

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah proses penyambungan pipa tembaga dengan metode *continuous drive friction welding* (CDFW) selesai, selanjutnya melakukan pengukuran, pengamatan, pengujian struktur mikro, kekerasan, dan kekuatan tarik pada spesimen hasil sambungan las. Data dari pengujian tersebut akan ditampilkan dalam bab ini beserta analisis dan pembahasannya.

4.1 Hasil Pengelasan Gesek Pipa Tembaga

Berikut adalah sampel hasil dari pengelasan gesek pipa tembaga menggunakan metode *continuous drive friction welding*. Parameter yang digunakan dalam pengelasan ini adalah tekanan gesek 30 MPa, 35 MPa, 40 MPa dengan waktu gesek 1 detik dan tekanan tempa 50 MPa dengan waktu tempa 5 detik .



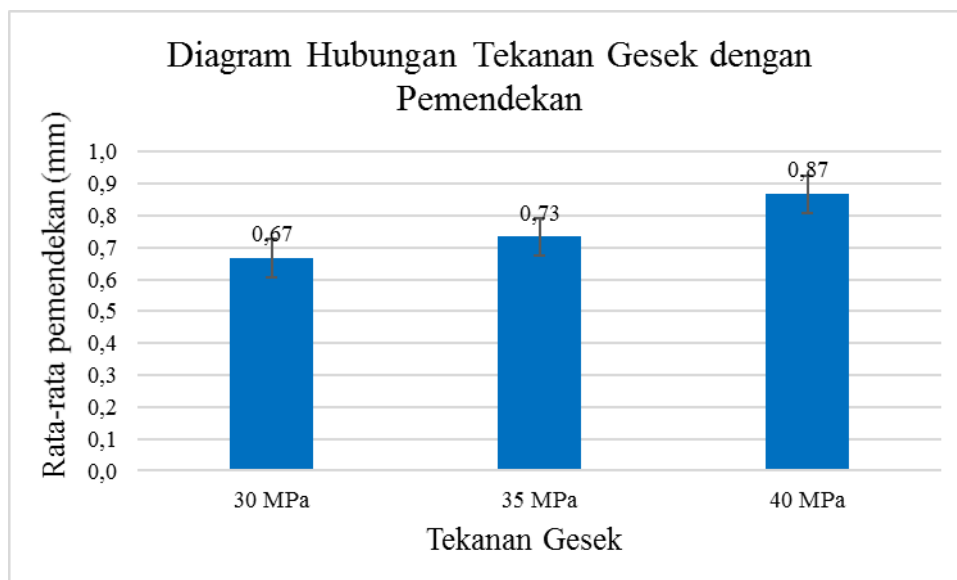
Gambar 4.1 Spesimen hasil pengelasan gesek dengan tekanan pada pipa tembaga ukuran 7/8": (A) 30 MPa, (B) 35 MPa, (C) 40 MPa

Gambar 4.1 menunjukkan hasil pengelasan gesek pipa tembaga. Dengan meningkatnya tekanan gesek, rata-rata pemedekan yang terjadi juga semakin besar (lihat tabel 4.1) meskipun *flash* yang dihasilkan tampak sama. Hal ini disebabkan oleh durasi gesekan yang sangat cepat yaitu 1 detik. Durasi 1 detik digunakan karena sifat tembaga yang lunak, sehingga pada kecepatan gesek 1000 rpm dengan waktu gesek 1 detik tembaga sudah mencapai kondisi termoplastis.

Tabel 4.1 Rata-rata Pemendekan Setelah Proses Pengelasan Gesek Kontinu

No	Tekanan Gesek (MPa)	Panjang Awal (mm)	Panjang Setelah Pengelasan (mm)	Pemendekan (mm)	Rata-Rata Pemendekan (mm) \pm SD
1	30	150,3	149,7	0,6	0,67 \pm 0,058
2		146,6	145,9	0,7	
3		152,5	151,8	0,7	
4	35	154,5	153,8	0,7	0,73 \pm 0,058
5		154,8	154,1	0,7	
6		150,2	149,4	0,8	
7	40	150,5	149,5	1	0,87 \pm 0,11
8		150,9	150,1	0,8	
9		150,4	149,6	0,8	

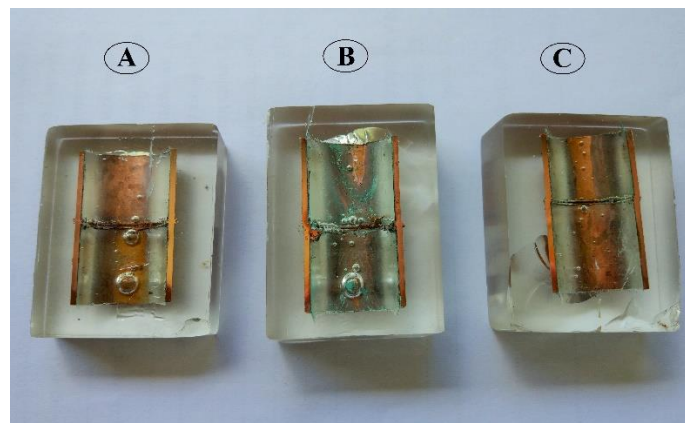
Jumlah spesimen hasil pengelasan gesek sebanyak 9 kali dengan 3 kali pengelasan dalam satu variasi tekanan gesek. Setelah dilakukan pengukuran terlihat rata-rata pemendekan meningkat seperti ditunjukkan pada tabel 4.1, sehingga didapat diagram hubungan antara variasi tekanan dengan rata-rata pemendekan.

