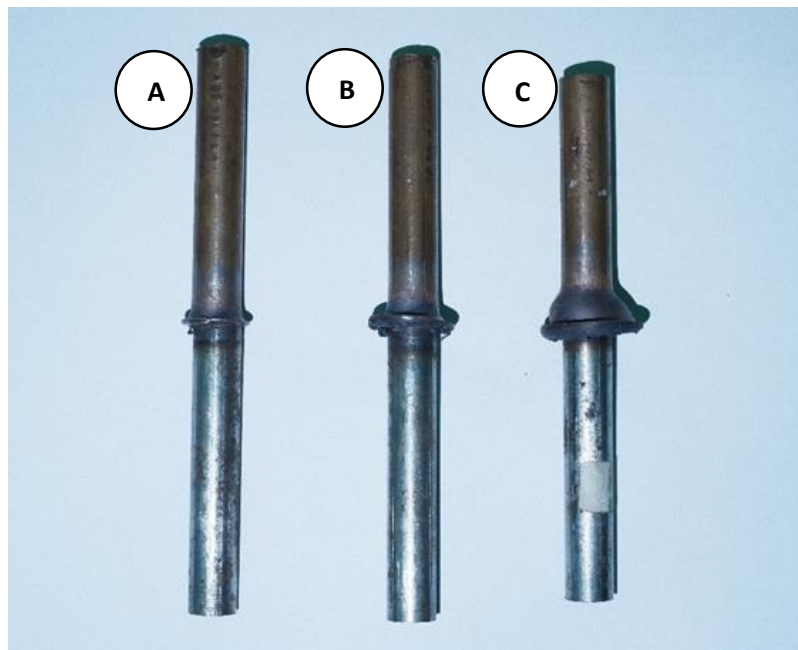


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah proses penyambungan dissimilar pejal tembaga-baja dengan metode *continuous drive friction welding* 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.

1.1 Hasil Pengelasan Gesek Dissimilar Pejal Tembaga-Baja

Berikut adalah sampel hasil dari pengelasan gesek dissimilar pejal tembaga-baja. Pengelasan ini menggunakan metode *continuous drive friction welding*. Parameter yang digunakan dalam pengelasan ini adalah tekanan gesek 30 MPa, 35 MPa, 40 MPa lalu tekanan tempa 80 MPa dan waktu gesek 5 detik.



Gambar 4.1 Contoh spesimen pengelasan gesek dengan tekanan (A) 30 MPa, (B) 35 MPa, (C) 40 MPa

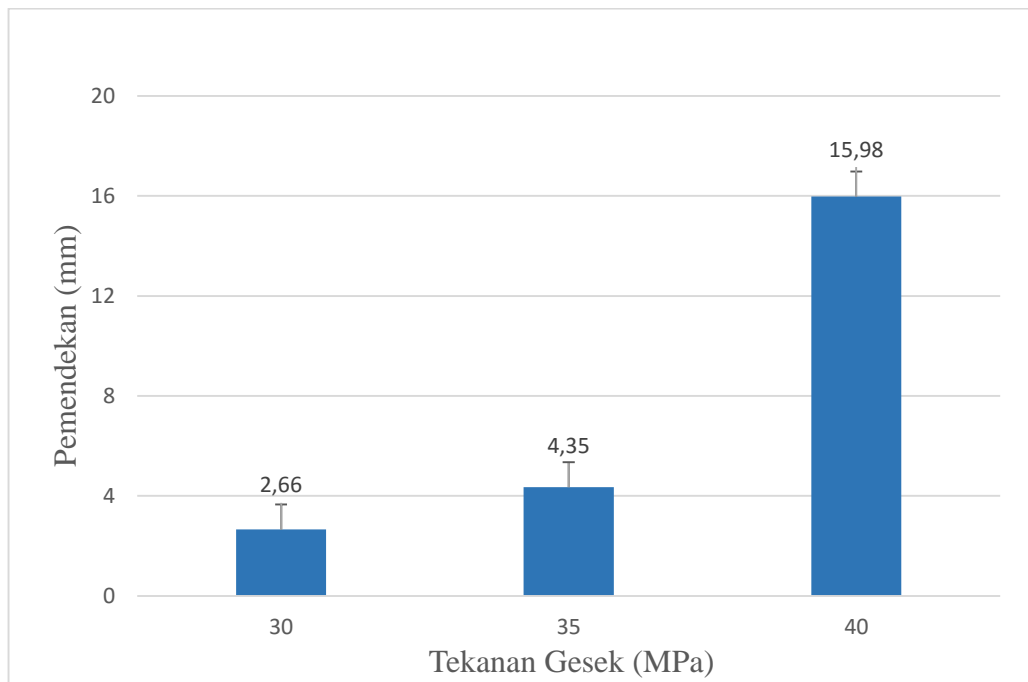
Gambar 4.1 hasil pengelasan gesek dissimilar silinder pejal tembaga-baja. Dengan meningkatnya tekanan gesek maka *flash* yang dihasilkan juga semakin

lebar. Hal ini juga disebabkan oleh durasi gesekan yang relatif lama yaitu 5 detik. Durasi 5 detik digunakan untuk melihat tingkat difusivitas baja dalam sambungan, karena difusivitas baja jauh lebih tinggi daripada tembaga. Semakin lama waktu gesekan maka suhu yang diperoleh akibat gesekan juga akan semakin naik. Selanjutnya spesimen masing-masing variasi hasil pengelasan akan diukur panjang dan pemendekan yang terjadi.

Tabel 4.1 Rata-rata Pemendekan Setelah Pengelasan Gesek.

