

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pengujian spesimen dilakukan setelah didapatkan spesimen uji yang telah berhasil disambung pada proses pengelasan gesek (*friction welding*). Spesimen yang akan diuji tarik sebanyak sepuluh spesimen dengan variasi yang sudah ditentukan. Spesimen yang tersambung selanjutnya dilakukan pengambilan data pengujian tarik. Data yang diperoleh dari pengujian digunakan untuk mengetahui bagaimana pengaruh waktu gesek dan tekanan tempa terhadap struktur mikro, kekerasan, dan kekuatan tarik. Pengujian kekerasan dan uji struktur mikro dapat dilakukan setelah melakukan kembali penyambungan spesimen pada proses pengelasan gesek. Penyambungan spesimen dilakukan dengan menyambung lima spesimen, mengacu pada data hasil uji tarik yang sah. Data yang diambil adalah data hasil uji terendah rendah sampai data tertinggi. Untuk menentukan data yang digunakan dimulai dari data hasil pengujian tarik ke dua dilongkap satu kali ke data pengujian tarik ke empat dan seterusnya. Hasil penyambungan spesimen kemudian dibelah menjadi dua bagian. Satu sisi spesimen yang telah dibelah digunakan untuk pengujian kekerasan dan sisi lainnya digunakan untuk pengujian struktur mikro.

#### **4.1. Hasil Pengelasan Gesek**

Pengelasan gesek untuk material yang berbeda sangat sulit dilakukan. Tidak semua pengujian yang dilakukan mendapatkan hasil yang baik. Hasil pengujian yang baik didapat dari ketelitian, kerjasama, dan kehati-hatian operator dalam melakukan penyambungan. Hasil proses pengelasan gesek pada bahan Aluminium Alloy 2024-T4 dan Stainless Steel AISI 420 setelah dilakukan proses penyambungan gesek dapat dilihat pada gambar 4.1.



**Gambar 4.1.** Hasil pengelasan gesek AA2024-T4 dan SS AISI 420

Terlihat pada gambar 4.1 hasil pengelasan yang terdapat flash akibat proses penyambungan hanya pada satu logam yaitu Aluminium Alloy 2024-T4. Sedangkan pada logam Stainless Steel AISI 420 tidak terjadi *flash*. Pada logam stainless steel AISI 420 hanya terjadi perubahan warna akibat panas gesek. Hal ini disebabkan karena Aluminium Alloy 2024-T4 lebih cepat mengalami *thermoplastis* dari pada Stainless Steel AISI 420.

#### 4.2. Hasil Pembahasan Struktur Mikro dan Makro

Struktur mikro merupakan butiran-butiran logam yang sangat kecil dan tidak dapat dilihat secara kasat mata. Untuk melihat struktur mikro diperlukan mikroskop optik atau mikroskop elektron agar butiran-butiran logam tersebut dapat terlihat. Struktur material berkaitan dengan komposisi, sifat, sejarah, dan kinerja pengolahan, sehingga dengan melakukan pengujian struktur mikro akan memberikan informasi yang menghubungkan komposisi dan pengolahan sifat serta kinerjanya.

Perubahan struktur mikro yang terjadi akibat komposisi atau perlakuan panas dapat diketahui dengan melakukan analisis struktur mikro untuk menentukan apakah parameter struktur berada dalam spesifikasi tertentu atau terjadi perubahan bentuk dan sifat materialnya. Sifat-sifat logam terutama sifat mekanis dan sifat fisis

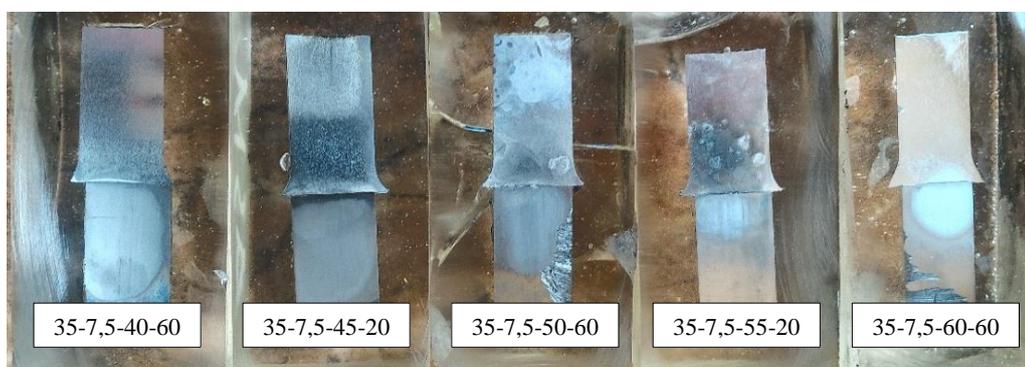
sangat dipengaruhi oleh mikro struktur logam dan paduannya, disamping komposisi kimianya.

Pengamatan metalografi dengan mikroskop umumnya dibagi menjadi dua, yaitu:

- a. Metalografi makro, yaitu pengamatan struktur dengan perbesaran 10 – 100 kali.
- b. Metalografi mikro, yaitu pengamatan struktur dengan perbesaran diatas 100 kali.

Dalam penelitian ini pengujian secara mikro dilakukan pada beberapa titik untuk melihat perubahan struktur mikro pada material Aluminium Alloy 2024-T4 dan Stainless Steel AISI 420 setelah dilakukan proses pengelasan gesek. Pengujian struktur mikro juga bertujuan untuk mengetahui daerah-daerah yang perlu dilakukan pengujian kekerasan. Berdasarkan pengujian tarik maka akan ditentukan variasi pengelasan gesek untuk dilakukan penyambungan. Variasi yang dipilih untuk pengujian mikro mulai dari variasi terendah, tengah, dan tertinggi. Setelah dilakukan pemilihan variasi pengelasan gesek, maka selanjutnya akan ditentukan posisi atau titik pengambilan uji mikro.

Pengujian foto mikro dilakukan terhadap lima variasi parameter pengelasan gesek. Lima variasi diperoleh dari analisa hasil pengujian tarik sepuluh spesimen uji dan diambil data terekstrim dari pengujian tarik. Hasil sambungan dibelah kemudian dicetak dengan resin dan campuran katalis untuk dijadikan sebagai spesimen uji metalografi. Persiapan selanjutnya spesimen dipoles dan dietsa sesuai dengan material untuk dilakukan pengujian foto mikro.

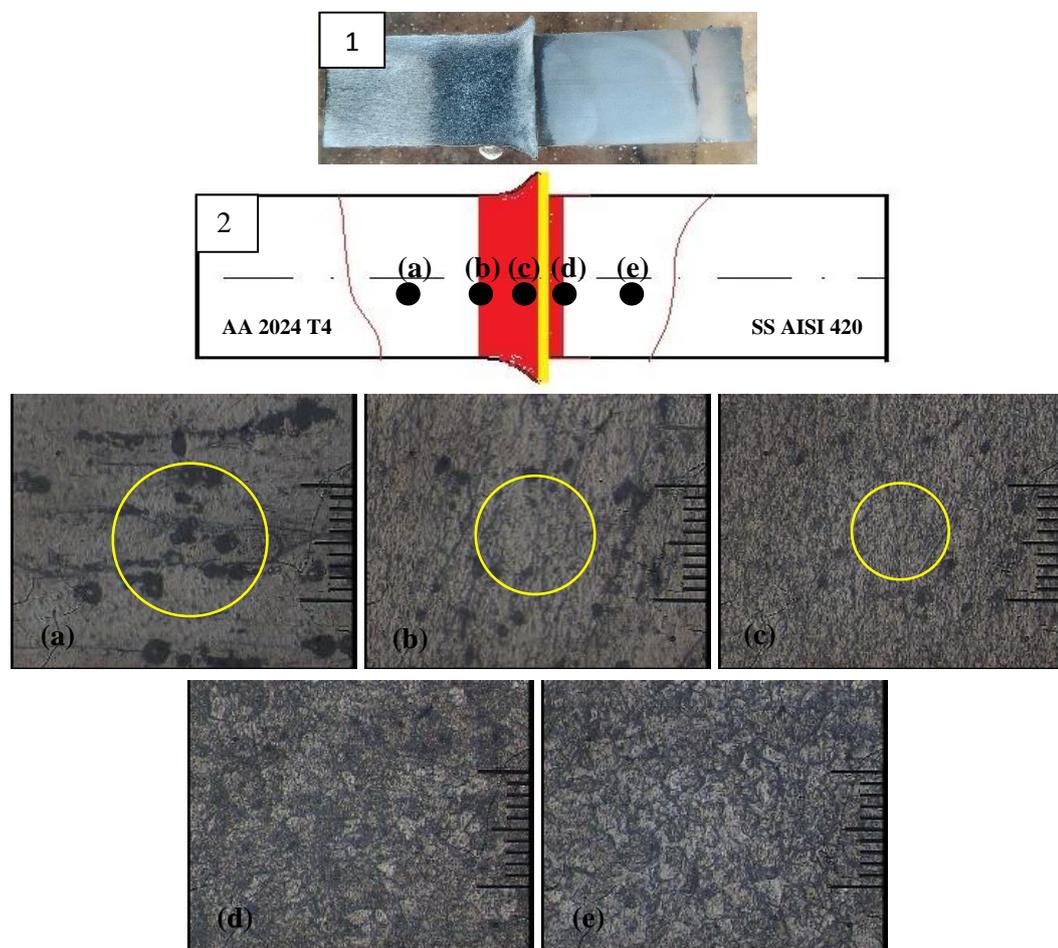


**Gambar 4.2.** Spesimen pengujian mikro

#### 4.2.1. Struktur mikro dan makro

1. Variasi tekanan gesek 35 MPa, waktu gesek 7,5 detik, tekanan tempa 45 MPa dan waktu tempa 20 detik

Posisi titik struktur mikro berdasarkan pada hasil flash yang timbul dari kedua material. Daerah flash pada Aluminium Alloy 2024-T4 yang ditimbulkan cukup besar di bandingkan dengan material Stainless Steel AISI 420 maka pengambilan foto mikro lebih banyak dilakukan di daerah Aluminium Alloy 2024-T4. Foto mikro bertujuan untuk melihat perubahan yang terjadi pada hasil pengelasan dari material induknya.



