

TESIS

**KARAKTERISTIK LAPISAN HASIL *FRICITION SURFACING PROCESS*  
DARI MATERIAL ALUMINIUM PADUAN AI6061**

Oleh

**Ismail**

D022172002



PROGRAM SEKOLAH PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2021

TESIS

**KARAKTERISTIK LAPISAN HASIL *FRICTION SURFACING PROCESS*  
DARI MATERIAL ALUMINIUM PADUAN AI6061**

Disusun dan diajukan oleh :

**ISMAIL**

D022172002

**Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Magister Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

PROGRAM SEKOLAH PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2021

## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

**KARAKTERISTIK LAPISAN HASIL *FRICTION SURFACING PROCESS*  
DARI MATERIAL ALUMINIUM PADUAN AI6061**

Disusun dan Diajukan oleh

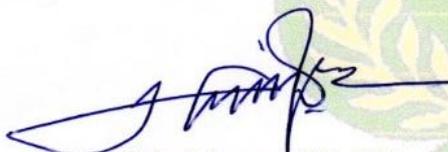
**ISMAIL**  
D022172002

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin pada tanggal 31 maret 2021  
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping



**Dr. Hairul Arsyad, ST., MT.**  
Nip. 19750322 200212 1 001



**Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT.**  
Nip. 19740415 199903 1 001

Ketua Program Studi  
Magister Teknik Mesin  
**Dr. Hairul Arsyad, ST., MT.**  
Nip. 19750322 200212 1 001Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin  
**Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT.**  
Nip. 19601231 198609 1 001

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : **ISMAIL**  
Nim : D022172002  
Program Studi : Teknik Mesin / Konstruksi Mesin  
Jenjang : Program Magister (S2)

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

### **KARAKTERISTIK LAPISAN HASIL *FRICTION SURFACING PROCESS* DARI MATERIAL ALUMINIUM PADUAN AI6061**

adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain, bahwa tesis yang saya tulis bena-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 31 maret 2021

Yang Menyatakan



**ISMAIL**  
NIM : D022172002

## KATA PENGANTAR

Segala Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT., karena Anugerah-Nya, kemurahan, berkat, serta pertolongan-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Magister Teknik dari Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Maka berbagai hal telah ditempuh dalam usaha menyelesaikan penulisan tugas akhir ini yang berjudul, “**KARAKTERISTIK LAPISAN HASIL *FRICITION SURFACING* DARI MATERIAL ALUMINIUM PADUAN AI6061**”. Penelitian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik untuk pembuatan spesimen dan mengumpulkan data pengujian. Dalam penulisan tugas akhir ini tentunya terdapat kekurangan yang mungkin tidak disadari oleh penulis, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan masukan yang membangun dari berbagai pihak.

Penghargaan dan ucapan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada kedua orang tua (Bapak Salahuddin dan Ibu Hartati) dan saudara-saudara Penulis (Sabit, Multazam, Parida, Fadliani, Haedir dan Nurhayati), serta keluarga besar yang selalu memberikan motivasi, dukungan, dan kasih sayangnya, serta doa restunya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.

Tak lupa pula penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T., selaku Dekan Fakultas

Teknik Universitas Hasanuddin

2. Bapak Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT., selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
3. Bapak Dr. Muhammad Syahid, ST., MT., selaku Sekretaris Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin sekaligus dosen penguji atas segala arahan, masukan, dan bantuannya selama penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Hairul Arsyad, ST.,MT., selaku Kepala Prodi Program Pascasarjana Teknik Mesin Universitas Hasanuddin sekaligus dosen pembimbing I tugas akhir ini atas segala bimbingan, arahan, masukan, dan bantuannya selama penyusunan tugas akhir.
5. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT., selaku dosen pembimbing II tugas akhir ini atas segala bimbingan, arahan, masukan, dan bantuannya selama penyusunan tugas akhir.
6. Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman, MT selaku dosen penguji atas segala arahan, masukan, dan bantuannya selama penyusunan tugas akhir ini.
7. Bapak Fauzan, ST.,MT.,Ph.D selaku dosen penguji atas segala arahan, masukan, dan bantuannya selama penyusunan tugas akhir ini.
8. Seluruh Dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang telah memberikan banyak ilmu yang bermanfaat.
9. Bapak Edi Iskandar selaku Laboran Laboratorium Metalurgi Fisik yang

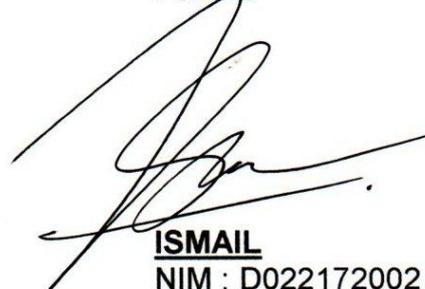
telah membantu dalam proses pengujian spesimen dan memberikan masukan selama pengambilan data.

10. Seluruh staff Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang telah membantu menyelesaikan kelengkapan administrasi.
11. Teman-teman seprogram pascasarjana baik senior, seangkatan dan junior, yang selalu mensuport dan memberikan semangat dalam penyelesaian tugas akhir ini penulis ucapkan banyak terima kasih.
12. Teman-teman Laboratorium Metalurgi Fisik, terkhusus kepada adik-adik seperguruan di laboratoriu metalurgi fisik , Nurhudaedah, Asruddin, Gaffar, Muhlis dan Adit yang senantiasa membantu dalam pembuatan spesimen.
13. Seluruh teman, kerabat yang tidak sempat penulis sebut satu persatu, yang telah banyak membantu penulis dalam penyelesaian studi penulis, terutama yang senantiasa memberikan motivasi kepada penulis untuk segera menyelesaikan tugas akhir ini.

Akhirnya, penulis berharap bahwa apa yang disajikan dalam skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan. Sekian dan terimakasih.

Gowa, 31 Maret 2021

Penulis



**ISMAIL**  
NIM : D022172002

## DAFTAR ISI

SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN TESIS.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR PERSAMAAN.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
ABSTRAK.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 RUMUSAN MASALAH.....	5
1.3 TUJUAN PENELITIAN.....	5
1.4 BATASAN MASALAH.....	5
1.5 MANFAAT PENELITIAN.....	6
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN.....	7
BAB II TEORI DASAR.....	9
2.1. FRICTION SURFACING (FS).....	9
1. Proses <i>friction surfacing</i> (FS).....	10
2. Parameter proses <i>friction surfacing</i> .....	12
3. Karakteristik proses sifat.....	15
4. Karakteristik lapisan <i>friction surfacing</i> .....	19

5. Aplikasi .....	24
2.2. ALUMINIUM .....	24
1. Aluminium dan paduannya .....	27
2. Pengaplikasian aluminium .....	33
2.3. PENGUJIAN MEKANIK (MECHANICAL TESTING) .....	36
1. Pengujian kekerasan ( <i>Hardness Test</i> ) .....	36
a. Metode Brinell .....	36
b. Metode Vickers .....	38
c. Metode Rockwell .....	39
2. Pengujian bending .....	40
3. Pengujian keausan .....	42
4. Pengujian SEM .....	45
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	51
3.1. WAKTU DAN TEMPAT PENELITIAN .....	51
3.2. PROSEDUR PENELITIAN .....	51
1. Studi literatur .....	51
2. Persiapan alat dan bahan .....	51
3. Pembubutan .....	62
4. Proses <i>Friction surfacing</i> .....	63
5. Analisa .....	64
3.3. DIAGRAM ALIR PENELITIAN .....	68
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	69
4.1. BENTUK DAN UKURAN LAPISAN .....	70
1. Pengukuran tebal dan lebar lapisan .....	70
2. Pengujian Bending .....	73
4.2. PENGUJIAN KEKERASAN .....	78

4.3. PENGUJIAN KEAUSAN .....	80
4.4. PENGUJIAN SEM .....	82
1. Langkah dan parameter pengujian.....	84
2. Lapisan Al6061 <i>substrate</i> baja ST37.....	84
3. Lapisan Al6061 <i>substrate</i> Al7075.....	89
BAB V PENUTUP .....	94
5.1. KESIMPULAN .....	94
5.2. SARAN .....	96
DAFTAR PUSTAKA.....	97
LAMPIRAN .....	100

## DAFTAR TABEL

TABEL 2. 1 KARAKTERISTIK ALUMUNIUM.....	27
TABEL 2. 2 DAFTAR SERI PADUAN ALUMINIUM TEMPA.....	28
TABEL 2. 3 DAFTAR SERI PADUAN ALUMINIUM TUANG .....	29
TABEL 4. 1 PERBANDINGAN LEBAR DAN TEBAL LAPISAN TERHADAP VARIASI LAJU TRAVEL SPEED HASIL PROSES FRICTION SURFACING.....	71

## DAFTAR PERSAMAAN

PERSAMAAN (1) Rumus kekerasan brinell.....	37
PERSAMAAN (2) Rumus perubahan indentor .....	37
PERSAMAAN (3) Rumus kekerasan vickers .....	38
PERSAMAAN (4) Rumus momen komposit.....	41
PERSAMAAN (5) Rumus kekuatan bending.....	41
PERSAMAAN (6) Rumus modulus elastisitas bending .....	41
PERSAMAAN (7) Rumus laju keausan.....	44
PERSAMAAN (8) Rumus intensitas keausan .....	45

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi proses <i>friction surfacing</i> .....	10
Gambar 2.2 Prinsip <i>friction surfacing</i> .....	11
Gambar 2.3 Distribusi masukan panas dalam bahan pelapis dan <i>substrate</i> bergerak .....	14
Gambar 2.4 Pengaruh parameter <i>friction surfacing</i> (tekanan gesekan dan kecepatan rotasi batang) pada efisiensi deposisi di udara .....	15
Gambar 2.5 Sketsa garis aliran pada penampang horizontal melalui deposit yang dihasilkan oleh <i>friction surfacing</i> dan gambar permukaan deposit percobaan.....	17
Gambar 2.6 Ilustrasi skema pergeseran sumbu kecepatan nihil dari: a) posisi awal ke b) kondisi selama peremajaan dan c) asimetri pada mekanisme deposisi <i>friction surfacing</i> .....	18
Gambar 2.7 Prinsip <i>friction surfacing</i> dan fenomena deposit lag.....	19
Gambar 2.8 Ilustrasi skematis dari toleransi parameter lapisan: Area yang diarsir menunjukkan kondisi yang dapat diterima .....	20
Gambar 2.9 Pengaruh tekanan dan kecepatan rotasi pada lebar dan ketebalan deposit.....	21
Gambar 2.10 Distribusi kekerasan lapisan pada kecepatan rotasi yang berbeda (dalam rev min-1).....	22
Gambar 2.11 Gambar mikro dari lapisan pelapis baja tahan karat yang diendapkan oleh <i>friction surfacing</i> .....	23
Gambar 2.12 KRL tokyo metro seri 6000 .....	34
Gambar 2.13 Geometri indentor brinell .....	37
Gambar 2.14 Geometri indentor vickers .....	39
Gambar 2.15 Jejak hasil penekanan indentor .....	39
Gambar 2.16 Indentor rockwell .....	40
Gambar 2.17 Penampang uji bending (Standart ASTM D 790-20).....	41
Gambar 2.18 Ilustrasi skematis keausan abrasif.....	43