No	Tekanan Gesek (MPa)	Panjang Awal (mm)		Panjang Setelah Pengelasan (mm)	Pemendekan (mm)	Rata-Rata Pemendekan (mm)
		Baja	Tembaga			
1	30	75,2	75,34	148,16	2,38	2,66±
2	30	75,5	75,46	148,24	2,72	
3	30	75,7	75,66	148,48	2,88	
4	35	75,44	75,2	145,6	5,04	4,35±
5	35	74,86	75,88	146,08	4,66	
6	35	75,3	77,02	148,96	3,36	
7	40	75,52	84,5	145,72	14,3	15,98±
8	40	75,3	84,82	143,4	16,72	
9	40	75,18	85,46	143,72	16,92	

Tabel 4.1 memperlihatkan jumlah spesimen pengelasan sebanyak 9 kali, dengan 3 kali pengelasan dalam satu variasi tekanan gesek. Setelah dilakukan pengukuran maka dari tabel 4.1 didapat grafik hubungan antara variasi tekanan dengan rata-rata pemendekan.



Gambar 4.2 Grafik hubungan tekanan gesek dengan pemendekan setelah pengelasan

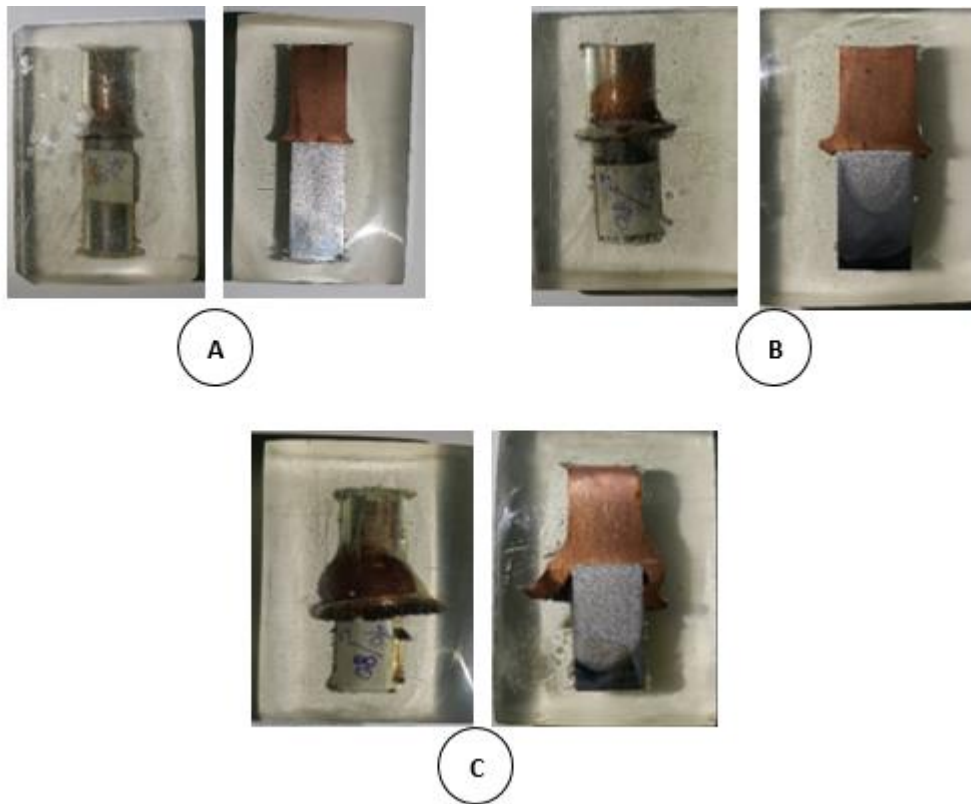
Gambar 4.2 menunjukkan pemendekan material setelah dilakukan pengelasan gesek. Material yang paling banyak mengalami pemendekan adalah tembaga. Hal ini karena suhu leleh tembaga lebih rendah dibandingkan dengan baja maka tembaga mengalami deformasi plastis yang paling besar. Dapat disimpulkan bahwa semakin besar tekanan gesek yang digunakan pemendekan juga akan semakin besar.

