yang terbentuk pada spesimen C1, spesimen C2 dan spesimen C3. Berdasarkan gambar 4.10 dapat dilihat bahwa diagram fasa yang paling dominan terbentuk pada spesimen C1, C2, dan spesimen C3 adalah α -ferit. Dimana fasa α -ferit paling tinggi terbentuk pada spesimen C2, diikuti spesimen C1 dan spesimen C3. Hal tersebut berbanding terbalik dengan nilai UTS yang didapatkan pada pengujian, yaitu semakin tinggi presentase fasa α -ferit maka nilai UTS semakin turun, seperti yang dijelaskan pada paragraf di atas bahwa fasa α -ferit dapat menurunkan nilai UTS. Namun, fasa α -ferit yang terbentuk tidak berbanding lurus dengan presentase silikon pada tiap spesimen, dimana spesimen C3 yang memiliki presentase silikon lebih besar dibanding spesimen C1 memiliki fasa α -ferit yang lebih rendah dibanding spesimen C3, hal tersebut dapat disebabkan karena adanya unsur-unsur lain dalam spesimen selain silikon yang dapat mempengaruhi terbentuknya kesetimbangan fasa pada setiap spesimen. Spesifik fasa yang terbentuk pada masing-masing specimen dapat dilihat pada tabel 4.4

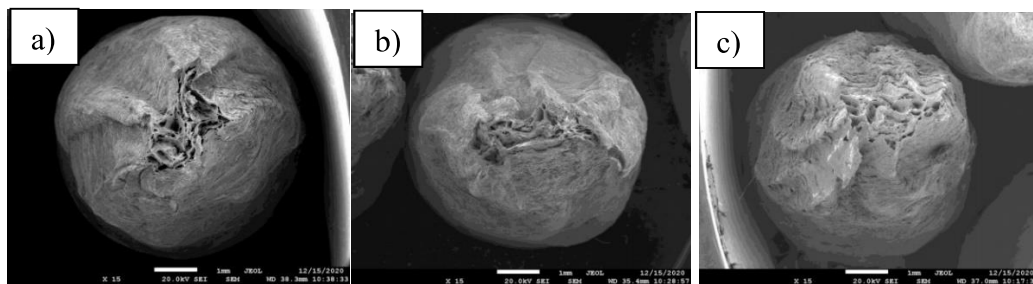
Tabel 4.4 Fasa Yang Terbentuk

No.	Fasa	Temperatur inisiasi			Temperatur berakhir		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3
1	α -Fe	0	0	0	1487.43	1486.40	1485.22
2	γ -Fe	> 756.67	> 760.43	> 760.27	< 1302.29	< 1282.91	< 1344.24
3	Sementit	0	0	0	< 757.09	< 760.79	< 761.25
4	(Mn,Fe)S	0	0	0	< 1287.73	< 1306.16	< 1298.14
5	Ti(C,N)	0	0	0	< 1414.56	< 1338.41	< 1329.65
6	Nb(C,N)	0	0	0	< 981.83	< 1003.07	< 980
7	SiO ₂			selalu hadir			
8	α -Al ₂ O ₃			selalu hadir			
9	N ₄ Si ₃	0	0	0	< 828.61	< 856.78	< 846.58

10	Liquid-Fe	>	>	>	-	1600	-
		1447.48	1445.08	1438.18			

4.3 Data Hot Ductility

Spesimen yang sudah dilakukan uji tarik panas didinginkan dan dilakukan pengamatan dengan SEM untuk mengamati permukaan patahan. Data selanjutnya yang diperoleh dari pengujian tarik panas atau *hot tensile testing* adalah data *hot ductility*. Data ini didapatkan dengan menghitung *reduction of area (RA)*. Nilai RA didapat luas permukaan akhir spesimen setelah dilakukan uji tarik yang dapat diamati dari hasil pengamatan SEM, lalu membandingkannya dengan luas permukaan awal. Semakin tinggi nilai RA menunjukkan nilai *hot ductility* yang semakin besar.