**Gambar 4.2** Diagram hubungan antara tekanan gesek dengan rata-rata pemendekan

Gambar 4.2 menunjukkan hubungan antara pemendekan dengan tekanan gesek material setelah dilakukan pengelasan gesek. Material yang paling banyak mengalami pemendekan yaitu pada tekanan 40 MPa. Hal ini karena semakin naik tekanan gesek maka semakin cepat menaikkan suhu pada *interface* tembaga sehingga deformasi plastis juga semakin cepat. Dapat disimpulkan bahwa semakin besar tekanan gesek yang digunakan maka pemendekan juga akan semakin besar.

4.2 Hasil Pengujian Makro dan Mikro

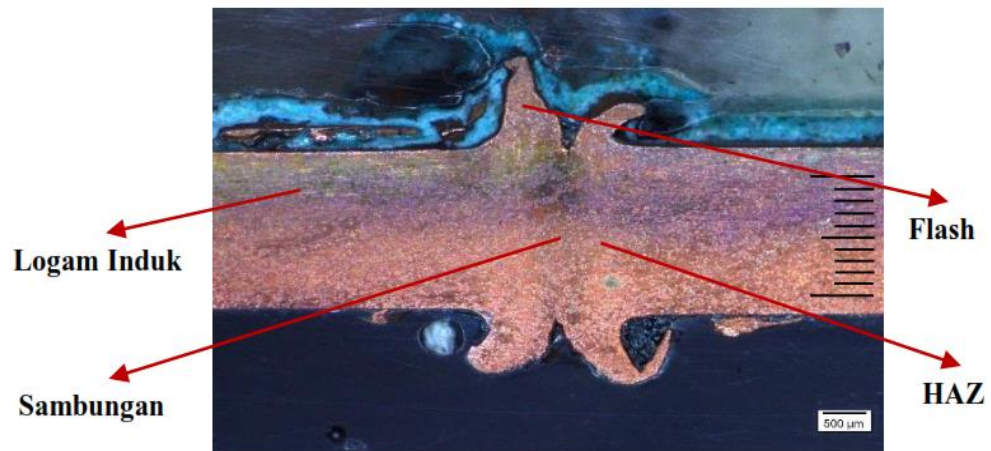
Spesimen yang telah berhasil disambung dengan pengelasan gesek kemudian dipotong dan dibelah menjadi dua bagian dengan gergaji, kemudian diresin. Setelah itu, permukaan spesimen yang akan diuji diampelas, dipoles dan dilakukan pengetsaan pada masing-masing spesimen untuk pengujian makro dan mikro. Berikut adalah spesimen yang akan digunakan untuk pengujian struktur mikro:



Gambar 4.3 Spesimen pengujian struktur mikro dan kekerasan: (A) 30 MPa, (B) 35 MPa, (C) 40 MPa.

4.2.1. Hasil Foto Makro

Pengambilan foto makro dilakukan pada daerah sambungan spesimen hasil pengelasan gesek dengan perbesaran 50x. Dari foto makro dapat diketahui pembagian daerah lasan pada sambungan pipa tembaga.



Gambar 4.4 Hasil foto makro pada sambungan pipa tembaga

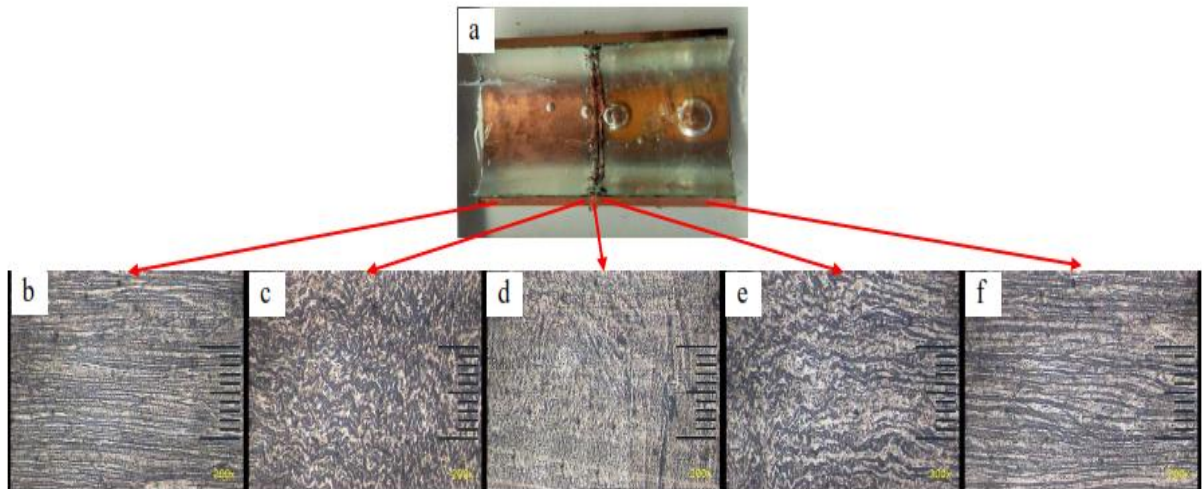
Pada gambar 4.3 terdapat 4 daerah yang terlihat dari hasil foto makro yaitu daerah sambungan las, daerah HAZ (*heat affected zone*), *flash*, dan daerah logam induk. Daerah sambungan adalah daerah yang mengalami termoplastis dan deformasi plastis akibat panas pengelasan dan tekanan. Daerah HAZ merupakan daerah yang terpengaruh panas yang berasal dari pengelasan. *Flash* adalah logam yang keluar dari daerah sambungan akibat tekanan setelah mencapai kondisi termoplastis. Daerah logam induk adalah logam dasar yang tidak terpengaruh panas dan tekanan gesek dari pengelasan.