1.2 Hasil Pengujian

4.2.1 Hasil Pengujian Struktur Mikro

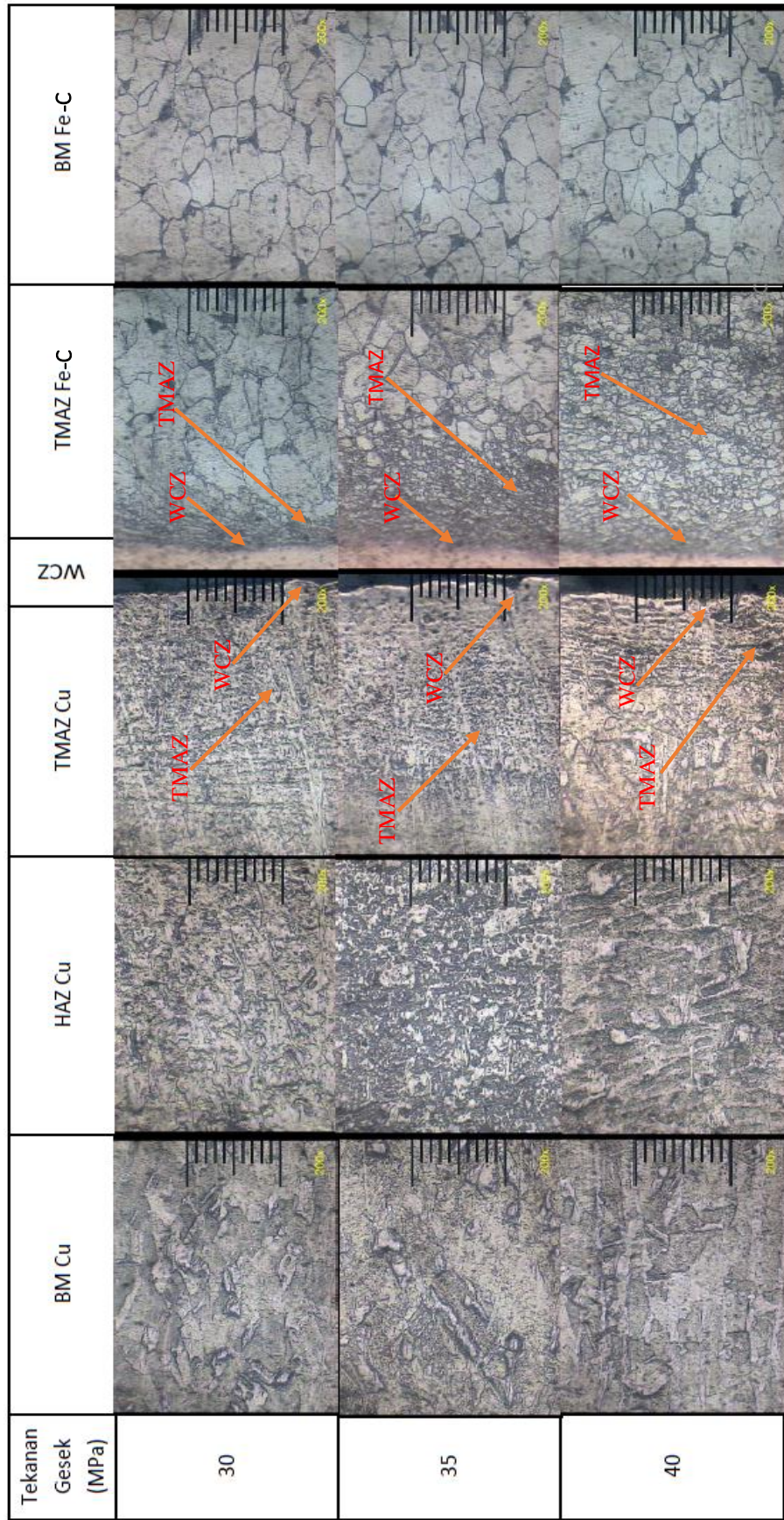
Pengujian struktur mikro dilakukan pada masing-masing spesimen dengan variasi tekanan gesek 30MPa, 35 MPa, dan 40 MPa. Pengujian mikro bertujuan untuk mengetahui perubahan struktur mikro pada material pejal tembaga dengan baja setelah dilakukan pengelasan gesek dengan metode *continuous drive friction welding*. 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.

Pengujian struktur mikro menggunakan perbesaran 200x. Dari foto mikro maka pembagian daerah pengaruh las gesek dapat diketahui. Daerah pengaruh lasan yang dapat diidentifikasi antara lain daerah WCZ (*welding center zone*), TMAZ (*thermomechanically affected zone*), HAZ (*heat affected zone*), dan daerah BM (*base metal*). Tetapi pada spesimen baja tidak terdapat daerah HAZ, karena efek suhu pada baja yang timbul pada saat terjadi gesekan kurang. Oleh karena itu pada spesimen baja tidak terdapat daerah HAZ.

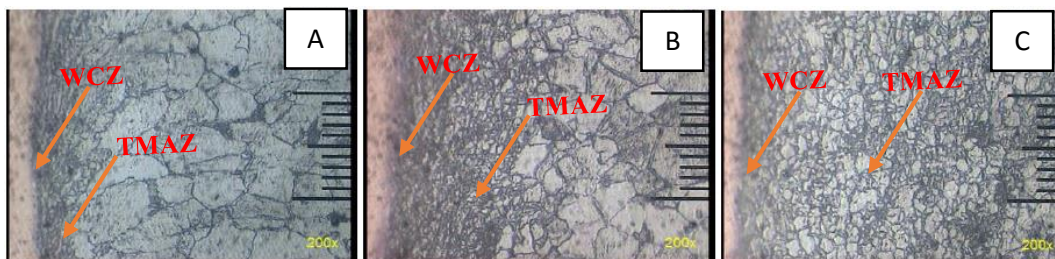


Gambar 4.4 Struktur Mikro sambungan dissimilar pejal tembaga-baja

Gambar 4.4 menunjukkan bentuk struktur mikro dari hasil pengelasan dissimilar pejal baja-tembaga dimana sambungan terjadi pada temperatur yang tinggi dan tekanan yang tinggi. Tipe daerah hasil pengelasan ini sama dengan penelitian terdahulu (Nugroho dkk, 2016) yang terdiri dari 3 bagian, yakni:

1. *Weld Centre Zone (WCZ)* atau dapat disebut daerah pusat pengelasan dimana pada daerah ini struktur logam mengalami rekristalisasi menjadi sangat halus, dikedua sisi daerah WCZ terdapat daerah *interface* baja dan daerah *interface* tembaga.
2. *Thermomechanically Affected Zone (TMAZ)* atau daerah terpengaruh gaya mekanik dan panas. Pada daerah ini butir kristal yang terbentuk lebih besar dari butir kristal pada daerah WCZ.
3. *Heat Affected Zone (HAZ)* atau daerah terpengaruh panas dimana pada daerah ini masih terpengaruh panas akibat pengelasan. Struktur mikro pada daerah ini hampir sama dengan struktur mikro pada logam induk atau *base metal*.

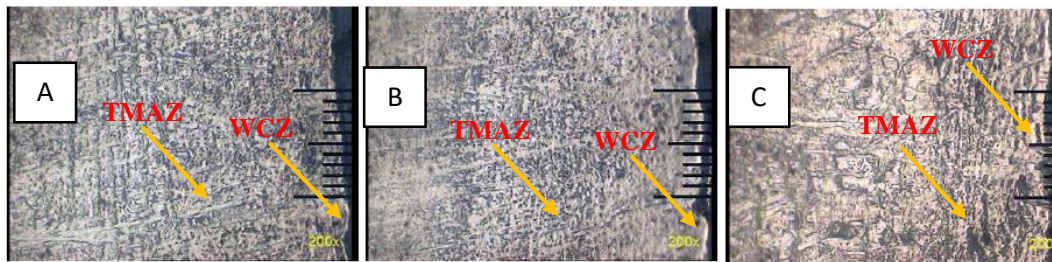
Jayabharath, dkk (2007) menyebutkan sifat termal dan fisik material yang berbeda untuk dilas dalam pengelasan dissimilar logam (kapasitas suhu, konduktivitas termal, hubungan antara kekerasan dan suhu) secara umum akan menghasilkan deformasi asimetris. Deformasi asimetris kali ini dapat dilihat pada foto daerah WCZ. Daerah WCZ adalah tempat terjadinya transisi fasa metalurgi antara tembaga dengan baja, sehingga bentuk struktur mikro sangat halus dibandingkan dengan daerah yang lain karena tingginya suhu pengelasan gesek.



