

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil pengamatan visual *friction welding*

Dari hasil pengamatan visual *friction welding* yang telah dilakukan, diperoleh data sebagai berikut ini:

Tabel 4.1 Hasil Visual Lasan

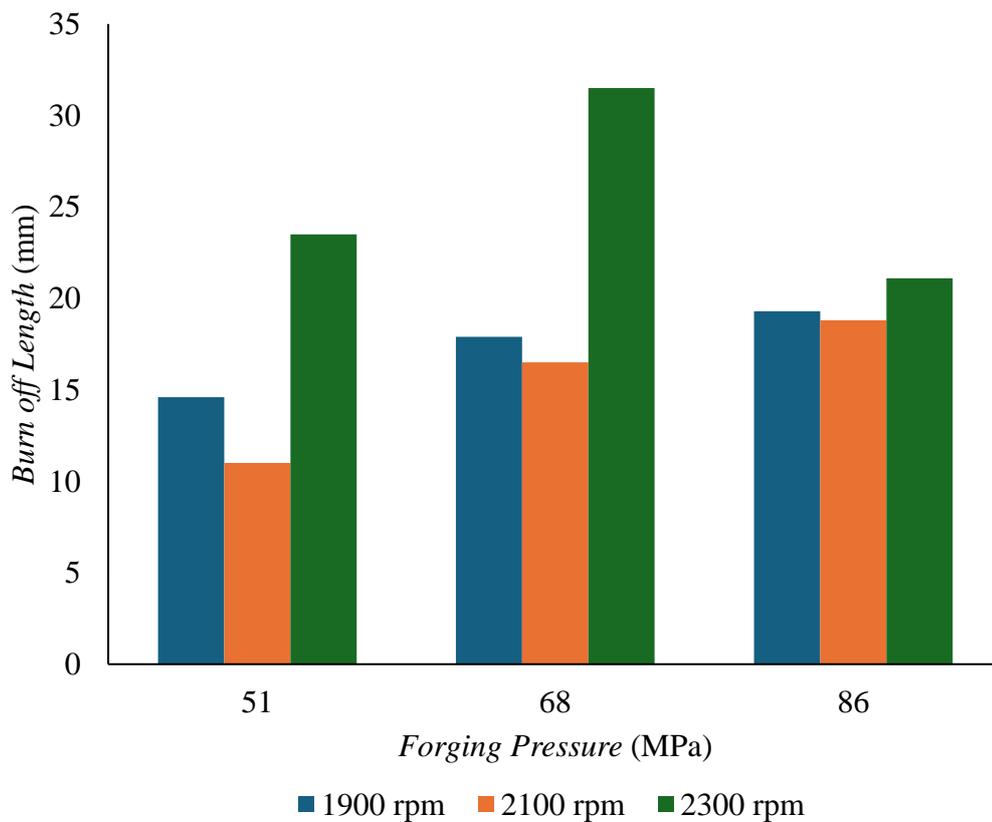
No	V (rpm)	P ₂ (MPa)	Panjang Akhir	<i>Burn Off Length</i> (mm)	Flash (mm ³)
1	1900	51		14,6	1650,38
2	1900	68		17,9	2023,42
3	1900	86		19,3	2181,67
4	2100	51		11	1243,44

5	2100	68		16,5	1865,16
6	2100	86		18,8	2125,15
7	2300	51		23,5	2656,44
8	2300	68		31,5	3560,76
9	2300	86		21,1	2385,14

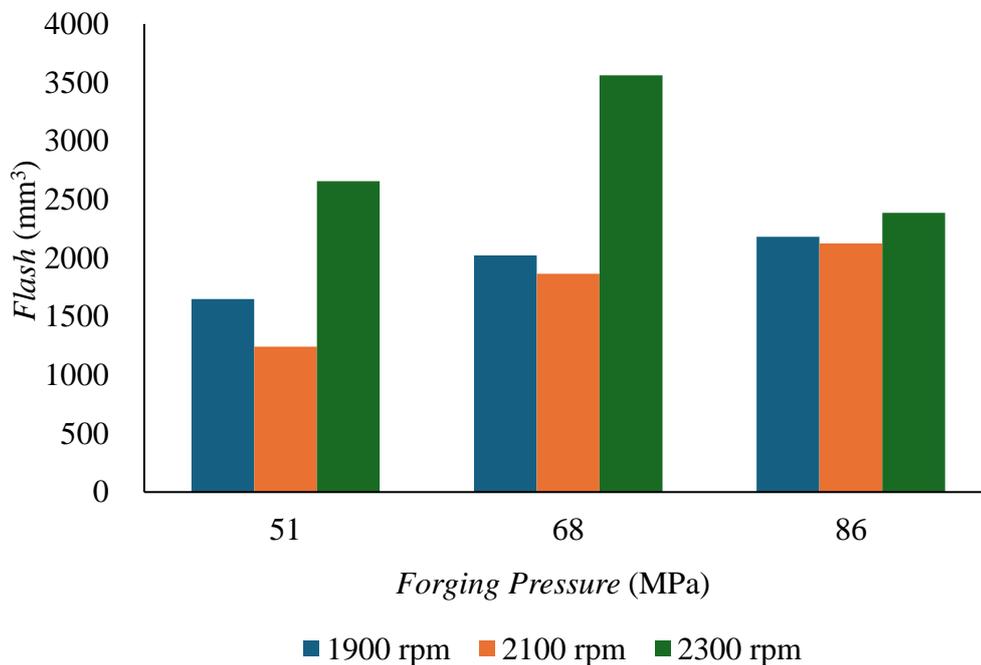
Dapat dilihat pada Table 4.1 merupakan hasil foto makro pada sambungan *dissimilar metal* Al – Cu dengan variasi kecepatan putaran dan *forging pressure*. Panjang total awal *specimen friction welding* adalah 140 mm. Pada tabel di atas terdapat istilah *burn off length* dan *flash*, *burn off length* adalah panjang spesimen yang berkurang akibat adanya gesekan antara dua spesimen, lalu salah satu spesimen diberikan tekanan gesek sehingga akan menimbulkan panas pada dua

spesimen tersebut dan mengakibatkan terjadinya deformasi plastis *pada* spesimen saat proses pengelasan berlangsung, sedangkan *flash* adalah lelehan atau deformasi plastis yang timbul di pusat bidang gesekan dan tempaan pada sampel saat proses pengelasan berlangsung.

Nilai *burn off length* di dapatkan dengan cara menghitung panjang awal dikurang dengan panjang akhir yang dimana hasil dari pengurangan tersebut didapatkan nilai *burn off length*. Sedangkan nilai *flash* didapatkan dengan cara menghitung menggunakan rumus volume yang dimana perhitungan hasil *burn off length* dan *flash* dapat dilihat pada lampiran A no 1 dan no 2. Untuk melihat grafik dari *burn off length* dan *flash* dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



Gambar 4.1 Diagram *burn off length* spesimen



Gambar 4.2 Diagram *flash* spesimen

Setelah dilakukan pengamatan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 terdapat fenomena yang terjadi pada saat proses pengelasan berlangsung. Menurut Agus Sasmito mengacu dari panjang awal sampel terlihat adanya peningkatan *burn off length* yang menyebabkan panjang sampel berkurang karena kecepatan putaran dan *forging pressure* yang semakin besar, hal ini menyebabkan *burn off length* juga semakin meningkat [6]. Sedangkan menurut Hudiyo Firmanto semakin tinggi kecepatan putarannya proses pemanasan pada sampel juga akan lebih cepat yang dapat menyebabkan lebih banyaknya pengurangan panjang (*burn off-length*) pada sampel [53].

Pada penelitian kali ini dapat disimpulkan seiring dengan meningkatnya *burn off length*, maka pembentukan *flash* juga akan terjadi secara beriringan. Hal ini dapat dikarenakan adanya peningkatan *burn off length* maka akan terjadi

pelelehan yang terjadi pada material aluminium 6063 akibat adanya beban aksial dan juga *friction pressure*, sehingga pembentukan *flash* juga akan meningkat. Hal ini dibuktikan dengan grafik Gambar 4.2 yang merepresentasikan *flash* yang berbanding lurus dengan grafik *burn off length*.

