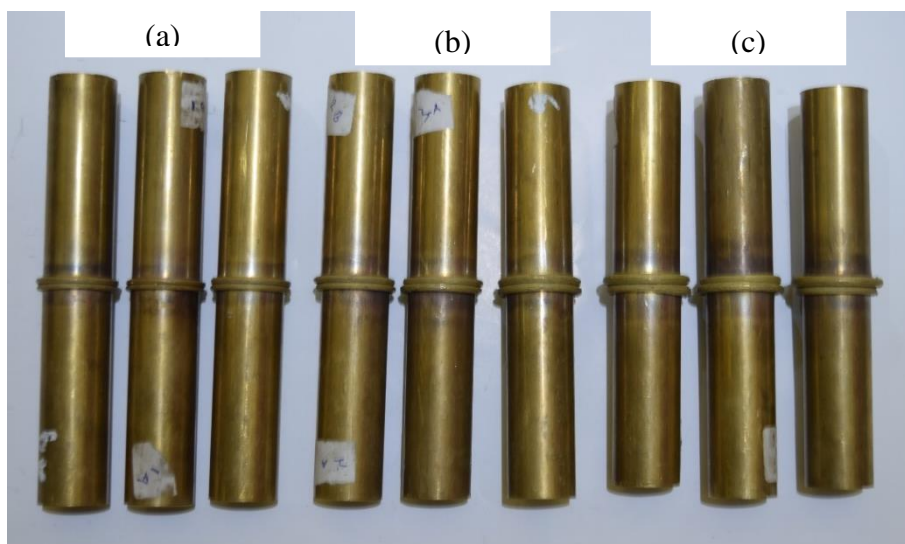


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan proses penyambungan dengan metode las gesek (*friction welding*), selanjutnya yaitu melakukan pengukuran, pengamatan, pengujian struktur mikro, kekerasan dan pengujian tarik pada spesimen hasil penyambungan pengelasan. Data hasil pengujian tersebut akan ditampilkan pada bab ini beserta analisa dan pembahasannya.

4.1 Hasil Penyambungan Logam Pipa Kuningan dengan Metode CDFW

Setelah dilakukan proses pengelasan gesek pada material logam pipa kuningan maka didapatkan hasil seperti pada gambar 4.1.



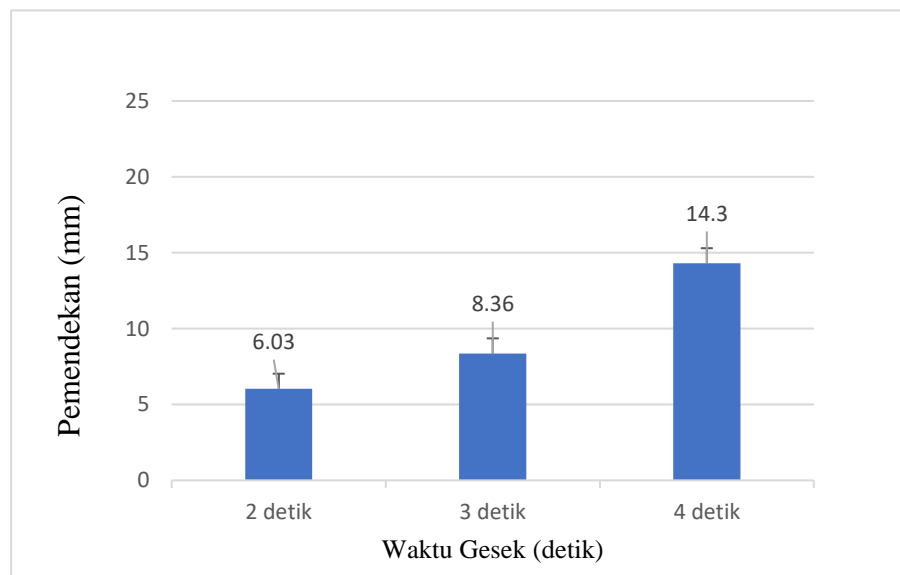
Gambar 4.1 Hasil Sambungan Pengelasan Gesek Pada Waktu Gesek (a). 2 Detik, (b). 3 Detik, (c). 4 Detik.

Gambar 4.1 merupakan hasil penyambungan dengan metode *continuous drive friction welding* dengan bahan logam pipa kuningan. Penyambungan dilakukan dengan parameter waktu gesek yang bervariasi. Variasi waktu gesek yang digunakan yaitu 2 detik, 3 detik, dan 4 detik. Terlihat *flash* yang dihasilkan pada sambungan ini berbeda-beda dikarenakan pengaruh variasi waktu gesek pada

saat proses pengelasan. Pada gambar 4.1 terlihat jelas dimana semakin lama waktu gesek pada saat proses pengelasan maka semakin besar pula *flash* yang dihasilkan. Besarnya *flash* yang terjadi menyebabkan adanya pemendekan dari hasil sambungan las. Pemendekan hasil sambungan las dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Pemendekan Hasil Sambungan Las Gesek.

No	Variasi waktu gesek (detik)	Panjang awal (mm)	Panjang akhir (mm)	Pemendekan (mm)
1.	2	150	145.4	4.6
2.	2	150	143.15	6.85
3.	2	150	143.56	6.44
4.	3	150	141.5	8.5
5.	3	150	141.2	8.8
6.	3	150	142.3	7.7
7.	4	150	135.2	14.8
8.	4	150	136.9	13.1
9.	4	150	138.8	11.2

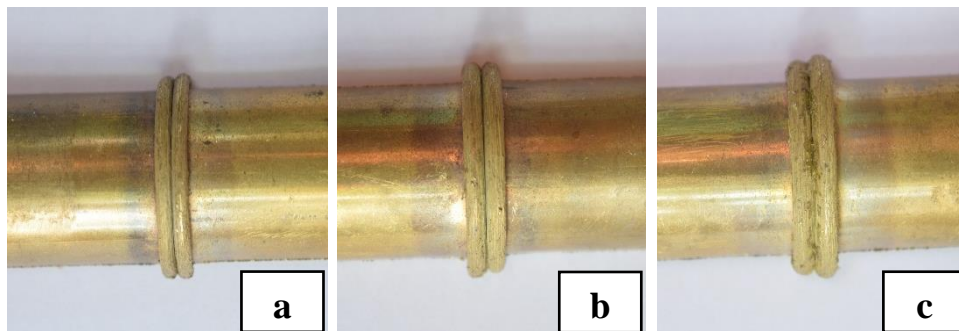


Gambar 4.2 Diagram Rata-Rata Pemendekan Hasil Sambungan Las Gesek.