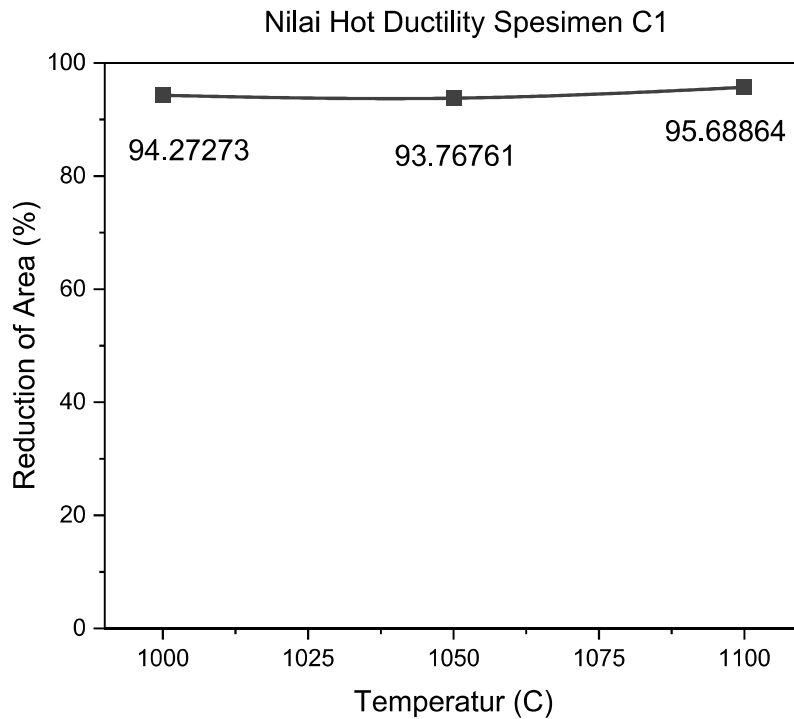
Gambar 4.11 Bentuk Patahan Spesimen C1 Pada a) Temperatur 1000 °C, b) Temperatur 1050 °C, c) Temperatur 1100 °C

Gambar 4.11 menunjukkan bentuk patahan spesimen C1 setelah dilakukan uji tarik pada masing-masing temperatur. Berdasarkan gambar 4.11a, pada temperatur 1000 °C dapat terlihat bentuk patahan yang berserabut dan berbentuk *dimple* yang cukup dalam dan besar dan berwarna gelap pekat, serta bentuk patahan berakhir di bagian tengah. Bentuk patahan pada temperatur 1050 °C dapat dilihat pada gambar 4.11b, dimana pada gambar dapat terlihat bentuk patahan pada temperatur 1050 °C memiliki bentuk yang memanjang serta memiliki serabut dan *dimple* yang berbentuk pipih. Berdasarkan gambar 4.11c, bentuk patahan dari spesimen temperatur 1100 °C cenderung oval dan berakhir di tengah, patahan memiliki morfologi berserabut dan berbuku-buku dan memiliki warna yang lebih terang

dibanding spesimen temperatur 1000 °C dan 1050 °C. Untuk menghitung luas penampang akhir spesimen menggunakan bantuan *software ImageJ*. Setelah diketahui luas penampang akhir dan nilai *reduction of area (RA)*, maka dibuatlah kurva *hot ductility* yang merupakan fungsi dari temperatur terhadap RA spesimen. Data *hot ductility* dari spesimen C1 dapat dilihat pada tabel 4.5 dan gambar 4.12