4.2.2. Hasil pengujian Struktur Mikro

Pengujian mikro bertujuan untuk mengetahui perubahan struktur mikro pada material pipa tembaga setelah dilakukan pengelasan gesek dengan metode las gesek kontinu. Pengujian struktur mikro dilakukan pada masing-masing spesimen dengan variasi tekanan gesek 30 MPa, 35 MPa, dan 40 MPa.

Pengujian struktur mikro menggunakan perbesaran 200x. Dari foto struktur mikro, maka pembagian daerah pengaruh las gesek dapat diketahui. Daerah pengaruh lasan yang dapat diidentifikasi antara lain daerah sambungan, HAZ, dan logam induk.

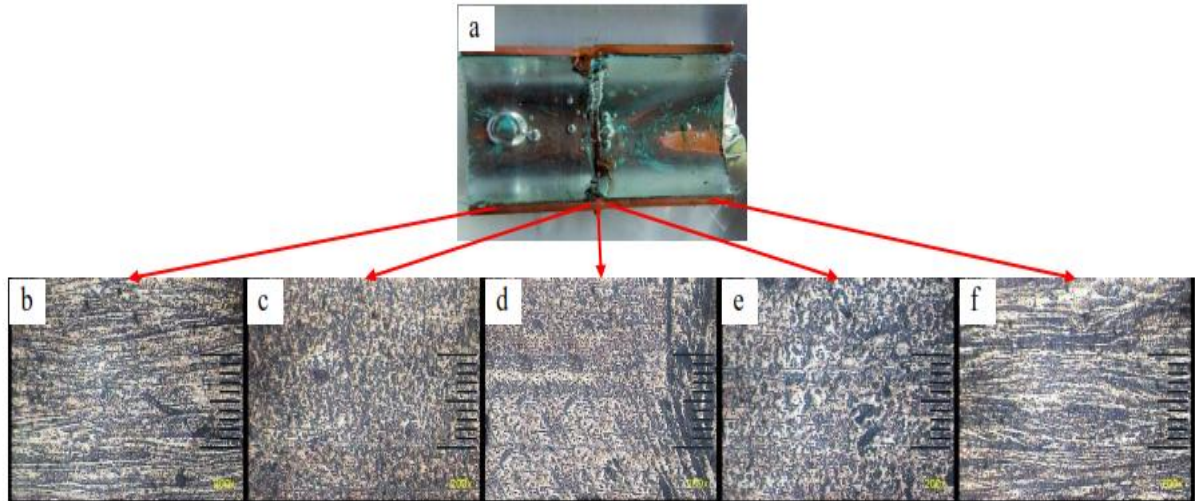
a. Hasil pengujian mikro struktur pada tekanan gesek 30 MPa



Gambar 4.5 (a) Benda uji spesimen 30 Mpa; (b) Daerah logam induk putar; (c) Daerah HAZ putar; (d) Daerah sambungan; (e) Daerah HAZ diam; dan (f) Daerah logam induk diam

Pada gambar 4.5 Gambar (a) merupakan spesimen benda uji dengan variasi tekanan gesek 30 MPa yang akan dilakukan pengamatan struktur mikro; Gambar (b) dan (f) menunjukkan struktur mikro pada daerah logam induk putar dan diam terlihat memiliki butiran lebih besar dan jaraknya saling berjauhan; Gambar (d) memperlihatkan dengan jelas daerah sambungan memiliki ukuran butir struktur mikro yang paling kecil dan rapat dibandingkan daerah HAZ dan logam induk. Karena pada daerah sambungan mengalami rekristalisasi penuh yang menghasilkan butir struktur mikro yang halus dan rapat; Gambar (c) dan (e) merupakan daerah HAZ putar dan diam, terlihat pada daerah ini memiliki ukuran butir struktur mikro yang lebih besar dan renggang dibandingkan dengan daerah sambungan dan memiliki ukuran butiran yang lebih kecil dan rapat dibandingkan daerah logam induk. Namun, pada HAZ diam butir struktur mikronya mirip dengan struktur mikro logam induk. Hal ini karena pada tekanan 30 MPa pengaruh panas yang diterima pada HAZ diam hanya sedikit.

