

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data dan Analisa Pengaruh Diameter dan Sudut *Chamfer* Terhadap Temperatur Maksimum Benda Kerja

4.1.1 Data Pengaruh Diameter dan Sudut *Chamfer* Terhadap Temperatur Maksimum Benda Kerja

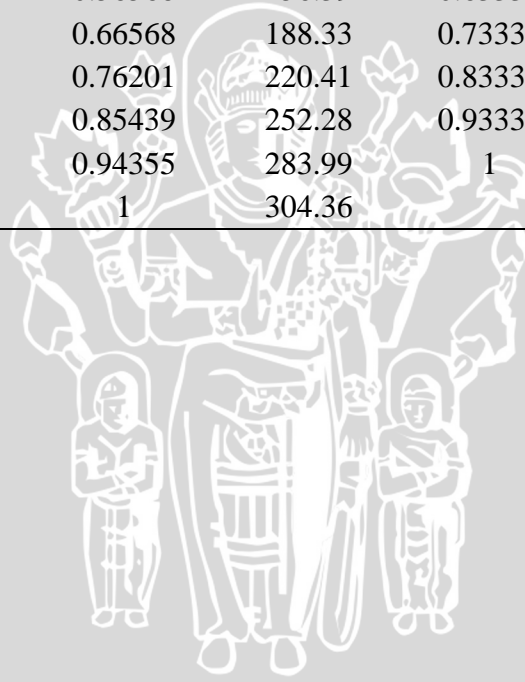
Pada sub bab berikut ini, akan dibahas data mengenai pengaruh diameter benda kerja dan sudut *chamfer* terhadap temperatur maksimum benda kerja. Berikut ini adalah tabel-tabel yang didapat dari hasil pengolahan data penelitian:

Tabel 4.1 : Data Temperatur Maksimum Benda Kerja Diameter 1,5 cm.

D 1.5 cm sudut 0 ⁰		D 1.5 cm sudut 15 ⁰		D 1.5 cm sudut 30 ⁰	
Time (s)	Temp max (°C)	Time (s)	Temp max (°C)	Time (s)	Temp max (°C)
1.00E-02	22.225	1.00E-02	22.428	1.00E-02	22.178
2.00E-02	22.599	1.70E-02	22.834	1.99E-02	22.46
3.78E-02	23.677	2.40E-02	23.311	2.98E-02	22.819
6.33E-02	25.797	3.64E-02	24.304	4.74E-02	23.64
0.1002	29.663	5.41E-02	25.926	7.20E-02	25.058
0.15374	36.458	7.95E-02	28.55	0.10599	27.443
0.2316	48.212	0.11563	32.766	0.15283	31.335
0.3316	65.672	0.16722	39.579	0.21741	37.604
0.4316	85.106	0.241	50.996	0.30684	47.66
0.5316	106.17	0.341	68.394	0.40684	60.219
0.6316	128.62	0.441	87.452	0.50684	74.079
0.7316	152.28	0.541	107.9	0.60684	88.451
0.8316	177.13	0.641	129.54	0.70684	104.18
0.9316	203.14	0.741	152.23	0.80684	119.86
1	221.29	0.841	175.89	0.90684	136.45
		0.941	200.46	1	152.52
		1	215.19		

Tabel 4.2 : Data Temperatur Maksimum Benda Kerja Diameter 2 cm.

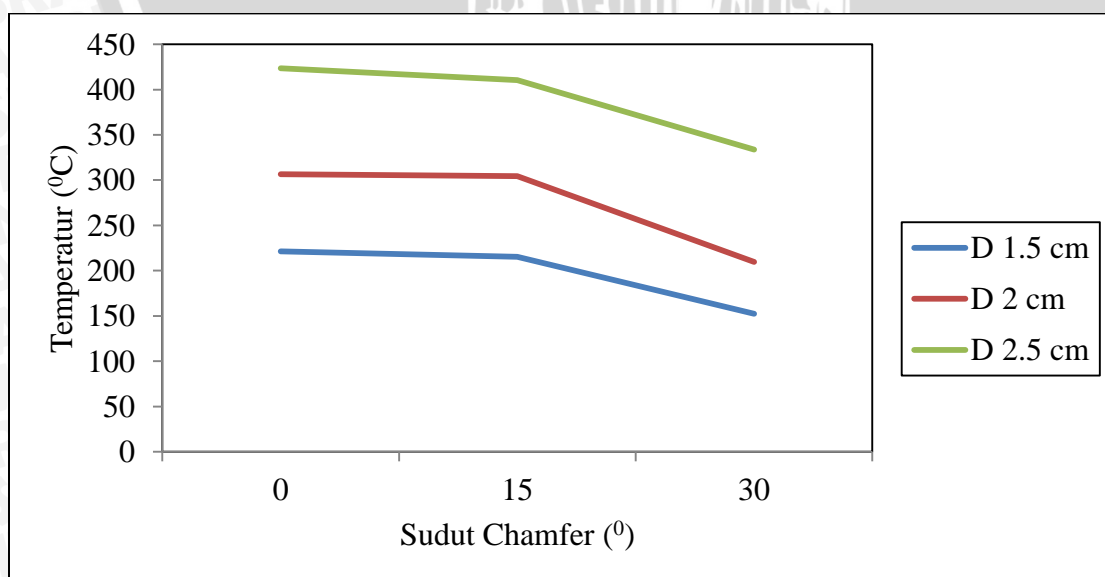
D 2 cm sudut 0 ⁰		D 2 cm sudut 15 ⁰		D 2 cm sudut 30 ⁰	
<i>Time</i> (s)	<i>Temp max</i> (⁰ C)	<i>Time</i> (s)	<i>Temp max</i> (⁰ C)	<i>Time</i> (s)	<i>Temp max</i> (⁰ C)
1.00E-02	22.304	1.00E-02	22.531	1.00E-02	22.265
2.00E-02	22.811	1.75E-02	23.081	1.97E-02	22.674
3.78E-02	24.269	2.50E-02	23.728	2.93E-02	23.19
6.34E-02	27.304	3.86E-02	25.111	4.72E-02	24.405
0.1004	32.954	5.81E-02	27.543	7.29E-02	26.532
0.15402	42.981	8.60E-02	31.982	0.1094	30.146
0.23194	60.203	0.12606	39.362	0.16093	36.168
0.33194	85.689	0.18338	51.447	0.23338	46.349
0.43194	113.78	0.26568	71.002	0.33338	62.871
0.53194	143.99	0.36568	97.435	0.43338	81.227
0.63194	176.01	0.46568	126.01	0.53338	101.13
0.728	208.32	0.56568	156.39	0.63338	122.42
0.8195	240.38	0.66568	188.33	0.73338	144.89
0.90728	272.21	0.76201	220.41	0.83338	168.52
0.95364	289.16	0.85439	252.28	0.93338	193.09
1	306.39	0.94355	283.99	1	209.58
		1	304.36		



Tabel 4.3 : Data Temperatur Maksimum Benda Kerja Diameter 2,5 cm.

D 2.5 cm sudut 0 ⁰		D 2.5 cm sudut 15 ⁰		D 2.5 cm sudut 30 ⁰	
Time (s)	Temp max (°C)	Time (s)	Temp max (°C)	Time (s)	Temp max (°C)
1.00E-02	22.391	1.00E-02	22.716	1.00E-02	22.368
2.00E-02	23.104	1.82E-02	23.542	2.00E-02	22.948
3.93E-02	25.302	2.64E-02	24.52	3.50E-02	24.115
6.72E-02	29.694	4.13E-02	26.825	5.70E-02	26.378
0.10752	38.598	6.26E-02	31.011	8.92E-02	30.583
0.16581	54.728	9.31E-02	38.017	0.13553	39.098
0.2502	82.441	0.13649	49.519	0.20172	54.091
0.3439	117.24	0.19855	68.1	0.2958	79.297
0.42674	150.37	0.28779	98.373	0.3958	109.48
0.50368	182.88	0.37834	131.92	0.4958	142.25
0.57648	215.03	0.46092	164.45	0.58968	174.83
0.64615	246.9	0.53848	196.52	0.67835	207.02
0.71341	278.62	0.61235	228.28	0.76309	238.99
0.77864	310.23	0.68344	259.86	0.84465	270.74
0.84213	*341.84	0.75225	291.33	0.92368	302.34
0.90393	373.39	0.81913	*322.68	1	*333.57
0.9642	404.8	0.88437	353.8		
1	423.64	0.94807	384.88		
		1	410.34		

4.1.2 Analisa Pengaruh Diameter dan Sudut *Chamfer* Terhadap Temperatur Maksimum Benda Kerja



Gambar 4.1 : Grafik Pengaruh Variasi Diameter dan Sudut *Chamfer* Terhadap Temperatur Maksimum Benda Kerja.

Gambar 4.1 menunjukkan adanya pengaruh hubungan antara variasi diameter terhadap temperatur maksimum benda kerja serta pengaruh hubungan antara sudut *chamfer* benda kerja (Al-6061) terhadap temperatur maksimum benda kerja. Dari gambar tersebut dapat diamati, yakni nilai temperatur untuk diameter 1,5 cm terbesar pada variasi sudut *chamfer* 0° sebesar $221,29^{\circ}\text{C}$, diikuti dengan variasi sudut *chamfer* 15° sebesar $215,19^{\circ}\text{C}$, dan variasi sudut *chamfer* 30° sebesar $152,52^{\circ}\text{C}$. Nilai temperatur untuk diameter 2 cm terbesar pada variasi sudut *chamfer* 0° sebesar $306,39^{\circ}\text{C}$, diikuti dengan variasi sudut *chamfer* 15° sebesar $304,36^{\circ}\text{C}$, dan variasi sudut *chamfer* 30° sebesar $209,58^{\circ}\text{C}$. Nilai temperatur untuk diameter 2,5 cm terbesar pada variasi sudut *chamfer* 0° sebesar $423,64^{\circ}\text{C}$, diikuti dengan variasi sudut *chamfer* 15° sebesar $410,34^{\circ}\text{C}$, dan variasi sudut *chamfer* 30° sebesar $333,57^{\circ}\text{C}$.

Berdasarkan tinjauan pustaka, disebutkan bahwa hasil pengelasan *continous drive friction welding* dapat menyatu dibutuhkan salah satu benda kerja mencapai temperatur rekristalisasinya (Adib, 2016). Untuk material Al-6061 sebesar $315,56^{\circ}\text{C}$ dan untuk material SS-304 sebesar $537,78^{\circ}\text{C}$. Selain itu, benda kerja mulai terdeformasi secara plastis ketika memasuki $0,3x$ temperatur cair benda kerja tersebut (Mumin Sahin, 2006) dan pada pengelasan dua jenis logam yang berbeda akan mengakibatkan deformasi yang tidak simetris antara kedua benda kerjanya karena perbedaan temperatur cair yang berbeda (Khan, 2011). Untuk material Al-6061 memiliki temperatur cair sebesar 660°C sedangkan material SS-304 sebesar $1523,889^{\circ}\text{C}$. Sehingga $0,3x$ temperatur cairnya untuk material Al-6061 sebesar 198°C dan untuk material SS-304 sebesar $457,1667^{\circ}\text{C}$.