Gambar 2.19 Keausan metode abrasive.....	44
Gambar 2.20 Mekanisme alat uji keausan abrasif .....	45
Gambar 2.21 Blok diagram SEM .....	46
Gambar 2.22 Skema Interaksi Bahan dan Elektron Di Dalam Sem.....	48
Gambar 2.23 Proses terbentuknya BSE. ....	49
Gambar 2.24 Proses pembentukan SE Dan X-Ray. ....	50
Gambar 3.1 Mesin bubut konvensional GEDEE WEILER LZ-330 G .....	51
Gambar 3.2 Pahat sisipan karbida .....	52
Gambar 3.3 Jangka sorong .....	52
Gambar 3.4 Mesin <i>drilling milling</i> .....	53
Gambar 3.5 Thermometer infrared .....	53
Gambar 3.6 Gerinda tangan .....	54
Gambar 3.7 Gergaji besi (tangan).....	54
Gambar 3.8 Kertas amplas .....	55
Gambar 3.9 Mesin amplas duduk .....	55
Gambar 3.10 Mesin mounting.....	56
Gambar 3.11 Mesin gosok duduk .....	56
Gambar 3.12 Alat uji kekerasan.....	57
Gambar 3.13 Mikroskop optic LEXT OLYMPUS-OLS4100.....	57
Gambar 3.14 Mesin uji keausan .....	58
Gambar 3.15 Electronic balance.....	58
Gambar 3.16 Gelas beaker.....	59
Gambar 3.17 Ultrasonic washing machine.....	59
Gambar 3.18 Aluminium 6061 .....	60
Gambar 3.19 Plat baja St37.....	60
Gambar 3 20 Plat aluminum 7075 .....	61
Gambar 3.21 Autozol.....	61
Gambar 3.22 Cairan aseton.....	62
Gambar 3.23 <i>Consumable rod</i> .....	62
Gambar 3.24 Ukuran <i>substrate</i> plat baja ST37 / Al7075 .....	63

Gambar 3.25 Bentuk dan ukuran spesimen uji bending .....	65
Gambar 3.26 Bentuk dan ukuran spesimen uji kekerasan .....	65
Gambar 3.27 Spesimen sebelum dimounting .....	66
Gambar 3.28 Bentuk spesimen uji SEM .....	66
Gambar 3.29 Bentuk dan ukuran spesimen uji keausan .....	67
Gambar 3.30 <i>Flow chart</i> penelitian .....	68
Gambar 4.1 Proses <i>friction surfacing</i> .....	70
Gambar 4.2 Lapisan hasil <i>friction surfacing</i> , (a) <i>substrate</i> baja ST37, (b) <i>substrate</i> Al7075 .....	71
Gambar 4.3 (a) Rod dengan flash cenderung keluar dengan <i>travel speed</i> lambat 4 cm/men, (b) Rod dengan flash sedikit keluar dengan <i>travel speed</i> cepat 6 cm/men.....	73
Gambar 4.4 Standar Deviasi pada kuat bending (N) rata-rata lapisan <i>substrate</i> baja ST37 untuk <i>travel speed</i> 4 cm/men (TS4), 5 cm/men (Ts5), 6 cm/men (Ts6).....	74
Gambar 4.5 Spesimen hasil uji bending (a) Lapisan tebal (b) Lapisan tipis .....	75
Gambar 4.6 Standar Deviasi pada kuat bending (N) rata-rata lapisan <i>substrate</i> al7075 untuk <i>travel speed</i> 4 cm/men (TS4), 5 cm/men (TS5), 6 cm/men (TS6).....	76
Gambar 4.7 Spesimen hasil uji bending (a) Proses uji bending lapisan Al6061 pada <i>substrate</i> Al7075 (b) Spesimen setelah uji bending.....	77
Gambar 4.8 Nilai kekerasan rata-rata lapisan pada <i>substrate</i> baja dan aluminium untuk <i>travel speed</i> 4 cm/men (TS4), 5 cm/men (TS5), 6 cm/men (TS6) .....	79
Gambar 4.9 Kehilangan berat rata-rata lapisan pada <i>substrate</i> baja dan aluminium untuk <i>travel speed</i> 4 cm/men (TS4), 5 cm/men (TS5), 6 cm/men (TS6). .....	81

- Gambar 4.10 Lapisan Al6061 *substrate* baja ST37 hasil *friction surfacing*, (a) foto x50, (b) foto x300, (c dan d) foto x2000 dengan batasan yang berbeda. Garis merah adalah garis batasan antara lapisan dan *substrate*. ..... 85
- Gambar 4.11 EDS spektrum dan persentase elemen di *interface* lapisan Al6061 dan *substrate* baja ST37 hasil *friction surfacing* ..... 86
- Gambar 4.12 Pemetaan unsur dengan mapping element pada *interface* lapisan Al6061 dan *substrate* baja ST37 (SEM-EDS 0-20 keV) ..... 88
- Gambar 4.13 Lapisan Al6061 *substrate* Al7075 hasil *friction surfacing*, (a) foto x50, (b) foto x300 (c) foto x2000. Garis merah adalah garis batasan antara lapisan dan *substrate*. ..... 89
- Gambar 4.14 EDS spektrum dan persentase elemen di *interface* lapisan Al6061 dan *substrate* Al7075 hasil *friction surfacing* 91
- Gambar 4.15 Pemetaan unsur dengan mapping lapisan Al6061 dan *substrate* Al6061 (SEM-EDS 0-20 keV) ..... 92

## ABSTRAK

**ISMAIL.** Karakteristik Lapisan Hasil *Friction Surfacing Process* dari Material Aluminium Paduan Al6061 (dibimbing oleh **Hairul Arsyad** dan **Lukmanul Hakim Arma**).

Penelitian ini menyajikan penyelidikan eksperimental karakteristik lapisan Al6061 pada substrate baja ST37 dan Al7075 dari hasil *friction surfacing*. Lapisan diperoleh dari proses *friction surfacing*, memanfaatkan gesekan yang terjadi antara permukaan/*substrate* dengan *consumable rod*/Al6061. *Consumable rod* (Al6061) merupakan aluminium silinder pejal yang dibubut dengan ukuran diameter 16 mm panjang 125 mm. *Consumable Rod* (Al6061) dengan tekanan konstan 40 kg serta putaran konstan dengan kecepatan 3000 rpm bergerak melapisi *substrate* dengan *travel speed* yang bervariasi 4, 5, dan 6 cm/menit. Hasil lapisan kemudian dianalisis untuk mengetahui karakteristik lapisan hasil *friction surfacing*, lapisan hasil *friction surfacing* diperoleh nilai terbaik pada *travel speed* lambat 4 cm/menit dimana, hasil pengujian kekuatan bending dan kekerasan lapisan diperoleh nilai tertinggi sedangkan hasil pengujian keausan lapisan menunjukkan bahwa massa keausan meningkat seiring dengan lama waktu yang digunakan dalam proses pengausan. Nilai massa keausan tertinggi terdapat pada jenis *substrate* Al7075 ditiap variasi waktu yang digunakan, nilai massa keausan pada *substrate* baja ST37 lebih rendah dibandingkan dengan nilai massa keausan pada *substrate* Al7075. Hasil SEM dan mapping menunjukkan adanya difusi Al, Fe dan C pada interface lapisan Al6061 *substrate* baja ST37 sedangkan, pada lapisan Al6061 *substrate* Al7075 menunjukkan adanya difusi unsur Zn dari *substrate* ke lapisan.

**Kata Kunci:** Gesekan Permukaan, Kecepatan Geser, Bending, Kekerasan, Keausan.

## ABSTRACT

**ISMAIL.** Characteristics of The Friction Surfacing Process of Aluminum Alloy Al6061 (guided by **Hairul Arsyad** and **Lukmanul Hakim Arma**)

This study presents an experimental investigation of characteristics of the Al6061 layer on the steel substrate ST37 and Al7075 using friction surfacing. The layer is obtained from the friction surfacing process, utilizing the friction between the substrate and the consumable rod/Al6061. Consumable rod (Al6061) is a solid bar with diameter of 16 mm and 125 mm long reduced using turning machine. Consumable Rod/Al6061 with constant pressure of 40 kg and constant rotation at 3000 rpm moves to coat the substrate with travel speed varying 4, 5, and 6 cm / minute. The results of the coating were then analyzed to determine characteristics of the layers. From the friction surfacing results, the layers were obtained the best value at the low travel speed of 4 cm / minute, where the bending strength and coating hardness test results reach the highest values. The coating wear test results showed that the mass wear increases with the length of time used in the wear process. The highest wear mass value was found in the Al7075 substrate type in each time variation used. The wear mass value on the ST37 steel substrate is lower than the wear mass value on the Al7075 substrate. The SEM-EDS and mapping results show the presence of diffusion of Al, Fe and C at the interface of the Al6061 layer of the ST37 steel substrate while, the Al6061 layer of the Al7075 substrate shows the diffusion of Zn elements from the substrate to the layer.

**Keywords** : *Friction Surfacing, Travel Speed, Substrate, Bending Strength, Hardness, Wear.*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Saat ini banyak kita jumpai permukaan yang membutuhkan sebuah lapisan tahan terhadap gesekan serta dapat melindungi permukaan tersebut dari korosi. Diantara beberapa permukaan, salah satu contoh yang mengalami momen gesek setiap saat adalah konduktor rail kereta api, pada konduktor rail kereta api ini diketahui bahwa terjadi gesekan setiap saat yang dapat menyebabkan terjadinya keausan, selain itu juga rentang mengalami korosi karena pengaruh lingkungan. Dari beberapa konduktor rail kereta api ada sebagian permukaan yang dilapisi dengan stainless steel (*Forman, 2013*), lapisan dengan stainless steel tentunya membutuhkan biaya yang lumayan besar. Seiring meningkatnya kemajuan teknologi mengakibatkan kebutuhan akan penelitian dan pengembangan dalam segala bidang semakin meningkat pesat, terutama dalam bidang material aluminium komposit (*Robinson, M., Carruthers, J., Gibson, 2005*).

Aluminium menjadi material pilihan sejak tahun 1930 dimana aluminium terdiri dari beberapa seri paduan yang menunjukkan kualitas dan karakteristik aluminium tersebut (*Skillingberg & Green, 2007*). Dari sekian banyak logam yang potensial, Komposit Matrik Logam (MMCs) paduan Al6061 (tersusun atas Al, Mg, Si, Cr, Cu) telah menjadi obyek dari

banyak riset, karena bahan ringan, tahan korosi, murah dan mudah untuk difabrikasi (Robinson, M., Hiroshi., 2006). Al6061 memiliki ketahanan korosi yang tinggi, karena logam ini sangat reaktif dan terbentuk lapisan oksida tipis pada permukaannya, salah satu keuntungan yang paling signifikan dari aluminium adalah penerapan ekstrusi berongga besar yang kaku secara internal dibandingkan dengan baja konvensional, jenis ini memungkinkan dibuat dengan bagian yang lebih kecil, mengurangi tingkat pengelasan yang diperlukan, dan secara signifikan lebih ringan, yang memiliki keuntungan lebih lanjut bahwa lapisan dapat dimanipulasi oleh satu pekerja, sehingga menghemat tenaga kerja. Paduan seri 6xxx (aluminium-magnesium-silikon) dapat diolah panas dan dapat menawarkan kekuatan yang lebih tinggi, kinerja korosi yang baik, dan kemampuan las yang baik (Skillingberg & Green, 2007). Dari sifat tersebut penulis memilih Al6061 sebagai bahan *coating* karena dianggap mampu sebagai *coating* atau pelapis permukaan untuk meningkatkan sifat permukaan material tahan terhadap korosi dan keausan serta memiliki bobot yang ringan.