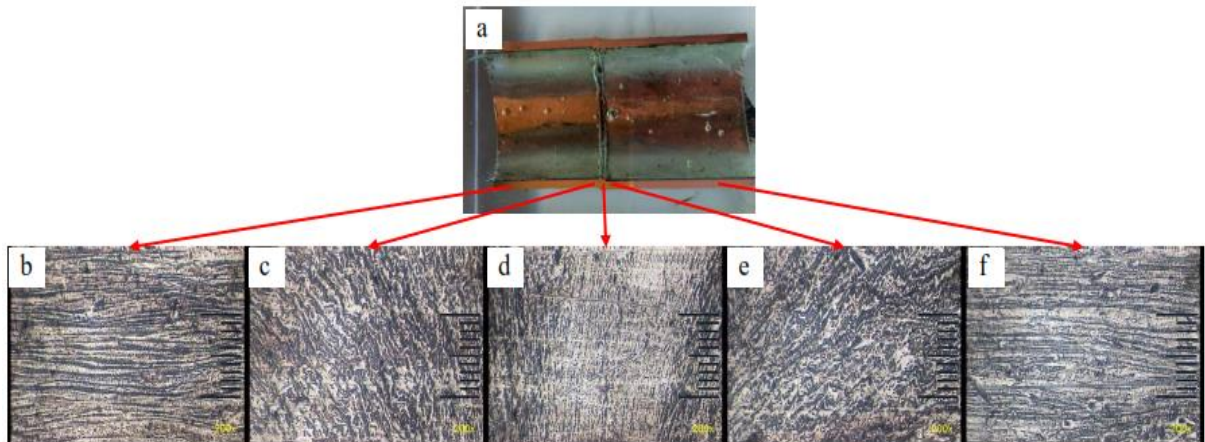
b. Hasil pengujian struktur mikro tekanan gesek 35 MPa



Gambar 4.6 (a) Benda uji spesimen 35 Mpa; (b) Daerah logam induk putar; (c) Daerah HAZ putar; (d) Daerah sambungan; (e) Daerah HAZ diam; dan (f) Daerah logam induk diam

Pada gambar 4.6 Gambar (a) merupakan spesimen benda uji dengan variasi tekanan gesek 35 MPa yang akan dilakukan pengamatan struktur mikro; Gambar (b) dan (f) adalah hasil struktur mikro pada daerah logam induk putar dan diam yang memiliki butiran lebih besar dan jaraknya saling berjauhan; Gambar (d) menunjukkan dengan jelas daerah sambungan memiliki ukuran butir struktur mikro yang lebih halus dan rapat dibandingkan daerah HAZ dan logam induk; Gambar (c) dan (e) merupakan daerah HAZ putar dan diam, terlihat pada HAZ putar memiliki butir struktur mikro yang lebih kecil dan rapat dibanding HAZ diam. Hal ini karena pada tekanan 35 MPa pengaruh panas yang diterima HAZ putar lebih lebih besar dibanding dengan HAZ diam.

c. Hasil pengujian struktur mikro tekanan gesek 40 MPa



Gambar 4.7 (a) Benda uji spesimen 40 Mpa; (b) Daerah logam induk putar; (c) Daerah HAZ putar; (d) Daerah sambungan; (e) Daerah HAZ diam; dan (f) Daerah logam induk diam

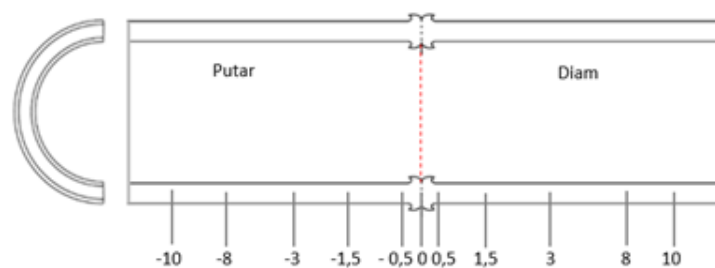
Pada gambar 4.7 Gambar (a) merupakan spesimen benda uji dengan variasi tekanan gesek 40 MPa yang akan dilakukan pengamatan struktur mikro; Gambar (b) dan (f) butir struktur mikro pada daerah logam induk berputar dan diam pada tekanan 40 MPa sama dengan tekanan 30 MPa dan 35 MPa, terlihat lebih besar dan jaraknya saling berjauhan; Gambar (d) menunjukkan dengan jelas daerah sambungan memiliki ukuran butir struktur mikro yang paling kecil dan rapat dibandingkan daerah HAZ dan logam induk. Karena daerah sambungan mengalami rekristalisasi penuh yang menghasilkan butir yang halus dan rapat; Gambar (c) dan (e) merupakan daerah HAZ berputar dan diam, terlihat pada daerah HAZ putar memiliki ukuran butir struktur mikro yang hampir sama dengan HAZ diam. Hal ini karena pada tekanan 40 MPa pengaruh panas yang diterima HAZ putar dan diam hampir sama.