Pada gambar tersebut, untuk variasi diameter 2,5 cm dengan semua variasi sudut *chamfer* telah memasuki temperatur yang dibutuhkan agar menyambung karena telah memasuki fase rekristalisasi untuk material Al-6061 dan pada tabel 4.3 diberikan tanda (*) pada temperturnya yang menandakan bahwa pada saat itu kedua benda kerja telah menyambung. Sedangkan untuk variasi diameter 2 cm dan 1,5 cm dengan semua variasi sudut *chamfer* belum dapat menyambung karena belum memasuki temperatur rekristalisasi. Namun, variasi diameter 2 cm dan 1,5 cm telah terdeformasi plastis untuk material Al-6061, akan tetapi material SS-304 belum terdeformasi plastis. Kecuali untuk variasi diameter 1,5 cm sudut *chamfer* 30° belum terdeformasi plastis untuk kedua materialnya.

Gambar 4.1 juga memberikan informasi tentang semakin besar diameter benda kerja, maka semakin besar pula temperatur maksimum yang dihasilkan. Hal tersebut dikarenakan semakin besar diameter benda kerja maka semakin besar luas permukaan yang

bergesekan. Gesekan yang antara kedua benda kerja menghasilkan *heat flux* sehingga mampu meningkatkan nilai temperatur kedua benda kerja tersebut.

Gambar 4.1 memberikan informasi tentang semakin besar sudut *chamfer* benda kerja (Al-6061) maka nilai temperatur maksimum yang dihasilkan semakin kecil. Hal ini dikarenakan semakin besar sudut *chamfer* menyebabkan semakin kecil luas permukaan yang bergesekan. Gesekan antara kedua benda kerja menghasilkan *heat flux* sehingga mampu meningkatkan nilai temperatur kedua benda kerja tersebut. Berdasarkan hal tersebut maka, semakin besar sudut *chamfer* menyebabkan panas yang dihasilkan lebih rendah daripada sudut *chamfer* yang lebih kecil.

4.2 Data dan Analisa Pengaruh Diameter dan Sudut *Chamfer* Terhadap Kenaikan Temperatur Benda Kerja

4.2.1 Data Pengaruh Diameter dan Sudut *Chamfer* Terhadap Kenaikan Temperatur Benda Kerja

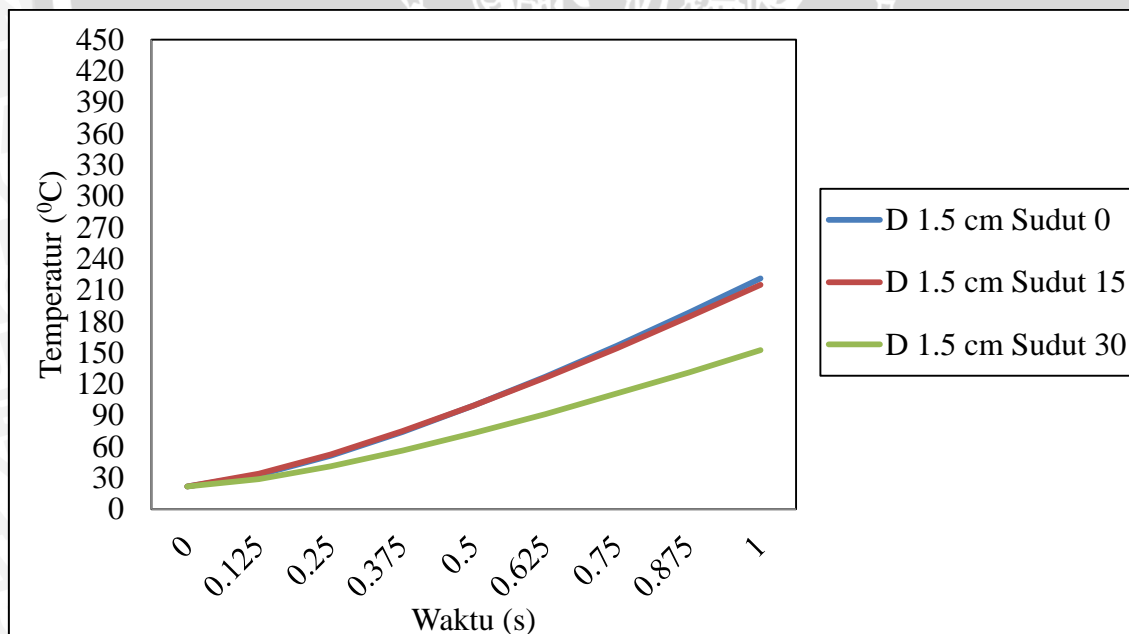
Pada sub bab berikut ini, akan dibahas data mengenai pengaruh diameter benda kerja serta sudut *chamfer* terhadap kenaikan temperatur benda kerja. Data berikut ini merupakan pengolahan lebih lanjut dari tabel 4.1, 4.2, dan 4.3. Tabel- tabel tersebut diolah lebih lanjut agar didapatkan nilai waktu yang sama hal ini dikarenakan pada data waktu tabel- tabel tersebut memiliki nilai waktu yang berbeda beda. Kemudian, tabel- tabel tersebut diolah dengan cara menyederhanakan *time*-nya menjadi 0,125s, 0,25s, 0,375s, 0,5s, 0,625s, 0,75s, 0,875s, dan 1s. Hal itu dilakukan dengan cara menginterpolasi agar ditemukan temperatur yang sesuai dengan waktu tersebut. Sehingga dihasilkan tabel 4.4:

Tabel 4.4 : Data Kenaikan Temperatur Maksimum Benda Kerja.

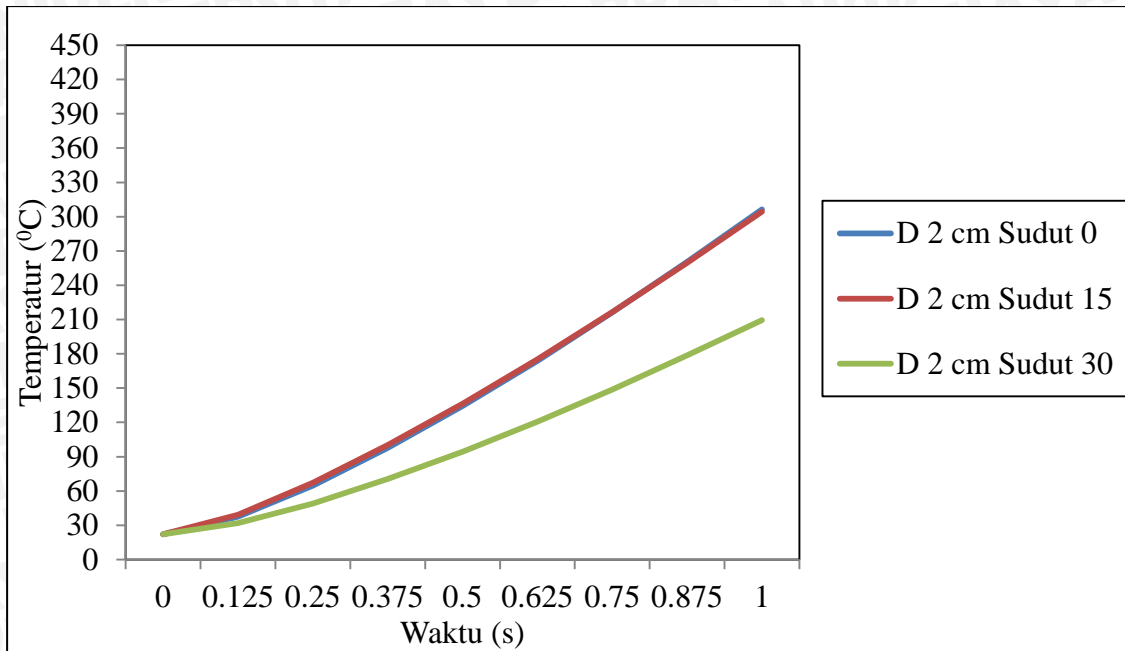
Time (s)	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)								
	D 1.5 cm			D 2 cm			D 2.5 cm		
	sudut 0	sudut 15	sudut 30	sudut 0	sudut 15	sudut 30	sudut 0	sudut 15	sudut 30
0	22	22	22	22	22	22	22	22	22
0.125	32.8105	34.0034	29.032	37.5542	39.1665	31.9691	43.4351	46.4758	37.1634
0.25	51.4246	52.5618	41.269	64.8058	67.2763	49.095	82.3753	85.5534	67.0262
0.375	74.1064	74.8737	56.22	97.785	100.098	70.5108	129.678	130.683	103.202
0.5	99.5138	99.5163	73.131	134.341	136.436	94.4864	181.325	180.609	143.708
0.625	127.139	126.078	91.307	173.788	175.337	120.636	237.225	233.899	187.652
0.75	156.852	154.359	110.95	216.028	216.41	148.817	296.351	290.301	234.052
0.875	188.418	184.244	131.17	260.505	259.61	178.746	*358.621	*349.33	282.875
1	221.29	215.19	152.52	306.39	304.36	209.58	423.64	410.34	*333.57

4.2.2 Analisa Pengaruh Diameter dan Sudut Chamfer Terhadap Kenaikan Temperatur Benda Kerja

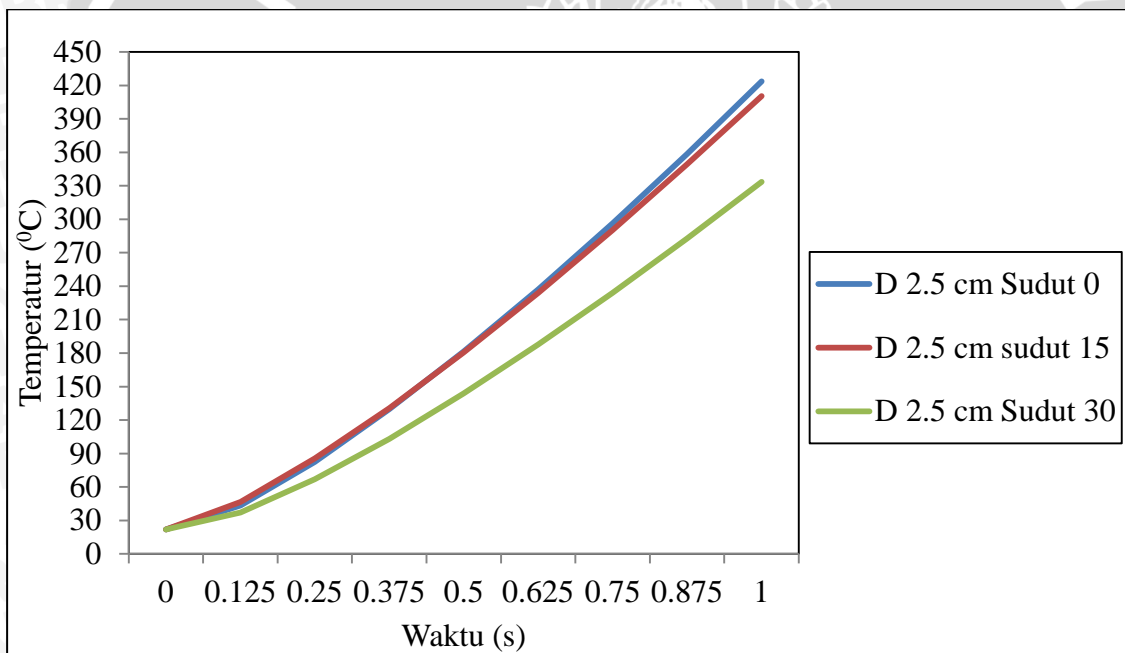
Berdasarkan tabel 4.4 dibuatlah grafik- grafik yang dapat diamati pada gambar 4.2, 4.3, dan 4.4. Hal ini dibuat untuk memudahkan menganalisa perkembangan temperatur benda kerja.