4.2 Hasil uji tarik

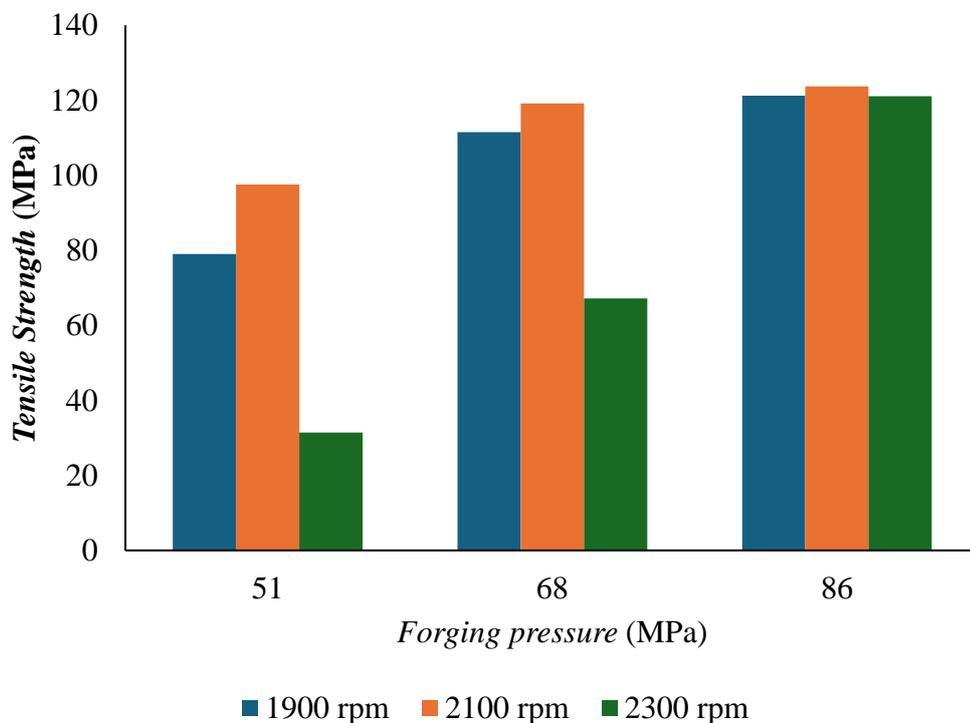
Pengujian Tarik pada penelitian ini dilakukan menggunakan mesin uji tarik *universal testing machine* (UTM). Dapat dilihat data uji tarik pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Uji Tarik

No	V (rpm)	P2 (MPa)	<i>Tensile Strength</i> (MPa)
1	1900	51	79,0
2	1900	68	111,5
3	1900	86	121,2
4	2100	51	97,5
5	2100	68	119,2
6	2100	86	123,7
7	2300	51	31,4
8	2300	68	67,2
9	2300	86	121,1

Data hasil uji tarik ditampilkan dalam Tabel 4.2, yang mencakup pengaruh variasi kecepatan putaran (V), tekanan tempa (P2) dan kekuatan tarik (*tensile strength*) pada setiap sampel pengelasan rotary *friction welding* (RFW). Berdasarkan hasil uji tarik, dilakukan analisis perbandingan nilai tegangan

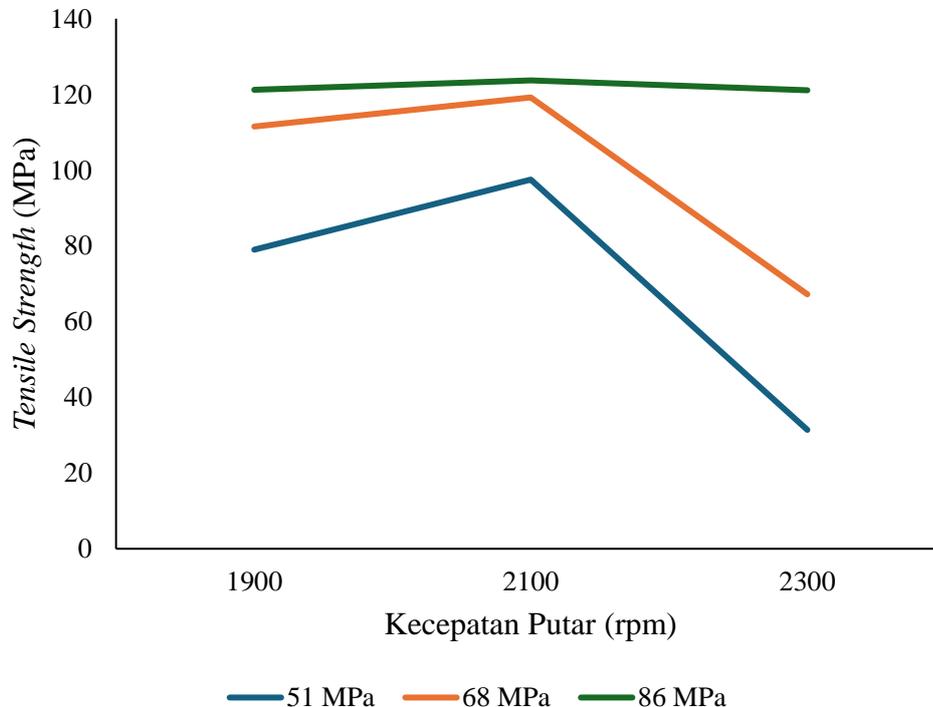
maksimal untuk setiap sampel, yang dipengaruhi oleh kombinasi kecepatan putaran dan tekanan tempa yang digunakan. Dari hasil yang didapat mengenai nilai kekuatan tarik (*tensile strength*) sampel pengelasan rotary *friction welding* (RFW) dibuatlah grafik perbandingan nilai tegangan dari masing masing sampel dengan variasi kecepatan putaran dan *forging pressure*. Grafik nilai tegangan terhadap *forging pressure* dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil kuat tarik terhadap *forging pressure*

Dari hasil pengujian pada Gambar 4.3, diperoleh bahwa pada variasi kecepatan putar 1900 rpm, terjadi peningkatan kekuatan tarik dari 79 MPa pada 51 MPa menjadi 111,5 MPa pada 68 MPa, dan mencapai 121,2 MPa pada 86 MPa. Begitu pula pada sampel dengan kecepatan putar 2100 rpm, terjadi peningkatan kekuatan tarik dari 97,5 MPa pada 51 MPa menjadi 119,2 MPa pada 68 MPa, dan

123,7 MPa pada 86 MPa. Sementara itu, sampel dengan kecepatan putar 2300 rpm menunjukkan hasil peningkatan kekuatan tarik yang signifikan, dimulai dari 31,4 MPa pada 51 MPa, naik menjadi 67,2 MPa pada 68 MPa, dan mencapai 121 MPa pada 86 MPa. Semua sampel menunjukkan kecenderungan peningkatan kekuatan tarik seiring dengan meningkatnya tekanan tempa selama proses *rotary friction welding* (RFW). Fenomena ini sesuai dengan literatur yang disampaikan oleh Purwanto dkk., di mana dijelaskan bahwa semakin tinggi tekanan tempa yang diterapkan selama proses pengelasan, maka akan memperkuat ikatan antar atom pada material. Selain itu, peningkatan tekanan juga berkontribusi pada pengurangan porositas pada material dan menghasilkan kompaksi yang lebih baik, yang pada gilirannya meningkatkan kekuatan mekanik material [49].