Tipikal daerah sambungan las pada penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Nugroho dkk, (2016). Dari hasil pengujian struktur mikro variasi tekanan gesek 30, 35 dan 40 MPa dapat disimpulkan bahwa pada daerah pusat las atau sering disebut *weld centre zone* (WCZ) tekanan gesek 40 MPa menghasilkan butir struktur mikro yang lebih halus dan rapat dibandingkan dengan daerah WCZ tekanan gesek 30 MPa dan 35 MPa. Hal ini disebabkan

tekanan gesek yang besar mengakibatkan panas pengelasan yang semakin tinggi, sehingga terjadi rekristalisasi penuh yang membuat butir struktur mikro pada daerah WCZ variasi tekanan gesek 40 MPa ini lebih halus dan rapat daripada variasi tekanan gesek lainnya. Pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) tekanan gesek 30 MPa dan 35 MPa, menunjukkan butir struktur mikro pada HAZ putar lebih kecil dan rapat dibanding HAZ diam karena pengaruh panas yang diterima HAZ putar lebih besar dibanding HAZ diam. Namun pada tekanan 40 MPa, daerah HAZ putar dan HAZ diam memiliki butir struktur mikro yang mirip karena pengaruh panas yang diterima HAZ putar dan HAZ diam hampir sama. Pengaruh panas yang diterima dari pengelasan menyebabkan rekristalisasi sebagian pada daerah HAZ sehingga butir struktur mikronya lebih besar dibanding daerah WCZ. Pada daerah logam induk atau *base metal* tidak terjadi perubahan struktur mikro dari ketiga pengujian yang telah dilakukan. Hal ini karena logam induk tidak terpengaruh panas dari pengelasan gesek.

4.3 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk melihat nilai kekerasan pada daerah WCZ, HAZ dan logam induk. Pada pengujian kekerasan ini diambil 11 titik di setiap variasi tekanan gesek. Posisi titik pengujian dapat dilihat pada gambar 4.8.



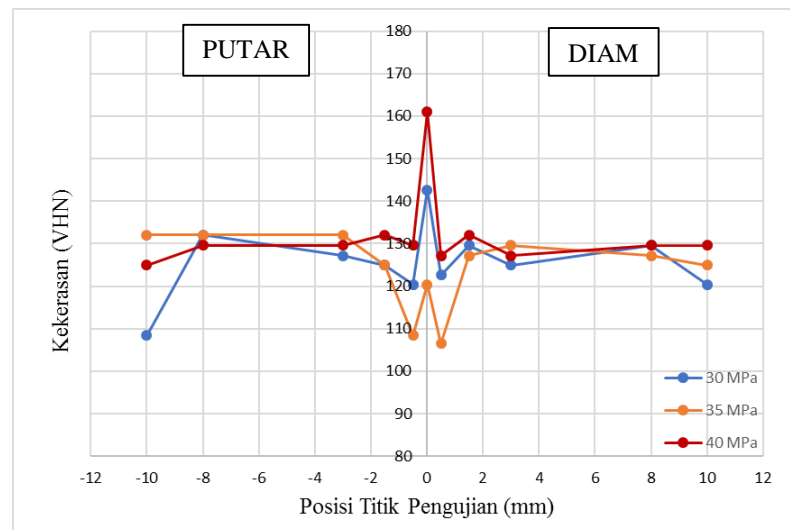
Gambar 4.8 Posisi titik pengujian kekerasan (mm).

Setelah dilakukan pengujian kekerasan pada masing-masing spesimen, nilai kekerasan dari proses penyambungan las gesek bahan pipa tembaga dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kekerasan Sambungan Pipa Tembaga

No	Variasi Tekanan Gesek	Jarak dari Sambungan	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d rata-rata (μm)	Kekerasan (VHN)	
1	30 MPa	Putar	-10	57	60	58,5	108,4
			-8	53	53	53	132
			-3	54	54	54	127,2
			-1,5	56	53	54,5	124,9
			-0,5	56	55	55,5	120,4
		Sambungan	0	51	51	51	142,6
		Diam	0,5	55	55	55	122,6
			1,5	54	53	53,5	129,6
			3	56	53	54,5	124,9
			8	53	54	53,5	129,6
10	56		55	55,5	120,4		
No	Variasi Tekanan Gesek	Jarak dari Sambungan	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d rata-rata (μm)	Kekerasan (VHN)	
2	35 MPa	Putar	-10	52	54	53	132
			-8	53	53	53	132
			-3	53	53	53	132
			-1,5	55	54	54,5	124,9
			-0,5	59	58	58,5	108,4
		Sambungan	0	56	55	55,5	120,4
		Diam	0,5	59	59	59	106,5
			1,5	55	53	54	127,2
			3	53	54	53,5	129,6
			8	54	54	54	127,2
10	55		54	54,5	124,9		
No	Variasi Tekanan Gesek	Jarak dari Sambungan	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d rata-rata (μm)	Kekerasan (VHN)	
3	40 MPa	Putar	-10	54	55	54,5	124,9
			-8	54	53	53,5	129,6
			-3	53	54	53,5	129,6
			-1,5	53	53	53	132
			-0,5	54	53	53,5	129,6
		Sambungan	0	49	47	48	161
		Diam	0,5	54	54	54	127,2
			1,5	53	53	53	132
			3	54	54	54	127,2
			8	53	54	53,5	129,6
10	53		54	53,5	129,6		

Untuk memudahkan analisis dan pembahasan, maka akan ditampilkan grafik nilai kekerasan terhadap jarak sambungan pada hasil penyambungan las gesek bahan pipa tembaga dengan variasi tekanan gesek 30 MPa, 35 MPa, 40 MPa. Grafik hasil uji kekerasan dapat dilihat pada gambar 4.8 sebagai berikut:



Gambar 4.9 Grafik nilai kekerasan pada sambungan pipa tembaga

Gambar 4.9 menunjukkan grafik nilai kekerasan sambungan las pipa tembaga setiap variasi tekanan gesek. Nilai kekerasan tertinggi terdapat pada sambungan las tekanan gesek 40 MPa sebesar 161 VHN dan nilai kekerasan terendah terdapat pada sambungan las tekanan gesek 35 MPa sebesar 120,4 VHN. Hal ini berbanding lurus dengan hasil struktur mikronya karena pada daerah sambungan las ketiga spesimen, tekanan gesek 40 MPa memiliki butir paling halus dan rapat sedangkan tekanan gesek 35 MPa memiliki butir yang paling besar dan renggang. Dapat disimpulkan bahwa nilai kekerasan meningkat seiring semakin halus dan rapat butir struktur mikronya. Untuk nilai kekerasan terendah pada logam tembaga terjadi pada daerah HAZ. Daerah HAZ mengalami pelunakan logam yang disebabkan oleh pengaruh panas pengelasan yang timbul.

Dari hasil nilai kekerasan maka dapat disimpulkan bahwa tekanan gesek mempengaruhi nilai kekerasan pada sambungan tembaga. Nilai kekerasan yang paling tinggi terdapat pada tekanan 40 MPa dan nilai kekerasan yang paling rendah terdapat pada tekanan 35 MPa. Kurt dkk, (2011) berpendapat bahwa secara umum nilai kekerasan meningkat

dengan meningkatnya tekanan gesek dan tekanan tempa, tetapi kekerasan dapat menurun dengan semakin lamanya durasi waktu tempa. Pernyataan tersebut berbanding terbalik pada penelitian ini, karena waktu gesek yang digunakan pada penelitian ini cukup singkat yaitu 1 detik. Sehingga dengan waktu gesek yang singkat maka peningkatan variasi tekanan gesek tidak berpengaruh nilai kekerasan yang didapat.

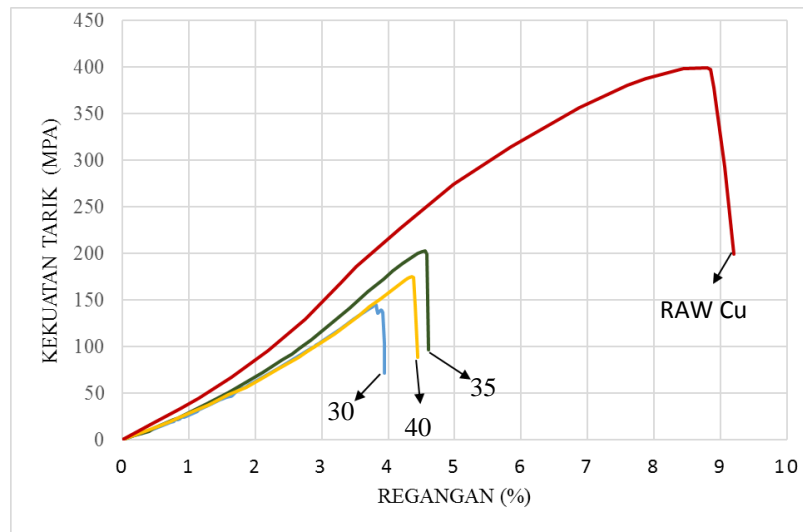
4.4 Hasil Pengujian Kekuatan Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik pada sambungan las gesek material tembaga. Pengujian tarik dilakukan 3 kali pengujian pada masing-masing spesimen variasi tekanan gesek. Sebelum melakukan pengujian tarik, spesimen akan dibentuk sesuai standar spesimen uji tarik yaitu JIZ Z 2201 no. 14C.



Gambar 4.10 Spesimen uji tarik, (A) 30 MPa, (B) 35 MPa, (C) 40 MPa, dan (D) Raw material tembaga

Material tembaga yang telah berhasil disambung dengan pengelasan gesek kemudian dibubut untuk menghilangkan *flash*nya. *Flash* dibuang agar mempermudah pengamatan patahan spesimen saat pengujian tarik. Gambar 4.10 menunjukkan spesimen yang sudah melalui proses pemesinan hingga terbentuk spesimen uji tarik sesuai standar. Selanjutnya, dilakukan pengujian tarik pada masing-masing spesimen. Hasil nilai kekuatan tarik dapat dilihat pada gambar 4.11.