Gambar 4.5 Daerah WCZ-TMAZ pada baja: (A) Tekanan gesek 30 MPa, (B) Tekanan gesek 35 MPa, (C) Tekanan gesek 40 MPa

Gambar 4.5 menunjukkan perubahan struktur mikro pada baja setelah dilas gesek. Pada daerah WCZ terjadi pengecilan butir, pengecilan butir semakin meluas

dengan naiknya tekanan gesek. Semakin tinggi tekanan gesek maka temperaturnya akan semakin tinggi. Sehingga ketika temperatur mencapai diatas titik rekristalisasi maka akan merubah sifat mekanik dan bentuk struktur mikro dari baja. Lalu semakin tinggi temperaturnya maka butiran yang berubah akan semakin meluas. Pada material baja tidak ditemukan HAZ karena temperatur pada saat gesekan tidak cukup untuk membentuk HAZ pada baja.



Gambar 4.6 Daerah WCZ-TMAZ pada tembaga: (A) Tekanan gesek 30 MPa, (B) Tekanan gesek 35 MPa, (C) Tekanan gesek 40 MPa

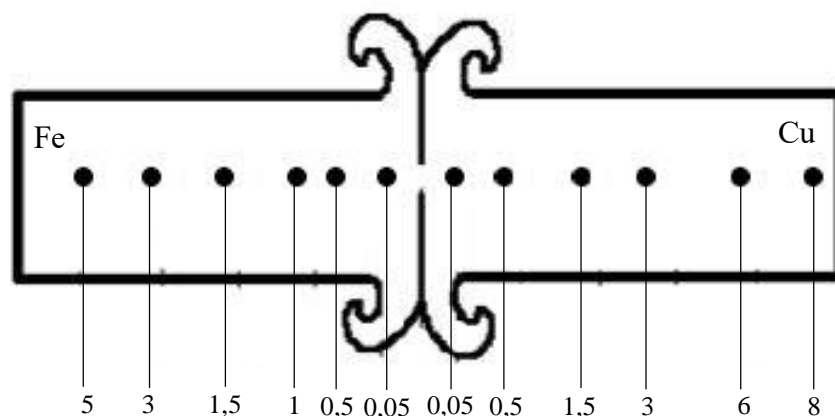
Struktur mikro di daerah WCZ-TMAZ dan HAZ pada spesimen variasi tekanan 30 MPa ke 35 MPa tidak mengalami perubahan yang signifikan. Tetapi pada spesimen dengan tekanan gesek 40 MPa daerah WCZ butirnya lebih besar dan mengalami kepadatan dan daerah TMAZ butirnya besar hampir sama dengan daerah HAZ. Karena pada tekanan 40 MPa temperatur sudah cukup tinggi sehingga deformasi plastis tembaga juga tinggi, lalu diberi tekanan tempa sebesar 80 MPa. Sehingga pada bagian yang deformasi plastisnya tinggi membentuk *flash* yang berlebih dan mengakibatkan kepadatan struktur mikro pada *interface* tembaga. Deformasi plastis tembaga terjadi karena konduktivitas termal yang berbeda antara tembaga dengan baja dan sebagian besar panas dihasilkan oleh *interface* tembaga. Daerah HAZ struktur mikronya hampir sama dengan logam induk. Peningkatan ukuran butiran HAZ pada tembaga berbanding lurus dengan peningkatan variasi tekanan gesek. Karena konduktivitas termal yang berbeda antara tembaga dengan baja maka panas spesifik lebih besar dihasilkan oleh tembaga. Perbedaan konduktivitas termal membuat struktur mikro tembaga mengalami perbaikan, ini juga akan berhubungan dengan pengujian tarik yang akan dilakukan.

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Kurt, dkk. (2011) memiliki hasil struktur mikro yang serupa pada penelitian ini. Pada struktur mikro sambungan

AISI 1010-ASTM B22 disebutkan peningkatan tekanan gesek menyebabkan penyambungan interface yang lebih baik dimana rekristalisasi terjadi pada tembaga. Hal ini juga akan berhubungan dengan sifat tarik logam tersebut. Lebar daerah rekristalisasi dan pengecilan butir dipengaruhi oleh tekanan gesek. Peningkatan tekanan gesek menghasilkan butiran kecil yang lebih luas. Kejadian yang sama pernah dilaporkan pada pengelasan gesek dissimilar, yaitu pada Fe-Ti, Cu-Ti, Fe-Cu, dan Fe-Ni. Dapat dikatakan bahwa untuk mencapai sambungan interface yang sempurna dalam pengelasan gesek dissimilar logam yang memiliki perbedaan konduktivitas termal yang jauh, cukup menggunakan waktu tempa dan tekanan gesek untuk mencapai suhu dan deformasi plastis yang optimal Sathiya, dkk. (2007).

4.2.2 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk melihat nilai kekerasan pada daerah lasan, HAZ dan logam induk. Pada pengujian kekerasan ini diambil 12 titik di setiap variasi tekanan gesek. Posisi titik pengujian kekerasan dimulai dari titik 0,05; 0,5; 1,5; 3; 6; 8 pada tembaga dari titik sambungan dan 0,05; 0,5; 1; 1,5; 3; 5 pada baja dari titik sambungan. Gambar 4.7 menunjukkan posisi titik pengujian kekerasan.



Gambar 4.7 Posisi titik pengujian kekerasan (mm).