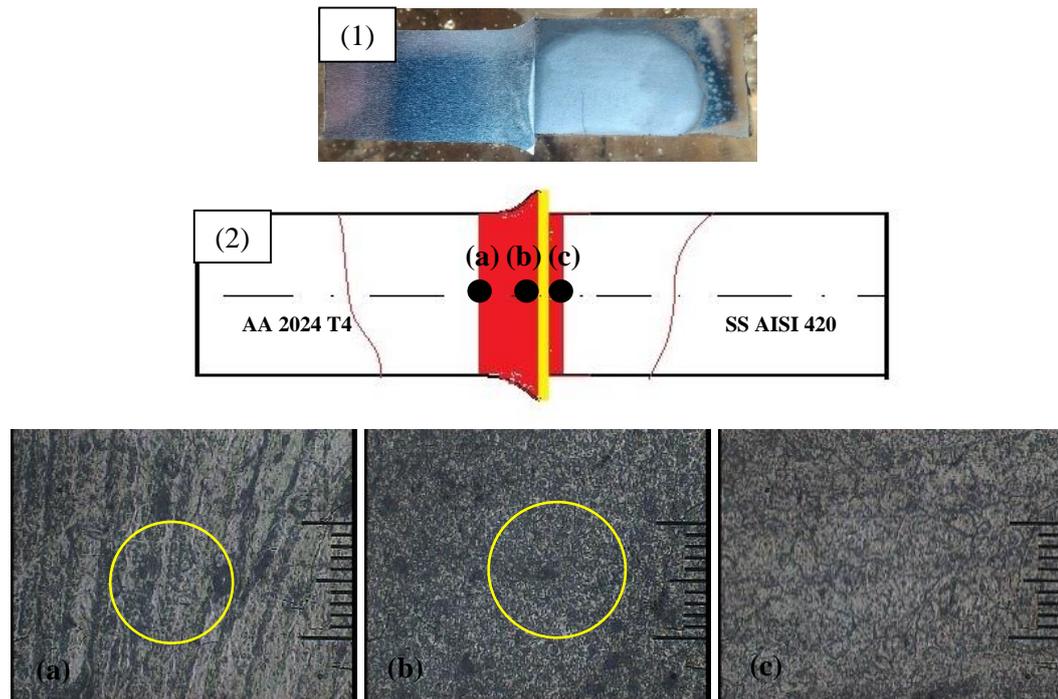
**Gambar 4.3.** (1) foto makro (2) posisi pengujian mikro, Struktur Mikro pengelasan gesek *dissimilar* (a) logam induk Aluminium Alloy 2024-T4, (b) daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4 (c) daerah las aluminium 2024 T4 (d) daerah las Stainless Steel AISI 420 (e) logam induk Stainless Steel AISI 420, dengan pembesaran 200 kali

Pengambilan foto mikro dilakukan beberapa titik untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada struktur mikronya pada logam sambungan, pada daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ, dan logam induknya. Dari gambar 4.3. dapat dilihat pada daerah logam induk Aluminium Alloy 2024-T4 terdapat porositas di dalamnya, pada daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ dapat dilihat perubahan struktur mikro Aluminium Alloy 2024-T4 butiran-butiran halus masih tidak beraturan yang akan menurunkan nilai kekerasan di daerah tersebut. Pada daerah lasan Aluminium Alloy 2024-T4 butiran-butiran halus sudah terlihat yang akan menaikkan nilai kekerasan pada daerah lasan.

Daerah las Stainless Steel AISI 420 terdapat butiran-butiran halus dan feritik martensitik yang tidak beraturan. Butiran kecil yang terlihat di daerah las Stainless Steel AISI 420 butirannya semakin halus di daerah dekat sambungan dan jauh dari daerah sambungan butirannya semakin membesar akan menurunkan nilai kekerasannya. Akan tetapi pada daerah logam induk Stainless Steel AISI 420 daerah tersebut tidak begitu terlihat perubahannya.

2. Struktur mikro dan makro dengan variasi tekanan gesek 35 MPa, waktu gesek 7,5 detik, tekanan tempa 40 MPa dan waktu tempa 60 detik.

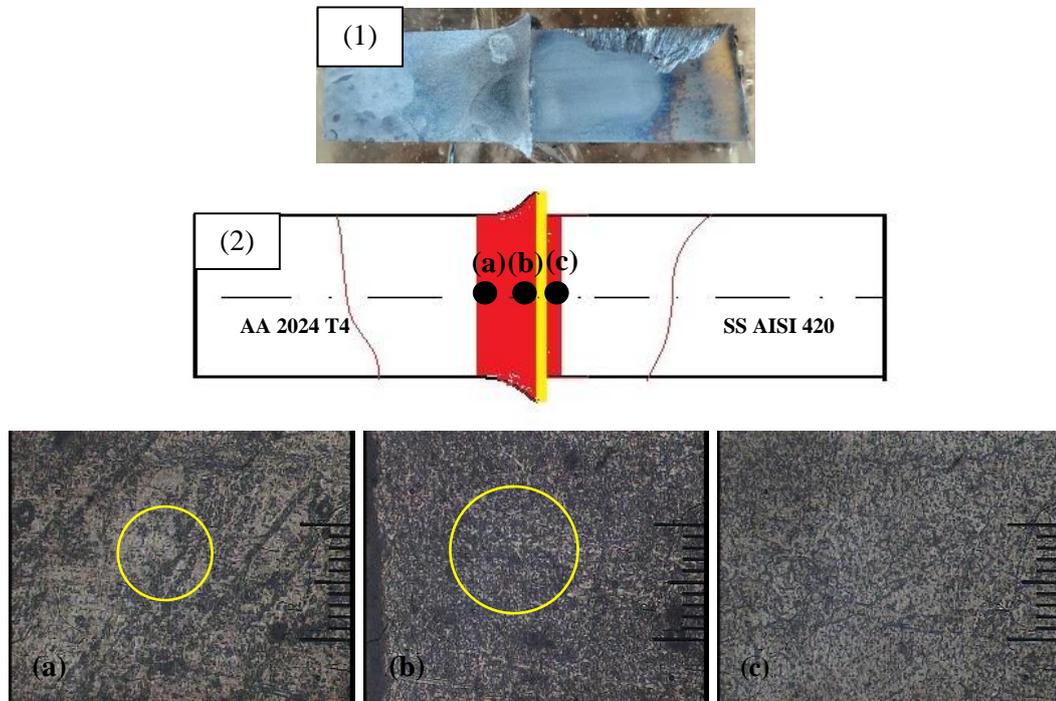
Pengujian struktur mikro pada variasi ini diambil tiga titik pengujian yaitu pada daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4, daerah las Aluminium Alloy 2024-T4, dan daerah las Stainless Steel AISI 420. Sedangkan pada logam induk Aluminium Alloy 2024-T4 dan Stainless Steel AISI 420 tidak diambil foto mikro karena pada foto mikro variasi tekanan tempa 45 MPa dan waktu tempa 20 detik tidak atau belum terjadi perubahan struktur mikro. Sehingga untuk foto mikro variasi selanjutnya pada pengujian struktur mikro diasumsikan struktur mikro tersebut sama dan hanya diambil tiga foto.



**Gambar 4.4.** (1) foto makro (2) posisi pengujian mikro, Struktur Mikro pengelasan gesek *dissimilar* (a) daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4, (b) daerah las Aluminium Alloy 2024-T4 (c) daerah yang mendekati perubahan yaitu HAZ Stainless Steel AISI 420, dengan pembesaran 200x

Pengambilan foto struktur mikro di daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4 terdapat butiran-butiran halus dan kasar yang terdapat di daerah itu yang terlihat pada lingkaran kuning. Daerah las Aluminium Alloy 2024-T4 terlihat butiran halus yang begitu banyak akan menaikkan nilai kekerasannya. Daerah yang mendekati perubahan yaitu HAZ logam Stainless Steel AISI 420 butiran-butiran halus masih sedikit terlihat akan menaikkan nilai kekerasannya dibandingkan dengan ukuran feritik martensitik mendominasi daerah tersebut.