Gambar 4.4 Hasil kuat tarik terhadap kecepatan putar

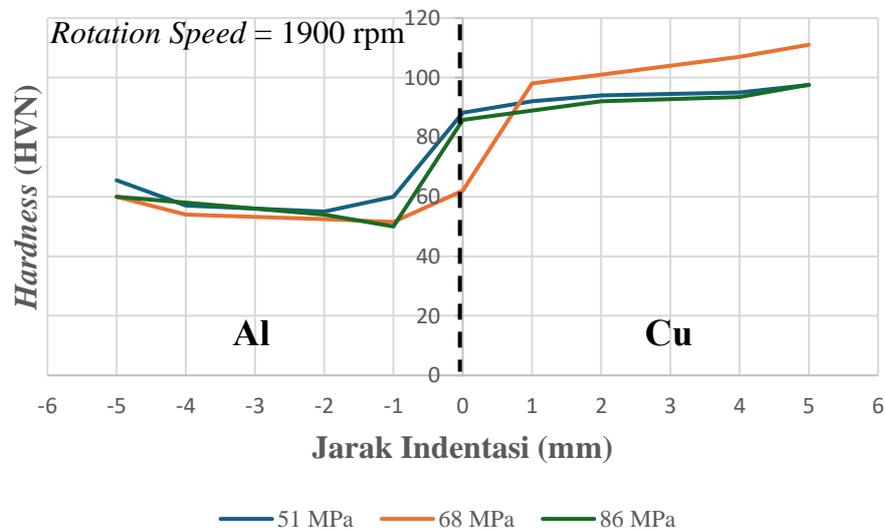
Sementara itu, jika ditinjau dari pengaruh kecepatan putaran terhadap nilai kekuatan tarik seperti pada Gambar 4.4, diketahui bahwa peningkatan kecepatan rotasi dari 1900 rpm menjadi 2100 rpm menghasilkan peningkatan kekuatan tarik pada sampel 51 MPa, dari 79 MPa menjadi 97,5 MPa. Namun, terjadi penurunan drastis saat kecepatan ditingkatkan lebih lanjut menjadi 2300 rpm, dengan kekuatan tarik menurun menjadi 31,4 MPa. Hal serupa juga diamati pada sampel dengan *forging pressure* 68 MPa dan 86 MPa, di mana kekuatan tarik meningkat saat kecepatan rotasi naik dari 1900 rpm ke 2100 rpm, namun kembali menurun ketika kecepatan mencapai 2300 rpm. Penurunan kekuatan tarik pada kecepatan 2300 rpm dapat dijelaskan melalui analisis efek *heat generation* (pembentukan panas) selama proses *friction welding* dengan kecepatan rotasi tinggi. Peningkatan kecepatan rotasi pada 2300 rpm menghasilkan panas yang lebih besar selama proses pengelasan, yang dapat menyebabkan degradasi mikrostruktur material, serta memperluas zona *heat affected zone* (HAZ). Zona HAZ yang lebih besar cenderung memiliki struktur mikro yang kurang optimal, seperti munculnya butiran yang kasar atau transformasi fasa yang tidak diinginkan, yang pada akhirnya mengurangi kekuatan mekanik sambungan [50].

Selain itu, tingginya deformasi plastis pada daerah sambungan akibat peningkatan panas dan tekanan juga dapat berkontribusi pada penurunan kekuatan tarik. Peningkatan suhu yang berlebihan dalam proses *welding* menyebabkan deformasi plastis yang tidak merata, serta berpotensi menyebabkan adanya konsentrasi tegangan (*stress concentration*) yang dapat memicu cacat lokal di daerah sambungan. Cacat-cacat ini dapat melemahkan sambungan secara

keseluruhan dan menurunkan kekuatan tarik. Dari analisis ini, dapat disimpulkan bahwa meskipun peningkatan kecepatan rotasi dan tekanan tempa secara umum dapat memperkuat sambungan dalam proses *friction welding*, ada batas optimal di mana efek peningkatan tersebut menjadi beerbanding terbalik. Kecepatan yang terlalu tinggi, seperti 2300 rpm dalam kasus ini, justru menghasilkan degradasi performa sambungan akibat efek termal dan deformasi yang tidak terkendali. Ini menunjukkan pentingnya optimasi parameter proses, terutama kecepatan rotasi, untuk mencapai kualitas sambungan yang maksimal tanpa mengorbankan sifat mekanik material. Dalam mencari nilai optimal, maka didapatkan tekanan yang tinggi dengan kecepatan rotasi yang berkisar di nilai 1900 rpm. Nilai ini menghasilkan kekuatan *tensile* yang cenderung tinggi. Kecepatan putar yang terlampau tinggi hingga 2300 rpm menghasilkan panas yang lebih tinggi dikarenakan kondisi gesek yang makin sering terjadi pada daerah *interface*. Panas ini dapat menyebar ke daerah lain dan mempengaruhi struktur mikro pada material sehingga dapat menurunkan sifat mekanik dari daerah yang terkena efek panas tersebut.

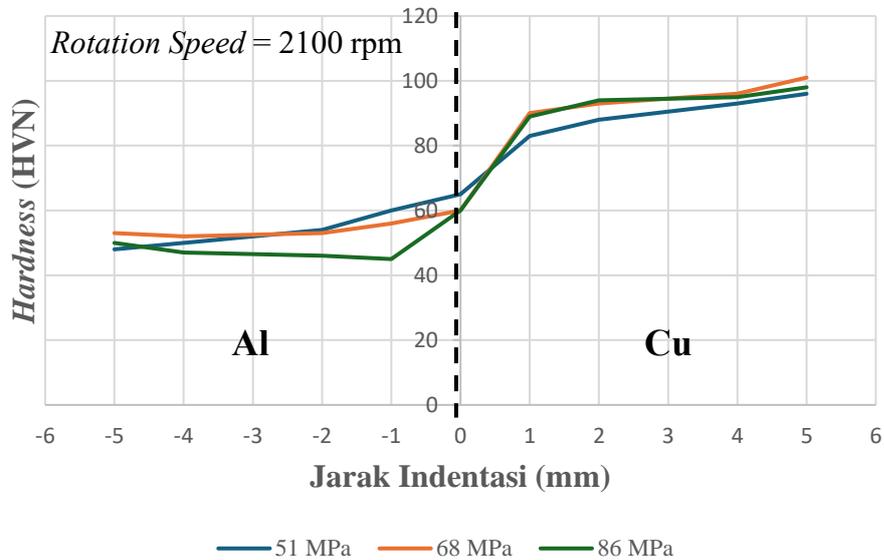
4.3 Hasil uji kekerasan

Pada penelitian ini pengambilan data uji kekerasan dilakukan pada 9 titik yang berbeda dengan beban 2 kgf dimana dilakukan pada 2 titik pada *base metal*, 1 titik daerah sambungan dan 4 titik daerah dekat sambungan, standar yang digunakan adalah ASTM E384. Hasil pengujian ditampilkan menjadi bentuk grafik garis pada gambar yang di tunjukan di bawah ini Gambar 4.5