Setelah dilakukan pengujian kekerasan pada masing-masing spesimen, nilai kekerasan dari proses penyambungan las gesek bahan pipa kuningan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.2 Hasil uji kekerasan variasi tekanan gesek 30 MPa

No	Variasi Tekanan Gesek	Jarak dari Sambungan	d1 (μm)	d2 (μm)	d rata-rata (μm)	Kekerasan (VHN)	
1	30 MPa	Baja	-5	2	42	22	210,2
			-3	42	43	42,5	205,3
			-1,5	44	45,5	44,75	193,8
			-1	45	42	43,5	196
			-0,5	45	44	44,5	187,3
			-0,05	45	46	45,5	179,1
		Tembaga	0,05	58	56	57	114,2
			0,5	63	64	63,5	92
			1,5	69	69	69	77,9
			3	70	71	70,5	74,6
			6	67	66	66,5	83,9
			8	62	61	61,5	98,1

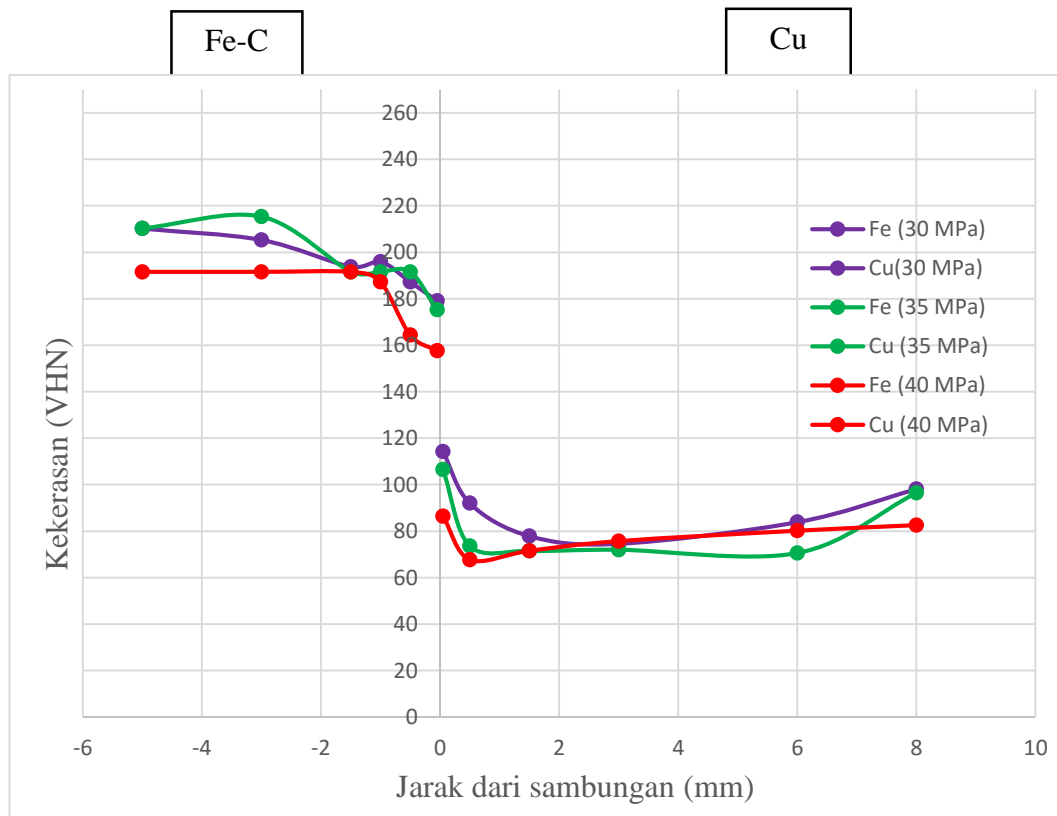
Tabel 4.3 Hasil uji kekerasan variasi tekanan gesek 35 MPa

No	Variasi Tekanan Gesek	Jarak dari Sambungan	d1 (μm)	d2 (μm)	d rata-rata (μm)	Kekerasan (VHN)	
2	35 MPa	Baja	-5	42	42	42	210,2
			-3	42	41	41,5	215,3
			-1,5	44	44	44	191,6
			-1	44	44	44	191,6
			-0,5	44	44	44	191,6
			-0,05	46	46	46	175,3
		Tembaga	0,05	60	58	59	106,5
			0,5	70	72	71	73,6
			1,5	72	72	72	71,5
			3	70,5	73	71,75	72
			6	73	72	72,5	70,6
			8	62	62	62	96,5

Tabel 4.4 Hasil uji kekerasan variasi tekanan gesek 40 MPa.

No	Variasi Tekanan Gesek	Jarak dari Sambungan	d1 (μm)	d2 (μm)	d rata-rata (μm)	Kekerasan (VHN)	
3	40 MPa	Baja	-5	44	44	44	191,6
			-3	44,5	43	43,75	191,6
			-1,5	44	44	44	191,6
			-1	44	45	44,5	187,3
			-0,5	48	47	47,5	164,4
			-0,05	49	48	48,5	157,7
		Tembaga	0,05	67	64	65,5	86,4
			0,5	74	74	74	67,7
			1,5	73	71	72	71,5
			3	70	70	70	75,7
			6	69	67	68	80,2
			8	67	67	67	82,6

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



Gambar 4.8 Grafik nilai kekerasan pada sambungan dissimilar silinder pejal baja-tembaga

Grafik nilai kekerasan menunjukkan nilai kekerasan setiap sambungan variasi tekanan gesek. Pada tekanan gesek 30 MPa nilai kekerasan pada jarak -0,05 (baja) dari sambungan 179,1 VHN dan pada jarak 0,05 (tembaga) dari sambungan 114,2 VHN. Pada tekanan gesek 35 MPa nilai kekerasan pada jarak -0,05 (baja) dari sambungan 175,3 VHN dan pada jarak 0,05 (tembaga) dari sambungan 106,5 VHN. Pada tekanan gesek 40 MPa nilai kekerasan pada jarak -0,05 (baja) dari sambungan 157,7 VHN dan pada jarak 0,05 (tembaga) dari sambungan 86,4 VHN.