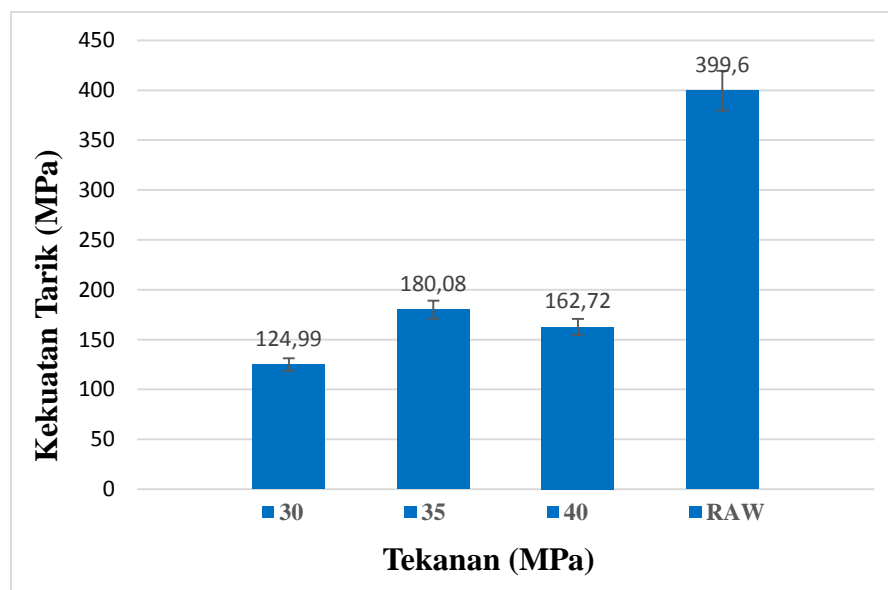
Gambar 4.11 Grafik Hasil Pengujian Tarik

Pada gambar 4.10 kekuatan tarik yang paling tinggi dihasilkan oleh raw material tembaga yaitu sebesar 399,6 MPa dengan regangan sebesar 9,2 %. Kekuatan tarik meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan gesek dan menurun akibat tekanan tempa yang dialami oleh spesimen variasi tekanan gesek 40 MPa. Meskipun setiap spesimen dibebani dengan tekanan tempa yang besarnya sama tetapi pada tekanan 40 MPa terjadi deformasi plastis yang berlebih. Hal ini yang menyebabkan struktur mikro pada tekanan gesek 40 MPa yang mengalami penyempurnaan didekat interface (daerah WCZ) hilang menjadi *flash* yang berlebih dan berakibat pada lemahnya sambungan.

Tabel 4.3 Nilai kekuatan tarik dan regangan

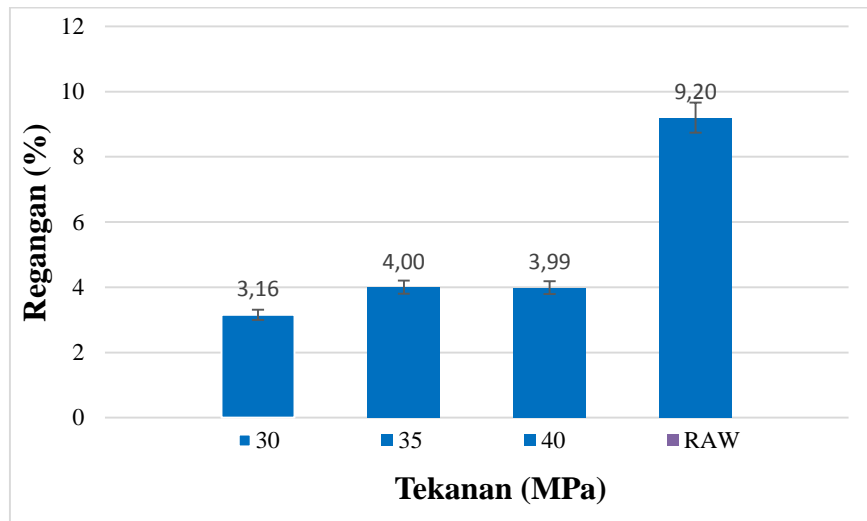
No.	Tekanan Gesek (MPa)	Kekuatan Tarik (MPa)	Regangan (%)	Rata-rata	
				Kekuatan Tarik (MPa) \pm SD	Regangan (%) \pm SD
1	30	131,76	3,14	124,99 \pm 23,77	3,16 \pm 0,79
2		144,64	3,96		
3		98,56	2,38		
4	35	177,13	3,88	180,08 \pm 23,21	4 \pm 0,58
5		160,48	3,49		
6		202,64	4,63		
7	40	175,37	4,47	162,72 \pm 12,02	3,99 \pm 0,42
8		161,36	3,83		
9		151,43	3,68		
10	RAW Cu	399,6	9,20	399,6	9,20

Data hasil pengujian tarik dari tiga kali pengujian pada masing-masing spesimen variasi tekanan gesek ditunjukkan pada tabel 4.3. Tekanan gesek 35 MPa menghasilkan rata-rata kekuatan tarik tertinggi. Meskipun rata-rata kekuatan tariknya tinggi tetapi standar deviasinya nya juga tinggi, sehingga hasil kekuatan tariknya tidak konsisten. Tekanan gesek 40 MPa menghasilkan kekuatan tarik yang lebih konsisten karena memiliki standar deviasi yang lebih rendah dibanding dengan tekanan gesek 30 dan 35 MPa.