Gambar 4.5 Hasil uji kekerasan kecepatan putaran 1900 rpm

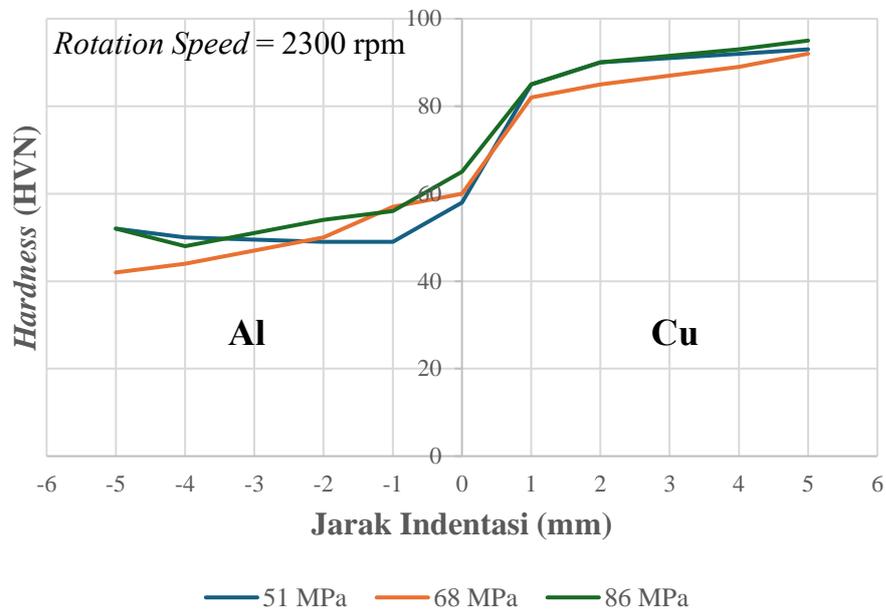
Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian kekerasan dipaparkan dalam bentuk grafik garis yang terdapat pada Gambar 4.5 pada gambar tersebut parameter variasi kecepatan putaran yaitu 1900 rpm dengan variasi parameter *Forging pressure* 51, 68, dan 86 MPa. Dapat dilihat pada jarak 0mm yang merupakan daerah sambungan Al-Cu, yang dimana nilai tertinggi pada daerah sambungan didapatkan pada parameter *forging pressure* 51 MPa sebesar 88,2 HVN. Sedangkan nilai kekerasan terendah pada daerah sambungan atau pada parameter *forging pressure* 68 MPa sebesar 62 HVN. kecenderungan dari uji kekerasan aluminium 6063 pada variasi kecepatan putaran 1900 rpm dengan variasi parameter *forging pressure* 51, 68, dan 86 MPa pada daerah Al (jarak uji -5; -4; -2; -1mm) mengalami penurunan nilai kekerasan. Sedangkan pada variasi parameter *forging pressure* 51, 68, dan 86 MPa pada daerah Cu (jarak uji +5; +4; +2; +1mm) mengalami kecenderungan peningkatan nilai kekerasan.



Gambar 4.6 Hasil uji kekerasan kecepatan putaran 2100 rpm

Selanjutnya pada Gambar 4.6 dengan variasi kecepatan putaran 2100 Rpm dan variasi parameter *forging pressure* 51, 68, dan 86 MPa mengalami penurunan nilai kekerasan pada daerah sambungan las. Untuk variasi pada kecepatan putaran 2100 dengan parameter *forging pressure* 51 MPa mempunyai nilai kekerasan pada sambungan sebesar 65 HVN, nilai kekerasan logam induk aluminium 6063 pada jarak -5mm yaitu sebesar 48 HVN, sedangkan nilai kekerasan pada logam induk tembaga pada jarak +5 mm yaitu sebesar 96 HVN. Selanjutnya nilai kekerasan pada parameter *forging pressure* 68 MPa yaitu sebesar 60 HVN pada daerah sambungan, nilai kekerasan logam induk aluminium 6063 pada jarak -5mm yaitu sebesar 53 HVN sedangkan nilai kekerasan pada logam induk tembaga pada jarak +5mm yaitu sebesar 101 HVN. Selanjutnya nilai kekerasan pada parameter *forging pressure* 86 MPa yaitu sebesar 60 HVN pada sambungan, nilai kekerasan logam induk

aluminium 6063 pada jarak -5mm yaitu sebesar 50 HVN sedangkan nilai kekerasan pada logam induk tembaga pada jarak +5mm yaitu sebesar 98 HVN.



Gambar 4.7 Hasil uji kekerasan kecepatan putaran 2300 rpm

Selanjutnya pada Gambar 4.7 dengan variasi kecepatan putaran 2300 rpm dan variasi parameter *forging pressure* 51, 68, dan 86 MPa pada gambar diatas mengalami kenaikan kekerasan pada daerah sambungan las. Pada parameter variasi kecepatan 2300 Rpm dengan parameter *forging pressure* 51 MPa mempunyai nilai kekerasan sambungan sebesar 58 HVN, nilai kekerasan logam induk aluminium 6063 pada jarak -5mm yaitu sebesar 52 HVN, sedangkan nilai kekerasan pada logam induk tembaga pada jarak +5mm yaitu sebesar 93 HVN. Selanjutnya hasil nilai kekerasan pada parameter *forging pressure* 68 MPa mempunyai nilai kekerasan sambungan sebesar 60 HVN, dan nilai kekerasan logam induk aluminium 6063 pada jarak -5mm yaitu sebesar 42 HVN, sedangkan nilai kekerasan pada logam induk tembaga pada jarak +5mm yaitu sebesar 92 HVN. selanjutnya

hasil nilai kekerasan pada parameter *forging pressure* 86 MPa mempunyai nilai kekerasan sambungan sebesar 65 HVN, nilai kekerasan logam induk aluminium 6063 pada jarak -5mm yaitu sebesar 52 HVN dan nilai kekerasan pada logam induk tembaga pada jarak +5mm yaitu sebesar 95 HVN.

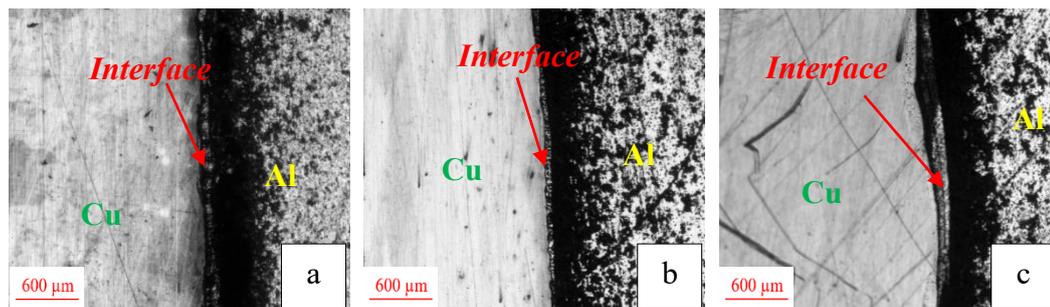
Rata-rata kekerasan dari masing-masing logam Al 6063 T6 dan Cu sebesar 83 HVN dan 98 HVN dimana Cu memiliki nilai lebih besar dalam hal kekerasan apabila dibandingkan dengan Al. Hasil uji kekerasan pada *fusion zone* atau *interface* tertinggi didapatkan dengan parameter kecepatan putaran 1900 rpm dan *forging pressure* 51 MPa yaitu sebesar 88,2 HVN dengan efisiensi kekerasan sambungan terhadap *base metal* Al sebesar 106,3%. Selanjutnya kekerasan pada *fusion zone* atau *interface* terendah didapatkan dengan parameter kecepatan putaran 2300 dan *forging pressure* 51 MPa yaitu sebesar 58 HVN dengan efisiensi kekerasan sambungan terhadap *base metal* Al sebesar 69,9%.

Dari hasil efisiensi kekerasan sambungan terhadap *base metal* Al dapat disimpulkan kecepatan putaran tidak terlalu berpengaruh terhadap kekerasan sambungan dimana pada kecepatan rendah (1900 rpm) memiliki nilai kekerasan yang melebihi *base metal* aluminium 6063 T6 yaitu sebesar 88,2 HVN dengan nilai efisiensi sebesar 106,3% sedangkan pada kecepatan tinggi (2300 rpm) memiliki nilai kekerasan yang rendah yaitu 58 HVN dengan efisiensi sebesar 69,9%, fenomena ini sesuai dengan literatur yang disampaikan oleh Agus Sasmito dimana kekerasan menurun seiring dengan meningkatnya kecepatan putaran [6]. Dari hasil kekerasan menandakan terjadinya perpaduan antara struktur Al dan Cu, dimana seiring dengan bertambahnya jarak dari titik lasan, maka kekerasan akan cenderung

sama seperti masing-masing *base metal*. Hal ini sesuai dengan literatur dimana pada daerah lasan, proses gesekan menghasilkan suhu tinggi yang menyebabkan deformasi plastis pada material. Deformasi ini dapat memperbaiki struktur mikro, menghasilkan penghalusan butir (*grain refinement*) yang meningkatkan kekuatan dan kekerasan material [51].