Gambar 4.2 : Grafik Kenaikan Temperatur Benda Kerja Diameter 1,5 cm.



Gambar 4.3 : Grafik Kenaikan Temperatur Benda Kerja Diameter 2 cm.



Gambar 4.4 : Grafik Kenaikan Temperatur Benda Kerja Diameter 2,5 cm.

Pada gambar 4.2, 4.3, dan 4.4 dapat diamati yakni, semakin bertambahnya *friction time*, maka semakin besar pula temperatur yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan seiring bertambahnya waktu maka jumlah putaran yang dihasilkan oleh benda kerja akan semakin bertambah. Hal ini menyebabkan bertambahnya gesekan yang terjadi antar kedua benda kerja seiring berjalannya waktu. Gesekan tersebut menghasilkan energi panas yang meningkatkan temperatur benda kerja.

Gambar 4.2 memberikan informasi tentang kenaikan temperatur benda kerja dengan diameter 1,5 cm dengan ketiga variasi sudut *chamfer*. Pada gambar tersebut terlihat bahwa sudut 0° memiliki kenaikan yang menghasilkan temperatur tertinggi, diikuti dengan variasi sudut *chamfer* 15° , dan yang terendah pada variasi sudut *chamfer* 30° .

Variasi penelitian dengan diameter benda kerja sebesar 1,5 cm membutuhkan waktu yang berbeda-beda untuk mencapai temperatur minimal agar benda kerja mengalami deformasi plastis. Pada variasi sudut *chamfer* 0° membutuhkan waktu 0,9118 detik, sedangkan variasi sudut *chamfer* 15° membutuhkan waktu 0,931 detik, dan variasi 30° , belum mencapai temperatur tersebut. Meskipun begitu untuk variasi diameter 1,5 cm pada semua variasi sudut *chamfer* kedua benda kerjanya masih belum menyatu, oleh sebab itu variasi ini membutuhkan *friction time* yang lebih lama agar mencapai temperatur rekristalisasi sehingga kedua benda kerja dapat menyatu.

Gambar 4.3 memberikan informasi tentang kenaikan temperatur benda kerja dengan diameter 2 cm dengan ketiga variasi sudut *chamfer*. Pada gambar tersebut terlihat bahwa sudut 0° memiliki kenaikan yang menghasilkan temperatur tertinggi, diikuti dengan variasi sudut *chamfer* 15° , dan yang terendah pada variasi sudut *chamfer* 30° .

Variasi penelitian dengan diameter benda kerja sebesar 2 cm membutuhkan waktu yang berbeda-beda untuk mencapai temperatur minimal agar benda kerja mengalami deformasi plastis. Pada variasi sudut *chamfer* 0° membutuhkan waktu 0,6873 detik, sedangkan variasi sudut *chamfer* 15° membutuhkan waktu 0,6947 detik, dan variasi 30° , membutuhkan waktu kurang dari 0,9532 detik agar mencapai temperatur tersebut. Meskipun begitu untuk variasi diameter 2 cm pada semua variasi sudut *chamfer* kedua benda kerjanya masih belum menyatu, oleh sebab itu variasi ini membutuhkan *friction time* yang lebih lama agar mencapai temperatur rekristalisasi sehingga kedua benda kerja dapat menyatu.

Gambar 4.4 memberikan informasi tentang kenaikan temperatur benda kerja dengan diameter 2,5 cm dengan ketiga variasi sudut *chamfer*. Pada gambar tersebut terlihat bahwa sudut 0° memiliki kenaikan yang menghasilkan temperatur tertinggi, diikuti dengan variasi sudut *chamfer* 15° , dan yang terendah pada variasi sudut *chamfer* 30° .

Variasi penelitian dengan diameter benda kerja sebesar 2,5 cm untuk mencapai temperatur minimal agar benda kerja terdeformasi plastis dan saling menyambung (pada tabel 4.4 diberikan tanda (*)) yang menandakan bahwa pada saat itu kedua benda kerja mulai menyatu). Pada variasi sudut *chamfer* 0° membutuhkan waktu 0,5379 detik agar mencapai temperatur untuk terdeformasi dan membutuhkan waktu 0,78894 detik agar

kedua benda kerja dapat menyatu. Variasi sudut *chamfer* 15^0 membutuhkan waktu 0,5419 detik agar mencapai temperatur untuk terdeformasi dan dibutuhkan waktu 0.80351 detik agar kedua benda kerja dapat menyatu. Sedangkan untuk variasi 30^0 , membutuhkan waktu 0,6535 detik agar mencapai temperatur minimal untuk terdeformasi dan membutuhkan waktu 0.9555 detik agar sehingga kedua benda kerja dapat menyatu.

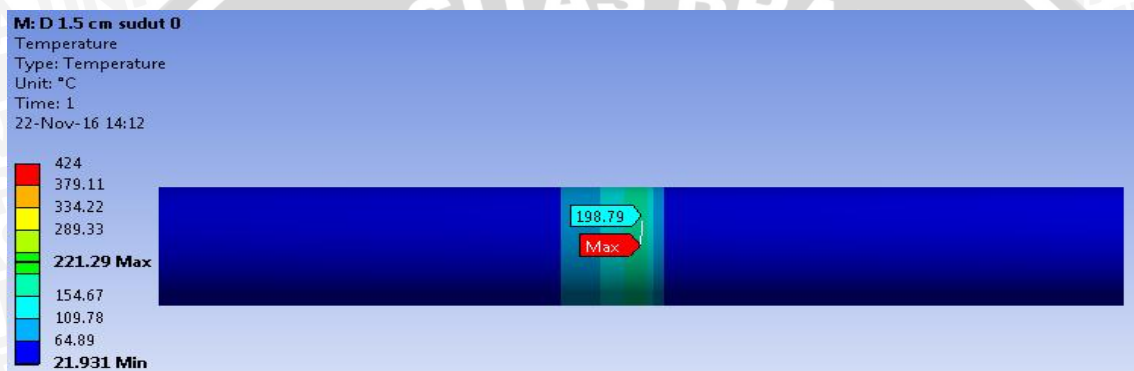
Pada gambar 4.2, 4.3, dan 4.4 dapat diamati yakni semakin bertambahnya nilai waktu, maka semakin besar pula temperatur yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan seiring bertambahnya waktu maka jumlah putaran yang dihasilkan oleh benda kerja akan semakin bertambah. Hal ini menyebabkan meningkatnya gesekan yang terjadi antar kedua benda kerja. Gesekan tersebut menghasilkan energi panas yang mengakibatkan meningkatnya temperatur benda kerja.

Pada tabel 4.1, 4.2, dan 4.3 dapat diamati untuk semua variasi diameter pada variasi sudut *chamfer* 0^0 pada *friction time* awal memiliki temperatur yang lebih kecil daripada variasi sudut *chamfer* 15^0 namun ketika memasuki *friction time* yang cukup lama nilai temperatur variasi sudut *chamfer* 0^0 lebih tinggi daripada variasi sudut *chamfer* 15^0 . Hal tersebut dikarenakan luas permukaan pada variasi sudut *chamfer* 15^0 lebih kecil daripada luas permukaan variasi sudut *chamfer* 0^0 . Hal tersebut mengakibatkan nilai *friction pressure* yang dihasilkan variasi sudut *chamfer* 15^0 lebih besar daripada variasi sudut *chamfer* 0^0 sehingga mampu menghasilkan temperatur yang lebih tinggi. Namun pada *friction time* yang cukup lama, temperatur variasi sudut *chamfer* 0^0 lebih tinggi daripada variasi sudut *chamfer* 15^0 . Hal tersebut disebabkan karena pada variasi sudut *chamfer* 0^0 memiliki luas permukaan yang bergesekan lebih besar daripada variasi sudut *chamfer* 15^0 dan dikarenakan konveksi yang terjadi pada variasi sudut *chamfer* 15^0 lebih cepat daripada variasi sudut *chamfer* 0^0 , sehingga ketika *friction time* yang cukup lama mampu menghasilkan temperatur yang lebih besar yang diakibatkan luas permukaan yang bergesekan lebih besar. Namun pada variasi sudut *chamfer* 30^0 nilai temperatur yang dihasilkan lebih kecil daripada variasi sudut *chamfer* yang lain. Hal tersebut disebabkan karena laju perpindahan panas akibat konveksi yang lebih cepat daripada variasi sudut *chamfer* yang lainnya.