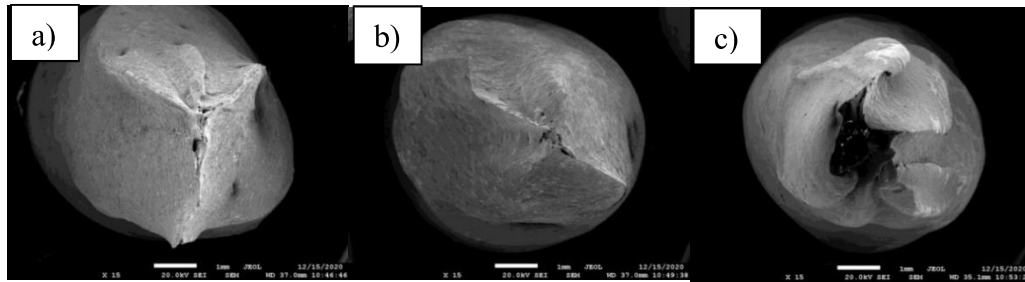
Tabel 4.5 Data *Hot Ductility* Spesimen C1

Spesimen C1	r_0	r_0^2	A_0	A_1	%RA
1000	4	16	50,28571	2,88	94,27273
1050	4	16	50,28571	3,134	93,76761
1100	4	16	50,28571	2,168	95,68864



Gambar 4.12 Kurva *Hot Ductility* Spesimen C1

Gambar 4.12 menunjukkan nilai *hot ductility* spesimen C1 pada temperatur 1000 °C, 1050 °C dan 1100 °C. Berdasarkan gambar, terjadi angka yang fluktuatif pada nilai %RA spesimen. %RA pada temperatur 1000 adalah 94,27273 %, kemudian turun menjadi 93,76761% pada temperatur 1050 °C serta mengalami kenaikan pada temperatur 95,68864% yang merupakan nilai tertinggi pada spesimen C1.

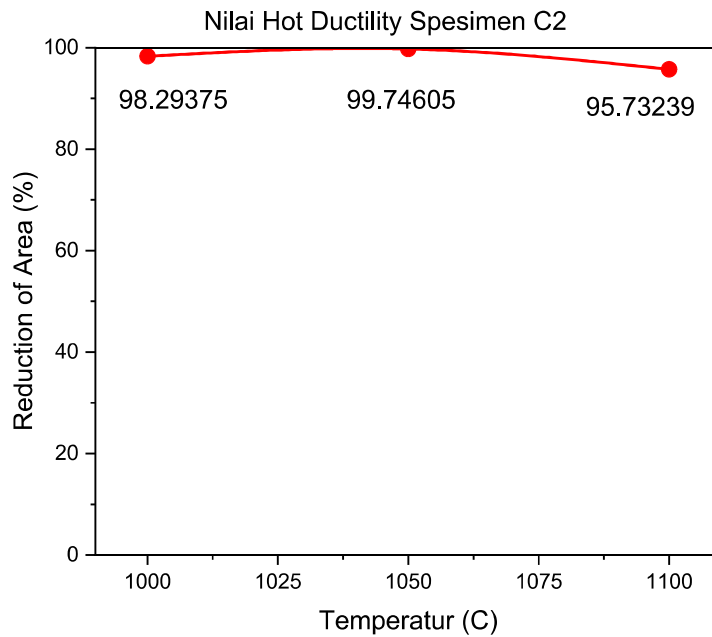


Gambar 4.13 Bentuk Patahan Spesimen C2 Pada a) Temperatur 1000 °C, b) Temperatur 1050 °C, c) Temperatur 1100 °C

Gambar 4.13 menunjukkan bentuk patahan pada spesimen C2 setelah dilakukan uji tarik panas. Pada spesimen C2 dengan temperatur uji 1000 °C dapat dilihat pada gambar 4.13a, pada gambar dapat diamati bentuk patahan dari spesimen C2 temperatur 1000 °C berbentuk pipih, memanjang dan memanjang serta permukaan patahan yang berongga. Bentuk patahan spesimen pada temperatur 1050 °C memiliki bentuk yang hampir sama dengan spesimen 1000 °C, yaitu yang pipih dan memanjang, namun pada spesimen 1050 °C berbentuk lebih pipih dan panjang. Permukaan patahan terdapat sedikit rongga di bagian tengah sedangkan di bagian sisinya hanya berupa garis tipis. Berbeda dengan spesimen 1000 °C dan 1050 °C, spesimen 1100 °C memiliki bentuk patahan yang berakhir di tengah dan memiliki rongga yang dalam pada permukaan patahan. Data *hot ductility* dari spesimen C1 dapat dilihat pada tabel 4.6 dan gambar 4.14