4.4 Hasil pengamatan metalografi

Pengujian metalografi dilakukan dengan menggunakan mikroskop optic dengan pembesaran 100 kali, pengambilan data hasil pengujian metalografi mikro pengelasan dilakukan pada daerah las. Variasi kecepatan putaran terdapat 3 yaitu 1900, 2100, dan 2300, sedangkan untuk variasi *forging pressure* terdapat 3 yaitu 51 MPa, 68 MPa, dan 86 MPa. Sehingga pengambilan data mengenai pengujian metalografi ini sebanyak 9 kali. Data hasil pengujian metalografi ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

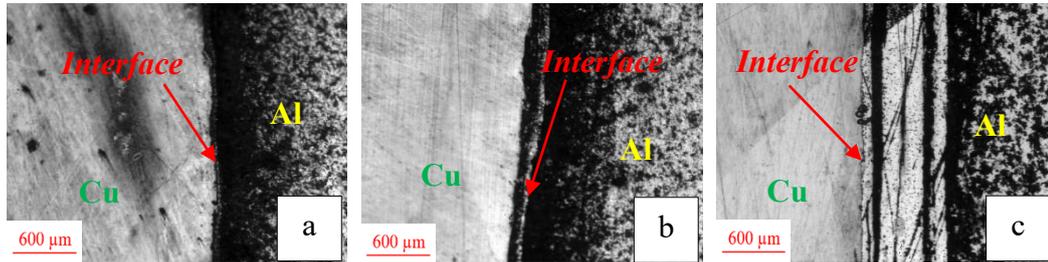


Gambar 4.8 Hasil pengamatan struktur mikro pada sampel dengan variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran (a) 1900 rpm, (b) 2100 rpm, dan (c) 2300 rpm

Hasil pengamatan struktur mikro pada material silinder pejal jenis material aluminium. Pada struktur mikro logam induk, material yang digunakan sebagai

bahan penelitian pada metode *friction welding* dengan pembesaran optik 100 kali. Pada Gambar 4.8a. variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm struktur partikel mengalami perubahan mengecil dan tersebar, disebabkan tingginya panas karena gesekan yang ditimbulkan dari putaran torsi dan tekanan yang terjadi. Gambar 4.8b. variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran 2100 rpm menunjukkan struktur aluminium mengalami perubahan struktur partikel melebar akibat panas disebabkan gesekan yang ditimbulkan dari kecepatan putar dan tekanan yang terjadi. Gambar 4.8c. variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran 2300 rpm struktur aluminium perubahan struktur butiran, disebabkan panas yang tinggi karena kecepatan putar menjadikan torsi meningkat dan gesekan dengan cepat.

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah logam induk tembaga, daerah terkena panas atau *heat affective zone*. Pada Struktur mikro logam induk, material yang digunakan sebagai bahan penelitian pada metode las gesek dengan pembesaran optik 100x dan seperti yang di tunjukan pada Gambar 4.8a. variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm menunjukkan perubahan struktur butiran mengecil akibat terkena panas, karena gesekan yang ditimbulkan dari putaran torsi dan tekanan yang terjadi. Gambar 4.8b. variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm struktur partikel melebar akibat panas disebabkan gesekan yang ditimbulkan dari kecepatan putar dan tekanan yang terjadi. Gambar 4.8c. variasi *forging pressure* 51 MPa dan variasi kecepatan putaran 2300 rpm struktur tembaga semakin melebar disebabkan panas yang tinggi akibat panas yang ditimbulkan dari kecepatan putar dan tekanan.

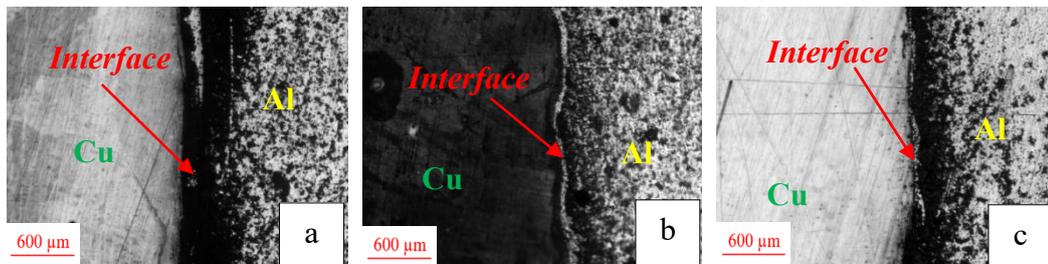


Gambar 4.9 Hasil pengamatan struktur mikro pada sampel dengan variasi *forging pressure* 68 MPa dan variasi kecepatan putaran (a) 1900 rpm, (b) 2100 rpm, dan (c) 2300 rpm

Hasil pengamatan struktur mikro pada material silinder pejal berbahan aluminium menunjukkan perubahan signifikan akibat proses las gesek. Struktur mikro pada logam induk diamati dengan pembesaran optik 100 kali, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Selanjutnya pada Gambar 4.9a variasi *forging pressure* 68 MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm partikel-partikel mengalami perubahan menjadi lebih kecil dan tersebar, yang disebabkan oleh tingginya panas akibat gesekan dari putaran torsi dan tekanan. Gambar 4.9b. variasi *forging pressure* 68 MPa dan variasi kecepatan putaran 2100 rpm menunjukkan bahwa partikel-partikel aluminium melebar karena panas yang dihasilkan dari gesekan, dipengaruhi oleh kecepatan putar dan tekanan selama proses. Sementara itu, pada Gambar 4.9c. variasi *forging pressure* 68 MPa dan variasi kecepatan putaran 2300 rpm struktur aluminium tidak mengalami perubahan signifikan karena panas yang dihasilkan lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh tingginya kecepatan putar yang menurunkan torsi dan memperlambat gesekan.

Pengamatan struktur mikro pada logam tembaga, khususnya di daerah terkena panas atau *heat-affected zone* (HAZ), juga menunjukkan perubahan. Dengan pembesaran optik 100 kali, pada Gambar 4.9a. variasi *forging pressure* 68

MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm terlihat bahwa butiran-butiran tembaga mengecil akibat panas yang dihasilkan oleh gesekan dari putaran torsi dan tekanan. Gambar 4.9b. variasi *forging pressure* 68 MPa dan variasi kecepatan putaran 2100 rpm memperlihatkan pelebaran partikel tembaga karena panas yang dihasilkan dari gesekan pada kecepatan putar dan tekanan tertentu. Gambar 4.9c. variasi *forging pressure* 68 MPa dan variasi kecepatan putaran 2300 rpm menunjukkan struktur tembaga yang semakin melebar, disebabkan oleh panas tinggi yang dihasilkan dari kecepatan putar dan tekanan selama proses las gesek.



Gambar 4.10 Hasil pengamatan struktur mikro pada sampel dengan variasi *forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran (a) 1900 rpm, (b) 2100 rpm, dan (c) 2300 rpm

Pengamatan struktur mikro pada material silinder pejal berbahan aluminium menunjukkan perubahan yang jelas akibat proses las gesek. Struktur mikro pada logam induk diperiksa menggunakan pembesaran optik 100 kali, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.10. Dapat dilihat pada Gambar 4.10a. variasi *forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm struktur partikel aluminium terlihat mengecil dan menyebar akibat panas yang dihasilkan dari gesekan selama putaran dan tekanan. Pada Gambar 4.10b. variasi *forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran 2100 rpm partikel aluminium melebar karena panas yang dihasilkan dari gesekan yang lebih kuat. Sedangkan pada Gambar 4.10c.

variasi *forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran 2300 rpm tidak ada perubahan besar pada struktur partikel karena panas yang dihasilkan lebih rendah, akibat kecepatan putar yang tinggi membuat torsi menurun dan mengurangi gesekan.