3. Struktur mikro dan makro dengan variasi tekanan gesek 35 MPa, waktu gesek 7,5 detik, tekanan tempa 50 MPa dan waktu tempa 60 detik.



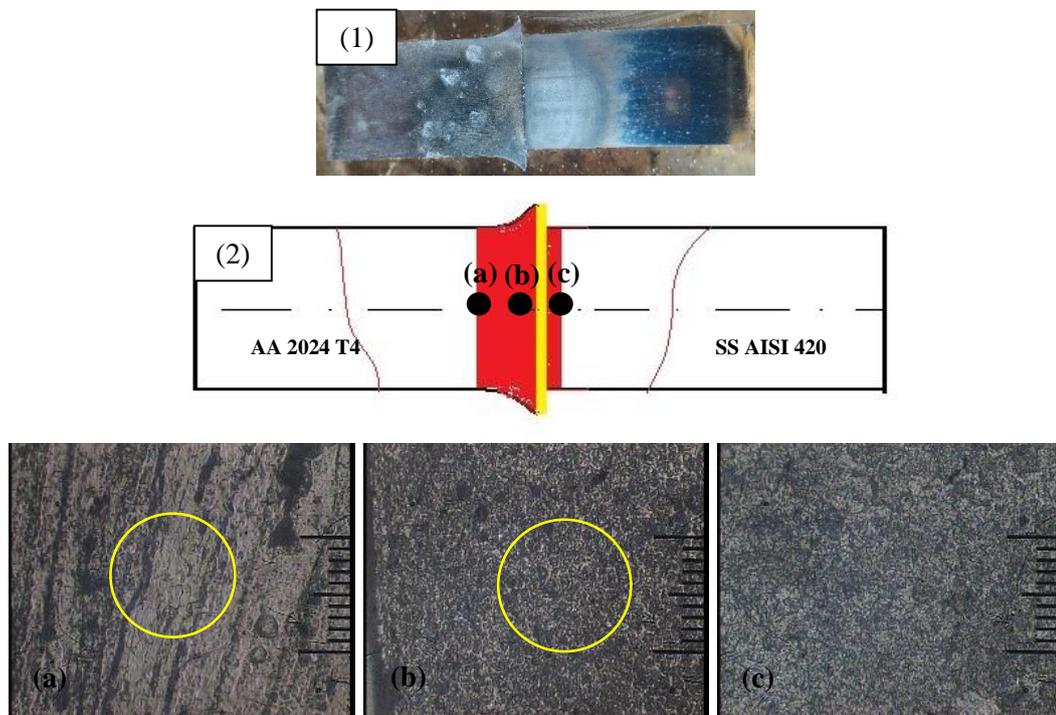
**Gambar 4.5.** (1) foto makro (2) posisi pengujian mikro , struktur Mikro pengelasan gesek *dissimilar* (a) daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4, (b) daerah las Aluminium Alloy 2024-T4 (c) daerah yang mendekati perubahan yaitu HAZ Stainless Steel AISI 420, dengan pembesaran 200x

Pengujian struktur mikro pada variasi tekanan gesek 35 MPa, waktu gesek 7,5 detik, tekanan tempa 50 MPa, dan waktu tempa 60 detik, maka di variasi tersebut dilakukan pengujian struktur mikro untuk mengetahui perubahan yang terjadi. Pengujian pada variasi ini terdapat 3 titik yang akan diuji yaitu pada daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4, daerah las Aluminium Alloy 2024-T4, dan pada daerah Stainless Steel AISI 420 yang mendekati perubahan yaitu HAZ.

Pengambilan struktur mikro pada variasi tersebut dapat dilihat pada gambar 4.5. di daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4 butiran-butiran kasar yang tidak beraturan terlihat pada lingkaran kuning yang akan menurunkan nilai kekerasannya. Daerah lasan Aluminium Alloy 2024-T4 butiran-

butiran halus dekat dengan garis lasan sangat kecil menjauhi garis lasan butiran semakin membesar terlihat pada lingkaran kuning. Daerah Stainless Steel AISI 420 yang mendekati perubahan yaitu HAZ struktur mikronya terdapat butiran-butiran halus pada daerah itu akan menaikkan nilai kekerasan pada daerah tersebut.

4. Struktur mikro dan makro dengan variasi tekanan gesek 35 MPa, waktu gesek 7,5 detik, tekanan tempa 55 MPa dan waktu tempa 20 detik.



**Gambar 4.6.** (1) foto makro (2) posisi pengujian mikro , Struktur Mikro pengelasan gesek *dissimilar* (a) daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4, (b) daerah las Aluminium Alloy 2024-T4 (c) daerah yang mendekati perubahan yaitu HAZ Stainless Steel AISI 420, dengan pembesaran 200x

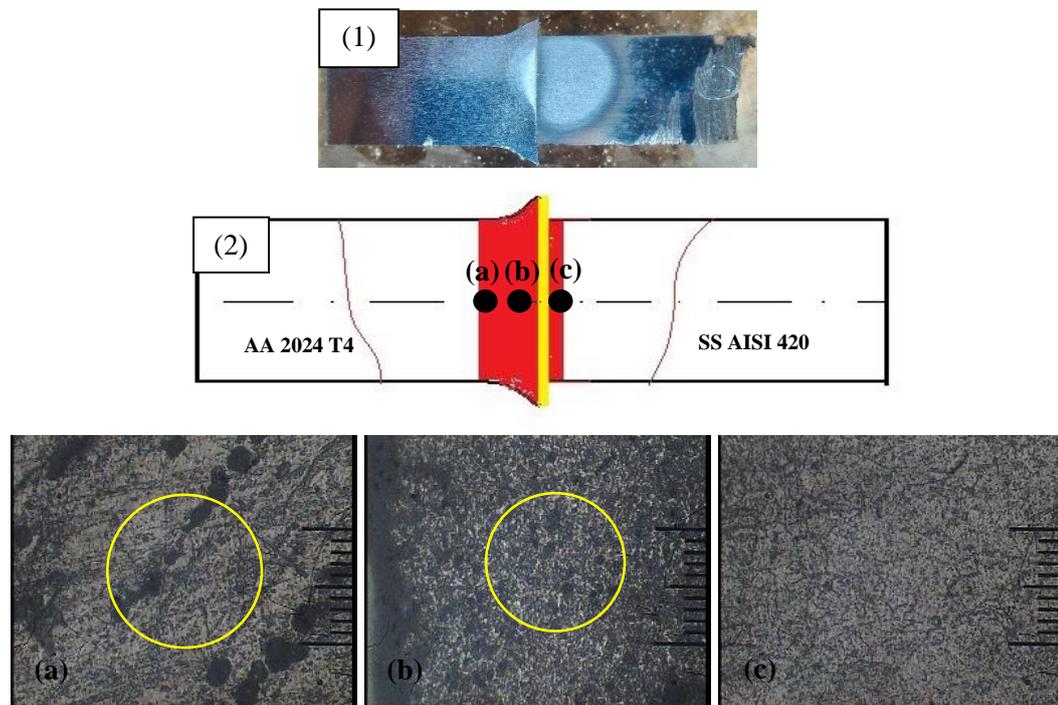
Pengujian struktur mikro pada variasi tekanan gesek 35 MPa, waktu gesek 7,5 detik, tekanan tempa 55 MPa, dan waktu tempa 20 detik, maka di variasi tersebut dilakukan pengujian struktur mikro untuk mengetahui perubahan yang terjadi. Pengujian pada variasi ini terdapat 3 titik akan di uji yaitu pada daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4, daerah las

Aluminium Alloy 2024-T4, dan pada daerah Stainless Steel AISI 420 yang mendekati perubahan yaitu HAZ.

Pengambilan struktur mikro pada variasi tersebut dapat dilihat pada gambar 4.6. di daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4 adanya butiran-butiran halus yang terdapat pada struktur mikronya, akan tetapi butiran tersebut tidak beraturan yang terlihat pada lingkaran kuning, oleh sebab itu akan menurunkan nilai kekerasan di daerah itu. Pada daerah lasan Aluminium Alloy 2024-T4 butiran dekat dengan daerah lasan sangat halus akan tetapi menjauhi daerah lasan butiran tidak beraturan terlihat pada lingkaran kuning yang akan menurunkan nilai kekerasannya. Daerah Stainless Steel AISI 420 yang mendekati perubahan yaitu HAZ struktur mikronya terdapat butiran-butiran halus pada daerah itu akan menaikkan nilai kekerasan pada daerah tersebut.

5. Struktur mikro dan makro dengan variasi tekanan gesek 35 MPa, waktu gesek 7,5 detik, tekanan tempa 60 MPa dan waktu tempa 60 detik.

Pengujian struktur mikro pada variasi tekanan gesek 35 MPa, waktu gesek 7,5 detik, tekanan tempa 60 MPa, dan waktu tempa 60 detik, maka di variasi tersebut dilakukan pengujian struktur mikro untuk mengetahui perubahan yang terjadi. Pengujian pada variasi ini terdapat 3 titik yang akan di uji yaitu pada daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4, daerah las Aluminium Alloy 2024-T4, dan pada daerah Stainless Steel AISI 420 yang mendekati perubahan yaitu HAZ.