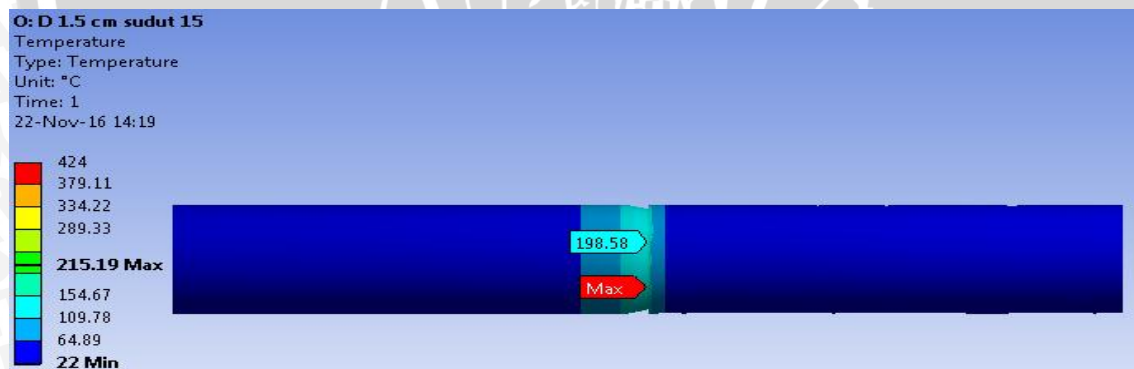
4.3 Data dan Analisa Pengaruh Diameter dan Sudut *Chamfer* Terhadap Distribusi Temperatur Benda Kerja

4.3.1 Data Pengaruh Diameter dan Sudut *Chamfer* Terhadap Distribusi Temperatur Benda Kerja

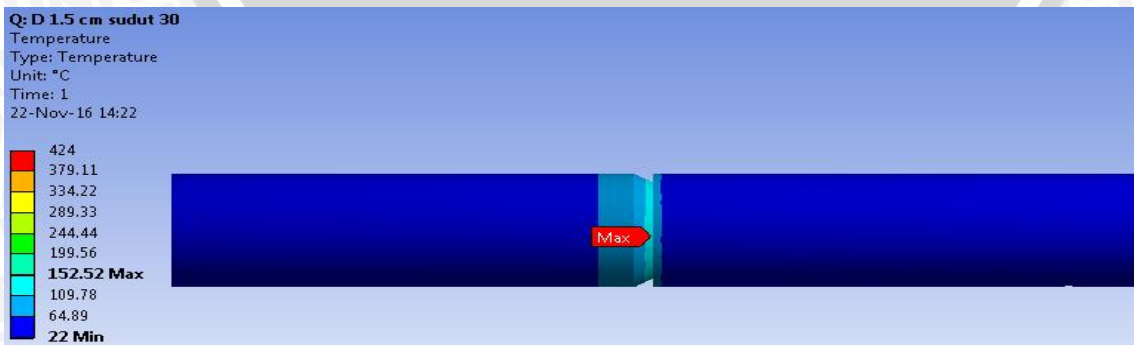
Pada sub bab berikut ini, akan dibahas mengenai pengaruh diameter dan sudut *chamfer* benda kerja terhadap distribusi temperatur benda kerja. Di dalam tabel di bawah ini, digambarkan distribusi temperatur benda kerja mulai dari ujung benda kerja pertama (Al-6061) sampai dengan ujung benda kerja kedua (SS-304). Sehingga berdasarkan data yang telah didapatkan, maka dihasilkan tabel berikut ini.



Gambar 4.5 : Distribusi Temperatur Variasi Diameter 1,5 cm Sudut *Chamfer* 0°.



Gambar 4.6 : Distribusi Temperatur Variasi Diameter 1,5 cm Sudut *Chamfer* 15°.



Gambar 4.7 : Distribusi Temperatur Variasi Diameter 1,5 cm Sudut *Chamfer* 30°.

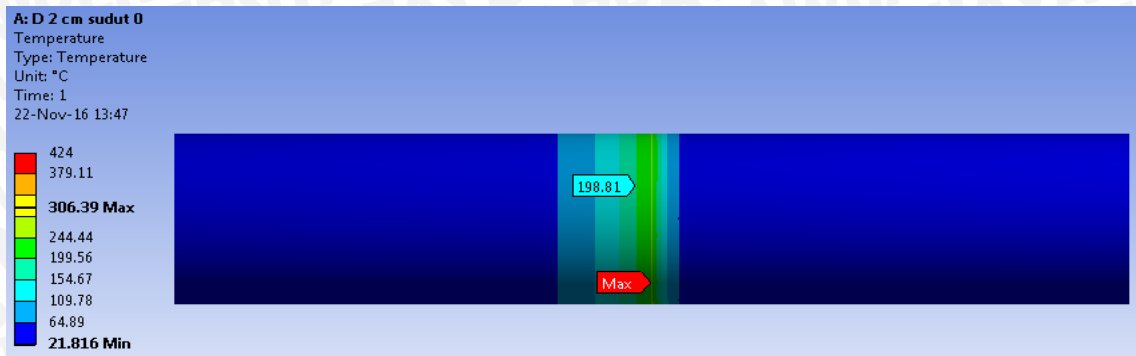
Gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 merupakan gambar distribusi benda kerja hasil pengelasan CDFW. Pada gambar-gambar tersebut diberikan informasi berupa letak temperatur maksimum yang diberi tanda warna merah (*max*). Pada gambar 4.5 dan 4.4 diberikan tanda warna biru muda (198) yang menginformasikan bahwa daerah pada benda kerja Al-6061 yang menunjukkan bahwa daerah tersebut telah berada di daerah zpd atau *partly deformed zone* (mencapai temperatur 198°C). Pada material Al-6061 untuk daerah yang memiliki temperatur dibawah 198°C berada pada daerah zud atau *undeformed region*, dan Pada material SS-304 untuk daerah yang memiliki temperatur dibawah $457,1667^{\circ}\text{C}$ berada pada daerah zud atau *undeformed region*.

Pada benda kerja dengan variasi diameter 1,5 cm, dibutuhkan *friction time* yang lebih lama agar kedua benda kerja saling menyambung satu sama lainnya. Menyambungnya kedua benda kerja terjadi apabila salah satu benda kerja telah mencapai temperatur rekristalisasinya sehingga mampu membentuk zpl (*fully plasticized zone*). Hal tersebut tentu dapat mempengaruhi kualitas dari hasil sambungan las CDFW. Yakni semakin luas daerah zpl maka sambungan yang terbentuk akan semakin baik dan kekuatannya semakin tinggi (Lin *et al*, 1999).

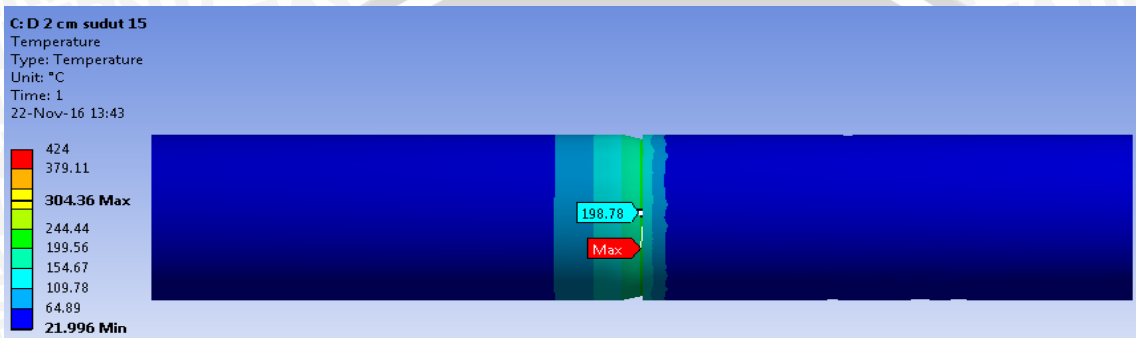


Tabel 4.5 : Data Distribusi Temperatur Benda Kerja Diameter 1,5 cm.

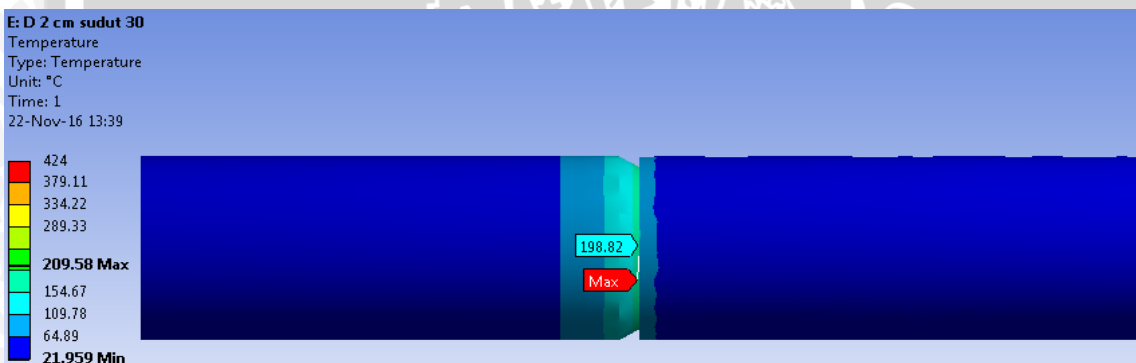
Material	Panjang benda (cm)	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)		
		Sudut 0°	Sudut 15°	Sudut 30°
al 6061	0	22.00	22.00	22.00
	0.25	22.003	22.003	22.002
	0.5	22.006	22.005	22.004
	0.75	22.012	22.010	22.008
	1	22.024	22.020	22.015
	1.25	22.046	22.042	22.028
	1.5	22.093	22.080	22.056
	1.75	22.183	22.150	22.112
	2	22.344	22.293	22.209
	2.25	22.652	22.543	22.381
	2.5	23.129	22.979	22.702
	2.75	24.115	23.736	23.237
	3	25.776	25.306	24.267
	3.25	28.551	27.679	25.884
	3.5	33.168	31.428	28.986
	3.75	40.376	37.836	33.546
	4	53.016	48.114	40.866
	4.25	72.172	64.080	51.978
	4.5	100.720	87.810	68.841
	4.75	142.070	123.920	89.170
5	221.290	215.190	152.52	
SS-304	5.25	61.860	54.989	42.596
	5.5	28.242	29.458	26.042
	5.75	22.895	22.796	22.763
	6	22.151	22.217	22.078
	6.25	22.013	22.028	22.018
	6.5	22.003	22.005	22.003
	6.75	22.000	22.000	22.000
	7	22.000	22.000	22.000
	7.25	22.000	22.000	22.000
	7.5	22.000	22.000	22.000
	7.75	22.000	22.000	22.000
	8	22.000	22.000	22.000
	8.25	22.000	22.000	22.000
	8.5	22.000	22.000	22.000
	8.75	22.000	22.000	22.000
9	22.000	22.000	22.000	
9.25	22.000	22.000	22.000	
9.5	22.000	22.000	22.000	
9.75	22.000	22.000	22.000	
10	22.000	22.000	22.000	



Gambar 4.8 : Distribusi Temperatur Variasi Diameter 2 cm Sudut *Chamfer* 0°.



Gambar 4.9 : Distribusi Temperatur Variasi Diameter 2 cm Sudut *Chamfer* 15°.