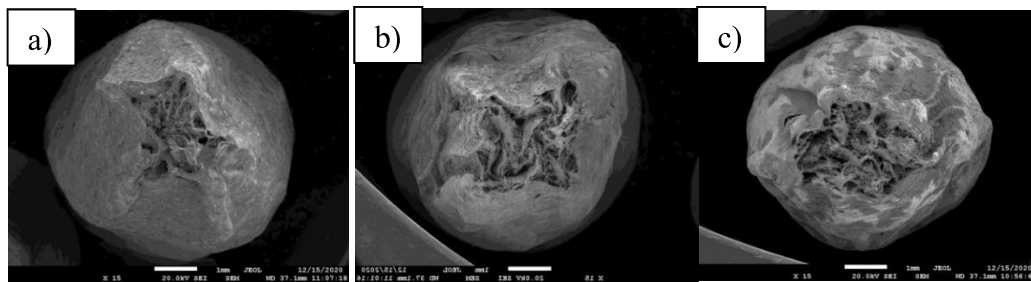
Tabel 4.6 Data *Hot Ductility* Spesimen C2

Spesimen C2	r_0	r_0^2	A_0	A_1	%RA
1000	4	16	50,28571	0,858	98,29375
1050	4	16	50,28571	0,1277	99,74605
1100	4	16	50,28571	2,146	95,73239



Gambar 4.14 Kurva *Hot Ductility* Spesimen C2

Kurva *hot ductility* spesimen C2 dapat dilihat pada gambar 4.14. Dapat dilihat dari gambar 4.14 bahwa nilai *hot ductility* ketiga spesimen cukup tinggi dan fluktuatif. Dimana pada temperatur 1000 °C memiliki nilai 98,29375%, kemudian meningkat menjadi 99,74605% pada temperatur 1050 °C dan menurun pada temperatur 1100 °C menjadi 95,73239%.



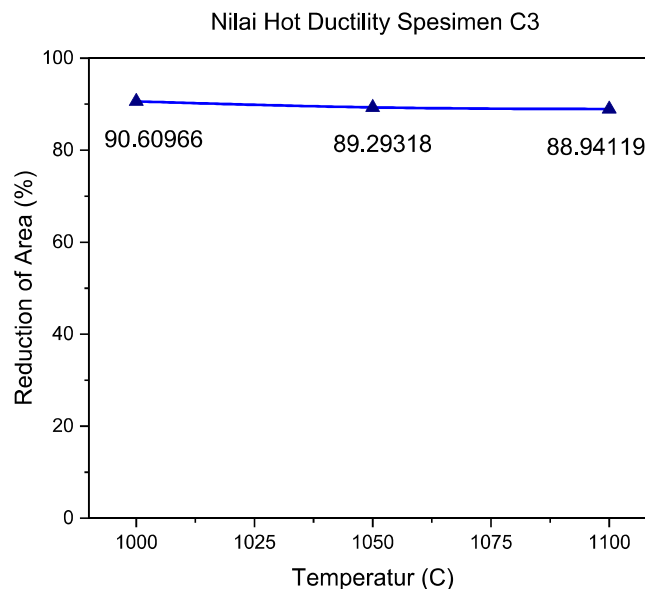
Gambar 4.15 Bentuk Patahan Spesimen C3 Pada a) Temperatur 1000 °C, b) Temperatur 1050 °C, c) Temperatur 1100 °C