Dari gambar 4.2 Grafik dapat disimpulkan bahwa lama durasi waktu gesek pada saat proses pengelasan sangat mempengaruhi besarnya pemendekan hasil pengelasan yang terjadi. Semakin lama waktu gesek yang digunakan, maka semakin besar pemendekan yang akan terjadi pada sambungan pengelasan.

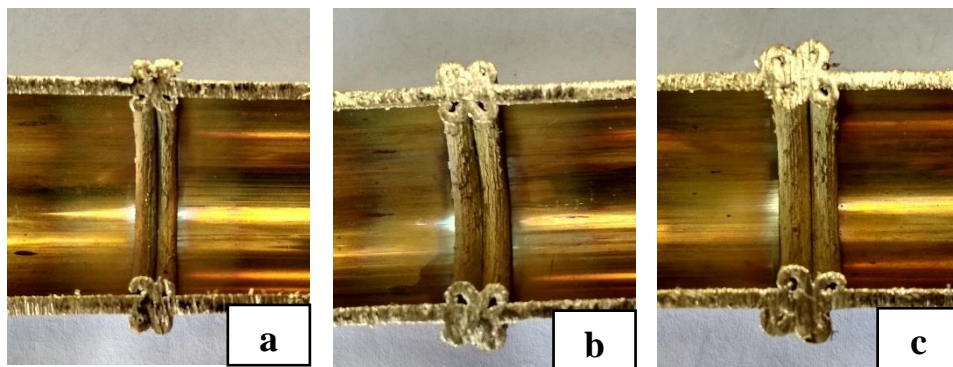
4.2 *Flash* Bagian Sambungan

- Tampak luar bagian sambungan



Gambar 4.3 *Flash* Bagian Luar Pipa Kuningan Pada Waktu Gesek a). 2 Detik
b). 3 Detik c). 4 Detik.

- Tampak dalam bagian sambungan

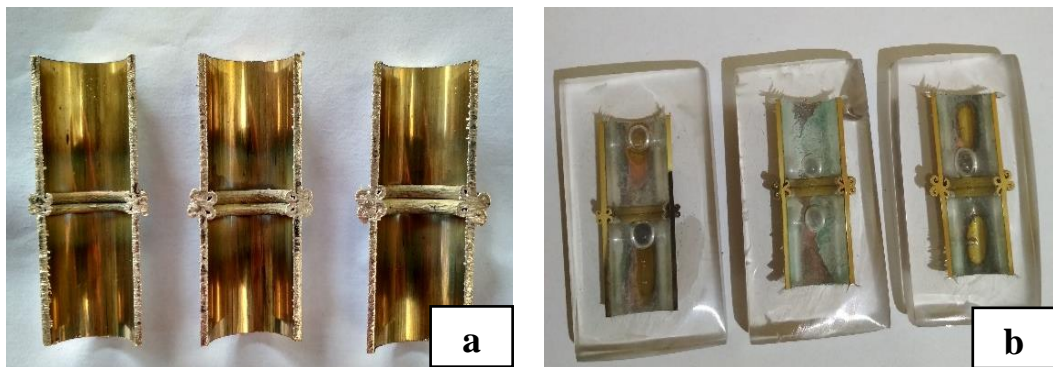


Gambar 4.4 *Flash* Bagian Dalam Pipa Kuningan Pada Waktu Gesek a). 2 Detik
b). 3 Detik c). 4 Detik.

Bentuk *flash* yang terjadi pada bagian luar dan dalam hasil pengelasan gesek berbeda-beda, dikarenakan lama waktu gesek pada saat pengelasan mempengaruhi *flash* yang terjadi di bagian luar dan dalam hasil sambungan.

4.3 Hasil Pengujian Makro dan Mikro

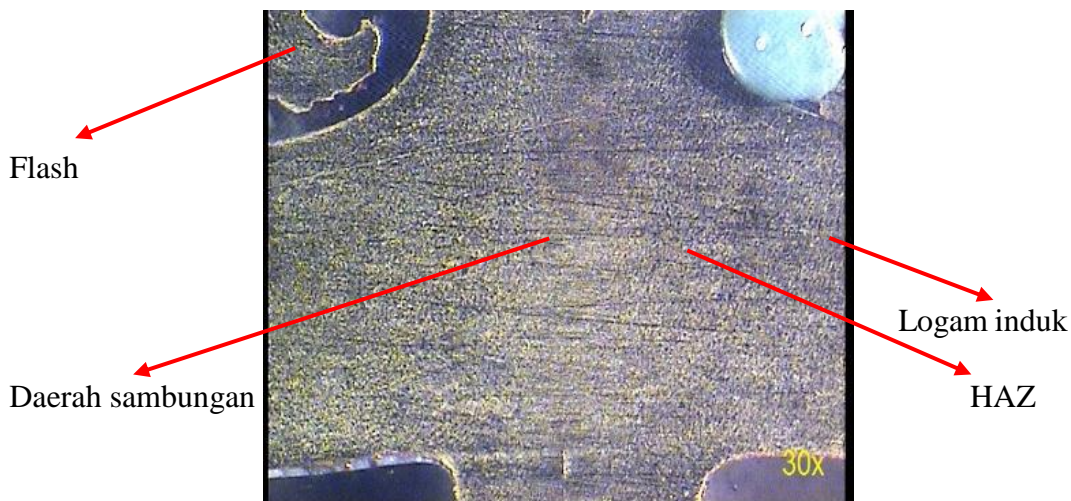
Pada pengujian makro dan mikro ini spesimen yang telah disambung dengan pengelasan gesek kemudian dipotong dan dibelah menjadi dua dengan gergaji, kemudian dicetak dengan resin. Setelah itu permukaan yang akan diuji struktur micro diampelas, dipoles, dan dilakukan pengetsaan pada masing-masing specimen.



Gambar 4.5 Spesimen Pengujian Mikro a). Hasil Potongan Melintang Spesimen Uji b). Hasil *Mounting* Spesimen Uji.

Pengambilan foto makro dilakukan pada daerah bagian sambungan dengan perbesaran 30x, sedangkan pengambilan foto mikro dilakukan pada beberapa titik hasil sambungan las diantaranya pada daerah Interface, daerah HAZ, dan daerah logam induk dengan perbesaran 200x.