**Gambar 4.7.** (1) Hasil foto makro (2) posisi pengujian mikro (5), Struktur Mikro pengelasan gesek *dissimilar* (a) daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4, (b) daerah las Aluminium Alloy 2024-T4 (c) daerah yang mendekati perubahan yaitu HAZ Stainless Steel AISI 420, dengan pembesaran 200x

Pengambilan struktur mikro pada variasi tersebut dapat dilihat pada gambar 4.7. di daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4 dapat dilihat adanya ukuran butir halus yang akan menaikkan nilai kekerasannya. Pada daerah lasan dapat dilihat perubahan yang terjadi dekat dengan daerah lasan butiran-butiran halus menjauhi dari daerah lasan butiran kasar yang akan menurunkan nilai kekerasannya. Daerah Stainless Steel AISI 420 yang mendekati perubahan yaitu HAZ struktur mikronya sedikit mengalami perubahan, pada daerah tersebut terdapat butiran-butiran halus pada daerah itu yang akan menaikkan nilai kekerasan pada daerah tersebut. Feritik martensitik yang terjadi di daerah Stainless Steel AISI 420 tidak terlalu terlihat jelas.

Hasil pengamatan pengujian struktur mikro pada variasi waktu tempa 20 detik dapat disimpulkan bahwa struktur mikro pada variasi 20 detik pada daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4 terjadi perubahan

butiran halus yang tak begitu banyak. Pada daerah las itu sendiri butiran halus sangat mendominasi akan menaikkan nilai kekerasan. Stainless Steel AISI 420 pada variasi 20 detik tidak begitu banyak perubahan di daerah las nya akan tetapi butiran halus berbentuk pipih atau feritik martensitik terlihat jelas yang akan menaikkan nilai kekerasannya. Struktur mikro variasi 60 detik pada daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ Aluminium Alloy 2024-T4 terlihat butiran kasar yang akan menurunkan nilai kekerasannya, pada daerah lasan Aluminium Alloy 2024-T4 terlihat dekat garis lasan butiran halus yang akan menaikkan nilai kekerasannya dan menjauh dari daerah lasan butiran semakin kasar. Pada variasi 60 detik logam Stainless Steel AISI 420 struktur mikro yang mendekati daerah perubahan yaitu HAZ tidak begitu banyak perubahan feritik martensitik berbentuk pipih dan butiran halus terlihat jelas yang akan menaikkan nilai kekerasannya.

Perbandingan variasi waktu tempa 20 detik dengan tekanan tempa 45 dan 55 MPa, variasi waktu tempa 60 detik dengan variasi tekanan tempa 40, 50, 60 MPa menghasilkan struktur mikro yang hampir sama pada titik HAZ, daerah lasan dan daerah yang mendekati perubahan yaitu HAZ Stainless Steel AISI 420. Pada logam Aluminium Alloy 2024-T4 pada variasi waktu tempa 20 dan 60 detik butiran halus dekat dengan sambungan lebih dominan dan akan menaikkan nilai kekerasannya. Pada logam Stainless Steel AISI 420 yang mendekati daerah perubahan yaitu HAZ sedikit sekali yang mengalami perubahan, hanya terlihat butiran halus dan feritik martensitik yang berbentuk pipih yang akan menaikkan nilai kekerasannya.

Hasil penelitian dilakukan oleh Febri (2014), didapat kesimpulan bahwa pada struktur mikronya mengatakan daerah las berfasa austenit berbutir kecil, daerah HAZ berfasa austenit berbutir lebih besar dan daerah base metal berbutir besar dengan fasa austenite. Cacat las yang terjadi berupa porositas yang dapat teramati pada seluruh hasil pengelasan.

Nur dan Budi (2011), menyimpulkan hasil analisa bahwa perubahan struktur mikro yang terjadi pada daerah HAZ dan daerah las (*weld nugget*). Hal ini sangat dipengaruhi oleh besarnya tekanan tempa, karena semakin tinggi tekanan tempa

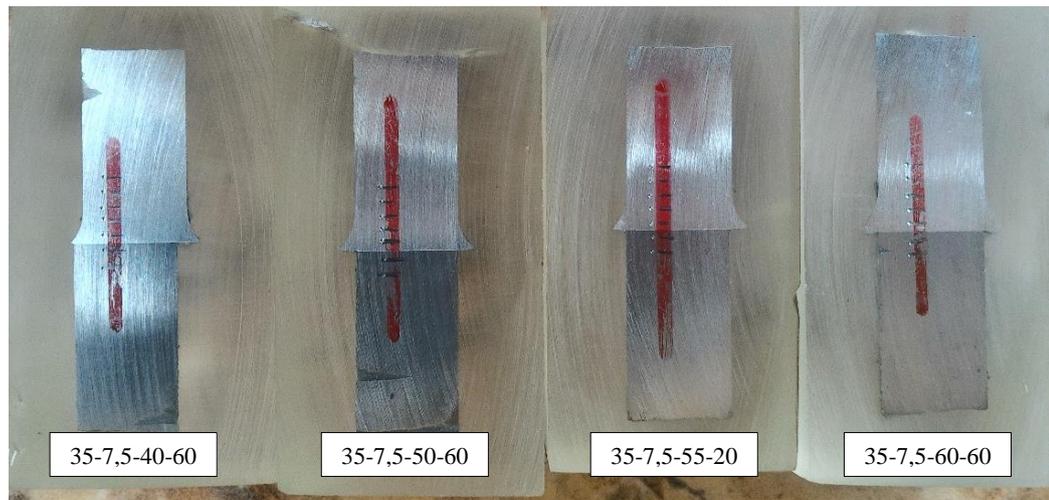
maka *difusi integrannular* menjadi maksimal hal itu ditunjukkan dengan jumlah *pearlite* yang lebih mendominasi dibandingkan dengan *ferrite* sehingga kekuatan pada sambungan las menjadi bertambah kuat dibandingkan pada daerah HAZ.

Pungky, dkk (2014), didapat kesimpulan bahwa struktur mikro pada pengelasan gesek Aluminium 6061 dengan berbagai suhu aging dengan hasil terdapat porositas pada sambungan dengan adanya perlakuan *precipitation hardening* dibandingkan dengan tanpa perlakuan *precipitation hardening*. Spesimen dengan perlakuan suhu *artificial aging* 150°C memiliki nilai porositas terendah yaitu sebesar 0,11%.

Budy, dkk (2012), dalam penelitiannya mengatakan adanya struktur mikro yang sangat halus di daerah tengah (*weld zone*) yang menyebabkan terjadinya nilai kekerasan yang tinggi sesuai dengan *Hall-Petch relation*. Sehingga kekuatan pada daerah tengah akan lebih tinggi. Juga didapatkan bahwa tekanan awal lebih efektif dibandingkan dengan tekanan akhir. Pada peristiwa las gesek ini perubahan struktur dimungkinkan dari pengaruh pemanasan dan pengaruh tempa. Namun pengaruh panas akan dieliminir oleh proses tempa. Mestinya semakin panas akan memperbesar butir kristal struktur mikro namun proses pembesaran butir kristal ini akan dihambat karena pengaruh tempa sehingga perubahan butir kristal yang sering terjadi didaerah pengaruh panas tersebut tidak terjadi karena ada proses tempa.

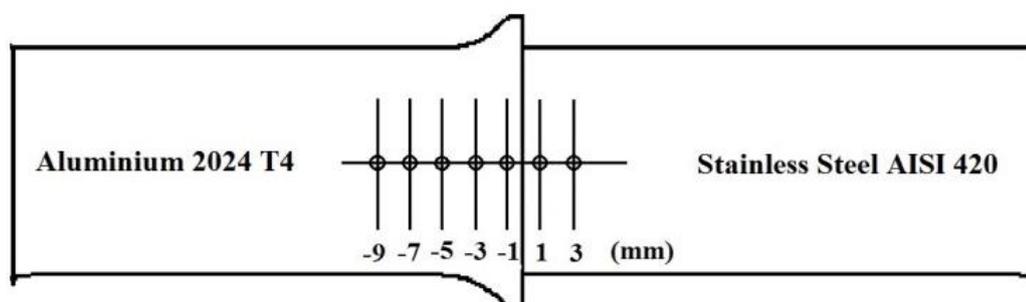
### **4.3. Hasil dan Analisis Pengujian Kekerasan**

Hasil dari pengujian pengelasan gesek diperoleh 10 spesimen sambungan. Untuk pengujian kekerasan hanya diambil 5 spesimen. Dari 5 spesimen dipilih data yang paling *significant* yang memiliki data tertinggi dan data ekstrim. Hasil sambungan yang dipilih kemudian di belah dan diamplas pada permukaannya untuk memperoleh permukaan yang rata untuk pengujian kekerasan. Permukaan yang kasar akan mempengaruhi hasil pengujian kekerasan.