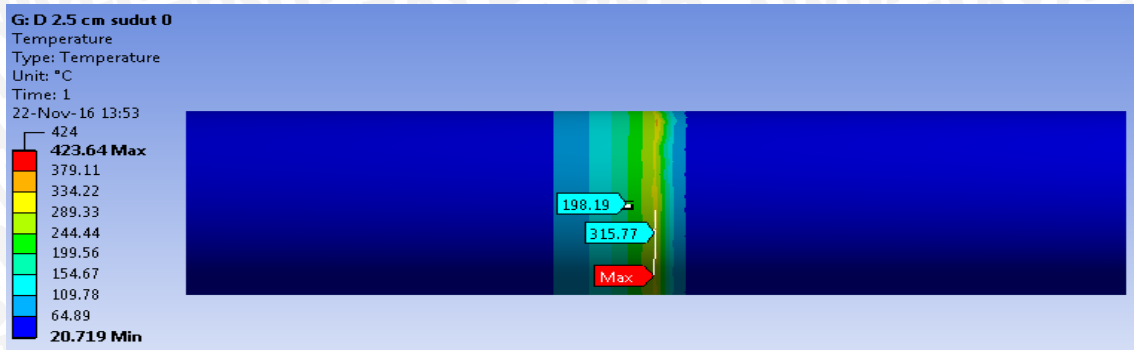
Gambar 4.10 : Distribusi Temperatur Variasi Diameter 2 cm Sudut *Chamfer* 30°.

Gambar 4.8, 4.9, dan 4.10 merupakan gambar distribusi benda kerja hasil pengelasan CDFW. Pada gambar-gambar tersebut diberikan informasi berupa letak temperatur maksimum yang diberi tanda warna merah (*max*). Pada gambar-gambar diberikan tanda warna biru muda (198) yang menginformasikan bahwa daerah pada benda kerja Al-6061 yang menunjukkan bahwa daerah tersebut telah berada di daerah Zpd atau *partly deformed zone* (mencapai temperatur 198°C).

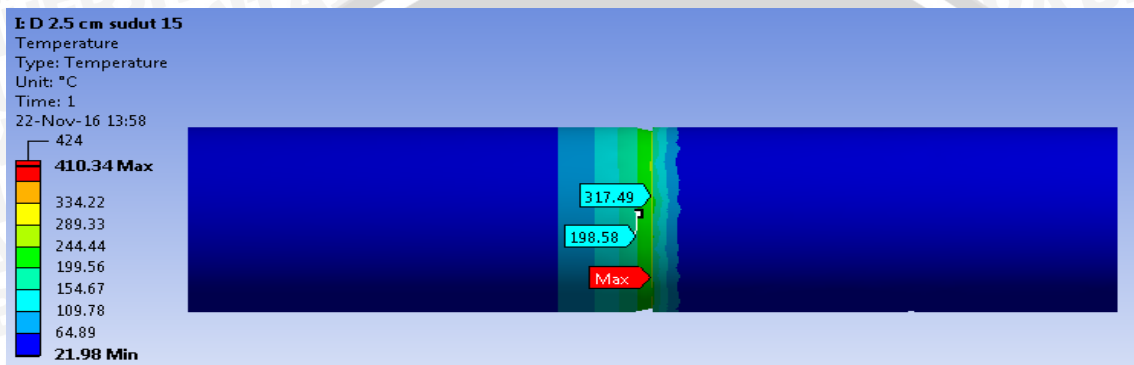
Pada benda kerja dengan variasi diameter 2 cm, dibutuhkan *friction time* yang lebih lama agar kedua benda kerja saling menyambung satu sama lainnya. Hal tersebut dapat terjadi apabila salah satu benda kerja telah mencapai temperatur rekristalisasinya sehingga mampu membentuk zpl (*fully plasticized zone*) sehingga mampu meningkatkan kualitas hasil pengelasannya.

Tabel 4.6 : Data Distribusi Temperatur Benda Kerja Diameter 2 cm.

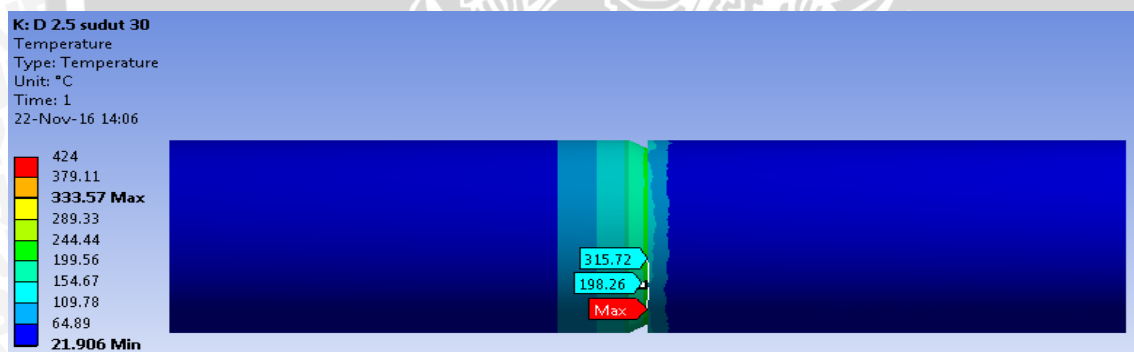
Material	Panjang benda (cm)	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)		
		Sudut 0°	Sudut 15°	Sudut 30°
al 6061	0	22.00	22.00	22.00
	0.25	22.003	22.003	22.003
	0.5	22.005	22.007	22.004
	0.75	22.008	22.015	22.006
	1	22.017	22.029	22.012
	1.25	22.035	22.056	22.023
	1.5	22.069	22.106	22.045
	1.75	22.134	22.217	22.087
	2	22.234	22.391	22.169
	2.25	22.246	22.721	22.301
	2.5	22.847	23.365	22.573
	2.75	23.223	24.497	23.068
	3	24.842	26.515	25.316
	3.25	26.896	29.850	27.890
	3.5	30.850	35.380	31.862
	3.75	37.249	44.802	39.111
	4	46.263	59.419	49.475
	4.25	88.957	80.257	67.576
	4.5	121.050	110.590	99.930
	4.75	174.350	162.540	136.260
5	306.390	304.360	209.580	
5.25	90.387	89.891	84.966	
5.5	30.386	30.982	29.862	
5.75	24.132	23.279	24.186	
6	22.210	22.093	22.724	
6.25	22.039	22.035	22.446	
6.5	22.030	22.022	22.226	
6.75	22.010	22.013	22.003	
7	22.000	22.000	22.000	
7.25	22.000	22.000	22.000	
7.5	22.000	22.000	22.000	
7.75	22.000	22.000	22.000	
8	22.000	22.000	22.000	
8.25	22.000	22.000	22.000	
8.5	22.000	22.000	22.000	
8.75	22.000	22.000	22.000	
9	22.000	22.000	22.000	
9.25	22.000	22.000	22.000	
9.5	22.000	22.000	22.000	
9.75	22.000	22.000	22.000	
10	22.000	22.000	22.000	
SS-304				



Gambar 4.11 : Distribusi Temperatur Variasi Diameter 2,5 cm Sudut Chamfer 0⁰.



Gambar 4.12 : Distribusi Temperatur Variasi Diameter 2,5 cm Sudut Chamfer 15⁰.



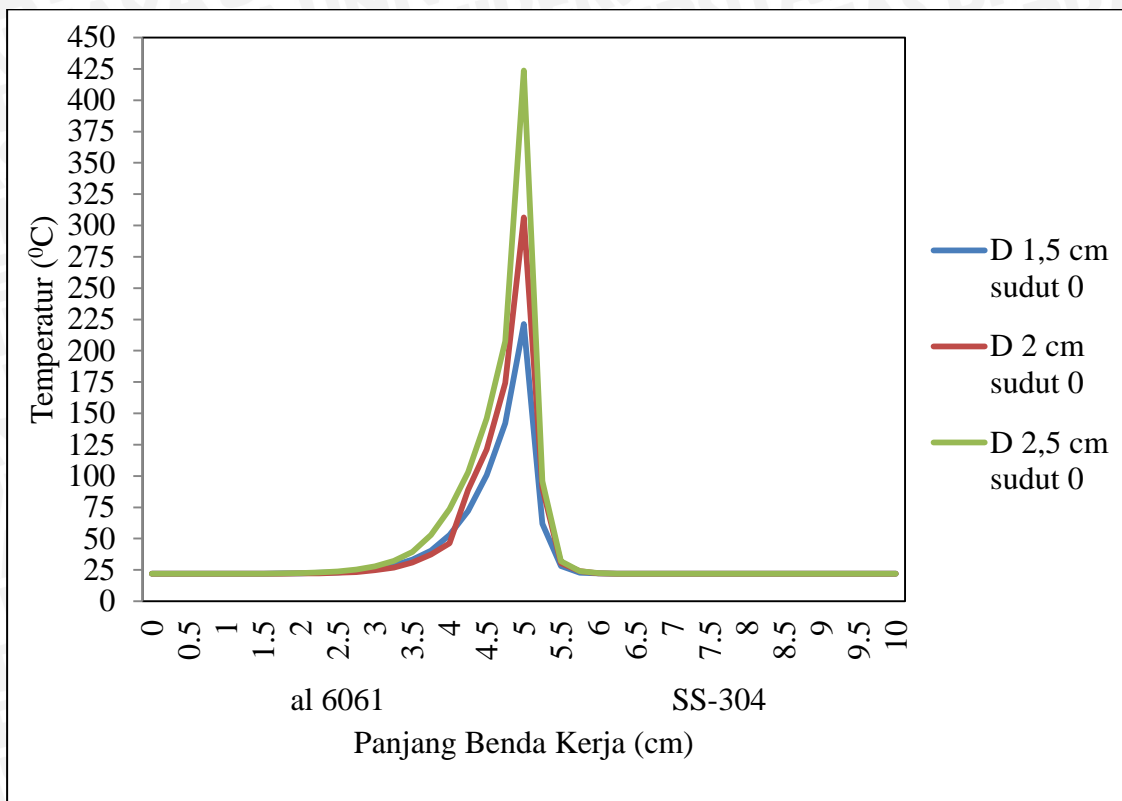
Gambar 4.13 : Distribusi Temperatur Variasi Diameter 2,5 cm Sudut Chamfer 30⁰.

Gambar 4.11, 4.12, dan 4.13 merupakan gambar distribusi benda kerja hasil pengelasan CDFW. Pada gambar-gambar tersebut diberikan informasi berupa letak temperatur maksimum yang diberi tanda warna merah. Pada gambar-gambar diberikan tanda warna biru muda yang menginformasikan bahwa daerah pada benda kerja Al-6061 yang menunjukkan bahwa daerah tersebut telah berada di daerah zpd atau *partly deformed zone* (mencapai temperatur 198⁰C). Selain itu pada gambar 4.11 dan 4.12 diberikan tanda warna biru muda yang terletak lebih dekat dengan permukaan benda kerja daripada tanda pertama yang menandakan bahwa daerah tersebut telah berada di daerah zpl atau *partly deformed zone* (mencapai temperatur 315,56⁰C).