*Coating* adalah lapisan yang diaplikasikan pada permukaan atau *substrate* suatu material. Lapisan permukaan yang diperoleh secara sintesis bertujuan untuk memperoleh sifat teknis tahan terhadap korosi dan tahan keausan (Ahmad, 2006). Adapun salah satu metode pelapisan permukaan yaitu metode *friction surfacing process*. (Nicholas E.D., 1993), menjelaskan bahwa metode *friction surfacing process* yang pertama kali

dipatenkan pada tahun 1941 oleh Klopstock H., & Neelands A.R. adalah sebuah metode baru untuk memproduksi pelapis berbutir halus, yang menunjukkan kualitas tahan keausan dan korosi.

*Friction surfacing process* adalah proses pelapisan *solid-state* berdasarkan deformasi plastik dari material pelapis/*consumable rod* (Gandra et al., 2014). *Consumable rod* yang digunakan dalam *friction surfacing process* dikonsumsi selama proses (Kalken, 2001). *Consumable rod* digesekkan secara kontinyu di bawah tekanan pada permukaan/*substrate* yang akan dilapisi. Deformasi *visco-plastic* material pelapis/*consumable rod* terjadi selama proses. *Travel speed* dan *axial force* yang digunakan selama proses adalah suatu parameter penting yang mempengaruhi proses pelapisan permukaan/*substrate* (Shinoda, 1998). Proses penting lainnya yang harus dikontrol untuk menghasilkan ikatan yang baik di atas material *substrate* adalah diameter batang konsumsi, kecepatan pelapisan/*travel speed*, *axial force*, dan kecepatan rotasi batang (Kalken, 2001). Pada penelitian ini semua parameter *friction surfacing* konstan kecuali *travel speed* divariasikan.

Berdasarkan kasus pada konduktor rail kereta api yang telah dibahas di atas, dimana konduktor rail rentang mengalami korosi seiring waktu akibat pengaruh lingkungan dan juga terjadi kerusakan permukaan akibat adanya gesekan yang terjadi saling menekan dan bergesekan secara terus-menerus sehingga dapat menyebabkan terjadinya keausan, adapun faktor-faktor yang mempengaruhi keausan adalah kecepatan, tekanan,

kekasaran permukaan dan kekerasan bahan (*Gandung Gistiano Suhartono, 2017*). Dari fenomena tersebut di atas diharapkan ada sebuah riset untuk mengetahui karakteristik lapisan hasil dari sebuah metode pelapisan yang mampu menghasilkan lapisan memiliki ketahanan, dimana hasil lapisan dianalisis untuk mengetahui karakteristik lapisan tersebut dengan beberapa metode pengujian pertama, pengujian bending untuk mengetahui kekuatan rekat lapisan terhadap *substrate* kedua, pengujian kekerasan untuk mengetahui kekerasan lapisan ketiga, pengujian keausan untuk mengetahui ketahanan aus lapisan terhadap gesekan dan keempat, pengujian SEM untuk mengetahui struktur dan unsur yang berdifusi pada interface diantara lapisan dan *substrate*.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa *friction surfacing process* adalah metode untuk memproduksi pelapis berbutir halus yang menunjukkan kualitas tahan keausan dan korosi (*Nicholas E.D., 1993*), maka dalam penelitian ini penulis memilih metode *friction surfacing* untuk mengetahui karakteristik lapisan yang dihasilkan. Karakteristik lapisan dapat dilihat dari tingkat kekuatan daya rekat lapisan, kekerasan lapisan, keausan lapisan dan struktur mikro serta unsur yang berdifusi diantara lapisan dan *substrate*. Dengan mengetahui karakteristik lapisan tersebut dapat memberikan referensi baru pada dunia industri khususnya dibidang kereta api, otomotif dll. Penelitian ini berfokus untuk mengetahui karakteristik lapisan hasil *friction surfacing process* dari material aluminium paduan Al6061.

## 1.2 RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dikemukakan diatas, maka dapat dirumuskan beberapa rumusan masalah, yakni :

1. Bagaimana pengaruh *travel speed* terhadap kualitas lapisan dengan metode *friction surfacing* pada substrate baja ST 37 dan Al7075?
2. Bagaimana nilai kekuatan bending, kekerasan dan nilai keausan permukaan yang telah dilapisi Al6061 dengan metode *friction surfacing* pada substrate baja ST 37 dan Al7075?
3. Bagaimana struktur mikro dan komposisi kimia aluminium dengan logam yang telah dilapisi Al6061 dengan metode *friction surfacing*?

## 1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh *travel speed* pada *friction surfacing* terhadap bentuk dan ukuran lapisan pada *substrate* baja ST37 dan Al7075.
2. Menganalisa kualitas lapisan dari kekuatan bending, nilai kekerasan dan keausan hasil proses *friction surfacing* pada *substrate* baja ST37 dan Al7075.
3. Menganalisa struktur mikro dan komposisi kimia lapisan dengan *substrate* hasil proses *friction surfacing* pada *substrate* baja ST37 dan Al7075.

## 1.4 BATASAN MASALAH

Batasan masalah dalam penelitian ini, terdiri atas :

1. Proses *friction surfacing* dalam penelitian ini, *Axial force* dijaga konstan dengan beban 40 kg dan *Rotational Speed* dijaga konstan dengan 3000 rpm.
2. Variasi *travel speed* yang digunakan 4 cm/men (TS4), 5 cm/men (TS5), 6 cm/men (TS6).
3. Jenis *substrate* yang digunakan baja ST37 dan Al7075.
4. Karena sifat material *substrate* baja ST37 dan Al7075 yang berbeda, suhu hantar proses *friction surfacing* pada baja ST37 dimulai dari 200°C dan pada Al7075 dimulai dari 100°C.

## 1.5 MANFAAT PENELITIAN

Penelitian ini dapat memberikan manfaat, yaitu :

1. Manfaat bagi Peneliti

Sebagai wadah untuk menerapkan pengetahuan tentang teori yang didapatkan selama perkuliahan, sehingga dapat membandingkan antara teori yang ada dengan kondisi yang ada di lapangan.

2. Manfaat bagi pembaca

Hasil penelitian dapat menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya untuk jadi acuan dalam pengembangan kualitas sebuah lapisan metode *friction surfacing*.

3. Manfaat bagi Universitas

Sebagai referensi untuk melakukan penelitian serupa mengenai pengaruh *travel speed* terhadap kualitas lapisan hasil *friction surfacing*.

## 1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Adapun sistematika yang digunakan dalam penulisan ini, yaitu sebagai berikut :

### BAB I : PENDAHULUAN

Dimaksudkan untuk mengarahkan penulis. Berisi latar belakang terkait aluminium yang digunakan serta metode pelapisan yaitu *friction surfacing*. Menentukan rumusan masalah dari lingkup latar belakang yaitu pengaruh, nilai, struktur mikro dan komposisi kimia spesimen penelitian. Kemudian, dari rumusan masalah tersebut kita peroleh pembahasan mengenai tujuan, batasan dan manfaat serta dapat menyusun sistematika penulisan.

### BAB II : TEORI DASAR

Pada bab ini berisikan tentang dasar-dasar teori yang didasarkan dari hasil studi literatur dan jurnal. Pada bab ini akan dijelaskan secara singkat beberapa hal yang terkait dalam penelitian ini. Diantaranya dijelaskan mengenai keausan, *friction surfacing*, aluminium, uji mekanik dan uji *scanning electron microscope* (SEM).

### BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi tentang waktu dan tempat penelitian, prosedur penelitian, langkah pembuatan *consumable rod*, proses *friction surfacing*, langkah proses analisa data dan flow chart penelitian.

#### BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang data-data yang diperoleh selama penelitian dan pembahasan mengenai hasil penelitian lapisan tentang daya rekat, kekerasan, keausan, struktur mikro serta komposisi kimia lapisan dan *substrate*.

#### BAB V : PENUTUP

Berisi tentang kesimpulan yang merupakan jawaban dari tujuan dalam penelitian lapisan mencakup pengaruh *travel speed*, kualitas, struktur mikro dan komposisi kimia serta, saran yang mungkin dapat bermanfaat untuk penelitian selanjutnya.

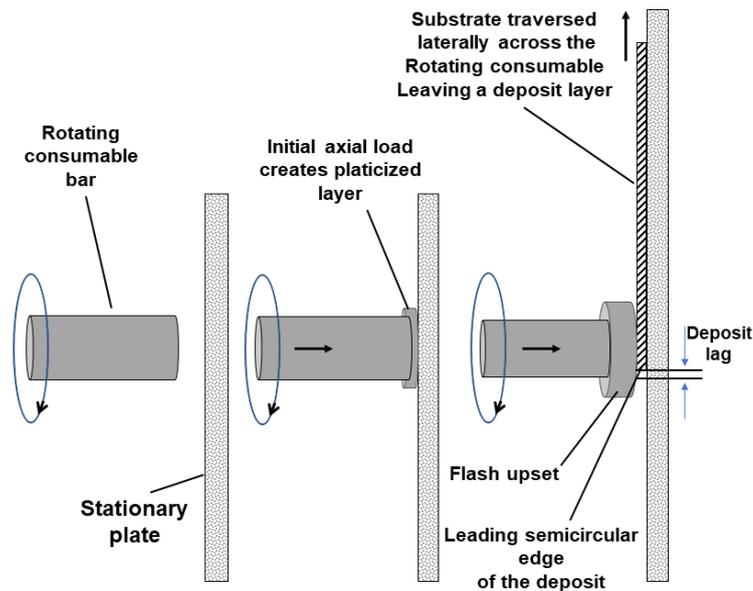
## BAB II

### TEORI DASAR

#### 2.1. FRICTION SURFACING (FS)

*Friction surfacing* adalah bagian yang berkembang sangat cepat terutama karena semakin banyak industri menyadari bahwa menggunakan bahan yang tepat di tempat yang tepat menghasilkan penghematan yang sesungguhnya (Bedford, 1985). *Friction surfacing* dapat diterapkan untuk mengatasi sejumlah masalah material seperti korosi, keausan dan kelelahan. Berbagai macam teknik perbaikan permukaan sudah dikembangkan dan banyak diantaranya berhasil diterapkan di industri namun, sebagian besar teknik *friction surfacing* terkait dengan masalah seperti porositas, inklusi terak, atau pengenceran yang berlebihan. *Friction surfacing* adalah teknik memperbaiki permukaan dan dikaitkan dengan sifat metalurgi yang sangat baik.

*Friction surfacing* adalah proses deposisi logam solid-state (Nicholas E.D., 1993). Proses ini bergantung adanya gerakan relatif antara *consumable rod* dan *substrate* saat ditekan bersama di bawah gaya aksial yang diterapkan untuk menghasilkan kondisi termomekanis. Gerakan relatif paling sederhana adalah rotasi *consumable rod*. Secara umum pengendapan tidak dilakukan untuk menyatukan dua benda kerja, melainkan untuk membuat lapisan pada benda kerja untuk melindungi, memulihkan, atau meningkatkan sifat *substrate* (Gambar 2.1).