4.3.1 Hasil Foto Makro



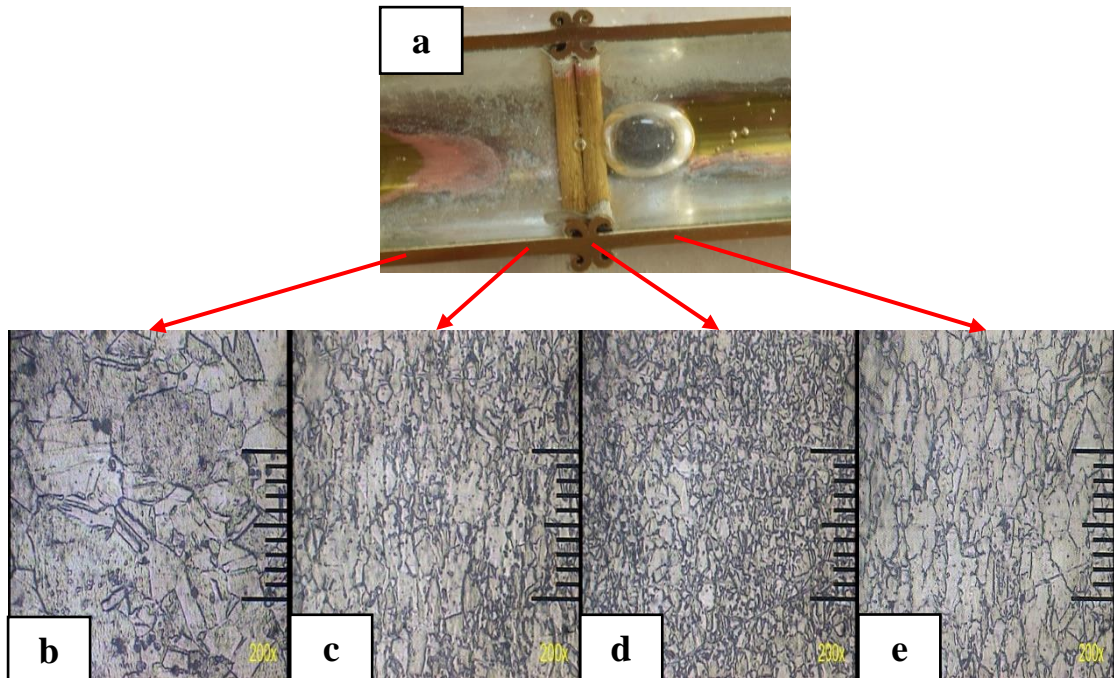
Gambar 4.6 Hasil Foto Makro Pada Sambungan Pipa Kuningan dengan Perbesaran 30x.

Pada gambar 4.6 merupakan hasil foto makro daerah sambungan pipa kuningan, terdapat 4 daerah yang terlihat dari hasil proses pengelasan gesek yaitu daerah sambungan las, HAZ, logam induk dan flash. Daerah sambungan merupakan daerah kedua sisi permukaan bahan yang mengalami deformasi plastis dan termoplastis akibat tekanan dan panas pengelasan. Daerah HAZ adalah daerah yang terkena efek panas pengelasan yang dihasilkan dari daerah sambungan. Logam induk adalah daerah logam dasar yang tidak terpengaruh panas dan tekanan gesk pengelasan. *Flash* adalah cairan logam yang keluar dari daerah sambungan akibat pengaruh tekanan.

4.3.2 Hasil Pengujian Struktur Mikro

Berikut ini merupakan hasil pengujian struktur mikro pada tiap variasi waktu gesek 2 detik, 3 detik, 4 detik dengan perbesaran 200x.

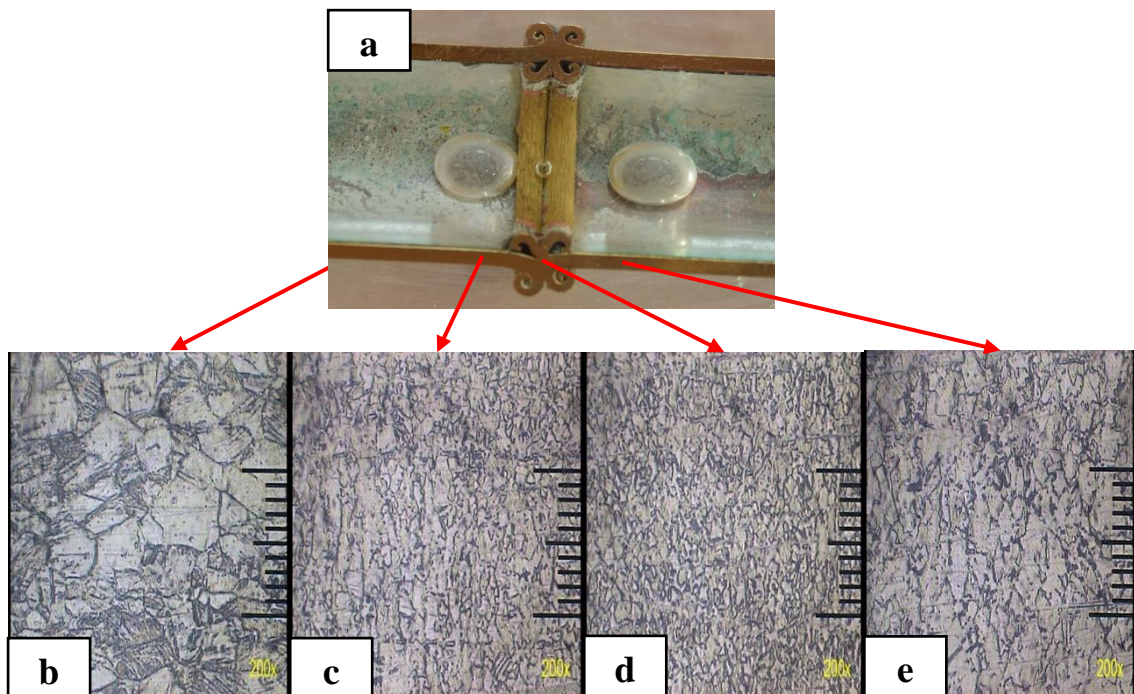
- Hasil pengujian mikro struktur variasi waktu gesek 2 detik



Gambar 4.7 a). Benda Uji Variasi Waktu Gesek 2 Detik b). Daerah Logam Induk c). HAZ putar d). Daerah Sambungan e). HAZ diam.