**Gambar 4.8.** Spesimen pengujian kekerasan

Pada pengujian kekerasan akan ditentukan posisi titik kekerasan untuk pengambilan data. Menentukan titik pengujian kekerasan didasarkan pada pengamatan makro dan mikro. Penentuan titik kekerasan secara makro di lihat dari profil hasil pengelasan gesek. Pada pengelasan gesek dengan material Aluminium Alloy 2024-T4 dan Stainless Steel AISI 420, Aluminium Alloy 2024-T4 memiliki deformasi plastis lebih cepat dari pada Stainless Steel AISI 420 yang tidak menimbulkan *flash*. Menentukan titik pengujian kekerasan juga dilakukan dengan cara mikro. Hasil foto mikro pengelasan gesek diamati ukuran butirnya sehingga dapat ditentukan daerah yang perlu dilakukan pengujian kekerasan. Foto mikro dapat menunjukkan titik daerah sambungan lasan, daerah yang mengalami perubahan yaitu HAZ dan logam induk seperti pada gambar 4.9.

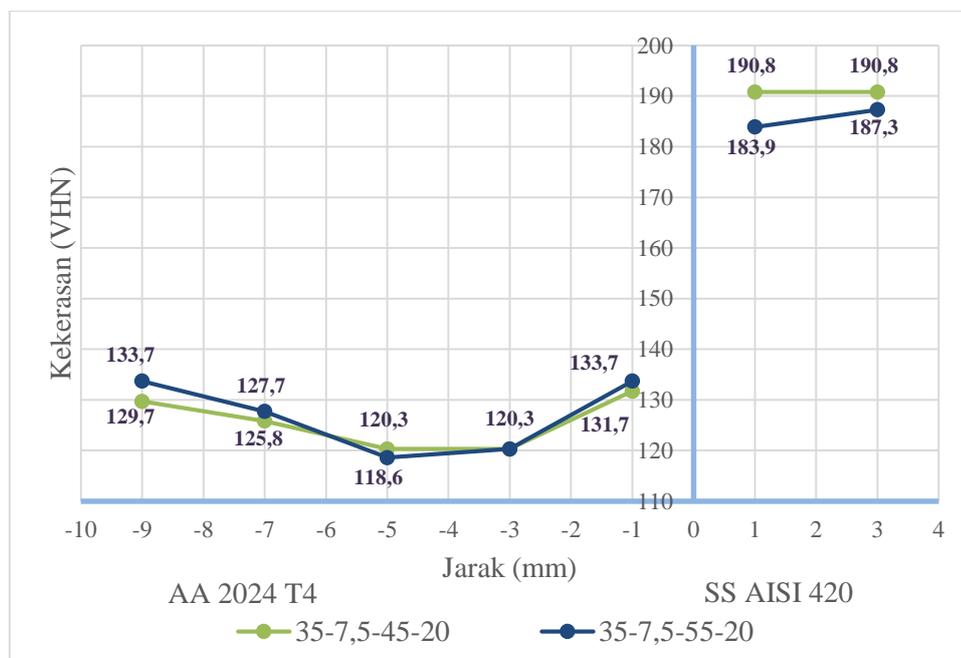


**Gambar 4.9.** Posisi pengujian kekerasan

Posisi pengujian kekerasan pada spesimen sambungan las gesek antara Aluminium Alloy 2024-T4 dan Stainless Steel AISI 420 terlihat pada gambar 4.9. Pada masing-masing bagian antara Aluminium Alloy 2024-T4 dan Stainless Steel AISI 420 terdapat jarak 1 mm untuk proses pengujian dikarenakan pada sambungan las gesek masih belum tersambung kuat. Hal ini disebabkan karena perbedaan sifat mekanis dan sifat *thermal* yang cukup jauh. Sehingga tidak dilakukan pengambilan data pada sambungan.

Dari pengujian sebelumnya, pengujian tarik diperoleh 5 variasi untuk pengujian kekerasan yaitu variasi waktu tempa 20 detik pada tekanan tempa 45, 55 MPa dan variasi waktu tempa 60 detik pada tekanan tempa 40, 50, 60 MPa.

Melihat dari variasi diatas maka penelitian ini terdapat dua pembahasan pokok yaitu variasi waktu tempa 20 dengan tekanan tempa 45, 55 MPa dan waktu tempa 60 detik dengan tekanan tempa 40, 50, 60 MPa. Untuk memudahkan kita mengklasifikasikan hasil dari kekerasan sambungan dua material yang berbeda yaitu Aluminium Alloy 2024-T4 dan Stainless Steel AISI 420 di buat grafik kekerasan pada gambar 4.10.

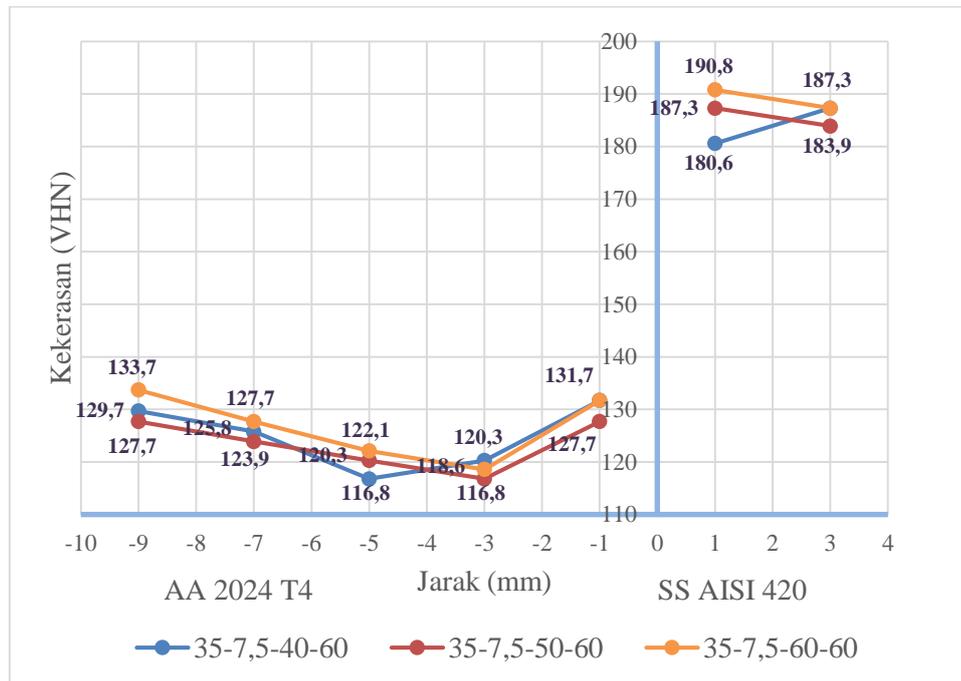


**Gambar 4.10.** Grafik kekerasan pada sambungan las gesek dengan waktu tempa 20 detik dengan variasi tekanan tempa 45 dan 55 MPa

Pada hasil pengamatan gambar 4.10. dapat dilihat nilai uji kekerasan menunjukkan bahwa variasi tekanan tempa 55 MPa lebih tinggi dibanding dengan tekanan tempa 45 MPa. Logam Aluminium Alloy 2024-T4 pada variasi tekanan tempa 45 MPa nilai VHN nya menurun pada jarak 1 mm sampai 5 mm dari sambungan. Kemudian nilai VHN naik pada jarak 7 mm sampai 9 mm dari sambungan. Kenaikan tidak melebihi nilai VHN pada jarak 1 mm dari sambungan. Tetapi variasi tekanan tempa 45 MPa pada jarak 9 mm dari sambungan dengan nilai 129,7 VHN lebih rendah dibandingkan variasi tekanan tempa 55 MPa pada jarak yang sama dengan nilai 133,7 VHN. Logam Stainless Steel AISI 420 dengan variasi tekanan tempa 45 MPa memiliki nilai 190,8 VHN lebih tinggi daripada variasi tekanan tempa 55 MPa yang hanya memiliki nilai 183,9 VHN pada jarak yang sama yaitu 1 mm dari sambungan.

Setelah pengamatan grafik kekerasan pada variasi gabungan diatas maka dapat disimpulkan bahwa hasil sambungan logam Aluminium Alloy 2024-T4 tingkat kekerasan paling tinggi terjadi pada variasi tekanan tempa 55 MPa dengan waktu tempa 20 detik pada jarak 1 mm dari sambungan dengan nilai kekerasan 133,7 VHN. Kemudian nilai kekerasan terendah pada variasi tempa 55 MPa dengan nilai 118,6 VHN dengan jarak 5 mm dari sambungan.

Logam Aluminium pada jarak 1 mm adalah daerah lasan yang memiliki nilai kekerasan yang sama dengan logam induk. Kemudian mengalami penurunan nilai kekerasan dikarenakan pada jarak 3 mm sampai 7 mm adalah daerah terpengaruh panas. Daerah terpengaruh panas memiliki nilai kekerasan yang rendah dikarenakan struktur pada daerah tersebut adalah butiran kristal halus. Sedangkan pada logam Stainless Steel nilai kekerasannya konstan dikarenakan tidak terjadi perubahan struktur mikro.