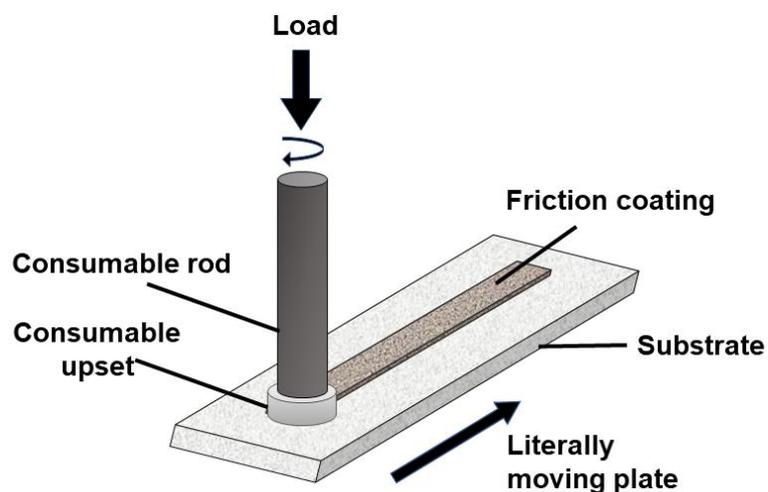
**Gambar 2.1** Ilustrasi proses *friction surfacing* (Nicholas E.D., 1993).

Proses *friction surfacing* pertama kali dipatenkan pada tahun 1941 oleh Klopstock dan Neelands (Klopstock, 1941). Namun, karena banyak ide baru, teknik *friction surfacing* tertidur hingga awal 1960-an. Sampai saat ini *friction surfacing* hanya dilakukan pada skala laboratorium. Perkembangan baru-baru ini memungkinkan untuk melakukan *friction surfacing* pada skala komersial, namun prosesnya terbatas pada aplikasi stasioner dalam posisi pengelasan datar. Hal ini disebabkan oleh kekuatan proses yang diperlukan, yang berarti penggunaan peralatan mesin yang besar dan kaku.

### 1. Proses *Friction Surfacing*

*Friction surfacing* sebanding dengan pengelasan gesekan di mana *consumable rod* digunakan sebagai bahan pelapis. Namun, pada *friction*

*surfacing* bahan *consumable rod* digunakan untuk pelapis bukan untuk menyambung benda kerja. Selama *friction surfacing* tidak ada peleburan yang terjadi dan suhu dijaga dekat dengan titik leleh bahan *consumable rod* yang jauh lebih rendah daripada yang dicapai dengan metode pelapisan konvensional (Bedford, 1985). Karena itu, proses tersebut memiliki zona pengaruh panas yang sempit (HAZ) dan jumlah difusi yang dapat diabaikan antara material di antarmuka selain itu, cacat keropos hampir tidak terlihat. Lapisan ini dicirikan oleh mikrostruktur kerja panas yang halus dan memiliki ikatan yang kuat dengan *substrate* (Nicholas E.D., 1993). Meskipun tingkat deposisi yang tinggi dapat dicapai, efisiensi *consumable rod* dapat menjadi sangat rendah karena material yang dilapisi sebagian didorong ke atas sepanjang *consumable rod* ke dalam (Li JQ. dan Shinoda T., 2000).



**Gambar 2.2** Prinsip *friction surfacing* (Shinoda, 1998).

Lapisan hasil *friction surfacing* dicapai dengan menghantar *consumable rod* kontak dengan *substrate*. Gerakan relatif yang dikombinasikan dengan gaya aksial yang diterapkan menghasilkan panas akibat gesekan sehingga *consumable rod* menjadi plastifikasi, ketika fase plastifikasi cukup tercapai, *consumable rod* dipindahkan di atas *substrate* menjadi lapisan material yang diendapkan (Gambar 2.2). Dimungkinkan untuk menghasilkan lapisan logam pada *substrate* logam yang berbeda karena adhesi padat dicapai dengan menghasilkan tegangan kontak yang tinggi dan kontak yang erat antara kedua logam (*Chandrasekaran, M., AW Batchelor, 1998*).

Untuk satu aplikasi, mungkin lebih penting untuk menghasilkan lapisan yang cukup tebal dalam sekali jalan sedangkan untuk aplikasi lain pengurangan HAZ mungkin lebih penting, tergantung pada tujuan lapisan *friction surfacing* dan kombinasi material tertentu (*Kalken, 2001*), parameter permukaan gesekan yang paling penting adalah:

- diameter *consumable rod*,
- kecepatan pelapisan/*travel speed*,
- gaya aksial/*axial force* dan,
- kecepatan rotasi batang (rpm)

## **2. Parameter Proses *Friction Surfacing***

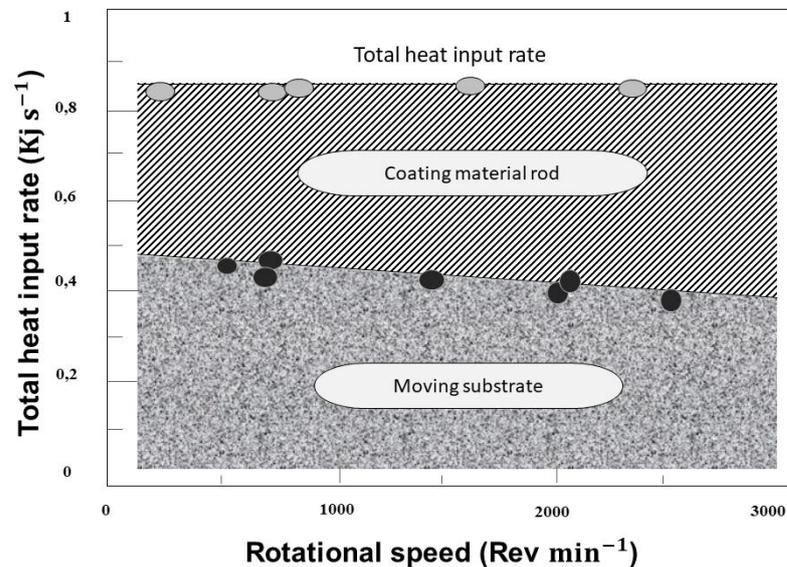
Sejumlah besar penelitian telah membahas pengaruh parameter proses pada *friction surfacing*. Penelitian lebih mendalam telah dilakukan

pada pengaruh kecepatan rotasi (*Shinoda, 1998*), hasil dari beberapa penelitian telah dihasilkan sampai saat ini. Untuk mengetahui perbandingan di antara parameter yang berbeda, hubungan gaya aksial dipertimbangkan dengan diameter *consumable rod* dalam satuan MPa. Secara umum suhu leleh *consumable rod* lebih tinggi dari pada *substrate* (*Kalken, 2001*).

Penelitian yang dilakukan oleh Shinoda et al. (*Shinoda, 1998*) menunjukkan bahwa dengan meningkatnya gaya, lebar lapisan bertambah dan ketebalan berkurang.

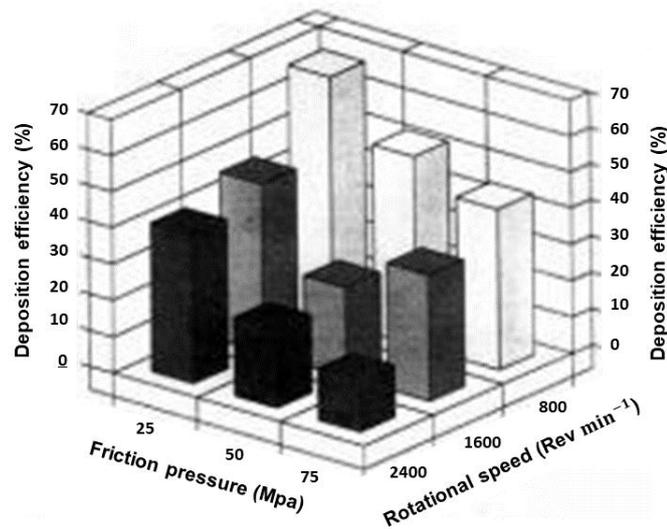
Pengukuran kalorimetrik dari panas yang dihasilkan selama *friction surfacing* telah dilakukan oleh Shinoda et al. (*Shinoda, 1998*). Pengaruh kecepatan rotasi terhadap panas yang dihasilkan pada *consumable rod* dan *substrate* telah diteliti, hasilnya kecepatan rotasi hampir tidak mempengaruhi panas yang dihasilkan (lihat Gambar 2.3). Meningkatnya kecepatan rotasi, *consumable rod* menyerap lebih banyak dari total panas yang dihasilkan dengan lebih sedikit energi yang ditransfer ke *substrate*. Dengan cara ini panas di *consumable rod* dan *substrate* dapat dikontrol. Ketika energi panas yang dihasilkan pada *substrate* meningkat, HAZ menjadi lebih besar yang memiliki efek yang lebih nyata pada mikrostruktur yang dihasilkan. Apabila kecepatan putar meningkat, panas yang dihasilkan pada *substrate* menjadi relatif kecil karena area gesekan antara *consumable rod* dan *substrate* berkurang akibatnya, dengan

meningkatnya kecepatan rotasi, kekerasan di HAZ dan dimensi deposit (yaitu ketebalan dan lebar) berkurang (Shinoda, 1998).



**Gambar 2.3** Distribusi masukan panas dalam bahan pelapis dan *substrate* bergerak (Shinoda, 1998).

*Consumable rod* akan selalu menghasilkan gangguan selama *friction surfacing* dan oleh karena itu efisiensi *consumable rod* yang digunakan tidak akan pernah 100%. Li dan Shinoda (Li JQ. dan Shinoda T., 2000). Efisiensi *friction surfacing* diukur sebagai perbandingan logam yang disimpan terhadap total logam yang dikonsumsi. Pengaruh kecepatan putar dan tekanan gesekan terhadap efisiensi ditunjukkan pada gambar 2.4. Semakin rendah kecepatan putar dan tekanan gesekan maka semakin baik efisiensi lapisan.



**Gambar 2.4** Pengaruh parameter *friction surfacing* (tekanan gesekan dan kecepatan rotasi batang) pada efisiensi deposisi di udara (Li JQ. dan Shinoda T., 2000).

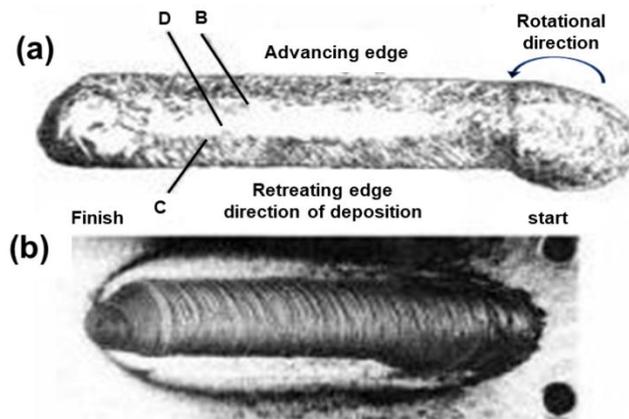
### 3. Karakteristik Sifat *Friction Surfacing*

Sifat bahan yang penting terkait dengan *friction surfacing* adalah konduktivitas termal logam yang digunakan, material dengan konduktivitas termal tinggi tidak memungkinkan terbentuknya lapisan yang dipanaskan selama *friction surfacing*. Batchelor (Batchelor, AW, 1996) menyebutkan bahwa, berbeda dengan baja tahan karat 304, AA6061 dan kuningan tidak menunjukkan adanya adhesi apapun dengan *substrate* baja ringan. Konduktivitas panas AA6061 dan kuningan sekitar 10 kali konduktivitas panas baja tahan karat. Oleh karena itu untuk membuat lapisan aluminium atau kuningan pada baja ringan, kecepatan rotasi harus ditingkatkan secara substansial atau tegangan kontak harus dinaikkan.