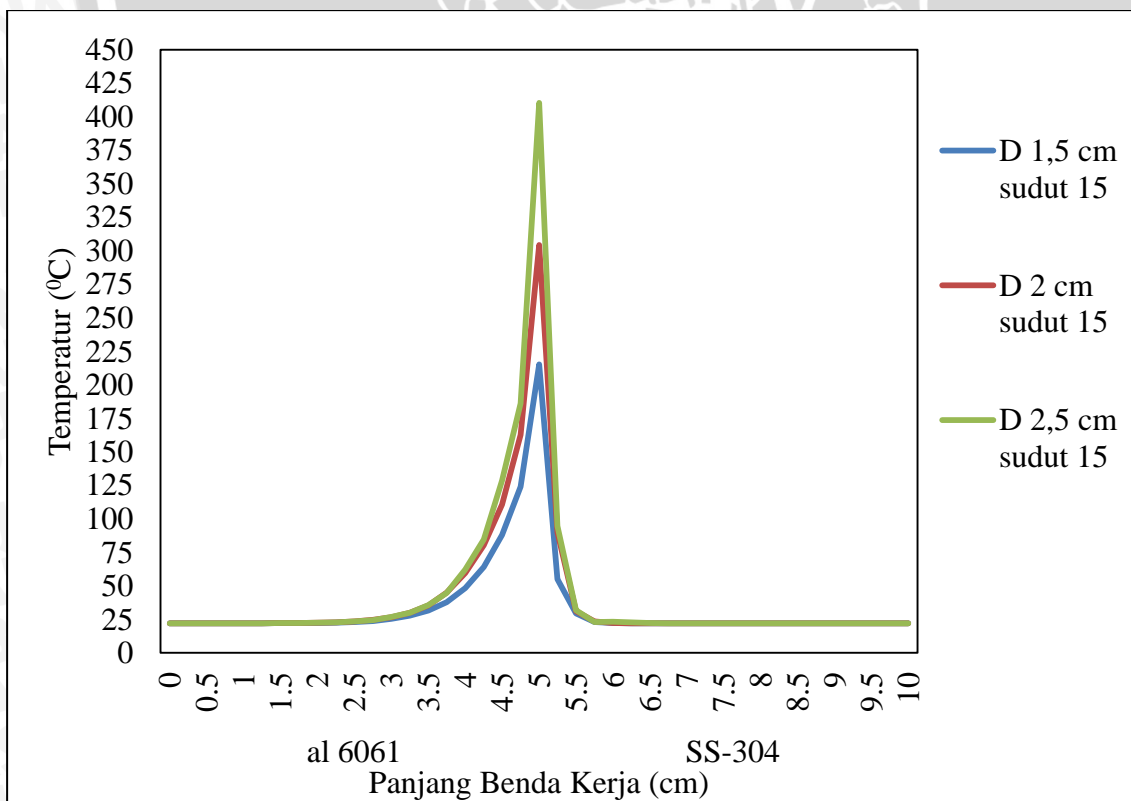
Tabel 4.7 : Data Distribusi Temperatur Benda Kerja Diameter 2,5 cm.

Material	Panjang benda (cm)	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)		
		Sudut 0°	Sudut 15°	Sudut 30°
al 6061	0	22.00	22.00	22.00
	0.25	22.003	22.003	22.003
	0.5	22.007	22.005	22.004
	0.75	22.014	22.011	22.007
	1	22.031	22.022	22.013
	1.25	22.063	22.044	22.028
	1.5	22.127	22.089	22.054
	1.75	22.247	22.175	22.108
	2	22.474	22.381	22.216
	2.25	22.930	22.666	22.391
	2.5	23.733	23.305	22.748
	2.75	25.276	24.441	23.386
	3	27.798	26.631	24.600
	3.25	32.208	29.952	26.667
	3.5	39.492	35.662	30.384
	3.75	52.875	44.725	44.496
	4	73.614	61.969	60.466
	4.25	103.080	84.618	82.132
	4.5	146.040	128.530	126.170
	4.75	207.470	186.130	184.170
5	*423.640	*410.340	*333.570	
SS-304	5.25	95.913	94.534	86.426
	5.5	31.957	31.694	27.256
	5.75	24.058	22.836	22.618
	6	22.541	23.229	22.091
	6.25	22.071	22.677	22.051
	6.5	22.007	22.119	22.025
	6.75	22.001	22.003	22.001
	7	22.000	22.000	22.000
	7.25	22.000	22.000	22.000
	7.5	22.000	22.000	22.000
	7.75	22.000	22.000	22.000
	8	22.000	22.000	22.000
	8.25	22.000	22.000	22.000
	8.5	22.000	22.000	22.000
	8.75	22.000	22.000	22.000
9	22.000	22.000	22.000	
9.25	22.000	22.000	22.000	
9.5	22.000	22.000	22.000	
9.75	22.000	22.000	22.000	
10	22.000	22.000	22.000	

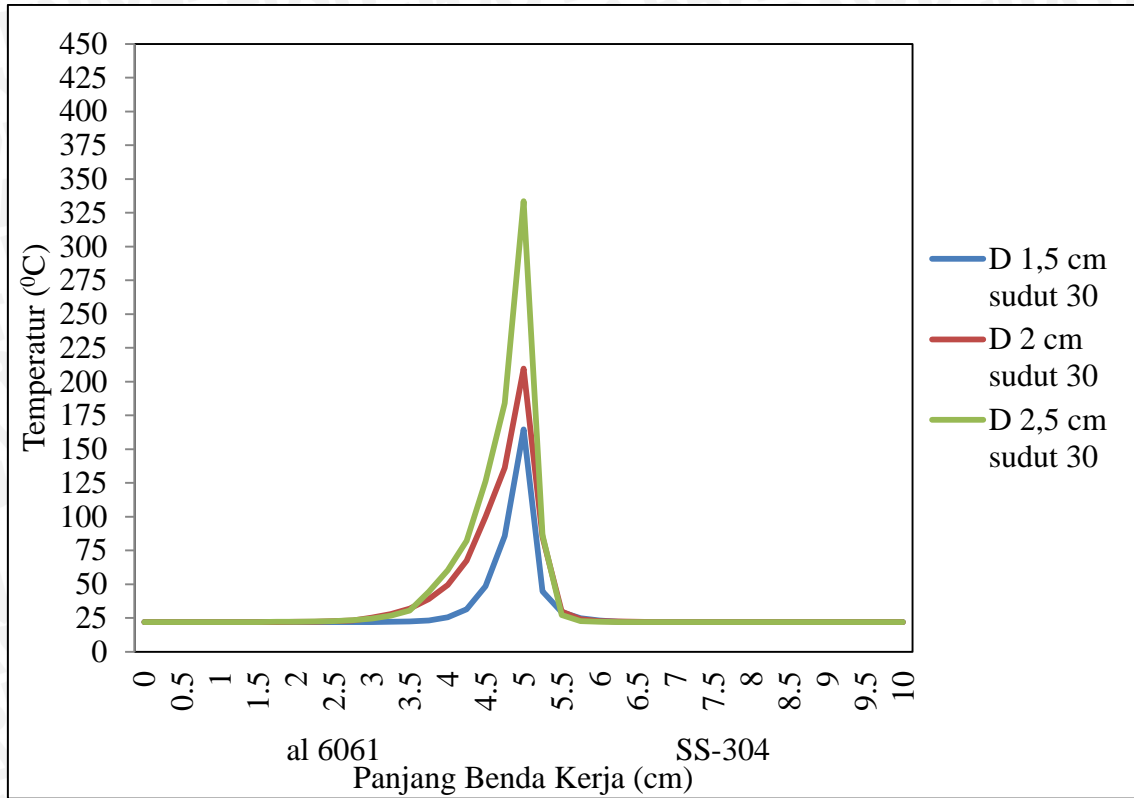
4.3.2 Analisa Pengaruh Diameter dan Sudut Chamfer Terhadap Distribusi Temperatur Benda Kerja



Gambar 4.14 : Grafik Distribusi Temperatur Benda Kerja Variasi Sudut Chamfer 0°.

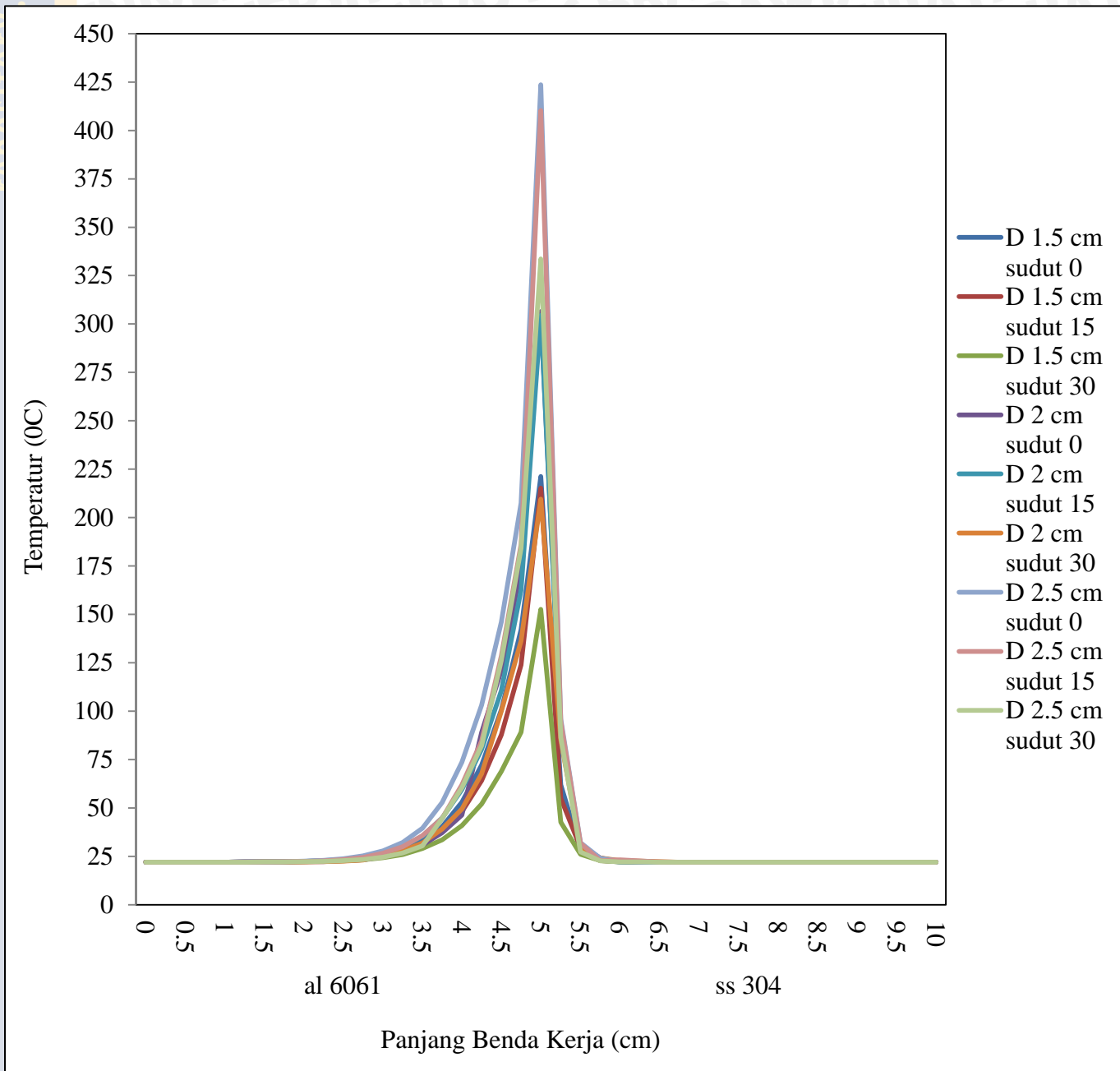


Gambar 4.15 : Grafik Distribusi Temperatur Benda Kerja Variasi Sudut Chamfer 15°.