Pada gambar 4.7 a) merupakan spesimen benda uji dengan variasi waktu gesek 2 detik yang akan dilakukan pengamatan struktur mikro. Gambar b) merupakan daerah logam induk dapat dilihat bahwa pada daerah ini butiran struktur mikronya lebih besar dan jaraknya saling berjauhan. Gambar c) merupakan daerah sambungan dapat diamati dengan jelas daerah sambungan ini memiliki ukuran butir struktur mikro yang paling kecil dan rapat dibandingkan daerah logam induk dan HAZ. Gambar d) merupakan daerah HAZ dapat dilihat pada daerah ini memiliki ukuran butir struktur mikro yang mulai mendekati dan butirannya lebih besar dibandingkan dengan daerah sambungan dan memiliki ukuran butir yang lebih kecil dibandingkan daerah logam induk.

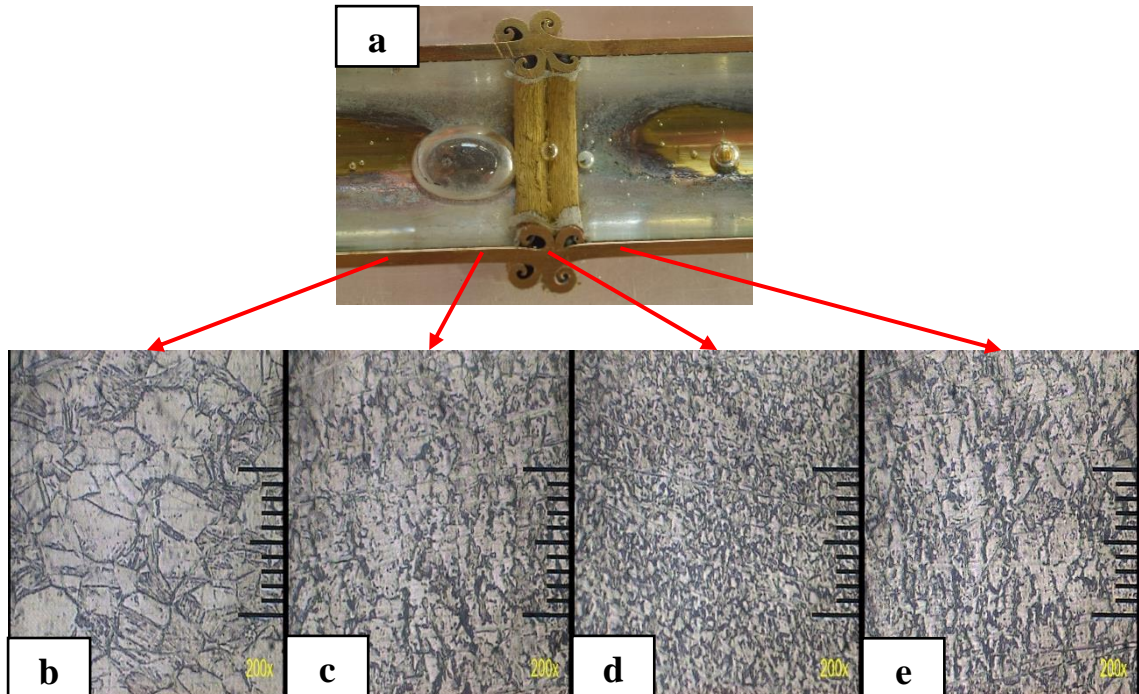
- Hasil pengujian mikro struktur variasi waktu gesek 3 detik.



Gambar 4.8 a). Benda Uji Variasi Waktu Gesek 3 Detik b). Daerah Logam Induk c). HAZ putar d). Daerah Sambungan e). HAZ diam.

Pada gambar 4.8 a) merupakan spesimen benda uji dengan variasi waktu gesek 3 detik yang akan dilakukan pengamatan struktur mikro. Gambar b) merupakan daerah logam induk terlihat bahwa pada daerah ini butiran struktur mikronya lebih besar dan jaraknya saling berjauhan dibandingkan dengan daerah sambungan dan HAZ. Gambar c) merupakan daerah sambungan dapat diamati dengan jelas daerah sambungan ini memiliki ukuran butir struktur mikronya lebih kecil dan rapat dibandingkan dengan variasi waktu gesek 2 detik. Gambar d) merupakan daerah HAZ dapat dilihat pada daerah ini memiliki ukuran butir struktur mikro yang mulai mendekati dan butirannya lebih besar dibandingkan dengan daerah sambungan dan memiliki ukuran butiran yang lebih kecil dibandingkan daerah logam induk.

- Hasil pengujian mikro struktur variasi waktu gesek 4 detik.



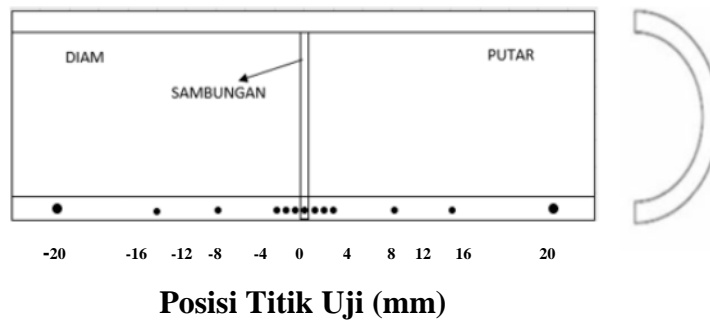
Gambar 4.9 a). Benda Uji Variasi Waktu Gesek 4 Detik b). Daerah Logam Induk c). HAZ putar d). Daerah Sambungan e). HAZ diam.

Pada gambar 4.9 a) merupakan spesimen benda uji dengan variasi waktu gesek 4 detik yang akan dilakukan pengamatan struktur mikro. Gambar b) merupakan daerah logam induk terlihat bahwa pada daerah ini butiran struktur mikronya lebih besar dan jaraknya saling berjauhan dibandingkan dengan daerah sambungan dan HAZ. Gambar c) merupakan daerah sambungan dapat diamati dengan jelas daerah sambungan ini memiliki ukuran butir struktur mikronya lebih kecil dan rapat dibandingkan dengan variasi waktu gesek yang lainnya. Gambar d) merupakan daerah HAZ dapat dilihat pada daerah ini memiliki ukuran butir struktur mikro yang mulai mendekati dan butirannya lebih besar dibandingkan dengan daerah sambungan dan memiliki ukuran butir yang lebih kecil dibandingkan daerah logam induk.