Masalah lain yang muncul dengan pemilihan material lapisan adalah material tersebut harus memiliki karakteristik gesekan yang tinggi. Baja tahan karat dikaitkan dengan koefisien gesekan yang tinggi, sedangkan kuningan adalah bahan bantalan yang efektif. Dalam penelitian Barchelor (*Batchelor, AW, 1996*), kuningan tidak membentuk lapisan sama sekali. Aluminium, yang cenderung kejang gesekan dalam keausan geser, menunjukkan adanya lapisan, yang ditekan oleh suhu yang lebih rendah.

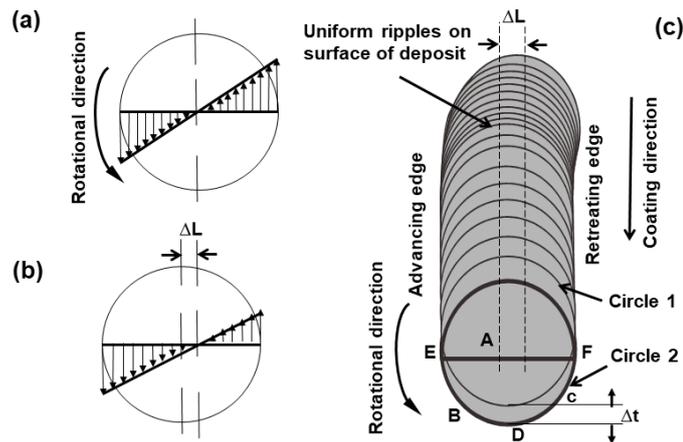
*Friction surfacing* dapat dibagi dalam dua tahap : kontak dinamis awal dan gerakan melintasi (*Chandrasekaran, M., AW Batchelor, 1998*). Selama tahap kontak dinamis awal, *consumable rod* dan *substrate* saling bersentuhan. Pada tahap ini suhu *consumable rod* dan *substrate* pada antarmuka meningkat. Kontak awal akan tetap ada selama beberapa detik sampai lapisan plastik terbentuk, selama tahap ini sedikit pengenceran *substrate* dan *consumable rod* dapat diamati (*Thomas, 1985*).

Pada tahap berikutnya (yaitu gerakan melintasi), bahan *consumable rod* didorong di atas permukaan. Selama tahap ini *consumable rod* yang kaku tidak bersentuhan dengan *substrate*. Hanya lapisan plastik, yang memiliki kekuatan mekanik lebih rendah, yang bersentuhan dengan *substrate* sehingga menghasilkan gerusan yang kurang efektif. Oleh karena itu pengenceran *consumable rod* di *substrate* dapat diabaikan (yaitu pengenceran rendah).



**Gambar 2.5** Sketsa garis aliran pada penampang horizontal melalui deposit yang dihasilkan oleh *friction surfacing* dan gambar permukaan deposit percobaan (Li JQ. dan Shinoda T., 2000).

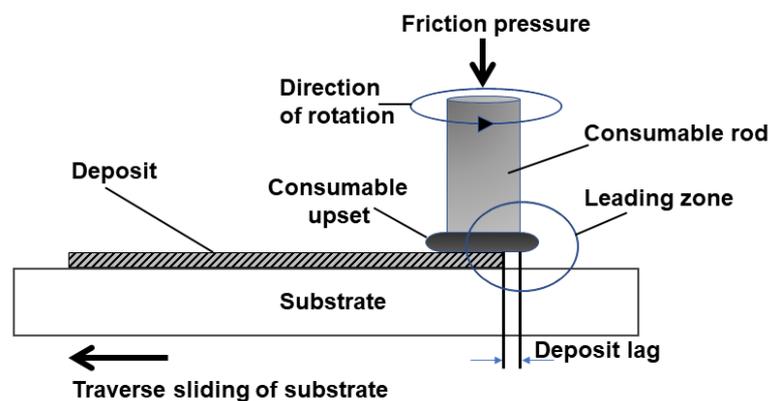
Gambar 2.5 menunjukkan galir aliran di bagian horizontal melalui lapisan yang dihasilkan *friction surfacing*. Lapisan pada permukaan ditunjukkan gambar 2.5b. Flowline berbeda pada titik awal, pada titik awal pola flowline berbentuk simetris, dititik ini *consumable rod* telah berputar beberapa saat tanpa bergerak di sepanjang *substrate*. Pada bagian tengah yaitu kondisi saat *consumable rod* didorong sepanjang *substrate* dengan kecepatan lintasan konstan saat berputar. Kecepatan relatif permukaan *consumable rod* berbeda pada sisi maju dan mundur karena pengaruh kecepatan pelapisan, ditambah kecepatan putar. Gambar 2.6 menggambarkan superposisi kecepatan putar *consumable rod* dan kecepatan pelapisan.



**Gambar 2.6** Ilustrasi skema pergeseran sumbu kecepatan dari: a) posisi awal ke b) kondisi selama peremajaan dan c) asimetri pada mekanisme deposisi *friction surfacing* (Li JQ. dan Shinoda T., 2000).

Gambar 2.6a menunjukkan distribusi kecepatan *consumable rod* yang hanya memiliki kecepatan putar dan tidak ada kecepatan lintasan. Gambar 2.6b menunjukkan distribusi kecepatan ketika kecepatan putar dikombinasikan dengan kecepatan lintasan (yaitu pelapisan) sebagai akibat dari penggerak *consumable rod* berputar sepanjang *substrate*, tempat di mana kecepatan relatif nol telah berpindah dari pusat ke sisi di mana kecepatan putaran berlawanan arah dengan kecepatan gerak *consumable rod* di atas *substrate*. Pada gambar ketiga (Gambar 2.6c) garis aliran di sisi lag, atau sisi mundur, juga disebut sisi maju. Akibatnya, garis tengah menjadi offset dari posisi semula dan kemunduran serta sisi yang maju dibuat terlihat dalam pola garis aliran. Dalam gambar 2.6c lapisan diilustrasikan dengan lingkaran nomor 1 dan posisi sebenarnya dari *consumable rod* dengan nomor lingkaran 2. Hambatan pelapisan adalah selisih antara dua lingkaran, yang ditunjukkan sebagai  $\Delta t$ .

Harus ditekankan bahwa  $\Delta t$  sangat kecil (yaitu 0,001 mm), karena kecepatan transversal *substrate* relatif lambat (yaitu 1 mm/s) dibandingkan dengan kecepatan putar *consumable rod* yang dapat melebihi 800 putaran/menit.  $\Delta t$  memiliki deposisi dipengaruhi oleh kecepatan rotasi *consumable rod* yang konstan dan kecepatan lintasan *substrate* (Li JQ. dan Shinoda T., 2000). Menurut Thomas (Thomas, 1985), gerusan diperlukan untuk mencapai ikatan yang baik. Goresan selama tahap *friction surfacing* dihasilkan oleh kontak antara *substrate* dan lapisan plastik yang berasal dari *consumable rod* (Gambar 2.7).

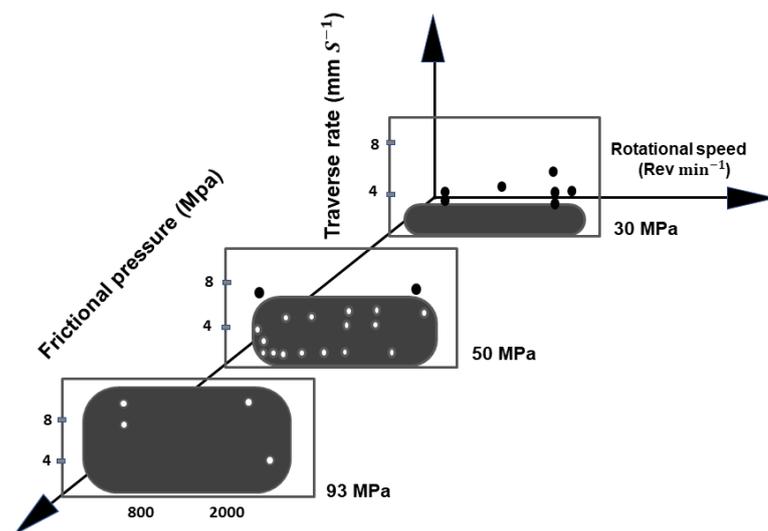


**Gambar 2.7** Prinsip *friction surfacing* dan fenomena deposit lag (Li JQ. dan Shinoda T., 2000).

#### 4. Karakteristik Lapisan *Friction Surfacing*

Karakteristik lapisan *friction surfacing* bergantung pada kombinasi parameter seperti yang disebutkan sebelumnya. Untuk kecepatan rotasi rod yang konstan dengan tekanan gesekan yang lebih tinggi, menghasilkan panas yang lebih luas dari kecepatan pelapisan yang

memungkinkan untuk lapisan bebas cacat (Gambar 2.8). Hal ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa, untuk kecepatan rotasi yang konstan, gaya aksial yang lebih rendah menghasilkan *consumable rod* plastik dalam jumlah terbatas, sehingga kualitas hasil pelapisan terbatas (Kalken, 2001).



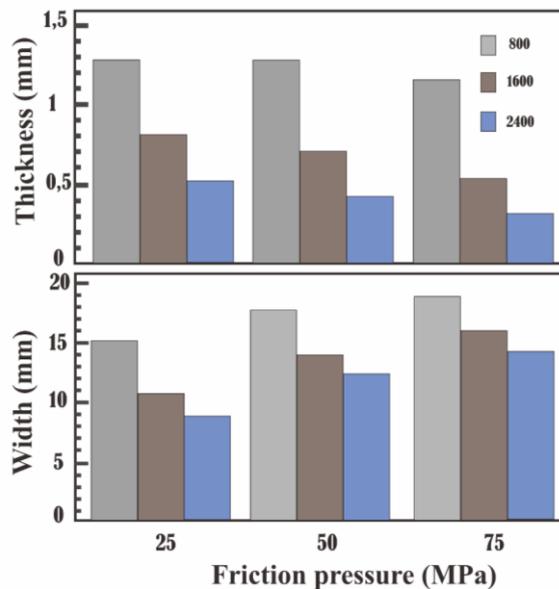
**Gambar 2.8** Gambaran skematis dari toleransi parameter lapisan: Bagian yang diarsir menunjukkan kondisi yang dihasilkan (Shinoda, 1998).