Gambar 4.16 : Grafik Distribusi Temperatur Benda Kerja Variasi Sudut *Chamfer* 30°.





Gambar 4.17 : Grafik Distribusi Temperatur Benda Kerja.

Pada gambar 4.17 merupakan gabungan dari gambar 4.14, 4.15, dan 4.16. Dan pada gambar tersebut memberikan informasi tentang grafik distribusi temperatur benda kerja semua variasi diameter dan sudut *chamfer*. Distribusi yang ditunjukkan mulai dari ujung benda kerja Al-6061 sampai dengan ujung benda kerja SS-304 yang masing-masing benda kerja memiliki panjang sebesar 5 cm. Yaitu, pada gambar tersebut benda kerja Al-6061 dimulai dari 0 sampai 5 cm, sedangkan benda kerja SS-304 dimulai dari 5 sampai 10 cm.

Pada gambar tersebut, nilai temperatur terendah sebesar 22⁰C yang dimiliki pada semua variasi. Pada benda kerja Al-6061 yang memiliki nilai temperatur sebesar 22⁰C

pada semua variasi diameter dan sudut *chamfer* terletak pada ujung benda kerja tersebut, yakni pada 0 cm. Sedangkan pada benda kerja SS-304 yang memiliki nilai temperatur sebesar 22⁰C untuk variasi benda kerja yang memiliki diameter 1,5 cm dimulai pada 6,75 cm sampai ujung benda kerja SS-304 yakni 10 cm. Sedangkan untuk variasi benda kerja berdiameter sebesar 2 cm dan 2,5 cm memiliki nilai temperatur sebesar 22⁰C dimulai pada 7 cm sampai ujung benda kerja SS-304 yakni 10 cm.

Pada gambar tersebut, nilai temperatur terbesar yaitu sebesar 423,640⁰C yang dimiliki variasi diameter 2,5 cm sudut *chamfer* 0⁰. Nilai temperatur terbesar kedua yaitu sebesar 410,340⁰C yang dimiliki variasi diameter 2,5 cm sudut *chamfer* 15⁰. Ketiga yaitu sebesar 333,570⁰C yang dimiliki variasi diameter 2,5 cm sudut *chamfer* 30⁰. Keempat yaitu sebesar 306,390⁰C yang dimiliki variasi diameter 2 cm sudut *chamfer* 0⁰. Kelima yaitu sebesar 304,360⁰C yang dimiliki variasi diameter 2 cm sudut *chamfer* 15⁰. Keenam yaitu sebesar 221,290⁰C yang dimiliki variasi diameter 1,5 cm sudut *chamfer* 0⁰. Ketujuh yaitu sebesar 215,190⁰C yang dimiliki variasi diameter 1,5 cm sudut *chamfer* 15⁰. Kedelapan yaitu sebesar 209,580⁰C yang dimiliki variasi diameter 2 cm sudut *chamfer* 30⁰. Kemudian yang terakhir atau kesembilan yaitu sebesar 152,52⁰C yang dimiliki variasi diameter 1,5 cm sudut *chamfer* 30⁰.

Pada proses pengelasan tentunya terdapat daerah HAZ atau *heat affected zone*. Seperti yang telah dijelaskan pada tinjauan pustaka, untuk proses pengelasan *continous drive friction welding* terdapat tiga jenis daerah HAZ. Zpl atau *fully plasticized zone* yakni daerah HAZ yang mengalami deformasi plastis secara keseluruhan dan menyatu saat pengelasan yang terjadi setelah memasuki temperatur rekristalisasi (Adib, 2016), untuk material Al-6061 memasuki zpl pada temperatur sebesar 315,56⁰C dan untuk material SS-304 sebesar 537,78⁰C. Zpd atau *partly deformed zone* yakni daerah HAZ yang mengalami deformasi sebagian yang diakibatkan oleh proses pengelasan yang terjadi setelah memasuki temperatur deformasi plastis akibat panas (Sahin, 2006) dan pada pengelasan dua jenis logam yang berbeda akan mengakibatkan deformasi yang tidak simetris antara kedua benda kerjanya dikarenakan perbedaan temperatur cair yang berbeda (Khan, 2011). Pada material Al-6061 memasuki zpd pada temperatur sebesar 198⁰C dan untuk material SS-304 sebesar 457,1667⁰C. Zud atau *undeformed region* yakni daerah yang tidak terpengaruh panas sehingga tidak terjadi deformasi pada bagian tersebut karena belum memasuki temperatur deformasi plastis akibat panas, untuk material Al-6061 dibawah temperatur 198⁰C dan untuk material SS-304 dibawah temperatur 457,1667⁰C.

Nampak pada gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 untuk variasi diameter 1,5 cm dengan sudut *chamfer* 0° dan 15° , telah memasuki daerah zpd pada material Al-6061 di daerah yang telah memasuki temperatur 198°C pada material Al-6061. Sedangkan untuk variasi diameter 1,5 cm dengan sudut *chamfer* 30° belum memasuki temperatur daerah zpd pada material Al-6061 karena belum memasuki temperatur 198°C dan masih pada kondisi zud. Selain itu, nampak pada gambar 4.8, 4.9, dan 4.10 untuk variasi diameter 2 cm untuk semua variasi sudut *chamfer*, telah memasuki daerah zpd pada material Al-6061 di daerah yang telah memasuki temperatur 198°C . Kemudian nampak pada gambar 4.11, 4.12, dan 4.13 untuk variasi diameter 2,5 cm untuk semua variasi sudut *chamfer*, telah memasuki daerah zpd pada material Al-6061 yakni untuk daerah yang telah memasuki temperatur 198°C dan terdapat bagian yang telah memasuki daerah zpl untuk daerah yang telah memasuki temperatur $315,56^{\circ}\text{C}$.

Pada semua variasi diameter dan sudut *chamfer*, pada material SS-304 belum mengalami deformasi plastis atau belum memasuki daerah zpd atau masih pada daerah zud. Hal ini dikarenakan pada material SS-304 belum memasuki temperatur $457,1667^{\circ}\text{C}$. Oleh sebab itu, diperlukan *friction time* yang lebih lama pada setiap variasi agar mencapai temperatur yang dibutuhkan agar material SS-304 memasuki daerah zpd dan zpl.

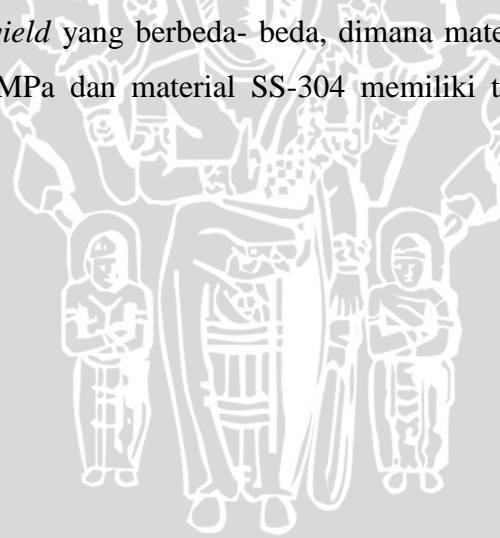
Kualitas pengelasan CDFW yang baik ditandai dengan menyatunya kedua benda kerja dengan *range* temperatur di antara temperatur rekristalisasi dan temperatur cair material yang digunakan. Pada penelitian ini, variasi yang memiliki kualitas yang baik yaitu pertama variasi diameter 2,5 cm sudut *chamfer* 0° , kedua variasi diameter 2,5 cm sudut *chamfer* 15° , ketiga variasi diameter 2,5 cm sudut *chamfer* 30° , sedangkan untuk variasi yang lain dibutuhkan *friction time* yang lebih lama agar dapat menyambung yakni sampai salah satu material telah mencapai temperatur rekristalisasinya. Hal tersebut berdasarkan penelitian sebelumnya (Lin *et al*, 1999) yang menyatakan bahwa semakin luas daerah zpl maka sambungan yang terbentuk akan semakin baik dan kekuatannya semakin tinggi.