Bentuk patahan dari spesimen C3 dapat dilihat pada gambar 4.15. Dapat dilihat bentuk patahan ketiga spesimen memiliki persamaan adanya serabut dan juga *dimple* pada permukaan patahan. Namun pada spesimen temperatur 1100 °C

terdapat perbedaan dimana pada sekeliling luas area akhir lebih memantulkan warna dibanding spesimen temperatur 1000 °C dan 1050 °C. Dari permukaan patahan yang berserabut dan terdapat *dimple*, hal tersebut mengindikasikan bahwa jenis patahan adalah ulet. Data *hot ductility* dari spesimen C1 dapat dilihat pada tabel 4.7 dan gambar 4.16

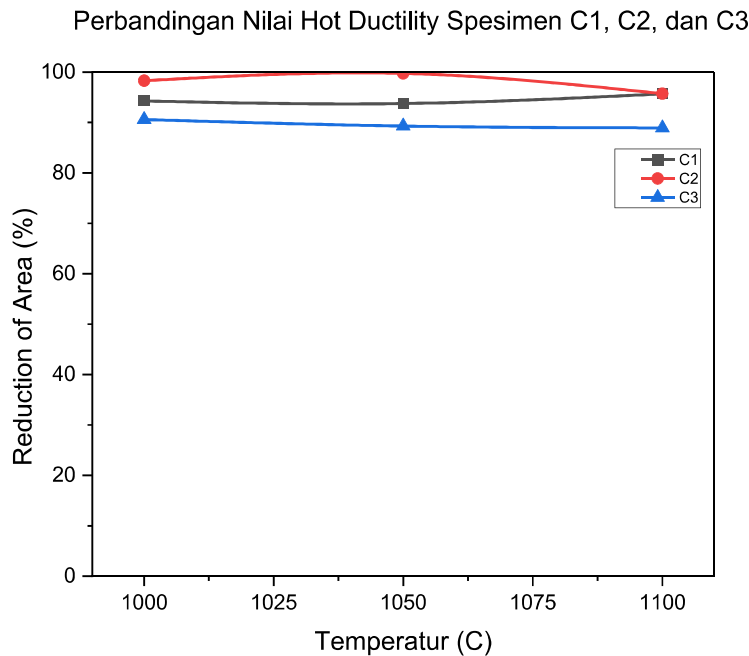
Tabel 4.7 Data *Hot Ductility* Spesimen C3

Spesimen C3	r_0	r_0^2	A_0	A_1	%RA
1000	4	16	50,28571	4,722	90,60966
1050	4	16	50,28571	5,384	89,29318
1100	4	16	50,28571	5,561	88,94119



Gambar 4.16 Kurva *Hot Ductility* Spesimen C3

Gambar 4.16 menunjukkan kurva *hot ductility* pada spesimen C3. Dapat dilihat bentuk kurva *hot ductility* spesimen C3 mengalami tren menurun seiring meningkatnya temperatur. Namun penurunan nilai %RA tidak signifikan dan masih memiliki nilai %RA yang tinggi pada ketiga spesimen. Hal tersebut berdasarkan pada literatur (Davis, 2004) yang menyebutkan bahwa jika %RA > 70% maka dapat dikatakan sangat baik, karena pada nilai tersebut retakan jarang terjadi dan memiliki kinerja panas yang unggul.