Berikut pengaruh parameter pada dimensi lapisan, kekerasan dan struktur mikro ;

a. Dimensi Lapisan

Untuk kombinasi material tertentu, lebar dan ketebalan lapisan yang dihasilkan dipengaruhi oleh permukaan, yaitu kecepatan putar *consumable rod*, diameter *consumable rod*, gaya aksial dan kecepatan pelapisan. Lebar zona terikat penuh biasanya sekitar 1 sampai 3 mm

lebih kecil dari diameter *consumable rod* (Nicholas E.D., 1993). Dengan kata lain, sisi luar lapisan selalu menunjukkan kurangnya ikatan. Akibat pergeseran (Gambar 2.1) menyebabkan distribusi tekanan yang tidak merata di diameter luar sehingga sisi luar lapisan ikatannya berkurang (Nicholas E.D., 1993). Kurangnya tekanan *consumable rod* di sisi luar diasumsikan juga berkontribusi pada kurangnya ikatan sisi luar lapisan yang dihasilkan (Nicholas E.D., 1993).



**Gambar 2.9** Pengaruh tekanan dan kecepatan rotasi pada lebar dan ketebalan lapisan (Shinoda, 1998).

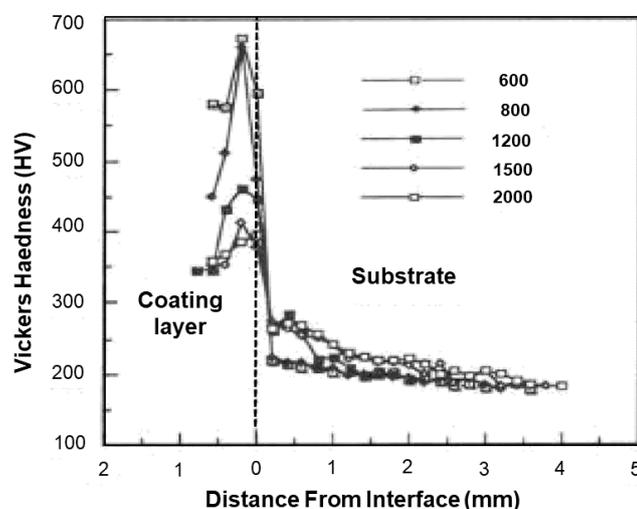
Gambar 2.9 menunjukkan tekanan gesekan dan kecepatan putaran rod untuk lebar dan tebal lapisan yang dihasilkan. Gambar 2.9 menunjukkan pengaruh tekanan gesekan dan kecepatan putaran rod terhadap lebar dan ketebalan lapisan. Ketika tekanan (gesekan)

meningkat, ketebalan akan berkurang dan lebar lapisan akan bertambah (*Shinoda, 1998*).

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, ketebalan lapisan yang dihasilkan tergantung pada *consumable rod*. Bahan dengan titik leleh tinggi terhadap deformasi plastis membutuhkan suhu yang lebih tinggi untuk menghasilkan lapisan (*Nicholas E.D., 1993*).

#### b. Kekerasan

Sebagian besar aplikasi *friction surfacing* memerlukan kekerasan lapisan yang tinggi. Distribusi kekerasan di *substrate* baja ringan dan bahan pelapis baja tahan karat, hasil dari kecepatan rotasi telah dihasilkan oleh Shinoda et al. (*Shinoda, 1998*). Spesimen telah dihasilkan dengan tekanan gesekan konstan dan kecepatan putar yang variabel. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 2.10.



**Gambar 2.10** Distribusi kekerasan lapisan pada kecepatan rotasi yang berbeda (dalam rev min<sup>-1</sup>) (*Shinoda, 1998*).

Selama *friction surfacing*, peningkatan suhu menyebabkan rekristalisasi, yang dinyatakan dalam bentuk kekerasan. Dapat dilihat bahwa kekerasan lapisan lebih tinggi dibandingkan dengan kekerasan *substrate* dan kecepatan putar yang lebih rendah menghasilkan lapisan yang lebih keras. Gambar 2.10 juga menunjukkan bahwa nilai kekerasan tertinggi telah diukur di tengah lapisan. Diantara permukaan kedua bahan *consumable rod* dan *substrate*, lapisan pelapis mengalami laju pendinginan yang lebih tinggi karena efek heat sink yang disebabkan oleh *substrate* yang menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi.

#### c. Mikro Struktur

Ciri khas dari pelapis baja tahan karat, dengan partikel karbida halus disajikan oleh Shinoda et al. (*Shinoda, 1998*) pada gambar 2.11. Matriks menunjukkan partikel karbida terdispersi sangat halus yang didistribusikan secara seragam ke seluruh lapisan.



**Gambar 2.11** Gambar mikro dari lapisan pelapis baja tahan karat yang dihasilkan oleh *friction surfacing* (*Shinoda, 1998*).

## 5. Aplikasi

*Friction surfacing* adalah proses pelapisan solid state, yang semakin kompetitif dengan teknik pelapisan lainnya (Nicholas E.D., 1993). Berdasarkan aspek material, telah ditetapkan dengan baik bahwa teknik *friction surfacing* mampu menggabungkan banyak kombinasi logam yang serupa dan berbeda. *friction surfacing* juga memiliki berbagai kombinasi logam serupa dan berbeda untuk digunakan untuk tujuan pelapisan (Bedford, 1985). Sebagian besar aplikasi *friction surfacing* secara umum adalah perlindungan terhadap objek lingkungan yang keras, erosi, korosi atau serangan lingkungan yang merusak dan perbaikan bagian yang aus (Jenkins, 1989).

Penerapannya, yang telah terbukti keberhasilannya adalah penerapan pada ujung tombak dan pada alat pertanian. Melindungi dan memperbaiki bilah turbin, bilah geser, rem cakram, batang rel, dan alat tekan mati dengan pengelasan gesekan juga dapat digunakan (Lambrineas, P., BM Jenkins, 1990).

### 2.2. ALUMINIUM

Aluminium ditemukan oleh Sir Humphrey Davy tahun 1809 sebagai suatu unsur dan pertama kali direduksi sebagai logam oleh H. C. Oersted, tahun 1825 baru diakui secara pasti oleh F. Wohler pada tahun 1827, sumber unsur ini tidak terdapat bebas, bijih utamanya adalah Bauksit. Secara industri tahun 1886, Paul Heroult di Perancis dan C . M. Hall di

Amerika Serikat secara terpisah telah memperoleh logam aluminium dari alumina dengan cara elektrolisis dari garam yang terfusi. Sampai sekarang proses Heroult Hall masih dipakai untuk memproduksi aluminium. Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya adalah urutan yang kedua setelah besi dan baja, yang tertinggi di antara logam *non ferro*.

Aluminium adalah logam yang memiliki kekuatan yang relatif rendah dan lunak. Aluminium merupakan logam yang ringan dan memiliki ketahanan korosi dan hantaran listrik yang baik. Umumnya aluminium dicampur dengan logam lainnya sehingga membentuk aluminium paduan. Material ini dimanfaatkan bukan saja untuk peralatan rumah tangga, tetapi juga dipakai untuk keperluan industri, konstruksi, dan lain sebagainya. Penggunaan Aluminium antara lain untuk pembuatan kabel, kerangka kapal terbang, mobil dan berbagai produk peralatan rumah tangga. Senyawanya dapat digunakan sebagai obat, penjernih air, fotografi serta sebagai ramuan cat, bahan pewarna, ampelas dan permata sintesis (Mujjyo, 2014).

Alumunium mempunyai manfaat dan kelebihan terdiri dari ringan, tahan terhadap korosi, kuat, tahan terhadap suhu rendah, mudah diolah, penghantar panas yang baik, non-magnetik, konduktor panas yang baik, mudah di daur ulang, perawatan yang mudah, non-sparking (tidak menimbulkan percikan api ketika material saling digosokkan (Surdia, 1999).

Paduan aluminium dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu aluminium *wrought alloy* (lembaran) dan aluminium *casting alloy* (batang cor). Aluminium (99,99%) memiliki berat jenis sebesar  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , densitas  $2,685 \text{ kg/m}^3$ , dan titik leburnya pada suhu  $660^\circ\text{C}$ , aluminium memiliki strength to weight ratio yang lebih tinggi dari baja. Sifat tahan korosi aluminium diperoleh dari terbentuknya lapisan oksida aluminium dari permukaan aluminium. Lapisan oksida ini melekat kuat dan rapat pada permukaan, serta stabil (tidak bereaksi dengan lingkungan sekitarnya) sehingga melindungi bagian dalam. Unsur- unsur paduan dalam aluminium antara lain:

1. Copper (Cu), menaikkan kekuatan dan kekerasan, namun menurunkan elongasi (pertambahan panjang pangjangan saat ditarik). Kandungan Cu dalam aluminium yang paling optimal adalah antara 4-6%.
2. Zink atau Seng (Zn), menaikkan nilai tensile.
3. Mangan (Mn), menaikkan kekuatan dalam temperature tinggi.
4. Magnesium (Mg), menaikkan kekuatan aluminium dan menurunkan nilai *ductility*-nya. Ketahanan korosi dan *weldability* juga baik.
5. Silikon (Si), menyebabkan paduan aluminium tersebut bisa diperlakukan panas untuk menaikkan kekerasannya.
6. Lithium (Li), ditambahkan untuk memperbaiki sifat tahan oksidasinya.

**Tabel 2. 1** Karakteristik alumunium

Sifat-sifat	Aluminium Murni Tinggi
Struktur Kristal	FCC
Densitas pada $20^{\circ}C$ (Sat. $10^3kg/m^3$ )	2.698
Titik cair ( $^{\circ}C$ )	660.1
Koefisien mulur panas kawat $20^{\circ} \sim 100^{\circ}C$ ( $\frac{10^{-6}}{K}$ )	23.9
Konduktifitas panas $20^{\circ} \sim 400^{\circ}C$ $W/(m.k)$	238
Tahanan listrik $20^{\circ}C$ ( $10^{-8} K\Omega.m$ )	2.69
Modulus elastisitas (Gpa)	70.5
Modulus kekakuan (Gpa)	26.0

### 1. Aluminium dan Paduannya

Berdasarkan metode peleburannya, paduan aluminium dikelompokkan menjadi dua kelompok utama yaitu paduan tempa (*wrought*) dan paduan tuang (*casting*). Jenis paduan aluminium saat ini sangat banyak dan tidak menutup kemungkinan ditemukannya lagi jenis paduan aluminium baru, oleh karena itu dibuat sistem penamaan sesuai dengan komposisi dan karakteristik paduan aluminium tersebut untuk memudahkan pengklasifikasinya. Salah satu penamaan paduan standar AA, seperti pada Tabel 2. 2.

**Tabel 2. 2** Daftar seri paduan aluminium tempa

<b>Paduan Tempa</b>	<b>Penandaan</b>
Aluminium (min.) 99.00%	1XXX
Tembaga	2XXX
Mangan	3XXX
Silikon	4XXX
Magnesium	5XXX
Magnesium dan Silikon	6XXX
Seng	7XXX

Sumber: (*Smallman, R. E. and Bishop, 2000*)

Paduan aluminium tempa, seri 1xxx digunakan untuk aluminium murni, paduan aluminium diidentifikasi dengan sistem empat digit berdasarkan elemen paduan utamanya. Untuk paduan tempa yang mengalami perubahan bentuk, digit pertama mengidentifikasi kelompok paduan dan digit kedua menunjukkan modifikasi paduan asli yang diidentifikasi dengan dua digit terakhir.

Untuk paduan tuang (*casting*) sistem penamaan agak berbeda. Di sini digit pertama mengidentifikasi kelompok, dua digit berikutnya mengidentifikasi paduan dan digit terakhir yang didahului desimal mengacu bentuk produk misalnya, 0 untuk hasil coran dan 1 untuk ingot (*Smallman, R. E. and Bishop, 2000*).