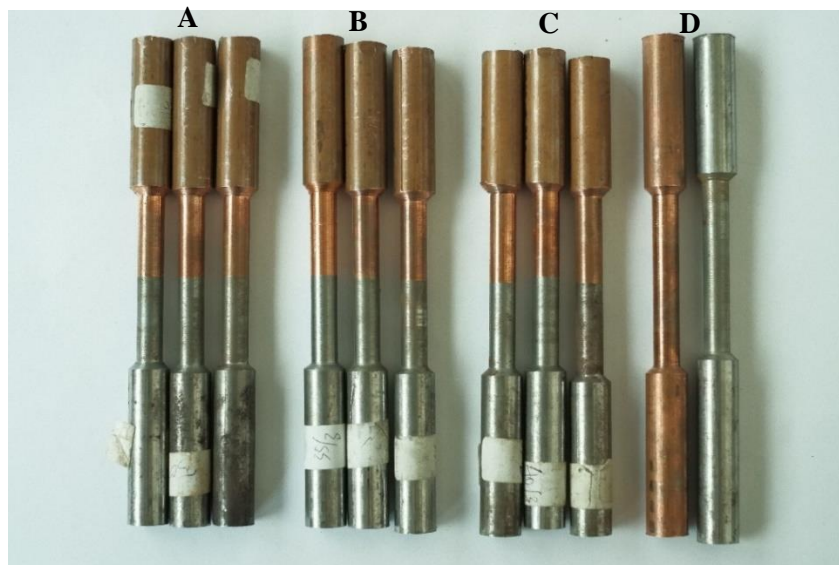
Dari hasil nilai kekerasan maka dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi tekanan gesek nilai kekerasan pada titik 0,05mm dan -0,05mm dari sambungan juga

akan menurun. 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 sangat bersinggungan pada penelitian ini, karena waktu tempa yang digunakan pada penelitian ini cukup lama yaitu 5 detik. Sehingga dengan tekanan gesek, tekanan tempa serta waktu tempa yang besar maka kekerasan juga dapat menurun. Dapat dikatakan bahwa penyebab lain dari menurunnya kekerasan adalah difusi pada material, perubahan mikrostruktur, dan kepadatan dislokasi.

Penelitian yang dilakukan Meshram, dkk.(2007) menyebutkan baja-tembaga sistem yang tidak dapat larut, artinya sambungan baja dengan tembaga tidak akan berdifusi secara sempurna. Kekerasan akan menurun dengan meningkatnya suhu akibat gesekan.

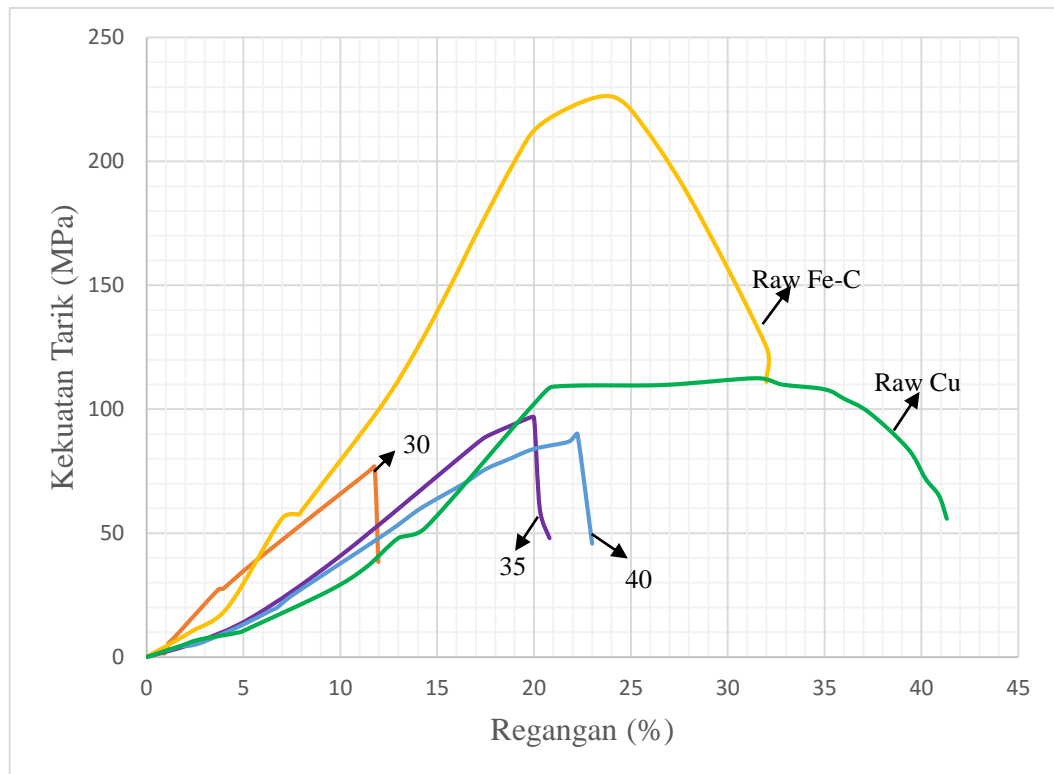
4.2.3 Hasil Pengujian Kekuatan Tarik

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*. Gambar 4.9 menunjukkan spesimen yang sudah melalui proses pemesinan hingga terbentuk spesimen uji tarik sesuai standar.



Gambar 4.9 Spesimen uji tarik, (A) 30 MPa, (B) 35 MPa, (C) 40 MPa, dan (D) Raw baja dan tembaga

Setelah dilakukan proses pemesinan untuk membuat spesimen uji tarik, selanjutnya dilakukan pengujian tarik pada masing-masing spesimen. Hasil nilai kekuatan tarik dapat dilihat pada gambar 4.10.