**Gambar 4.11.** Grafik kekerasan pada sambungan las gesek dengan waktu tempa 60 detik pada variasi tekanan tempa 40, 50, dan 60 MPa

Pada pengamatan gambar 4.11 dapat dilihat nilai uji kekerasan menunjukkan bahwa variasi tekanan tempa 60 MPa lebih tinggi dibanding dengan tekanan tempa 40 MPa dan 50 MPa. Pada logam Aluminium Alloy 2024-T4 pada variasi tekanan tempa 40 MPa terlihat nilai VHN turun pada jarak 1 mm sampai 5 mm dari sambungan dan nilai VHN naik pada jarak 7 mm sampai 9 mm dari sambungan. Sedangkan pada variasi tekanan tempa 50 MPa nilai VHN turun pada jarak 1 mm sampai 3 mm dan nilai VHN naik pada jarak 5 mm sampai 9 mm, tetapi kenaikan ini tidak melebihi nilai kekerasan pada jarak 1 mm dari sambungan. Hal ini terjadi karena rambatan panas yang didapatkan hanya pada Aluminium Alloy 2024-T4. Variasi waktu tempa dan tekanan tempa semakin lama dapat mempengaruhi harga VHN pada jarak dari sambungan. Kemudian pada variasi tekanan tempa 60 MPa nilai VHN turun pada jarak 1 mm sampai 3 mm dari sambungan dan nilai VHN naik pada jarak 5 mm sampai 7 mm.

Hasil pengamatan grafik kekerasan terhadap variasi gabungan, terlihat bahwa pada logam Aluminium Alloy 2024-T4 variasi tekanan tempa 60 MPa dengan

waktu tempa 60 detik tingkat kekerasannya lebih tinggi dengan nilai 131,7 VHN daripada variasi tekanan tempa 50 MPa dengan waktu tempa 60 detik yang hanya memiliki nilai 127,7 VHN pada jarak yang sama yaitu 1 mm dari sambungan. Tapi pada jarak yang sama yaitu 3 mm dari sambungan pada variasi tekanan tempa 50 MPa dengan waktu gesek 60 detik nilai kekerasannya lebih rendah dengan nilai 116,8 VHN daripada variasi tekanan tempa 40 MPa dan tekanan tempa 60 MPa yang memiliki nilai lebih tinggi yaitu 120,3 VHN dan 118,6 VHN. Pada logam Stainless Steel AISI 420 mengalami kenaikan nilai kekerasan naik untuk variasi tekanan gesek 40 MPa. Namun pada variasi tekanan tempa 50 MPa dan 60 MPa nilai kekerasannya terjadi penurunan karena perubahan struktur mikro.

Logam Aluminium mengalami penurunan nilai kekerasan dikarenakan pada jarak 3 mm sampai 7 mm adalah daerah terpengaruh panas. Daerah terpengaruh panas memiliki nilai kekerasan yang rendah dikarenakan struktur pada daerah tersebut adalah butiran kristal halus. Pada jarak 1 mm adalah daerah lasan yang memiliki nilai kekerasan yang sama dengan logam induk. Sedangkan pada logam Stainless Steel nilai kekerasannya ada yang naik dan ada yang turun namun tidak terlalu jauh. Penurunan nilai kekerasan dikarenakan pada variasi tekanan tempa 40 MPa dan waktu tempa 60 detik indenter mengenai struktur yang lebih lunak.

Kekerasan Aluminium Alloy 2024-T4 pada logam sambungan lebih tinggi di bandingkan logam induknya. Dapat diambil contoh pada variasi waktu tempa 60 detik dengan tekanan tempa 40 MPa, pada jarak 1 mm dari sambungan memiliki nilai 137,7 VHN sedangkan logam induk yang berjarak 9 mm dari sambungan memiliki nilai 129,7 VHN. Namun tidak semua kekerasan Aluminium Alloy 2024-T4 pada sambungan lebih tinggi dibandingkan dengan logam induknya. Dapat diambil contoh pada variasi waktu tempa 60 detik dengan tekanan tempa 50 MPa, pada jarak 1 mm dari sambungan memiliki nilai 127,7 VHN sama dengan nilai logam induknya yaitu 127,7 VHN. Hal tersebut terjadi dikarenakan rambatan panas kurang merata.

Dari penelitian yang pernah dilakukan oleh Nur dan Budi (2011), Data hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa semakin besar tekanan tempa yang diberikan (1040, 1127, 1214 dan 1300) kg/cm<sup>2</sup> dengan pemberian nilai waktu gesekan yang sama (45 detik) maka nilai UTS yang dihasilkan akan semakin besar, nilai kekuatan puntir semakin tinggi juga nilai kekerasan pada logam las semakin tinggi hal ini dikarenakan adanya difusi integranular (perpindahan atom satu ke atom lainnya) akan lebih maksimal. Keadaan ini didukung oleh adanya perubahan struktur mikro pada logam las. Perubahan ini terjadi karena adanya tekanan tempa, adanya proses mortal forming pada logam las.

#### 4.4. Hasil dan Analisis Pengujian Tarik

Pada pengujian tarik, spesimen dibuat sesuai standar *JIS Z 2201* untuk dilas dengan pengelasan gesek. Hasil pengelasan gesek dapat menimbulkan *flash* pada spesimen uji. *Flash* yang timbul dihilangkan dan dibentuk kembali sesuai standar pengujian tarik dengan cara pembubutan. Proses pembubutan *flash* menghasilkan diameter spesimen uji yang berbeda-beda. Hal ini disebabkan dari hasil pengelasan gesek yang kurang linear. Spesimen uji dibuat rata dan lurus untuk memperoleh hasil pengujian tarik yang akurat.



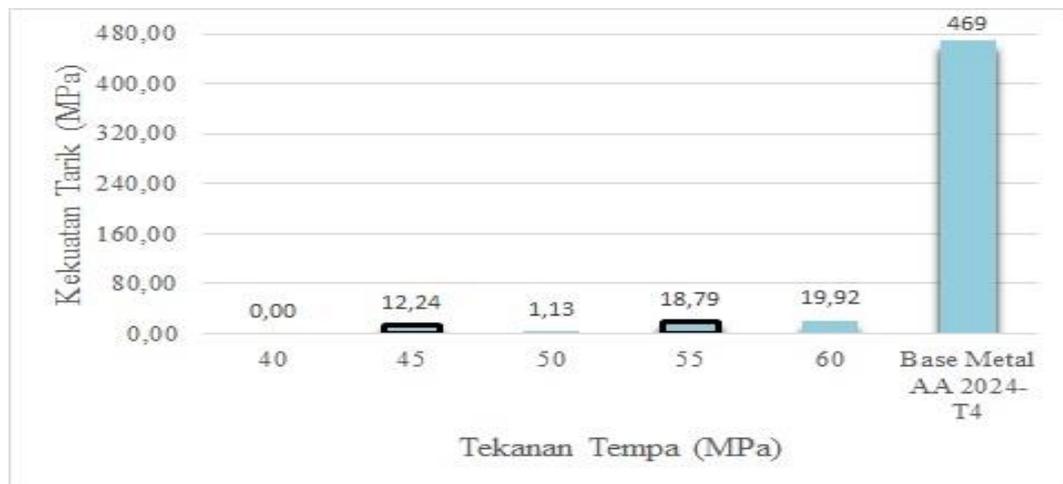
**Gambar 4.12.** Spesimen Uji Tarik Aluminium Alloy 2024-T4 dan Stainless Steel AISI 420 sesuai standar *JIS Z 2201*

Hasil dari proses pengelasan gesek yang telah di ratakan pada *flash* dengan cara pembubutan dilanjutkan dengan proses pengujian tarik. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.1. Dari hasil pengujian tarik terlihat bahwa spesimen tidak mengalami pertambahan panjang. Semua spesimen terjadi patah getas pada bagian sambungan las. Penampang patahan hasil pengujian tarik dapat diamati adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.1.** Data hasil pengujian tarik pada sambungan bahan Aluminium Alloy 2024-T4 dengan Stainless Steel AISI 420