**Tabel 2. 3** Daftar seri paduan aluminium tuang

<b>Paduan Tuang</b>	<b>Penandaan</b>
Aluminium (min.) 99.00%	1XX.X
Tembaga	2XX.X
Silikon, Tembaga dan Magnesium	3XX.X
Silikon	4XX.X
Magnesium	5XX.X
Seng	7XX.X
Timah Putih	8XX.X

Sumber:(*Smallman, R. E. and Bishop, 2000*)

Berdasarkan metode pengerasannya, aluminium dapat dibagi menjadi dua kelompok, *heat treatable alloys* dan *non-heat treatable alloys*. *Heat treatable alloys* adalah paduan aluminium yang dapat diperkeras dengan penuaan (*aging*). Sementara *non-heat treatable alloys* tidak dapat diperkuat dengan penuaan melainkan dengan penguatan larutan-padat (*solid solution strengthening*), pengerasan butir (*strain hardening*), atau pengerasan dispersi (*dispersion strengthening*).

Paduan tempa yang dapat diperkuat lewat perlakuan panas adalah kelas 2xxx, 6xxx, 7xxx, dan beberapa jenis dari kelas 8xxx. (*Hatch, 1984*). Berikut grade seri aluminium berdasarkan sifatnya (*Nurhudaedah, 2019*) :

a. *Grade* aluminium Seri 1xxx

*Grade* dari aluminium ini (1050, 1060, 1100, 1145, 1200, 1230, 1350 dan lain-lain) ditandai dengan ketahanan korosi yang sangat baik, konduktivitas termal dan elektrik yang tinggi, sifat mekanik yang rendah, dan kemampuan kerja yang sangat baik. *Grade* aluminium ini memiliki kandungan Besi dan silikon yang besar.

b. *Grade* aluminium Seri 2xxx

Paduan aluminium ini (2011, 2014, 2017, 2018, 2124, 2219, 2319, 201,0; 203,0; 206,0; 224,0; 242,0 dll) memerlukan *solution heat treatment* untuk mendapatkan sifat yang optimal, didalam kondisi *solution heat treatment* sifat mekanik yang mirip dengan baja karbon rendah dan kadang-kadang melebihi sifat mekanik baja karbon rendah. Dalam beberapa contoh, proses perlakuan panas (aging) digunakan untuk lebih meningkatkan sifat mekanik. Paduan aluminium dalam seri 2xxx tidak memiliki ketahanan korosi yang baik ketimbang kebanyakan paduan aluminium lainnya, dan pada kondisi tertentu paduan ini mungkin akan terjadi korosi pada antar butir. *Grade* aluminium dalam seri 2xxx ini baik untuk bagian yang membutuhkan kekuatan yang bagus yaitu pada suhu sampai 150°C (300°F). Kecuali untuk kelas 2219, paduan aluminium ini sudah memiliki mampu las tapi masih terbatas beberapa paduan dalam seri ini memiliki kemampuan mesin yang baik.

c. *Grade* aluminium Seri3xxx

Paduan aluminium ini (3003, 3004, 3105, 383,0; 385,0; A360; 390,0) umumnya memiliki ketidakmampuan panas tetapi memiliki kekuatan sekitar 20% lebih dari paduan aluminium seri 1xxx karena hanya memiliki presentase mangan yang sedikit (sampai sekitar 1,5%) yang dapat ditambahkan ke aluminium. Mangan digunakan sebagai elemen utama dalam beberapa paduan.

d. *Grade* aluminium Seri 4xxx

Unsur paduan utama dalam paduan seri 4xxx (4032, 4043, 4145, 4643 dll) adalah silikon, yang dapat ditambahkan dalam jumlah yang cukup (hingga 12%) menyebabkan substansial menurunkan rentang lebur. Untuk alasan ini, paduan aluminium-silikon yang digunakan dalam kawat las dan sebagai paduan untuk menyolder digunakan untuk menggabungkan aluminium, di mana titik lebur lebih rendah dari logam dasar yang digunakan.

e. *Grade* aluminium Series 5xxx

Unsur paduan utama *grade* aluminium ini adalah magnesium, bila digunakan sebagai elemen paduan utama atau digabungkan dengan mangan, hasilnya adalah paduan yang memiliki kekerasan sedang hingga kekuatan yang tinggi. Magnesium jauh lebih efektif daripada mangan sebagai penguat sekitar 0,8% Mg sama dengan 1,25% Mn dan dapat ditambahkan dalam jumlah yang jauh lebih tinggi. Paduan

aluminium dalam seri ini (5005, 5052, 5083, 5086, dll) memiliki karakteristik pengelasan yang baik dan ketahanan yang relatif baik terhadap korosi dalam atmosfer laut. Namun, pada pekerjaan dingin harus dilakukan pembatasan dan suhu operasi ( $150^{\circ}$ ) diperbolehkan untuk paduan aluminium yang memiliki magnesium tinggi untuk menghindari kerentanan terhadap korosi retak.

f. *Grade* aluminium Seri 6xxx

Paduan aluminium dalam seri 6xxx (6061 dan 6063) mengandung silikon dan magnesium sekitar dalam proporsi yang diperlukan untuk pembentukan magnesium silisida ( $Mg_2Si$ ), sehingga membuat paduan ini memiliki mampu perlakuan panas yang baik. Meskipun tidak sekuat pada paduan 2xxx dan 7xxx, paduan aluminium seri 6xxx memiliki sifat mampu bentuk yang baik, mampu las, mampu mesin, dan ketahanan korosi yang relatif baik dengan kekuatan sedang.

Untuk paduan aluminium seri 6xxx yang memiliki unsur paduan utama Al-Mg-Si, dalam sistem klasifikasi AA dapat diperoleh paduan Al 6063 dan Al 6061. Paduan dalam sistem ini mempunyai kekuatan kurang sebagai bahan tempaan dibandingkan dengan paduan–paduan lainnya, tetapi sangat liat, sangat baik mampu bentuknya untuk penempaan, ekstrusi dan sebagainya. Paduan 6063 dipergunakan untuk rangka–rangka konstruksi, maka selain dipergunakan untuk rangka konstruksi. Sedangkan paduan aluminium seri 6061 adalah

salah satu jenis material yang banyak penerapannya pada industri maju karena memiliki keunggulan dari berbagai sisi yaitu seperti kemampuan permesinan yang baik, penyelesaian permukaan sempurna, kekuatan yang tinggi dan ringan, serta tahan terhadap korosi.

g. *Grade* aluminium Seri 7xxx

Zinc jumlah dari 1% sampai 8% ) merupakan unsur paduan utama dalam paduan aluminium seri 7xxx (7075, 7050, 7049, 710,0; 711,0 dll) dan ketika digabungkan dengan persentase magnesium yang lebih kecil di dalam perlakuan panas yang cukup maka paduan ini akan memiliki kekuatan yang sangat tinggi. Biasanya unsur-unsur lain, seperti tembaga dan kromium, juga ditambahkan dalam jumlah kecil. paduan seri 7xxx digunakan dalam struktur badan pesawat, peralatan besar yang bergerak dan bagian lainnya memiliki tekanan yang sangat tinggi (*Subagyo dan Nur Imam, 2017*).

## **2. Pengaplikasian Aluminium**

Aluminium adalah logam non-besi yang paling banyak digunakan di seluruh dunia. Produksi global dunia pada tahun 2005 mencapai 31,9 juta ton, melebihi produksi semua logam non-besi lainnya (*Hetherintong, 2007*). Ada beberapa kegunaan umum dari aluminium yaitu sebagai berikut:

- a. Aluminium *alloy* digunakan pada bodi gerbong Kereta Rel Listrik (KRL) Tokyo Metro Seri 6000.



**Gambar 2. 12** KRL tokyo metro seri 6000 (Kaspar, 2020)

- b. Pada kereta api terdapat *Rigid Overhead Conductor*, mempunyai kawat kontak yang ditopang pada sebuah batangan kaku yang disebut “*rigid bar*”, dan bukannya oleh sebuah kawat penggantung. *Rigid bar* ini umumnya terbuat dari *aluminium alloy 6063* dengan tinggi 110 mm dan luas permukaan 2.220 mm persegi.
- c. Aluminium memiliki rasio kekuatan terhadap massa yang paling tinggi, sehingga banyak digunakan sebagai bahan pembuat pesawat dan roket. Aluminium juga dapat menjadi reflektor yang baik; lapisan aluminium murni dapat memantulkan 92% cahaya.
- d. Aluminium murni, saat ini jarang digunakan karena terlalu lunak. Penggunaan aluminium murni yang paling luas adalah aluminium foil (92-99% aluminium).

- e. Paduan aluminium-magnesium umumnya digunakan sebagai bahan pembuat badan kapal. Paduan lainnya akan mudah mengalami korosi ketika berhadapan dengan larutan alkali seperti air laut.
- f. Paduan aluminium-tembaga- lithium digunakan sebagai bahan pembuat tangki bahan bakar pada pesawat ulang-alik milik NASA.
- g. Uang logam juga terbuat dari aluminium yang diperkeras. Hingga saat ini, sulit dicari apa bahan paduan uang pembuat uang logam berwarna putih keperakan ini, kemungkinan dirahasiakan untuk mencegah pemalsuan uang logam.
- h. Velg mobil juga menggunakan bahan aluminium yang dipadu dengan magnesium, silicon, atau keduanya, dan dibuat dengan cara ekstrusi atau dicor.
- i. Beberapa jenis roda gigi menggunakan paduan Al-Cu. Penggunaan paduan Cu untuk mendapatkan tingkat kekerasan yang cukup dan memperpanjang usia benda akibat fatigue.
- j. Sektor pembangunan perumahan; untuk kusen pintu dan jendela.
- k. Sektor industri makanan , untuk kemasan berbagai jenis produk.
- l. Sektor lain, misal untuk kabel listrik, perabotan rumah tangga dan barang kerajinan.
- m. Membuat termit, yaitu campuran serbuk aluminium dengan serbuk besi (III) oksida, digunakan untuk mengelas baja ditempat, misalnya untuk menyambung rel kereta api.

Pembuatan Aluminium Sulfat ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) digunakan untuk

industri kertas dan karton, pewarna pada industri tekstil, dan pemadam kebakaran jenis busa. (bila dicampur dengan  $\text{NaHCO}_3$  dan zat pengemulsi).

### **2.3. PENGUJIAN MEKANIK (MECHANICAL TESTING)**

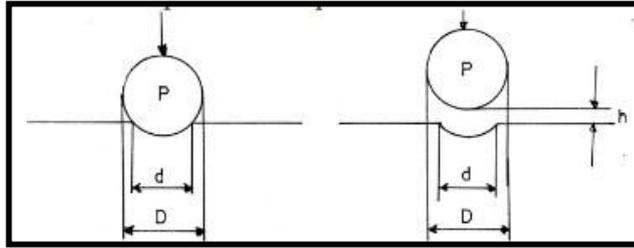
#### **1. Pengujian Kekerasan atau *Hardness Test***

Pengujian kekerasan adalah jenis pengujian mekanik yang penting untuk logam *ferrous* dan *non ferrous*. Tujuan pengujian kekerasan adalah untuk mengetahui ketahanan dari deformasi plastis, bila diberikan beban/gaya dari luar. Prinsip pengujian kekerasan terhadap spesimen uji yang permukaannya telah dipreparasi dilakukan penekanan dengan identor. Beban yang digunakan untuk setiap jenis logam adalah berbeda, tergantung terhadap metode pengujian dan pengukuran yang digunakan.