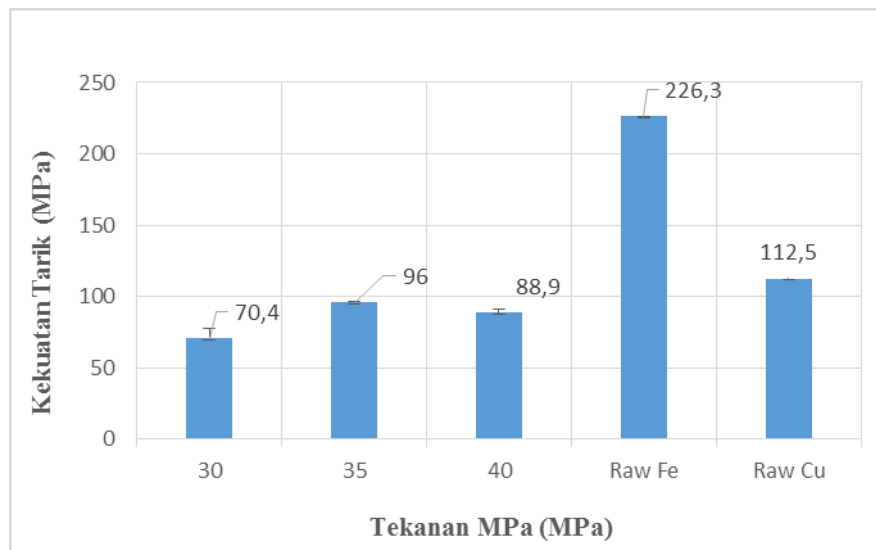
Gambar 4.10 Grafik hubungan kekuatan tarik (MPa) dengan regangan (%) hasil uji tarik.

Gambar 4.10 menunjukkan hubungan antara kekuatan tarik dengan regangan setelah dilakukan uji tarik. Kekuatan tarik yang paling tinggi dihasilkan oleh raw material baja yaitu sebesar 226,3 MPa dengan regangan sebesar 31,2 %. Sementara kekuatan tarik raw material tembaga 112,5 MPa dengan regangan 40,4%. Hal ini disebabkan oleh perbedaan modulus young tembaga dan baja. Kekuatan tarik meningkan seiring dengan meningkatnya tekanan gesek dan turun akibat tekanan tempa yang dialami pada spesimen variasi tekanan gesek 40 MPa. Meskipun pada tiap spesimen diberi tekanan tempa yang besarnya sama tetapi pada tekanan 40 MPa terjadi deformasi plastis yang berlebih. Hal ini yang menyebabkan struktur mikro

tembaga yang mengalami penyempurnaan didekat interface (daerah WCZ) hilang menjadi *flash* yang berlebih dan berakibat pada lemahnya sambungan.

Tabel 4.5 Nilai kekuatan tarik dan regangan

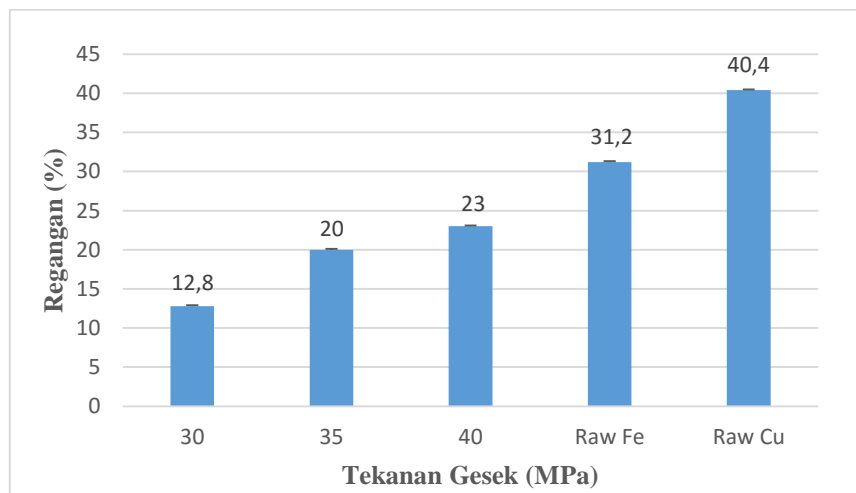
No	Tekanan Gesek (MPa)	Rata-rata Kekuatan Tarik (MPa)	Regangan (%)
1	30	70,4	12,8
2	35	96	20
3	40	88,9	23
4	RAW Fe	226,3	31,2
5	RAW Cu	112,5	40,4



Gambar 4.11 Diagram hubungan antara tekanan gesek (MPa) dengan kekuatan tarik (MPa)

Gambar 4.11 menunjukkan hasil kekuatan tarik dari sambungan las dissimilar silinder pejal tembaga dengan baja variasi tekanan gesek 30, 35, 40 MPa. Dapat diamati bahwa kekuatan tarik tertinggi dihasilkan oleh spesimen dengan tekanan gesek 35 MPa yaitu sebesar 96 MPa, disusul dengan spesimen dengan tekanan gesek 40 MPa sebesar 88,9 MPa, lalu spesimen dengan tekanan gesek 30 MPa sebesar 70,4 MPa. dapat disimpulkan bahwa variasi tekanan gesek 35 MPa

telah mencapai kekuatan tarik maksimum. Hal ini karena tembaga telah mengalami pembebanan maksimal dan juga perbedaan modulus young antara tembaga dengan baja. Pada tekanan gesek 35 MPa tembaga mengalami perubahan struktur mikro sehingga kekuatan tarik meningkat. Tetapi pada tekanan 40 MPa tembaga mengalami deformasi plastis yang berlebih lalu terkena tekanan tempa sehingga kekuatan tarik pada *interface* sambungan melemah. Kekuatan tarik pada sambungan las gesek tembaga dengan baja masih rendah dari kekuatan tarik *raw material* tembaga yaitu sekitar 85,3% dari *raw material* tembaga.