Gambar 4.17 Kurva *Hot Ductility* Semua Spesimen

Dalam gambar 4.17 menunjukkan ketiga jenis spesimen memiliki nilai %RA yang tinggi, yaitu ketiganya memiliki rentang %RA sebesar 88% hingga 99%. Hal tersebut ada kaitannya dengan jenis baja yang digunakan, yaitu baja silikon (*silicon steel 3%*). Menurut literatur (J. Liu dkk., 2020), penambahan silikon dapat meningkatkan keuletan baja tanpa mempengaruhi nilai ketangguhan dan kekerasannya. Keuletan tersebut disebabkan karena silikon dapat membentuk α -ferit yang lebih lunak dibanding dengan matriks martensitik. Dari data yang ditunjukkan oleh gambar 4.17 juga dapat dilihat bahwa nilai *hot ductility* dari yang terbesar ke yang terkecil yaitu spesimen C2, C1 dan spesimen C3. Menurut literatur (Lin dkk., 2022), semakin tinggi presentase silikon dapat meningkatkan nilai *hot ductility* baja, hal tersebut dapat dibuktikan karena spesimen C2 yang memiliki nilai *hot ductility* yang paling tinggi memiliki presentase silikon paling besar jika dibanding spesimen C1 dan C3. Namun ada ketidaksesuaian dengan spesimen C1 dan C3, dimana spesimen C3 yang memiliki kadar silikon lebih besar dibanding spesimen C1 memiliki nilai *hot ductility* paling rendah. Hal tersebut dapat berkaitan dengan tambahan unsur lain serta fasa yang terbentuk pada setiap

spesimen seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.8 diatas. Dimana pada gambar 4.8 tersebut menunjukkan fasa yang terbentuk pada setiap spesimen. Dari diagram fasa tersebut dapat dilihat fasa α -ferit yang terbentuk paling tinggi pada spesimen C2, diikuti spesimen C1 dan fasa α -ferit paling rendah terbentuk di spesimen C3. Kadar fasa α -ferit yang terbentuk berbanding lurus dengan nilai *hot ductility* yang didapat, fasa α -ferit dapat meningkatkan nilai *hot ductility* karena bersifat lebih lunak.

Selain pengaruh komposisi silikon, nilai *hot ductility* juga dapat dipengaruhi oleh unsur lain yang terkandung dalam masing-masing spesimen. Seperti pada spesimen C2 yang memiliki nilai *hot ductility* yang paling tinggi karena memiliki unsur silikon paling tinggi, juga disebabkan karena spesimen C2 juga memiliki presentase karbon yang paling kecil yaitu sebesar 0,026%. Menurut literatur (Crowther & Mintz, 1986; Xing dkk., 2022) karbon dapat menurunkan suhu tranformasi dan menyebabkan daerah palung kegetasan semakin lebar yang dapat menurunkan nilai *hot ductility*.

Pada spesimen C1, meskipun memiliki presentase silikon paling kecil dibanding spesimen C3, memiliki nilai *hot ductility* yang lebih tinggi. Selain karena fasa memiliki fasa α -ferit yang lebih tinggi, hal itu dapat disebabkan karena spesimen C1 memiliki presentase titanium dan Mangan yang lebih besar, dimana titanium dapat meningkatkan nilai *hot ductility*. Titanium dapat meningkatkan nilai *hot ductility* karena titanium dapat mengendalikan pertumbuhan butir dan struktur mikro pada temperatur tinggi sehingga dapat mencegah terjadinya kegagalan atau deformasi yang tidak diinginkan saat pemrosesan pada temperatur tinggi (Abushosha dkk., 1991). Dapat dilihat juga pada gambar 4.8 yang menunjukkan fasa Ti(N,C) spesimen C1 yang lebih besar dibanding spesimen C3.

Mangan dapat meningkatkan *hot ductility* karena dapat mengikat sulfur. Menurut literatur, semakin tinggi rasio Mangan dalam sulfur akan meningkatkan nilai *hot ductility*(Lanjewar dkk., 2014). Selain itu spesimen C1 memiliki presentase Aluminium, sulfur, dan karbon yang lebih rendah jika dibanding spesimen C2 dan C3. Aluminium dapat menurunkan nilai *hot ductility* karena menyebabkan struktur dendritik yang kasar penyebab terjadinya retakan (Mintz, 1999). Hal ini sesuai dengan yang ditunjukkan oleh gambar 4.8 dimana dari gambar

tersebut menunjukkan fasa Al_2O_3 yang terbentuk pada spesimen C1 lebih rendah dibanding spesimen C3.