Gambar 4.12 Diagram kekuatan tarik rata-rata terhadap variasi tekanan gesek

Gambar 4.11 menunjukkan hasil kekuatan tarik dari sambungan las pipa tembaga variasi tekanan gesek 30 MPa, 35 MPa, 40 MPa dan RAW. Dapat diamati bahwa kekuatan tarik tertinggi dihasilkan oleh spesimen dengan tekanan gesek 35 MPa yaitu sebesar 180,08 MPa, disusul dengan spesimen dengan tekanan gesek 40 MPa sebesar 162,72 MPa, lalu spesimen dengan tekanan gesek 30 MPa sebesar 124,99 MPa. Dapat disimpulkan bahwa kekuatan tarik paling optimal didapat pada variasi tekanan gesek 35 MPa. Pada tekanan gesek 35 MPa tembaga mengalami perubahan struktur mikro sehingga kekuatan tarik meningkat. Tetapi tembaga mengalami deformasi plastis yang berlebih pada tekanan 40 MPa lalu terkena tekanan tempa sehingga kekuatan tarik pada *interface* sambungan melemah. Kekuatan tarik pada sambungan las gesek tembaga masih rendah dari kekuatan tarik *raw material* tembaga yaitu sekitar 55% dari *raw material* tembaga.

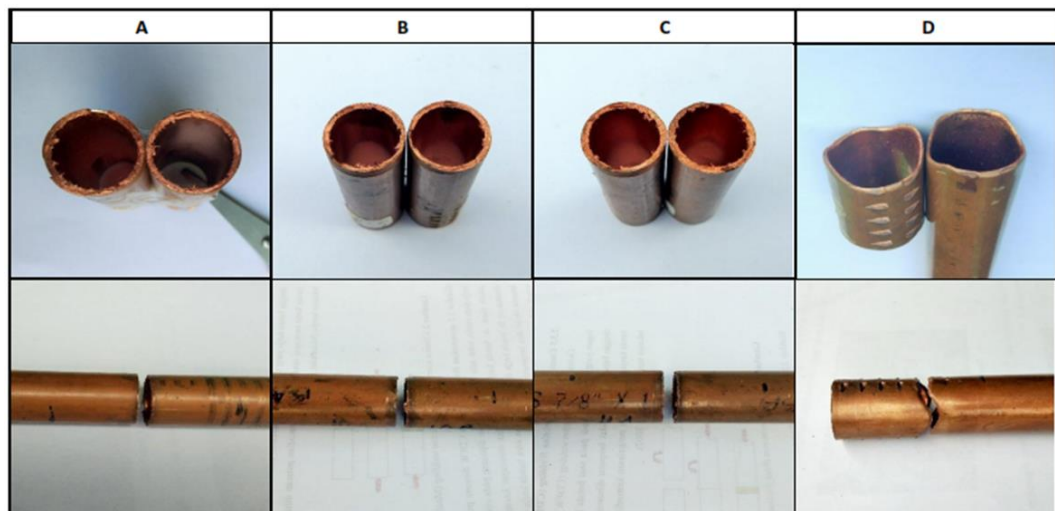


Gambar 4.13 Diagram regangan rata- rata terhadap variasi tekanan gesek

Gambar 4.12 menunjukkan nilai regangan tertinggi pada daerah sambungan pengelasan gesek terjadi pada variasi tekanan gesek 35 MPa. Nilai regangan pada variasi tekanan gesek 35 MPa yaitu 4%, namun nilai regangan ini masih lebih kecil dari nilai regangan pada raw material yang memiliki nilai regangan sebesar 9,2%. Hal ini karena pada sambungan hasil pengelasan gesek mengalami patah tepat di daerah sambungan yang merupakan daerah terkena panas pengelasan dan terjadi perubahan struktur mikro, sehingga menyebabkan kekuatan tariknya menurun. Dapat disimpulkan bahwa nilai regangan berbanding lurus dengan hasil kekuatan tarik. Semakin besar nilai regangan semakin besar pula kekuatan tariknya.

Gambar 4.13 menunjukkan detail patahan dari raw tembaga dan masing-masing spesimen variasi tekanan gesek sambungan pipa tembaga. Terlihat patahan pada semua variasi spesimen las gesek terletak pada sambungan. Namun, patahan pada material raw terletak pada bagian yang dicekam. Hal ini terjadi karena bagian material raw yang dicekam mengalami luka akibat gerigi pada cekam. Sehingga saat beban tarik semakin meningkat, luka pada raw material juga semakin dalam dalam lebar. Inilah yang menyebabkan patahan raw material tidak tepat di tengah *gauge*.

Patahan yang terjadi pada variasi tekanan gesek 30, 35 dan 40 MPa (gambar 4.13) tidak mengalami *necking* atau penyempitan area penampang. Hal ini menunjukkan sifat dari sambungan pengelasan gesek pipa tembaga bersifat getas. Berbeda dengan patahan yang terjadi pada raw material pipa tembaga yang mengalami *necking* sebelum terjadinya patahan. Hal ini menunjukkan bahwa sifat raw material pipa tembaga bersifat ulet. Gambar 12 menunjukkan regangan rata-rata pada variasi tekanan gesek dan raw material. Tekanan gesek 30, 35 dan 40 MPa memiliki regangan yang kecil dibandingkan dengan regangan pada raw material tembaga. Dari patahan sambungan las dan nilai regangan membuktikan bahwa pada sambungan las dengan tekanan gesek 30, 35 dan 40 MPa memiliki sifat getas.



Gambar 4.14 Foto patahan hasil uji tarik pada sambungan pipa tembaga (A) 30 MPa, (B) 35 MPa, (C) 40 MPa dan (D) RAW Cu