Pengamatan struktur mikro pada daerah logam induk tembaga, khususnya di zona yang terkena panas (*heat-affected zone* atau HAZ) menunjukkan perubahan signifikan akibat proses las gesek. Dengan menggunakan pembesaran optik 100x, seperti yang ditunjukkan, terlihat bahwa struktur butiran tembaga mengalami pengecilan dan pelebaran. Hal ini disebabkan oleh panas yang dihasilkan dari gesekan selama proses las gesek, yang dapat menyebabkan deformasi dan rekristalisasi pada mikrostruktur tembaga. Pada Gambar 4.10a. variasi *Forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran 1900 rpm butiran tembaga mengecil karena panas dari gesekan yang terjadi. Pada Gambar 4.10b. variasi *Forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran 2100 rpm partikel tembaga melebar karena panas dari gesekan yang lebih besar, dan di Gambar 4.10c. variasi *Forging pressure* 86 MPa dan variasi kecepatan putaran 2300 rpm butiran tembaga semakin melebar karena suhu yang sangat tinggi yang dihasilkan oleh gesekan pada kecepatan putar dan tekanan yang lebih tinggi.

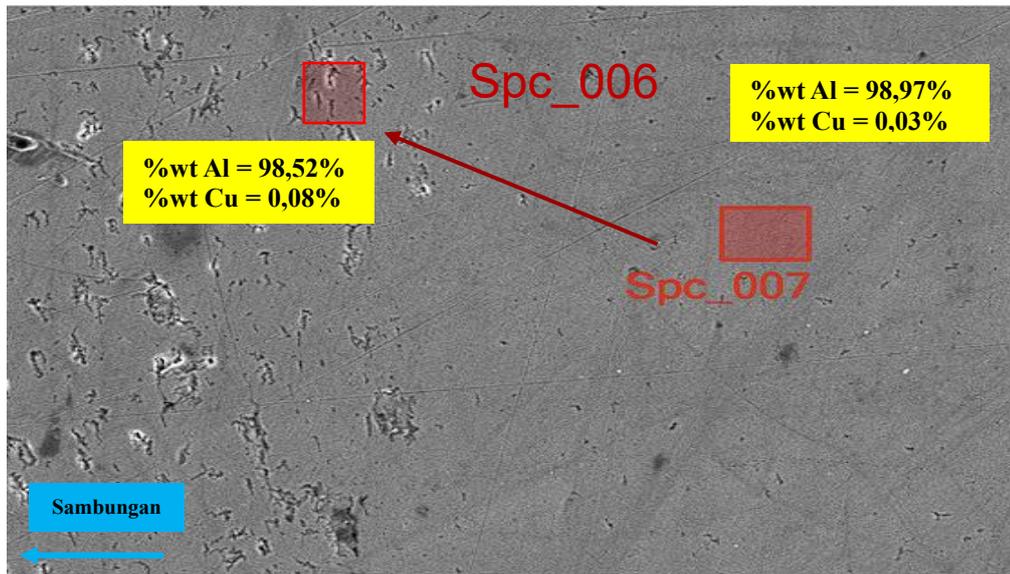
Hasil pengamatan struktur mikro daerah HAZ tembaga pada Variasi kecepatan putaran terdapat 3 yaitu 1900, 2100, dan 2300, sedangkan untuk variasi *forging pressure* terdapat 3 yaitu 51 MPa, 68 MPa, dan 86 MPa. dengan per besaran lensa 100 kali struktur mikro mengalami pengasaran dan pembesaran butiran dikarenakan pengaruh panas yang berlangsung saat pengelasan. Struktur mikro

memiliki ukuran agak berjauhan dan memanjang persebaran butiran agak berjauhan. Struktur mikro memiliki jarak berjauhan dan memanjang mengecil sebaran partikelnya berjauhan.

Struktur mikro pada aluminium mengecil dan menempel pada tembaga, sedangkan tembaga tidak meleleh dikarenakan mempunyai titik leleh yang tinggi daripada Aluminium. Struktur mikro hasil pengelasan terlihat bahwa setiap variasi putaran gesekan berbeda pada daerah sambungan (*interface*). Pada sambungan las gesek dengan variasi *forging pressure* 86 MPa, sambungan terlihat rapi lurus yang disebabkan adanya tekanan yang besar sehingga susunan partikelnya menjadi sangat padat. Secara literatur, titik leleh tembaga dan aluminium masing-masing adalah 1200 dan 660 °C. Melihat dari sambungan yang terjadi, dapat dilihat bahwa daerah sambungan telah mencapai suhu deformasi plastis dengan temperatur berkisar 200 °C, nilai ini telah dilampaui selama proses *friction welding* dan dapat dilihat bahwa aluminium mengalami paling banyak pembentukan butir yang dapat dilihat pada beberapa gambar sebelumnya.

4.5 Hasil karakterisasi SEM-EDS (*Scanning Electron Microscope*)

Pada sub bab ini sampel yang digunakan adalah sampel nomor 8 dengan parameter 2300 *friction pressure* 19 MPa dan *forging pressure* 68 MPa. Dilakukan karakterisasi material menggunakan *scanning electron microscope* dengan bantuan *energy dispersive spectroscopy* untuk mengetahui kemungkinan fasa terbentuk pada beberapa bagian dari sampel. Diperoleh hasil pengujian SEM pada *base metal* aluminium adalah sebagai mana pada Gambar 4.11.



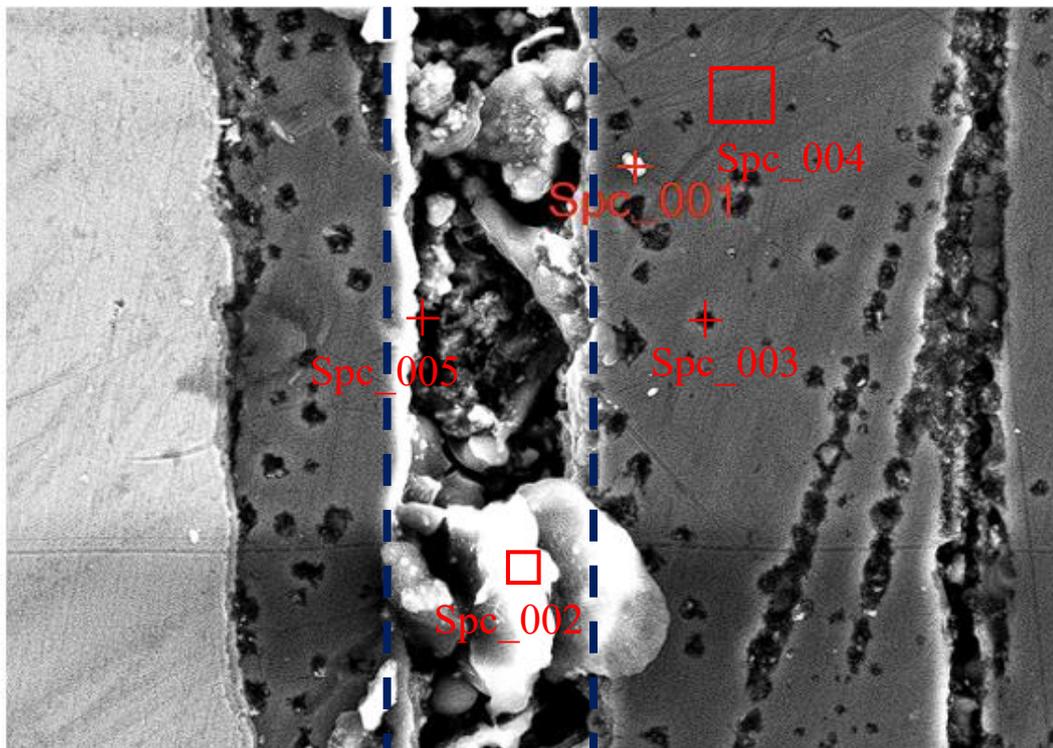
Gambar 4.11 Hasil SEM – EDX *base metal*

Pada Gambar 4.11 didapatkan hasil analisa SEM pada titik base metal aluminium. Secara visual, didapatkan hasil yang berbeda secara signifikan antara daerah Spc_007 dengan Spc_006 dimana daerah Spc_007 cenderung memiliki topologi yang rata, sedangkan daerah Spc_006 bersifat sebaliknya. Hal ini dikarenakan terdapat perbedaan suhu pada daerah Spc_007 dan Spc_006, kondisi ini mengakibatkan retak pada aluminium pada saat pendinginan. Selain itu, kondisi retak ini juga dapat diakibatkan oleh suhu tinggi selama pengelasan yang dapat mengubah struktur mikro di daerah Spc_006 dikarenakan berdekatan dengan sambungan, seperti adanya pembesaran butir yang menghasilkan retakan [52].