Pada hasil pengujian mikro struktur antara variasi waktu gesek 2 detik, 3 detik dan 4 detik dapat disimpulkan bahwa pada daerah sambungan variasi waktu gesek 4 detik terlihat struktur mikronya lebih kecil dan paling rapat dibandingkan variasi waktu gesek yang lainnya. Hal ini disebabkan lama waktu pengelasan gesek mengakibatkan panas pengelasan yang semakin tinggi sehingga proses pengerjaan dingin (*cold working*) tinggi juga, yang membuat struktur mikro pada daerah sambungan variasi waktu gesek 4 detik ini lebih kecil dan rapat daripada variasi waktu gesek lainnya. Pada daerah HAZ terlihat bahwa pada tiap variasi waktu gesek memiliki ukuran butir struktur mikro yang lebih besar dan lebar dari daerah sambungan. Hal ini disebabkan masukan panas dan pengerjaan dingin (*cold working*) yang lebih rendah daripada daerah sambungan. Pada daerah logam induk pada tiap variasi waktu gesek terlihat bahwa semakin lama waktu gesek pada saat pengelasan tidak mempengaruhi perubahan struktur mikro pada daerah ini. Nugroho, dkk. (2014), mengatakan bahwa struktur mikro daerah logam induk dengan fasa austenit terlihat jelas dengan susunan butir yang besar sehingga material ini bersifat ulet.

4.4 Hasil dan Analisis Pengujian Kekerasan

Dari pengujian struktur mikro yang telah dilakukan maka dapat diketahui posisi untuk menentukan titik pengujian kekerasan. Posisi titik pengujian kekerasan dapat dilihat pada gambar 4.9. Spesimen yang digunakan untuk pengujian kekerasan adalah hasil sambungan dengan variasi waktu gesek 2 detik, 3 detik dan 4 detik. Pengujian kekerasan ini menggunakan metode uji Vickers dengan pembebanan 200 gf. Hal ini bertujuan untuk mengetahui nilai kekerasan pada daerah yang mengalami perubahan struktur mikro. Pada pengujian kekerasan ini posisi titik pengujian untuk pengambilan data pada spesimen ada 13 titik pengujian. Dimulai pada titik 0 atau tengah hasil sambungan, selanjutnya kearah kanan dengan jarak 0.5, 1.5, 3.5, 8, 15, 20 mm, kemudian kearah kiri dengan jarak yang sama. Posisi titik pengujian kekerasan dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Posisi Titik Pengujian Kekerasan.

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 Waktu Gesek 2 Detik

No	Variasi waktu gesek	Jarak dr sambungan	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{rata-rata} (μm)	Kekerasan (VHN)	
1.	2 detik	Berputar	20.0 mm	48.0	48.0	48.00	161.0
			15.0 mm	48.0	49.0	48.50	157.7
			8.0 mm	49.0	50.0	49.50	151.4
			3.5 mm	65.0	64.0	64.50	89.1
			1.5 mm	62.0	62.0	62.00	96.5
			0.5 mm	68.0	68.0	68.00	80.2
		Diam	0.0 mm	60.0	60.0	60.00	103.0
			0.5 mm	63.5	63.0	63.25	92.7
			1.5 mm	63.0	63.0	63.00	93.4
			3.5 mm	70.0	70.0	70.00	75.7
			8.0 mm	56.0	56.0	56.00	118.3
			15.0 mm	50.0	52.0	51.00	142.6
			20.0 mm	55.0	54.0	54.50	124.9

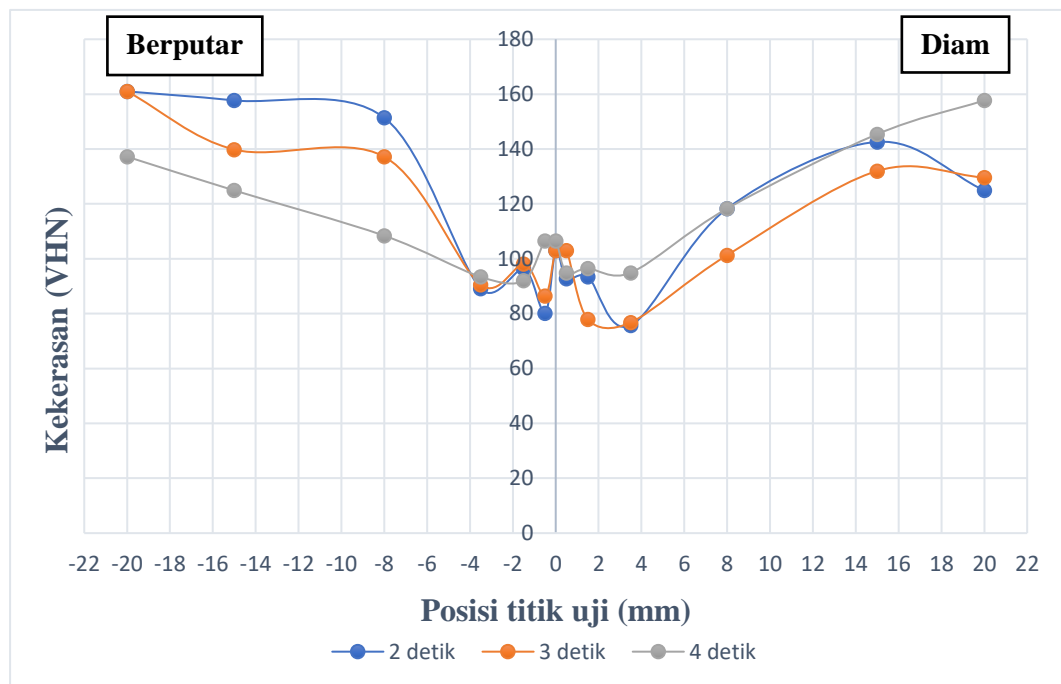
Tabel 4.3 Hasil Uji Kekerasan Variasi Waktu Gesek 3 Detik

No	Variasi waktu gesek	Jarak dr sambungan	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{rata-rata} (μm)	Kekerasan (VHN)	
2.	3 detik	Berputar	20.0 mm	48.0	48.0	48.00	161.0
			15.0 mm	51.0	52.0	51.50	139.8
			8.0 mm	52.0	52.0	52.00	137.2
			3.5 mm	65.0	63.0	64.00	90.5
			1.5 mm	63.0	60.0	61.50	98.1
		Diam	0.5 mm	65.0	66.0	65.50	86.4
			0.0 mm	60.0	60.0	60.00	103.0
			0.5 mm	60.0	60.0	60.00	103.0
			1.5 mm	69.0	69.0	69.00	77.9
			3.5 mm	70.0	69.0	69.50	76.8
			8.0 mm	61.0	60.0	60.50	101.3
			15.0 mm	53.0	53.0	53.00	132.0
			20.0 mm	54.0	53.0	53.50	129.6