Sulfur dapat menurunkan nilai *hot ductility* karena akan terjadinya segregasi sulfur ke batas butir, sehingga batas butir akan melemah. Sulfur juga dapat membentuk ikatan Mn-Sulfida pada pembentukan rongga yang kemudian akan menghasilkan kegagalan intergranular daktilitas rendah (Mintz, 1999). Dapat dilihat pada gambar 4.8 menunjukkan fasa MnS yang terbentuk pada spesimen C1 lebih rendah jika dibanding spesimen C3 yang menyebabkan nilai *hot ductility* spesimen C3 menurun. Dengan akumulasi perbedaan komposisi dan juga fasa yang terbentuk pada masing-masing spesimen menyebabkan spesimen C1 memiliki nilai *hot ductility* yang lebih tinggi dibanding spesimen C3 meskipun memiliki komposisi silikon yang lebih sedikit dibanding spesimen C3.

Berdasarkan literatur (Davis, 2004), ketiga spesimen memiliki nilai *hot ductility* yang tinggi karena pada rentang temperatur 1000 °C-1100 °C, baik pada spesimen C1, C2, maupun spesimen C3 memiliki nilai *hot ductility* diatas 70%. Hal tersebut sesuai literatur, karena dari berbagai sumber, pada temperatur tersebut sudah termasuk ke dalam daerah *high ductility high temperature* (HDH). Tingginya nilai *hot ductility* dapat berkaitan dengan dengan terjadinya rekristalisasi dinamis atau *dynamic recrystallization (DRX)*, yaitu terjadinya transformasi fasa dengan disertai adanya pembentukan butir baru dan nukleasi atau pengintian selama terjadinya deformasi. Mekanisme dari rekristalisasi dinamis memungkinkan terjadinya migrasi batas butir sehingga dapat mengurangi ketegangan internal yang menyebabkan terjadinya retakan. Dimana pada rentang temperatur 1000 °C-1100 °C terbentuk fasa ferit-austenit yang dimulai dari temperatur 756,67 °C untuk spesimen C1, 760,43 °C untuk spesimen C2, dan 760,27 untuk spesimen C3. Dari diagram fasa yang ditunjukkan oleh gambar 4.8 dan tabel 4.2-tabel 4.4 dapat dilihat fasa yang paling dominan terbentuk adalah α -ferit. Menurut literatur, (Mintz dkk., 1991), volume ferit yang tinggi dapat mengurangi konsentrasi regangan pada batas butir, dimana konsentrasi tegangan dapat menyebabkan deformasi preferensial di sekitar batas butir yang dapat mengakibatkan mekanisme embrittlement. Selain itu, ferit juga memiliki *dynamic recovery* yang tinggi sehingga dapat membentuk batas

butir bergerigi, yang dapat mengurangi pergeseran batas butir. Jika dibandingkan dengan penelitian lain yang menggunakan spesimen dan variabel percobaan yang sama tetapi menggunakan temperatur yang berbeda yaitu 700 °C, 750 °C, 800 °C, 850 °C, 900 °C, dan 950 °C, semua spesimen memiliki nilai *hot ductility* yang tinggi dan berada diatas 88%. Nilai *hot ductility* dari masing-masing spesimen memiliki nilai yang hampir sama dan hanya ada sedikit penurunan, contohnya pada temperatur 700 °C, nilai *hot ductility* yang didapat 98,5% pada spesimen C1, 99,43% pada spesimen C2 dan 98,41% pada spesimen C3, sedangkan nilai *hot ductility* yang didapat pada temperatur 1100 °C yang merupakan temperatur tertinggi sebesar 95,68864% pada spesimen C1, 95,73239% pada spesimen C2 dan 88,9% pada spesimen C3. Jika dilihat dari diagram fasa *factstage*, hal itu disebabkan pada temperatur 700 °C memiliki volume fasa ferit yang lebih besar jika dibanding pada temperatur 1100 °C.