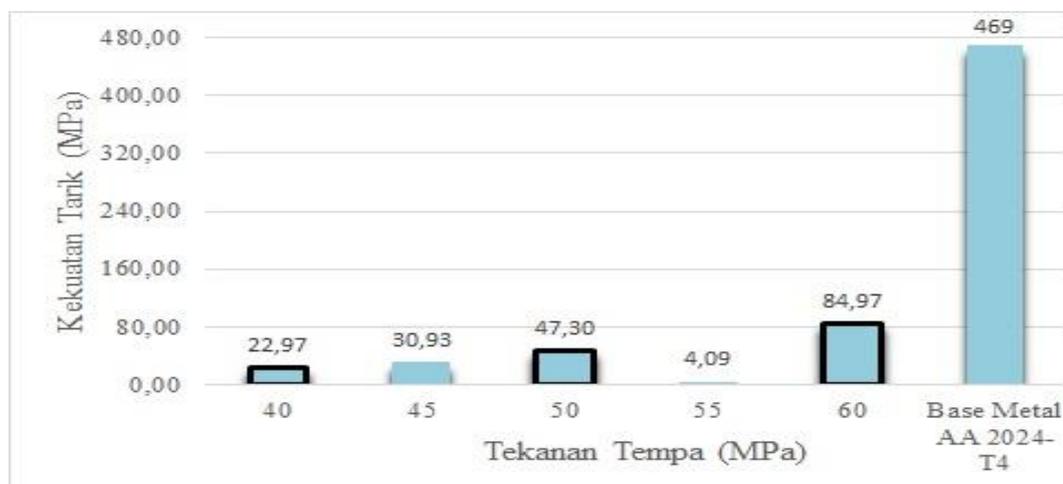
| No | Urutan Las Gesek | Tekanan Gesek (MPa) | Waktu Gesek (Detik) | Tekanan Tempa (MPa) | Waktu Tempa (Detik) | Kekuatan Tarik (MPa) |
|----|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 1  | 1                | 35                  | 7,5                 | 40                  | 20                  | 0,00                 |
| 2  | 6                |                     |                     | 45                  |                     | 12,24                |
| 3  | 9                |                     |                     | 50                  |                     | 1,13                 |
| 4  | 8                |                     |                     | 55                  |                     | 18,79                |
| 5  | 2                |                     |                     | 60                  |                     | 19,92                |
| 6  | 4                |                     |                     | 40                  | 60                  | 22,97                |
| 7  | 7                |                     |                     | 45                  |                     | 30,93                |
| 8  | 10               |                     |                     | 50                  |                     | 47,30                |
| 9  | 3                |                     |                     | 55                  |                     | 4,09                 |
| 10 | 5                |                     |                     | 60                  |                     | 84,97                |

Dari tabel 4.1. data hasil pengelasan gesek diperoleh dengan cara acak (*random*). Dari hasil data tersebut diperoleh bahwa hasil pengujian tarik terlihat *fluktuatif* pada hasil tegangan tarik dan tegangan luluhnya. Dari hasil pengujian tarik yang dapat diamati dan terlihat hasilnya pada variasi waktu tempa 20 detik dengan tekanan tempa 45 MPa, 50 MPa, 55 MPa, 60 MPa. Pada variasi waktu tempa 60 detik dengan tekanan tempa 40 MPa, 45 MPa, 50 MPa, 55 MPa, 60 MPa.



**Gambar 4.13.** Grafik perbandingan hasil tegangan tarik dengan tekanan tempa pada waktu tempa 20 detik

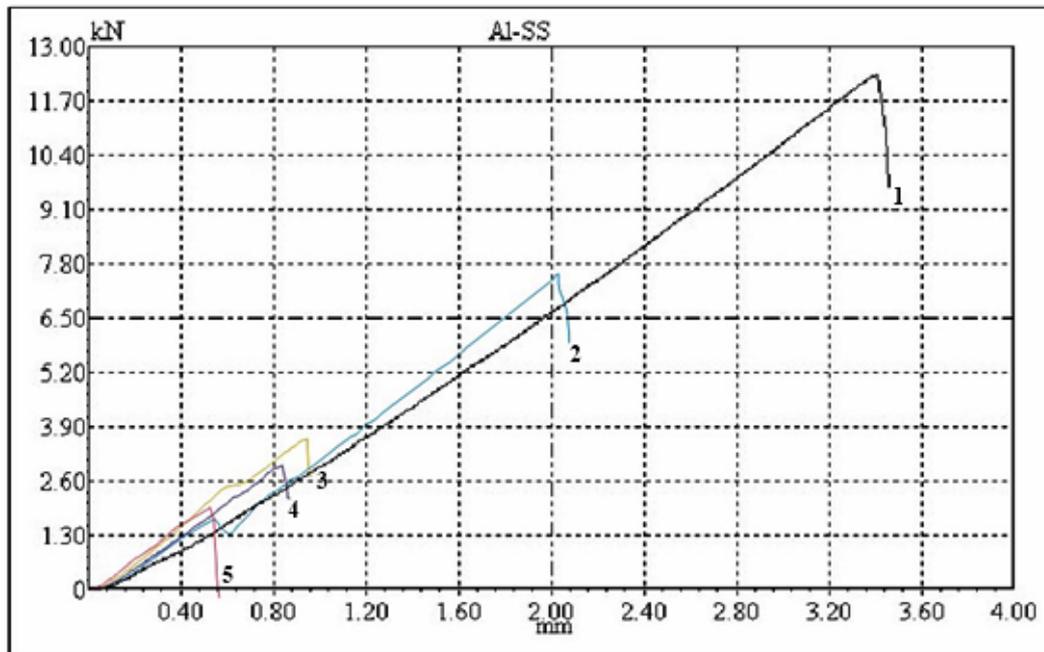
Pada gambar 4.13. grafik tegangan tarik dengan tekanan tempa pada waktu tempa 20 detik. Hasil tertinggi pada tegangan tariknya terdapat pada variasi tekanan tempa 60 MPa pada waktu tempa 20 detik dengan nilai tariknya sebesar 19,92 MPa dan nilai tegangan tarik terendah terdapat pada variasi tekanan tempa 50 MPa pada waktu tempa 20 detik dengan nilai tariknya sebesar 1,13 MPa. Hal tersebut terjadi dikarenakan *error* dalam proses penyambungan. *Error* tersebut terjadi karena spesimen uji tidak dalam posisi *center* akibat proses tempa yang tidak sempurna. Variasi yang diberi garis hitam diambil untuk pengujian kekerasan dan struktur mikro.



**Gambar 4.14.** Grafik perbandingan hasil tegangan tarik dengan tekanan tempa pada waktu tempa 60 detik

Pada gambar 4.14. grafik tegangan tarik dengan tekanan tempa pada waktu tempa 60 detik. Hasil tertinggi pada tegangan tariknya terdapat pada variasi tekanan tempa 60 MPa pada waktu tempa 60 detik dengan nilai tariknya sebesar 84,97 MPa dan nilai tegangan tarik terendah terdapat pada variasi tekanan tempa 55 MPa pada waktu tempa 60 detik dengan nilai tariknya sebesar 4,09 MPa. Hal tersebut terjadi dikarenakan *error* dalam proses penyambungan. *Error* tersebut terjadi karena spesimen uji tidak dalam posisi *center* akibat proses tempa yang tidak sempurna. Kekuatan tarik logam dasar Aluminium Alloy 2024-T4 sebesar 469 MPa (ASM Aero Specification Metals, Inc. Florida). Sehingga jika dibandingkan dengan hasil penelitian tertinggi dalam penelitian ini pencapaiannya masih sekitar 18,12% nya. Pada variasi yang diberi garis hitam diambil untuk pengujian kekerasan dan struktur mikro.

Dari hasil pengujian menandakan bahwa variasi tekanan tempa dan waktu tempa mempengaruhi hasil kekuatan tarik. Variasi waktu tempa yang lama dan tekanan tempa yang lama akan menaikkan kekuatan tarik, sedangkan variasi tekanan tempa yang sama dan waktu tempa yang lebih kecil akan menurunkan kekuatan tarik. Secara keseluruhan hasil penelitian dari tiga pengujian yang dilakukan memiliki nilai yang saling berkaitan. Hasil terbaik dalam penelitian terdapat pada variasi tekanan gesek 35 MPa dengan waktu gesek 7,5 detik dan variasi tekanan tempa 60 MPa dengan waktu tempa 60 detik.



**Gambar 4.15.** Grafik gabungan beban perpanjangan. (1) tekanan tempa 60 MPa waktu tempa 60 detik, (2) tekanan tempa 55 MPa waktu tempa 20 detik, (3) tekanan tempa 50 MPa waktu tempa 60 detik, (4) tekanan tempa 45 MPa waktu tempa 20 detik, (5) tekanan tempa 40 MPa waktu tempa 60 detik

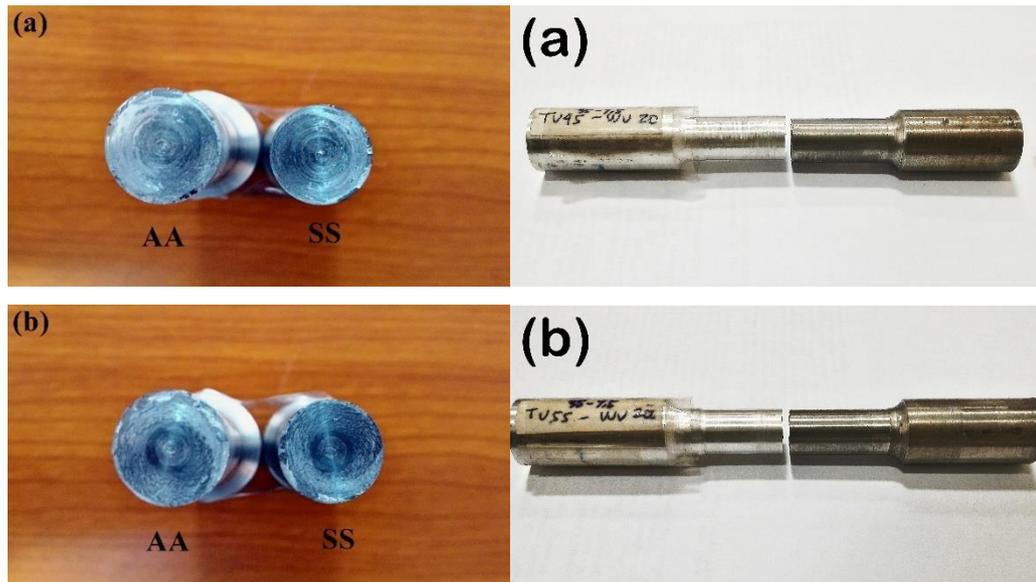
Dari grafik gabungan pada gambar 4.15. terlihat grafik beban perpanjangan pengujian tarik, titik yang menunjukkan perubahan dari deformasi elastis ke deformasi plastis yang tinggi. Grafik beban perpanjangan pada variasi tekanan tempa 60 MPa waktu tempa 60 detik mendapatkan nilai beban maksimal yaitu 12,320 kN dan memiliki UTS sebesar 84,97 MPa.