Tabel 4.4 Hasil Uji Kekerasan Variasi Waktu Gesek 4 Detik

No	Variasi waktu gesek	Jarak dr sambungan	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{rata-rata} (μm)	Kekerasan (VHN)	
3.	4 detik	Berputar	20.0 mm	51.0	53.0	52.00	137.2
			15.0 mm	54.0	55.0	54.50	124.9
			8.0 mm	57.0	60.0	58.50	108.4
			3.5 mm	63.0	63.0	63.00	93.4
			1.5 mm	64.0	63.0	63.50	92.0
		Diam	0.5 mm	59.0	59.0	59.00	106.5
			0.0 mm	58.0	60.0	59.00	106.5
			0.5 mm	62.0	63.0	62.50	94.9
			1.5 mm	62.0	62.0	62.00	96.5
			3.5 mm	62.0	63.0	62.50	94.9
			8.0 mm	55.0	57.0	56.00	118.3
			15.0 mm	51.0	50.0	50.50	145.4
			20.0 mm	49.0	48.0	48.50	157.7

Untuk memudahkan analisis dan pembahasan, maka akan ditampilkan grafik nilai kekerasan terhadap jarak sambungan pada hasil penyambungan las gesek bahan pipa kuningan dengan variasi waktu gesek 2 detik, 3 detik, dan 4 detik. Grafik hasil uji kekerasan dapat dilihat pada gambar 4.10 berikut.



Gambar 4.11 Grafik Nilai Kekerasan

Pada gambar 4.11 menunjukkan bahwa nilai kekerasan tertinggi terjadi pada daerah logam induk spesimen yang berputar dengan variasi waktu gesek 2 detik dan 3 detik. Nilai kekerasan tersebut berjarak 20 mm dari daerah sambungan dengan nilai kekerasan masing-masing 161.0 VHN. Sedangkan untuk nilai kekerasan terendah terjadi pada spesimen diam variasi waktu gesek 2 detik, jarak 3.5 mm dari daerah sambungan dengan nilai kekerasan 75.7 VHN. Pada daerah sambungan nilai kekerasan tertinggi didapatkan pada spesimen dengan variasi waktu gesek 4 detik, jarak 0 mm yaitu sebesar 106.5 VHN. Sedangkan pada variasi waktu gesek 2 detik dan 3 detik pada daerah sambungan nilai kekerasannya cenderung menurun dan sama yaitu sebesar 103.0 VHN. Selanjutnya, pada jarak yang semakin jauh dari sambungan pengelasan didapatkan nilai kekerasan yang semakin meningkat. Hal ini disebabkan pada saat proses pengelasan gesek terjadi deformasi plastis yang menyebabkan butiran-butiran kecil menumpuk pada daerah sambungan pengelasan. Kolbi, (2015), mengatakan bahwa lama waktu gesek ketika pengelasan berlangsung akan mempengaruhi kekerasan hasil las. Hal ini dikarenakan *weld nugget* sudah mulai dingin dan proses difusi antar atom kurang.

Dari grafik nilai kekerasan diatas dapat disimpulkan bahwa penggunaan variasi waktu gesek yang semakin lama dapat mempengaruhi nilai kekerasan yang berbeda-beda. Nilai kekerasan daerah sambungan variasi waktu gesek 4 detik memiliki nilai kekerasan lebih besar dibandingkan nilai kekerasan variasi waktu gesek 2 detik dan 3 detik. Pada daerah sambungan variasi waktu gesek 4 detik nilai kekerasannya 106.5 VHN. Sedangkan pada variasi waktu gesek 2 detik dan 3 detik nilai kekerasannya sama yaitu sebesar 103.0 VHN. Hal ini menandakan bahwa penggunaan waktu gesek yang semakin lama akan sebanding dengan panas yang dihasilkan. Sedangkan semakin besar panas yang dihasilkan akan mempengaruhi perubahan struktur mikro yang ada pada logam tersebut. Perubahan struktur mikro inilah yang mempengaruhi turunnya nilai kekerasan dari hasil sambungan las. Fenomena ini juga didukung pada hasil pengujian mikro struktur dimana pada daerah sambungan foto struktur mikro variasi waktu gesek 4 detik butiran-butiran kecil lebih halus dan rapat dibandingkan foto struktur mikro variasi waktu gesek 2 detik dan 3 detik.

Hasil penelitian Kolbi, (2015), dalam hasil pengujian kekerasannya menjelaskan bahwa semakin lama waktu gesek yang diberikan maka kekerasan pada daerah sambungan semakin menurun. Dapat disimpulkan bahwa hasil pengujian kekerasannya memiliki perbedaan dengan penelitian ini. Hal ini mungkin disebabkan karena mekanisme pengelasan gesek pada penelitiannya masih menggunakan pegas sebagai pemberian tekanan gesek, sehingga tekanan yang diberikan tidak konstan.