Meninjau dari sisi hasil konsentrasi unsur, dapat dilihat bahwa komposisi aluminium sedikit menurun di Spc_006 dibandingkan Spc_007, yang jauh dengan daerah sambungan. Selain itu, peningkatan kecil kandungan tembaga di Spc_006 dapat disebabkan oleh adanya migrasi tembaga dari daerah sambungan atau presipitasi lokal akibat pemanasan. Sementara itu, komposisi di Spc_007 tetap

stabil karena jauh dari daerah sambungan yang tidak terpengaruh signifikan oleh panas, yang menunjukkan bahwa adanya perubahan komposisi. Hal ini mengindikasikan dimana aluminium bermigrasi dari daerah yang lebih panas menuju daerah yang lebih dingin.

Untuk tahap selanjutnya, dilakukan pengujian SEM pada daerah dekat sambungan. Didapatkan hasil yang dapat dilihat pada Gambar 4.12 dibawah ini diperoleh hasil SEM dan EDX pada daerah sambungan lasan, pengujian dilakukan dengan 3 titik uji dimana tanda kotak menandakan pengujian dalam lingkup *square* atau *area* (Spc_002; Spc_004), tanda plus menandakan pengujian dalam bentuk titik atau *spot* (Spc_001; Spc_003; dan Spc_005).



Gambar 4.12 Hasil SEM – EDX daerah dekat sambungan

Melalui Gambar 4.12 di atas, Adapun diperoleh data hasil konsentrasi dari masing masing titik disajikan pada Tabel 4.3 sebagai berikut:

Tabel 4.3 Hasil Konsentrasi Unsur EDS

Unsur	Konsentrasi Unsur (wt%)				
	Spc_001	Spc_002	Spc_003	Spc_004	Spc_005
C	55,74	79,55	45,94	0	70,12
O	3,84	18,17	5,09	1,26	5,01
Mg	0,21	0,06	0,25	0,45	0,1
Al	39,04	0,94	47,09	96,4	22,66
Si	0,46	0,04	0,2	0,54	0,14
Ti	0	0,65	0	0	0,77
Fe	0,29	0,3	0,09	0,2	0,79
Cu	0,44	0,29	1,34	1,14	0,4
Total	100	100	100	100	100

Tabel 4.3 menjelaskan mengenai distribusi dari masing-masing titik yang diuji dimana terdapat variasi dari konsentrasi Al dan Cu pada masing-masing titik. Pada titik Spc_001, diketahui bahwa daerah ini memiliki konsentrasi utama C (55,74%), Al (39,04%), dan O (3,84%) yang mengindikasikan bahwa daerah ini merupakan bagian dominan dari logam Al (aluminium) *base metal*. Dikarenakan daerah ini masih tergolong *heat affected zone* maka terjadi kemungkinan deteksi fasa oksida yang menunjukkan adanya kemungkinan pembentukan oksida aluminium (Al_2O_3), yang terbentuk akibat paparan panas dan oksidasi selama proses pengelasan.

Pada titik Spc_002, dominasi karbon dan oksigen C (79,55%), O (18,17%), dan Al (0,94%) Konsentrasi aluminium sangat rendah pada titik ini, hal ini menunjukkan bahwa lapisan ini berada di permukaan dan tidak berasal langsung

dari base metal aluminium. Selain itu, pada daerah ini, kemungkinan terjadinya difusi sangatlah sedikit dikarenakan keterlibatan unsur lain seperti Cu, Mg, dan Fe sangat kecil yang mengindikasikan pemaduan minimal dari bahan Cu-Al di area ini.

Pada titik Spc_003, daerah hitam Al (47,09%), C (45,94%), dan O (5,09%).menandakan tingginya konsentrasi aluminium dengan karbon, yang menunjukkan bahwa area ini lebih mendekati material Al daripada material Cu. Kandungan oksigen menunjukkan adanya lapisan oksida, tetapi tidak sebanyak di area lain. Kehadiran Cu (1,34%) mengindikasikan bahwa ini adalah area peralihan (*intermediate zone*) antara material Cu dan Al.

Selanjutnya, diketahui pada titik Spc_004 yang merupakan daerah terjauh dari zona sambungan, diperoleh data bahwa Hampir seluruh area ini terdiri dari aluminium Al (96,4%), Si (0,54%), dan O (1,26%), menunjukkan bahwa ini adalah bagian dominan dari material aluminium tanpa banyak kontaminasi. Konsentrasi oksigen rendah menunjukkan sedikit atau tidak ada oksidasi yang signifikan di area ini. Unsur Cu hampir tidak ditemukan, sehingga kemungkinan besar ini adalah sisi aluminium yang jauh dari *interface*.

Dan pada titik Spc_005, didapatkan bahwa seiring dengan menjauhnya lokasi pengujian dari daerah sambungan menuju *base metal* Cu, tetap didapatkan komposisi karbon dengan sebagian besar aluminium C (70,12%), Al (22,66%), dan O (5,01%) yang menunjukkan adanya kontaminasi karbon, tetapi lebih sedikit dibandingkan Spc_002. Tingginya nilai konsentrasi Al di sini menunjukkan kemungkinan lapisan Al bercampur dengan karbon, terjadi akibat proses

pengelasan gesek yang menimbulkan residu. Sementara itu unsur lain seperti Fe dan Cu hadir dalam jumlah kecil, menunjukkan sedikit pengaruh dari material Cu.

4.6 Pembahasan

Setelah melihat, mengolah dan menganalisa data yang diperoleh, maka dilakukan korelasi antara data yang didapat dengan hasil yang diharapkan pada sampel.

4.6.1 Pengaruh variabel terhadap struktur mikro

Pada penelitian ini, pengamatan hasil visual spesimen *friction welding* meliputi *burn off length* dan *flash* yang dihasilkan pada proses pengelasan dengan variasi kecepatan putaran dan tekanan tempa. Berdasarkan Tabel 4.1, terlihat bahwa parameter proses, yaitu kecepatan putaran (rpm) dan tekanan (*forging pressure*), berpengaruh signifikan terhadap nilai *burn off length* dan *volume flash*. Pada kecepatan 1900 rpm, *burn off length* berkisar antara 14,6 mm hingga 19,3 mm, sementara pada kecepatan 2300 rpm, nilai ini meningkat dari 23,5 mm hingga 31,5 mm. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh meningkatnya panas yang dihasilkan dari gesekan dengan kecepatan putaran yang lebih tinggi. Panas ini menyebabkan deformasi plastis pada material sehingga terjadi pengurangan panjang spesimen. Selain itu, tekanan tempa yang lebih besar memberikan kontribusi pada peningkatan deformasi plastis, menghasilkan nilai *burn off length* yang lebih tinggi. Hal ini sejalan dengan penelitian Hudiyo Firmanto [53] yang menyatakan bahwa semakin cepat kecepatan putar, maka semakin besar pengurangan panjang spesimen akibat pemanasan yang cepat dan

intens. Sementara itu, *flash*, yaitu deformasi plastis yang terjadi di sekitar bidang gesekan, juga menunjukkan tren peningkatan dengan naiknya parameter proses. Pada kecepatan 1900 rpm, volume *flash* meningkat dari 1650,38 mm³ pada tekanan 51 MPa menjadi 2181,67 mm³ pada tekanan 86 MPa. Kejadian serupa juga diamati pada kecepatan 2300 rpm, dengan nilai *flash* tertinggi mencapai 3560,76 mm³ pada tekanan 68 MPa. Pembentukan *flash* yang lebih besar dapat dijelaskan oleh peningkatan *burn off length*, yang berkontribusi langsung terhadap jumlah material yang meleleh dan terdorong keluar dari daerah sambungan. Selain itu, gesekan yang lebih intens menghasilkan deformasi yang lebih besar, terutama pada material aluminium, yang memiliki titik leleh lebih rendah dibandingkan tembaga. Hal ini sesuai dengan literatur dari Agus Sasmito [6], yang menyatakan bahwa peningkatan kecepatan putaran dan tekanan tempa menghasilkan pembentukan *flash* yang lebih banyak pada material aluminium.