Alves, dkk, (2010), meneliti tentang sambungan logam padat beda jenis Aluminium Alloy 1050 dan Stainless Steel AISI 304. Setelah proses pengelasan, uji tarik dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanik sambungan, selain pengaturan parameter, optimalisasi, dan kualifikasi prosedur pengelasan dan proses. Sambungan dengan kekuatan tarik ( $\sigma_t$  max) terbaik mengacu pada spesimen dengan parameter  $P_1=2,1$  MPa;  $t_1=32$  s;  $P_2=1,4$  MPa;  $t_2=2$  s, dengan kekuatan tarik yang lebih tinggi ( $\sigma_t$  max) = 80,08 MPa untuk material dengan kekuatan tarik Aluminium Alloy 1050 yang lebih rendah. Waktu ( $t_1$ ) dan tekanan pengelasan gesek ( $P_2$ ) adalah parameter yang paling mempengaruhi kekuatan sambungan. Dalam pengelasan

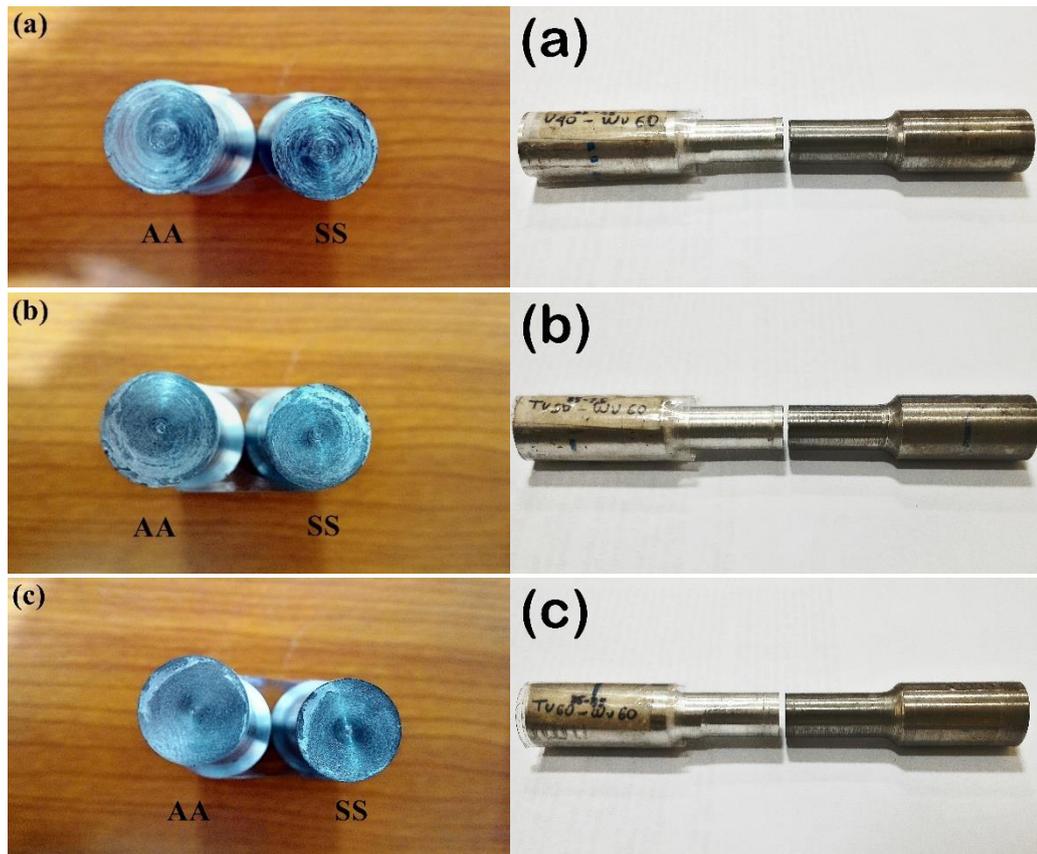
logam beda jenis seperti Aluminium Alloy 1050 dan Stainless Steel AISI 304, waktu gesek ( $t_1$ ) = 32 detik memungkinkan peningkatan temperatur pada antarmuka ikatan dengan nilai yang cukup untuk ikatan yang sempurna antar material. Hasil yang baik di daerah las dan tidak adanya cacat permukaan menunjukkan efisiensi proses pengelasan gesek pada logam beda jenis, seperti Aluminium Alloy 1050 dan Stainless Steel AISI 304. Efisiensi proses pengelasan gesek (dianalisis dengan uji tarik), pengulangan dan produktivitas yang tinggi memungkinkan alternatif baru untuk memperoleh sambungan antara logam beda jenis dengan aplikasi di bidang kedirgantaraan.

Sahin dan Misilir, (2013), meneliti tentang sifat mekanik dan sifat material pengelasan gesek sambungan logam Aluminium. Parameter memiliki kesalahan minimal menggunakan metode kuadrat terkecil diambil sebagai parameter pengelasan yang optimal. Parameter optimal ditemukan dalam studi yang berbeda sebelumnya yang digunakan dalam percobaan ( $T_f = 4$  s;  $P_f = 30$  MPa;  $T_u = 12$  s; dan  $P_u = 60$  MPa). Sifat mekanik dan sifat material las gesek sambungan Aluminium selanjutnya tes tarik untuk spesimen pengelasan. Stainless Steel AISI 304 dengan Aluminium dan Aluminium dengan Tembaga berhasil dilas. Proses pengelasan diteliti menggunakan uji tarik. Kekuatan tarik untuk Stainless Steel AISI 304 dengan Aluminium menghasilkan hasil positif bila dibandingkan dengan logam dasar. Kekuatan sambungan meningkat dan kemudian menurun setelah mencapai nilai maksimum, dengan bertambahnya waktu gesek. Panas yang cukup untuk memperoleh sambungan yang kuat tidak dapat dihasilkan dengan waktu gesek yang lebih pendek. Waktu gesek yang lebih lama mengakibatkan kelebihan pembentukan lapisan intermetalik. Namun, beberapa lasan menunjukkan kekuatan kurang baik tergantung pada beberapa akumulasi elemen paduan pada antarmuka, yang merupakan hasil dari kenaikan suhu dan keberadaan lapisan intermetalik seperti FeAl. Meskipun kekuatan tarik sambungan Tembaga dan Aluminium umumnya tersambung bila dibandingkan dengan logam dasar. Beberapa lasan menunjukkan kekuatan yang buruk sebagai akibat dari akumulasi unsur-unsur paduan pada antarmuka. Akumulasi unsur-unsur adalah hasil dari kenaikan suhu

dan keberadaan lapisan abu-abu. Lapisan abu-abu ini terbentuk karena hilangnya panas dalam pengelasan gesek dan ditemukan mengandung cukup banyak senyawa intermetalik. Adanya kontaminasi pada antarmuka logam mengurangi kualitas sambungan. Tidak ada efek signifikan yang diamati pada sifat pengelasan sehubungan dengan hasil permukaan akhir.



**Gambar 4.16.** Penampang patahan pengujian tarik pada waktu tempa 20 detik, (a). Variasi tekanan tempa 45 MPa, (b). Variasi tekanan tempa 55 MPa



**Gambar 4.17.** Penampang patahan pengujian tarik pada waktu tempa 60 detik, (a). Variasi tekanan tempa 40 MPa, (b). Variasi tekanan tempa 50 Mpa, (c). Variasi tekanan tempa 60 MPa

Dari hasil pengujian tarik spesimen terjadi putus pada daerah sambungan atau patah getas. Hal ini terjadi karena *thermoplastis* yang menyebabkan terjadinya ikatan belum menemukan parameter yang cukup. Sangat sulit terjadinya *thermoplastis* pada material yang memiliki sifat *thermal* dan sifat mekanis yang jauh berbeda. Ketika terjadi patah getas, struktur pada kedua material belum mengalami ikatan yang kuat sehingga patahan terjadi pada sambungan ketika ditarik. Dari 10 spesimen hasil pengujian tarik terjadi patahan hanya pada sambungan. Semua spesimen tidak terjadi difusi atau sambungan penuh. Tetapi ada sedikit logam yang menempel pada logam lain. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.16. dan 4.17.