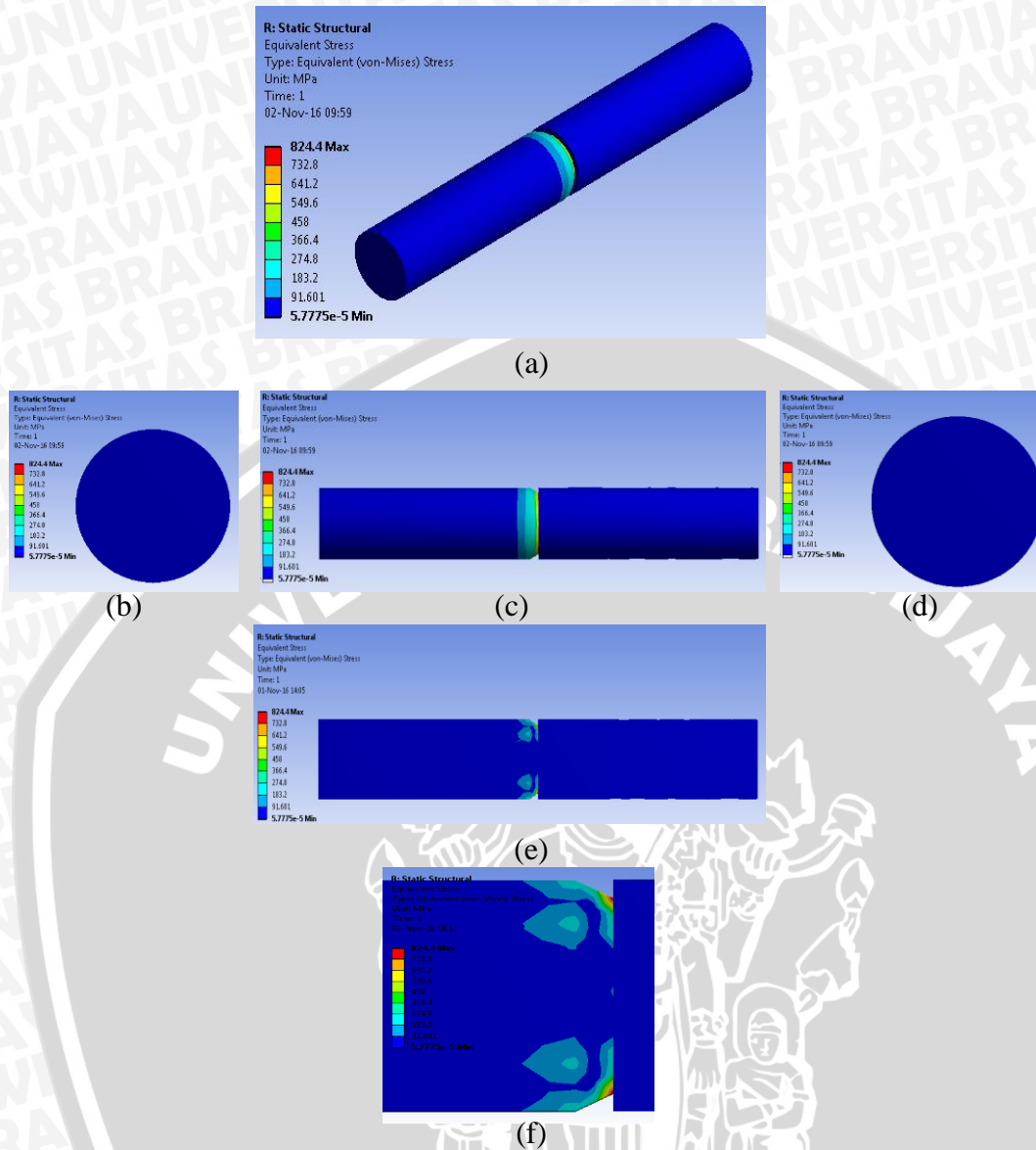
Pada gambar tersebut menginformasikan yakni nilai distribusi temperatur benda kerja SS-304 turun drastis dari temperatur maksimumnya daripada benda kerja AL-6061 yang temperaturnya turun lebih landai dari temperatur maksimumnya dan distribusi temperatur benda kerja SS-304 yang lebih rendah daripada benda kerja Al-6061. Perubahan temperatur dipengaruhi oleh *specific heat* ($\text{J/Kg}^{\circ}\text{C}$) yakni, besar energi yang dibutuhkan untuk menaikkan setiap 1°C per 1kg. Pada benda kerja Al-6061 memiliki *specific heat* yang lebih tinggi daripada benda kerja SS-304. Hal ini menyebabkan energi

yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur Al-6061 lebih tinggi daripada SS-304. Selain itu, perubahan temperatur juga dipengaruhi oleh konduktivitas termal (W/m^0C) yakni, kemampuan material untuk menghantarkan panas. Pada benda kerja Al-6061 memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi daripada benda kerja SS-304 yang menyebabkan kecepatan perpindahan panas yang terjadi pada Al-6061 lebih cepat daripada SS-304. Hal tersebutlah yang menyebabkan distribusi temperatur benda kerja Al-6061 lebih tinggi daripada benda kerja SS-304 dan tampak pada gambar 4.17 grafik distribusi temperatur SS-304 lebih curam daripada grafik distribusi temperatur Al-6061.

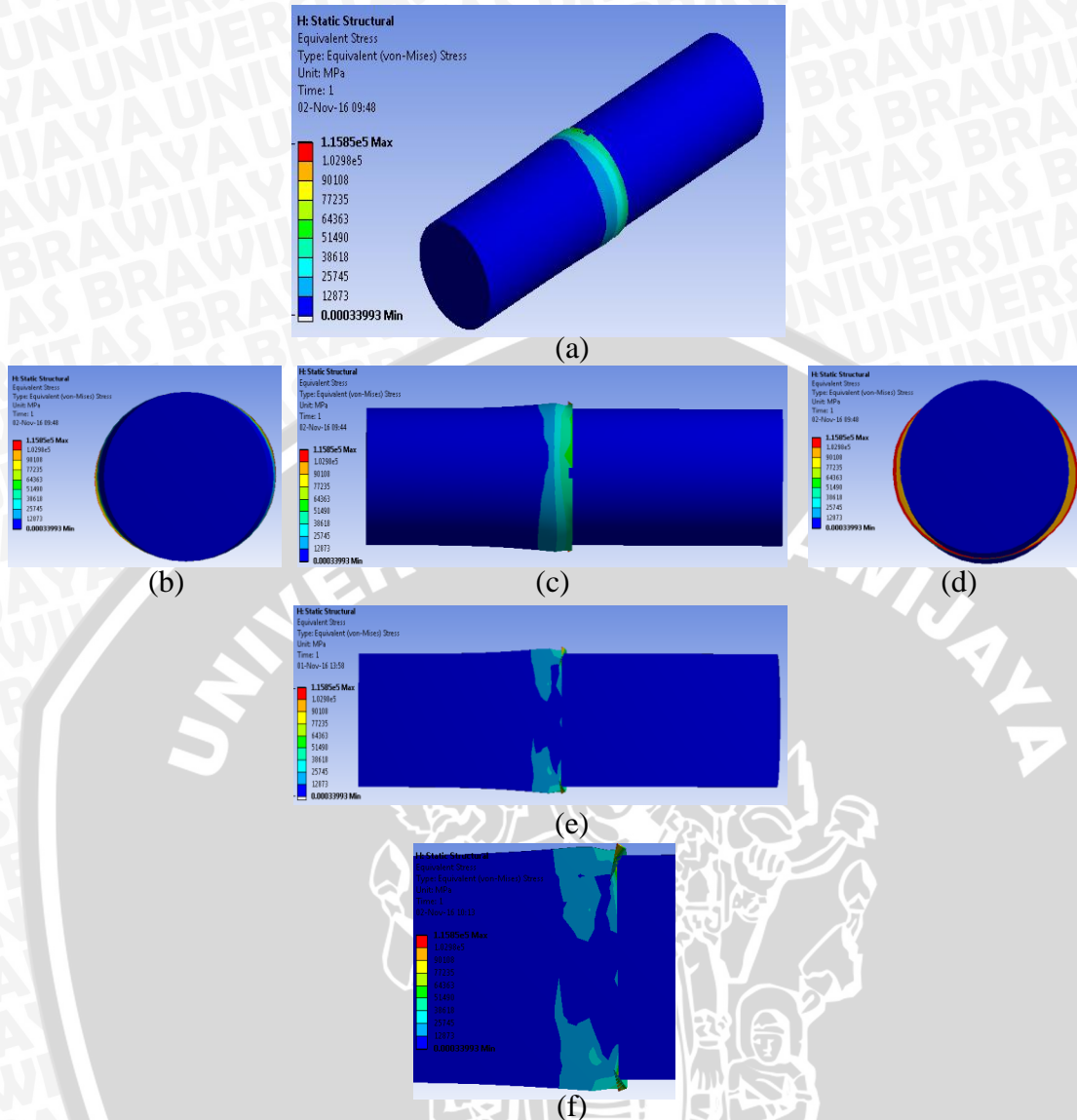
4.4 Analisa Pengaruh Diameter dan Sudut *Chamfer* Terhadap Distribusi Tegangan Benda Kerja

Pada sub bab berikut ini, akan dibahas mengenai pengaruh diameter dan sudut *chamfer* benda kerja terhadap distribusi tegangan pada benda kerja. Di dalam tabel di bawah ini, digambarkan distribusi tegangan benda kerja mulai dari ujung benda kerja pertama (Al-6061) sampai dengan ujung benda kerja kedua (SS-304). Kedua material tersebut memiliki tegangan *yield* yang berbeda- beda, dimana material Al-6061 memiliki tegangan *yield* sebesar 55,2MPa dan material SS-304 memiliki tegangan *yield* sebesar 215MPa.





Gambar 4.18 : Distribusi Tegangan Variasi Diameter 1,5 cm Sudut *Chamfer* 30⁰: (a) tampak isometri; (b) tampak kiri; (c) tampak depan; (d) tampak kanan; (e) tampak depan dengan dibelah arah *axial*; (f) tampak depan dengan dibelah arah *axial* dan diperbesar pada kedua permukaan benda kerja yang bergesekan.



Gambar 4.19 : Distribusi Tegangan Variasi Diameter 2,5 cm Sudut *Chamfer* 0° : (a) tampak isometri; (b) tampak kiri; (c) tampak depan; (d) tampak kanan; (e) tampak depan dengan dibelah arah *axial*; (f) tampak depan dengan dibelah arah *axial* dan diperbesar pada kedua permukaan benda kerja yang bergesekan.

Pada gambar 4.18, menggambarkan distribusi tegangan variasi diameter 1,5 cm sudut *chamfer* 30° . Variasi tersebut memiliki tegangan maksimum sebesar 824,4Mpa. Pada gambar 4.19, menggambarkan distribusi tegangan variasi diameter 2,5 cm sudut *chamfer* 0° . Variasi tersebut memiliki tegangan maksimum sebesar 115850Mpa. Nampak pada kedua gambar tersebut, material Al-6061 mengalami tegangan lebih besar daripada material SS-304.

Pada variasi diameter 1,5 cm sudut *chamfer* 30° , pada material Al-6061 memiliki bagian yang mengalami tegangan maksimum sehingga telah melewati tegangan *yield* Al-6061, yakni terletak di penampang luar di sekitar permukaan yang bergesekan. Hal tersebut

menyebabkan terjadinya deformasi plastis yang lebih kecil daripada variasi diameter 2,5 cm sudut *chamfer* 0^0 . Pada variasi diameter 2,5 cm sudut *chamfer* 0^0 memiliki tegangan maksimum yang cukup besar pada material Al-6061 sehingga menyebabkan deformasi plastis yang cukup besar. Hal tersebut juga menggambarkan tentang daerah zpd dan zpl pada variasi tersebut. Seperti yang dijelaskan pada sub bab sebelumnya, bahwa semakin luas daerah zpl maka sambungan yang terbentuk akan semakin baik dan kekuatannya semakin tinggi (Lin *et all*,1999).