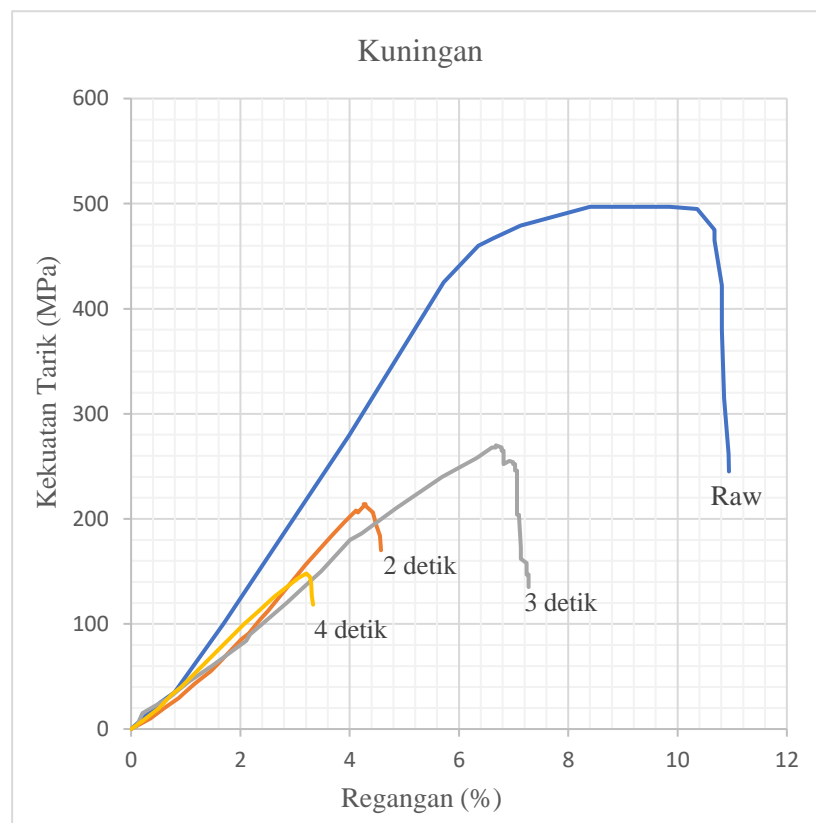
4.5 Hasil dan Analisis Pengujian Tarik

Pegujian tarik ini dilakukan 3 kali pengujian pada masing-masing spesimen variasi waktu gesek. Sebelum melakukan pengujian tarik, spesimen uji tarik dilakukan proses pemesinan untuk menghilangkan *flash* pada daerah sambungan dan dibentuk sesuai standar *JIZ Z 2201*. Hasil spesimen setelah dilakukan pemesinan dapat dilihat pada gambar 4.12.



Gambar 4.12 Spesimen Uji Tarik.

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 4.13.



Gambar 4.13 Grafik Hubungan Antara Kekuatan Tarik (MPa) dengan Regangan (%) Hasil Uji Tarik.

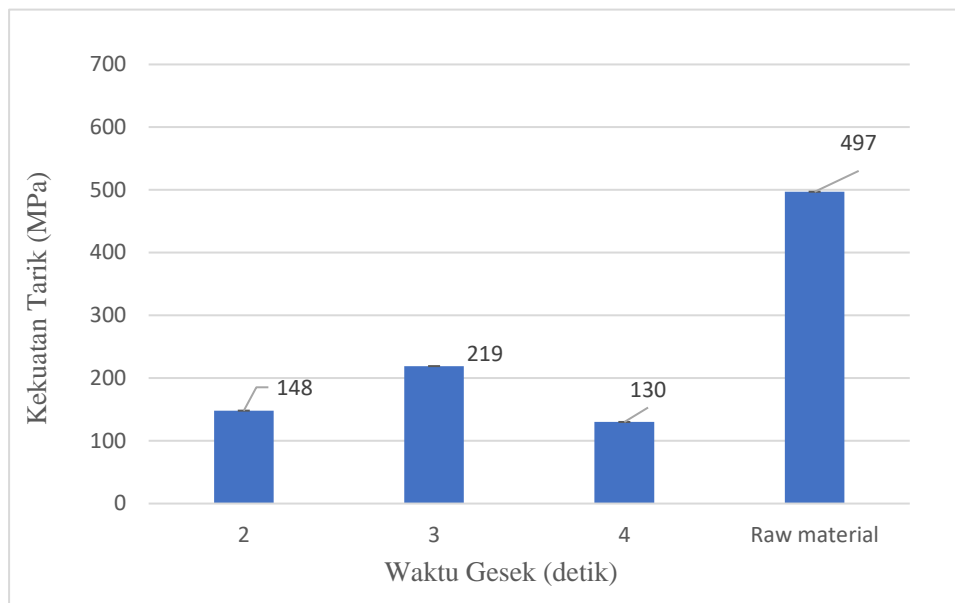
Gambar 4.13 dapat diketahui bahwa hasil kekuatan tarik pada raw material pipa kuningan lebih besar dibandingkan dengan kekuatan tarik hasil sambungan pengelasan dengan variasi waktu gesek. Gambar 4.13 dapat diamati bahwa pada raw material mengalami bentuk patahan ulet yang ditunjukkan oleh kekuatan tarik yang cukup tinggi, sedangkan pada sambungan hasil pengelasan gesek tingkat keuletannya menurun. Hal ini disebabkan karena pada daerah sambungan mengalami perubahan struktur mikro akibat proses pengelasan gesek.

Tabel 4.5. Hasil Nilai Kekuatan Tarik Variasi Waktu Gesek 2, 3, 4 detik

Waktu Gesek (detik)	Ke 1	Ke 2	Ke 3	Kekuatan tarik rata-rata (MPa)
2 detik	93 MPa	214 MPa	136 MPa	148 MPa
3 detik	210 MPa	270 MPa	178 MPa	219 MPa
4 detik	122 MPa	119 MPa	148 MPa	130 MPa
Raw material	497 MPa	500 MPa	496 MPa	497 MPa

Tabel 4.6. Hasil Nilai Rata-rata Kekuatan Tarik dan Regangan Varasi Waktu Gesek 2, 3, 4 Detik dengan Putaran Mesin 1000 Rpm

No	Waktu Gesek (detik)	Kekuatan Tarik rata-rata (MPa) \pm SD	Regangan (%) \pm SD
1.	2	148 \pm 61	3 \pm 1,4
2.	3	219 \pm 46	5 \pm 1,9
3.	4	130 \pm 15	2,8 \pm 0,4
4.	Raw material	497 \pm 2	10,7 \pm 1,1

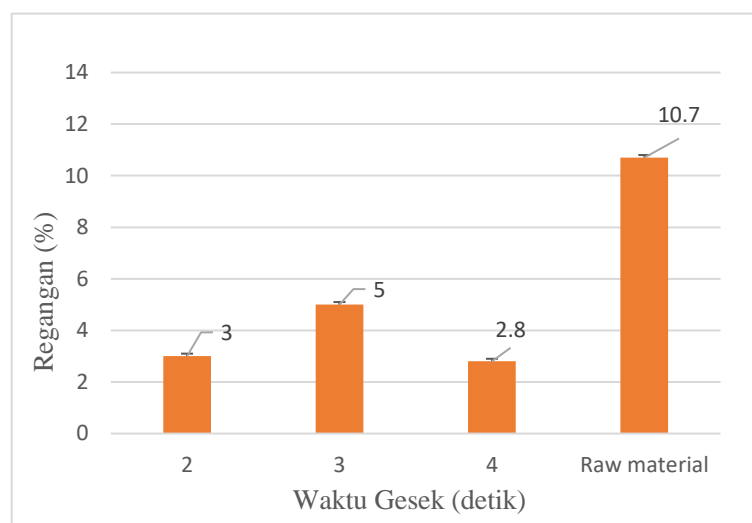


Gambar 4.14 Diagram Hubungan Antara Waktu Gesek dengan Kekuatan Tarik (MPa).