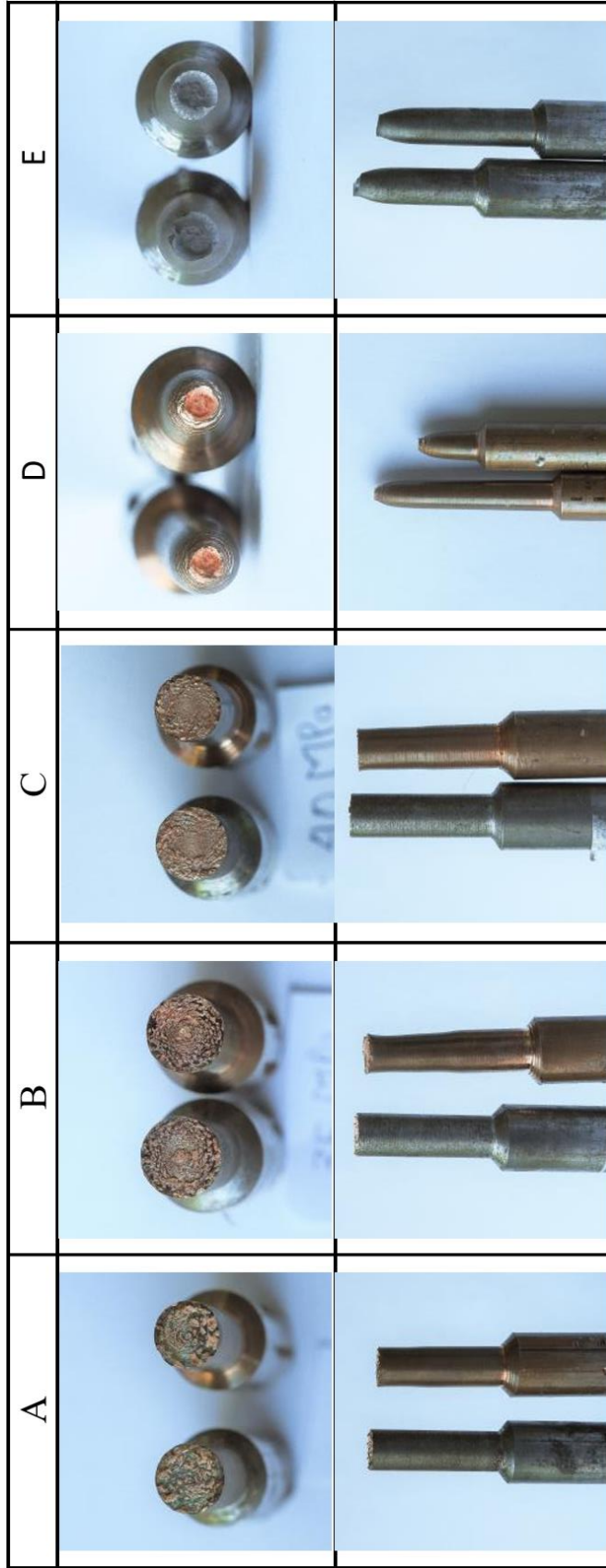
Gambar 4.12 Diagram hubungan antara tekanan gesek (MPa) dengan regangan (%)

Gambar 4.12 menunjukkan nilai regangan sambungan las gesek dissimilar silinder pejal. Nilai regangan tertinggi terjadi pada spesimen dengan variasi tekanan gesek 40 MPa sebesar 23%. Hal ini disebabkan karena perubahan struktur mikro daerah HAZ tembaga pada spesimen tekanan gesek 40 MPa tidak terlalu signifikan (hampir sama) dengan struktur mikro *base metal* tembaga, maka keuletan dari spesimen 40 MPa lebih tinggi daripada spesimen lain. Semakin tinggi nilai regangan maka dapat dikatakan suatu material bersifat ulet dan semakin rendah regangan sifat materialnya getas.

4.2.3.1 Analisis Patahan Setelah Pengujian Tarik

Gambar 4.13 menunjukkan detail patahan dari raw baja, raw tembaga dan masing-masing spesimen variasi tekanan gesek sambungan dissimilar silinder pejal baja-tembaga. Terlihat semua patahan terletak pada sambungan atau pada daerah WCZ. Hal ini disebabkan karena difusi kedua material tidak seimbang mengingat suhu lebur atau konduktivitas termal baja dan tembaga berbeda jauh. Semakin tinggi tekanan gesek maka semakin tebal tembaga yang menempel pada patahan *interface* baja. Karena suhu pada tekanan 40 MPa sudah membuat *interface* tembaga berdifusi dengan *interface* baja, ditambah struktur mikro pada *interface* tembaga lebih memadat tetapi hal ini tidak membuat kekuatan tarik spesimen dengan variasi tekanan gesek 40 MPa bertambah kuat. Maka batas patahan yang terjadi pada tembaga adalah antara struktur yang memadat dengan daerah HAZ.

Selanjutnya patahan dengan kekuatan tarik yang paling tinggi yaitu pada tekanan 35 MPa, terlihat material tembaga mengalami perpanjangan akibat pembebanan tarik yang diberikan. Hal ini karena penyempurnaan butir yang optimal sehingga sambungan lebih kuat daripada spesimen tekanan gesek 30 dan 40 MPa. Sementara itu patahan raw baja dan raw tembaga patahan tidak tepat ditengah *gauge*. Salah satu faktor yang mempengaruhi adalah kekasaran permukaan gauge kedua raw material pada saat pembubutan. Pada raw tembaga mengalami perpanjangan yang besar daripada raw baja. Hal ini karena tembaga memiliki nilai regangan lebih tinggi daripada baja, maka tembaga lebih ulet daripada baja.



Gambar 4.13 Patahan spesimen uji tarik sambungan dissimilar silinder pejal tembaga-baja, (A) 30 MPa, (B) 35 MPa, (C) 40 Mpa, (D) Raw Cu, (E) Raw Fe-C