Hasil pengamatan struktur mikro pada daerah sambungan aluminium 6063 dan tembaga menunjukkan perubahan signifikan akibat parameter proses *friction welding*, yaitu kecepatan putaran dan *forging pressure*. Pengamatan ini dilakukan untuk memahami hubungan antara struktur mikro dengan sifat mekanik sambungan, serta menjelaskan fenomena yang terjadi pada daerah *Heat affected zone* (HAZ) dan weld zone. Dari hasil struktur mikro menggunakan OM, struktur mikro di zona *interface* menunjukkan perubahan ukuran dan bentuk butir. Pada parameter kecepatan putaran rendah (1900 rpm) dengan tekanan tempa rendah (51

MPa), struktur butir cenderung lebih kecil dan terdistribusi rapat. Hal ini disebabkan oleh deformasi plastis yang sedang serta panas yang cukup untuk menginisiasi terjadinya rekristalisasi butir. Sebaliknya, pada kecepatan putaran tinggi (2300 rpm) dan tekanan tempa tinggi (86 MPa), struktur butir terlihat lebih kasar dan tidak merata, yang diakibatkan oleh panas berlebih yang dapat memperluas zona rekristalisasi seperti yang dijelaskan pada Gambar 4.10c. Perubahan struktur mikro ini dapat dikaitkan dengan deformasi plastis antar logam aluminium pada tembaga pada zona *interface*. Pada parameter maksimumn (2300 rpm, 51 MPa), deformasi plastis yang berlebihan dapat menyebabkan pembentukan butir kasar yang mengurangi kekuatan sambungan akibat adanya konsentrasi tegangan di zona HAZ [41].

Distribusi elemen dan identifikasi fasa yang terbentuk dikarakterisasi menggunakan SEM-EDS. Pada daerah (titik Spc_004), ditemukan bahwa kandungan aluminium mencapai 96,4%, mengindikasikan kemurnian material yang relatif terjaga. Sebaliknya, pada daerah (titik Spc_003), ditemukan peningkatan kandungan Cu hingga 1,34%, yang dapat diasumsikan bahwa adanya difusi tembaga ke dalam aluminium akibat panas dan tekanan selama proses pengelasan. Distribusi oksigen juga terjadi di beberapa titik, terutama pada Spc_002 dimana menunjukkan peningkatan konsentrasi akibat pembentukan lapisan oksida (Al_2O_3) selama proses pengelasan. Lapisan oksida ini, meskipun tipis, berfungsi sebagai pelindung alami dari korosi, seperti yang telah dijelaskan

dalam Bab II mengenai sifat aluminium yang tahan korosi karena pembentukan oksida alami [12]. Namun, keberadaan oksigen yang berlebihan juga dapat mengindikasikan adanya cacat oksida, yang berpotensi melemahkan sambungan mekanik.

4.6.2 Pengaruh variabel terhadap kuat tarik

Hasil uji tarik menunjukkan hubungan yang kuat antara parameter proses *friction welding*, perubahan struktur mikro, hasil karakterisasi SEM-EDS, dan sifat mekanik sambungan, terutama *tensile strength*. Data menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putaran dan *forging pressure* memengaruhi kekuatan tarik secara signifikan, tetapi hasil terbaik hanya dapat dicapai dalam kondisi parameter yang optimal. Deformasi plastis menciptakan sambungan kuat dengan *burn off length* yang moderat dan *flash* yang proporsional. Namun, pada kecepatan 2300 rpm, volume *flash* yang berlebihan menunjukkan deformasi plastis yang tidak terkendali, yang mengakibatkan pembentukan zona lemah di sambungan dan menurunkan kekuatan tarik [41]. Pada kecepatan putaran sedang (2100 rpm) dan tekanan tinggi (86 MPa), struktur mikro yang terbentuk cenderung halus dan merata karena menghasilkan panas yang cukup tanpa menyebabkan *overheatnig*. Hal ini sesuai dengan hasil uji tarik, di mana *tensile strength* mencapai nilai maksimum 123,7 MPa. Sebaliknya, pada kecepatan putaran tinggi (2300 rpm), panas berlebih menghasilkan butir kasar pada zona *interface* dan HAZ, yang mengurangi kekuatan tarik hingga 31,4 MPa akibat degradasi mikrostruktur dan pelebaran zona HAZ [41].

Zona HAZ, seperti yang diidentifikasi memengaruhi sifat mekanik sambungan, pada parameter yang terbaik, zona HAZ relatif sempit dengan struktur mikro yang stabil, mendukung kekuatan tarik yang tinggi. Namun, pada parameter kecepatan putaran tinggi (2300 rpm), pelebaran zona HAZ dengan butir kasar dan transformasi fasa yang tidak diinginkan mengurangi *tensile strength* [41]. Kecepatan putaran rendah hingga sedang (1900-2100 rpm) dan tekanan tempa tinggi (86 MPa) menjadi kombinasi yang menghasilkan kekuatan tarik (*tensile strength*) tertinggi. Cacat struktur mikro atau distribusi fasa yang buruk, seperti yang terlihat pada kecepatan putaran tinggi, secara drastis menurunkan kekuatan tarik sambungan. Dari data kekuatan tarik pada semua sampel, dihasilkan bahwa efisiensi sambungan yang paling tinggi didapatkan dengan parameter kecepatan putaran (2100 rpm) dan tekanan tempa (86 MPa) dengan efisiensi sebesar 54,47% dari kekuatan tarik *base metal* aluminium 6063 dan hasil efisiensi sambungan yang paling rendah didapatkan dengan parameter kecepatan putaran (2300) dan tekanan tempa (51 MPa) dengan efisiensi sebesar 13,8% dari kekuatan tarik *base metal* aluminium 6063.

4.6.3 Pengaruh variabel terhadap kekerasan

Pada penelitian ini pengamatan hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan pada daerah sambungan *friction welding* mengalami peningkatan yang relatif tinggi dengan kekerasan awal *base metal* aluminium 6063 T6 sebesar 83 HVN. Berdasarkan Gambar 4.5 terlihat pada

parameter kecepatan rendah yaitu 1900 rpm dengan *forging pressure* 51 MPa mendapatkan nilai kekerasan tertinggi yaitu sebesar 88,2 HVN dengan efisiensi sambungan terhadap kekerasan awal *base metal* aluminium yaitu sebesar 106,3%, sedangkan pada Gambar 4.7 terlihat pada parameter kecepatan tinggi yaitu 2300 dengan *forging pressure* 51 MPa mendapatkan nilai kekerasan paling rendah yaitu sebesar 58 HVN dengan efisiensi sambungan terhadap kekerasan awal *base metal* aluminium yaitu sebesar 69,9%. Fenomena ini dapat dijelaskan karena pada kecepatan putaran yang terlalu tinggi cenderung menurunkan kekerasan akibat pelebaran butir dan panas berlebih, hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh agus sasmito dimana kekerasan menurun seiring dengan meningkatnya kecepatan putaran [6]. Peningkatan kekerasan di zona sambungan dibandingkan base metal Al terjadi karena faktor material aluminium 6063 yang sudah mengalami deformasi plastis selama proses pengelasan yang dapat meningkatkan densitas material. Secara keseluruhan, kombinasi kecepatan putaran 1900 rpm menghasilkan peningkatan kekerasan yang optimal, memastikan sambungan yang tinggi melewati nilai kekerasan *base metal* aluminium 6063 T6.