- Efisiensi kekuatan tarik tertinggi daerah sambungan dengan raw material:

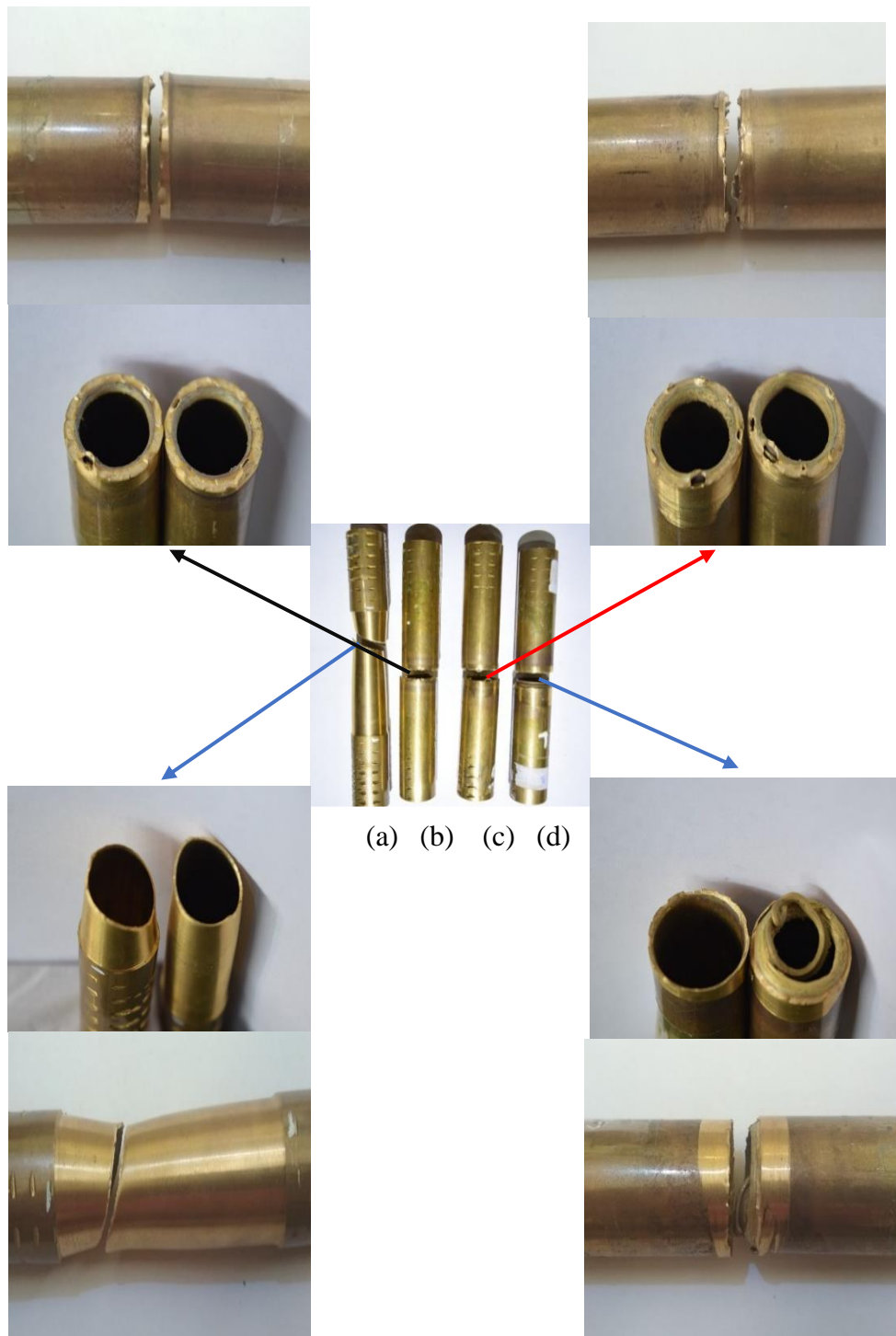
$$\eta = \frac{219}{497} = 0.44 \times 100\% = 44\%$$

Gambar 4.14 dapat diamati bahwa kekuatan tarik tertinggi pada hasil sambungan pengelasan gesek terjadi pada variasi waktu gesek 3 detik dengan kekuatan tarik 219 MPa, sedangkan pada variasi waktu gesek 2 detik kekuatan tariknya 148 MPa dan variasi waktu gesek 4 detik kekuatan tariknya 130 MPa. Dapat disimpulkan bahwa pada penelitian ini variasi waktu gesek 3 detik telah mencapai kekuatan tarik maksimum. Sebab, dengan ditambahkannya waktu gesek yang lebih lama kekuatan tariknya semakin menurun. Kekuatan tarik hasil sambungan pengelasan gesek pipa kuningan masih lebih rendah dari kekuatan tarik pipa kuningan tanpa sambungan yaitu sebesar 497 MPa. Hal ini disebabkan karena pada daerah sambungan mengalami perubahan struktur mikro akibat proses pengelasan gesek.



Gambar 4.15 Diagram Hubungan Antara Waktu Gesek dengan Regangan (%)

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa nilai regangan berbanding lurus dengan hasil kekuatan tarik. Nilai regangan tertinggi pada daerah sambungan pengelasan gesek terjadi pada variasi waktu gesek 3 detik dibandingkan variasi waktu gesek yang lain. Nilai regangan pada variasi waktu gesek 3 detik yaitu 5%, namun masih lebih kecil dari nilai regangan pada raw material yang memiliki nilai regangan sebesar 10,7%. Hal ini disebabkan 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.



Gambar 4.16 Hasil Patahan Spesimen Uji Tarik (a).Raw Material (b).Waktu Gesek 2 Detik (c).Waktu Gesek 3 Detik (d).Waktu Gesek 4 Detik.

Gambar 4.16 merupakan hasil patahan spesimen uji tarik. Dapat diamati pada gambar (a) yaitu raw material mengalami bentuk patahan ulet yang ditunjukkan dengan adanya pertambahan panjang yang cukup panjang. Pada gambar (b) waktu gesek 2 detik dan (c) waktu gesek 3 detik terlihat bahwa terdapat adanya difusi pengelasan yang tertinggal pada daerah sambungan, sedangkan pada gambar (d) waktu gesek 4 detik patahannya mengalami bentuk patahan getas yang ditunjukkan pada hasil sambungan pengelasan gesek dimana ditunjukkan dengan tidak adanya difusi pengelasan yang ada pada daerah sambungan, sehingga kekuatan tarik pada variasi waktu gesek 4 detik ini menurun dibandingkan variasi waktu gesek yang lainnya.