Ada tiga metode pengujian yang paling sering digunakan untuk logam yaitu, Metode *Brinell*, Metode *Vickers* dan Metode *Rockwel*.

##### **a. Metode *Brinell***

Pengujian dengan metode ini dilakukan dengan identor yang berbentuk bola dengan beban dan waktu tertentu, seperti terlihat pada Gambar 2. 13. Harga kekerasan diperoleh dari persamaan berikut ini:



**Gambar 2. 13** Geometri identor brinell (*Standart ASTM D 790-20*)

$$H = \frac{2P}{\pi D(-\sqrt{D^2-d^2})} = \frac{P}{D.h} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan :

P = Beban bola penekanan yang diberikan (Kgf),

D = Diameter bola penekanan (mm),

d = Diameter jejak (mm).

Pemilihan diameter bola dan besar beban tergantung pada jenis logam serta ketebalannya. Perubahan identor akan diikuti dengan perubahan beban akan didapatkan Hb yang sama.

$$\frac{P_1}{D_1^2} = \frac{P_2}{D_2^2} = \frac{P_3}{D_3^2} \dots\dots\dots (2)$$

Jika D terlalu besar dan P terlalu kecil, maka bekas lekukan akan terlalu kecil sehingga sukar diukur dan akan memberi informasi yang keliru. Jika D terlalu kecil dan P terlalu besar dapat berakibat amblasnya bola, sehingga memberikan harga kekerasan yang keliru. Beberapa parameter penting yang mempengaruhi harga kekerasan *Brinell* :

- Kekerasan permukaan.

- Posisi spesimen saat pengujian.
- Kebersihan permukaan spesimen.

**b. Metode *Vickers***

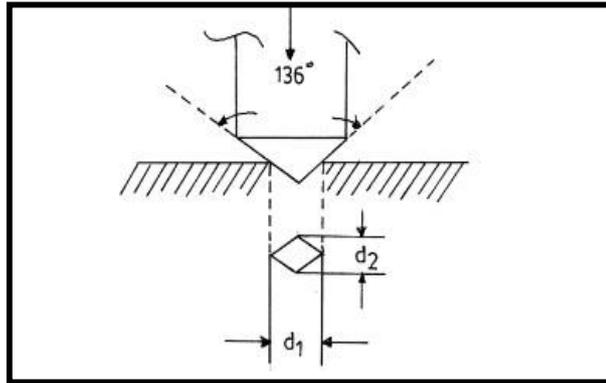
Pengujian dengan metode ini prosesnya sama dengan metode *Brinell* yang berbeda hanya pada bentuk indentor yaitu berbentuk piramida bujur sangkar dengan sudut puncak 136 terbuat dari intan, seperti terlihat pada Gambar 2. 14. Harga kekerasan *Vickers* diperoleh dengan rumus:

$$H_v = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{L^2} = \frac{1,854 \cdot P}{L^2} \dots\dots\dots (3)$$

Dengan :

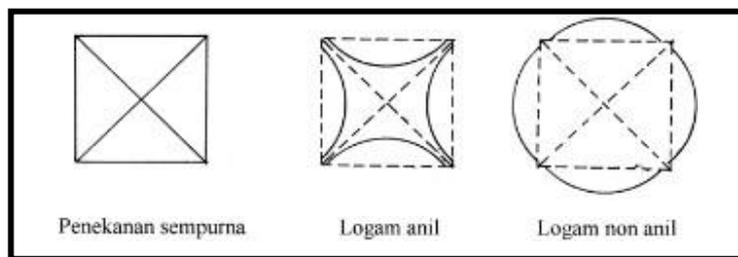
- P = Beban yang diberikan (kg),
- L = Diagonal rata-rata (mm) = (d<sub>1</sub> + d<sub>2</sub>)/2,
- O = Sudut puncak 136 .

Uji kekerasan *Vickers* mempunyai kelebihan dalam jangkauan pemeriksaan yang luas dengan pemakaiannya beban tunggal (HV5–HV1500). Beban yang dipakai biasanya antara 1 (satu)–120 kg.



**Gambar 2. 14** Geometri indenter *vickers* (*Standart ASTM D 790-20*)

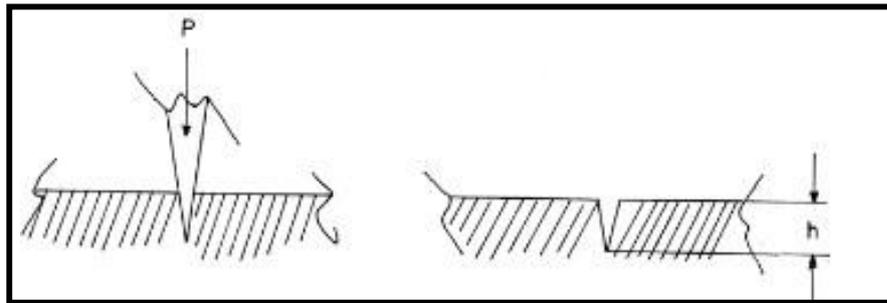
Hasil penekanan akan berbentuk bujur sangkar dengan diagonal yang akan diukur dengan mikroskop, seperti dalam Gambar 2. 15.



**Gambar 2. 15** Jejak hasil penekanan indenter (*Standart ASTM D 790-20*)

**c. Metode *Rockwell***

Pada metode ini digunakan indenter intan yang berbentuk kerucut, seperti terlihat pada Gambar 2.16. Kerucut akan menekan permukaan logam sedalam “h” dari permukaan. Jarak “h” menentukan kekerasan dari logam uji.



**Gambar 2. 16** Indentor *rockwell* (Standart ASTM D 790-20)

Harga kekerasan diperoleh dari pembacaan langsung pada skala alat pengujian *Rockwell* antara lain:

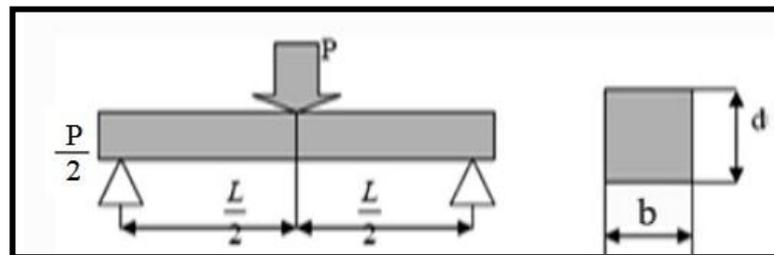
- Metode *Rockwell C* (HRC), menggunakan indentor kerucut intan sudut 120 dengan diameter ujung 0,2 mm. Beban yang dipakai 150 kg dengan *pre-load* 10 kg. Pengujian untuk *steel* dan *hardened steel* dengan  $h > (0,6-0,7)$  mm.
- Metode *Rockwell A* (HRA), Menggunakan indentor sama dengan *Rockwell C* dan beban yang sama pula 150 kg. pengujian untuk material  $h < (0,4-6)$ mm.
- Metode *Rockwell B* (HRB), Menggunakan indentor baja bentuk bola dengan diameter 1116" dan beban 100 kg dipakai untuk material *unhardened steel* dan *non ferrous*. (Standart ASTM E-18)

Pada penelitian ini pengujian kekerasan yang digunakan adalah uji kekerasan *rockwell* karena ukuran spesimen yang kecil/mikro.

## 2. Uji bending (tekuk)

Material komposit mempunyai sifat tekan lebih baik dibanding tarik, pada perlakuan uji bending spesimen, bagian atas spesimen terjadi

proses tekan dan bagian bawah terjadi prosestarik sehingga kegagalan yang terjadi akibat uji bending yaitu mengalami patah bagian bawah karena tidak mampu menahan tegangan tarik. Dimensi balok dapat kita lihat pada gambar 2.17 berikut ini : (Standart ASTM D 790-02 )



**Gambar 2. 17** Penampang uji bending (*Standart ASTM D 790-20*)

Momen yang terjadi pada komposit dapat dihitung dengan persamaan :

$$M = \frac{P}{2} \cdot \frac{L}{2} \dots\dots\dots (4)$$

Menentukan kekuatan bending menggunakan :

$$\sigma_b = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \dots\dots\dots (5)$$

Sedangkan untuk menentukan modulus elastisitas bending menggunakan rumus sebagai berikut :

$$E_B = \frac{L^2 \cdot P}{4 \cdot b \cdot d \cdot d^2 \cdot \delta} \dots\dots\dots (6)$$

Dimana :

- $\sigma_b$  = Kekuatan bending (MPa)
- P = Beban yang diberikan (N)
- L = Jarak antara titik tumpuan (mm)
- b = Lebar Spesimen (mm)

$d$  = Tebal spesimen (mm)

$\delta$  = Defleksi (mm)

$E_B$  = Modulus elastisitas (MPa)

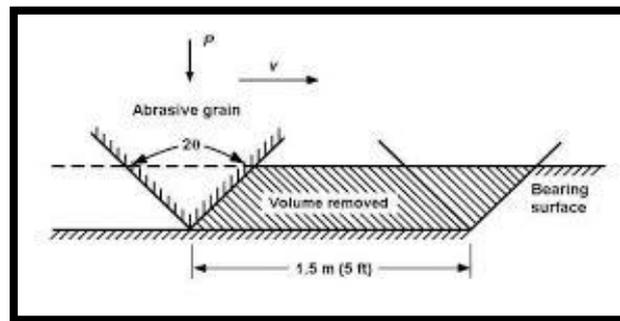
### 3. Pengujian Keausan

Keausan merupakan hilangnya bahan dari suatu permukaan atau perpindahan bahan dari permukaannya ke bagian yang lain atau Bergeraknya bahan pada suatu permukaan. Keausan yang terjadi pada suatu material disebabkan oleh adanya beberapa mekanisme yang berbeda dan terbentuk oleh beberapa parameter yang bervariasi meliputi, bahan, lingkungan, kondisi operasi, dan geometri permukaan yang terjadi keausan.

Mekanisme keausan menurut Koji Kato, dikelompokkan menjadi tiga macam, yaitu keausan yang disebabkan perilaku mekanis (*mechanical*), keausan yang disebabkan perilaku kimia (*chemical*), dan keausan yang disebabkan perilaku panas (*thermal wear*). Keausan yang disebabkan perilaku mekanis digolongkan lagi menjadi *abrasive*, *adhesive*, *flow* dan *fatigue wear*.

Penelitian ini difokuskan masalah pada keausan abrasif, dengan metode pengujian yang digunakan mengikuti metode yang diajukan oleh (Bataev, A. A. dan Tushinskii, 1996) yaitu interaksi antara material padat (block) sebagai benda uji yang digesekkan pada disk berputar yang dilapisi kertas abrasif. Keausan Abrasif (*Abrasive Wear*) terjadi bila suatu partikel keras (*asperity*) dari material tertentu meluncur pada permukaan

material lain yang lebih lunak sehingga terjadi penetrasi atau pemotongan material yang lebih lunak, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.18 di bawah ini.



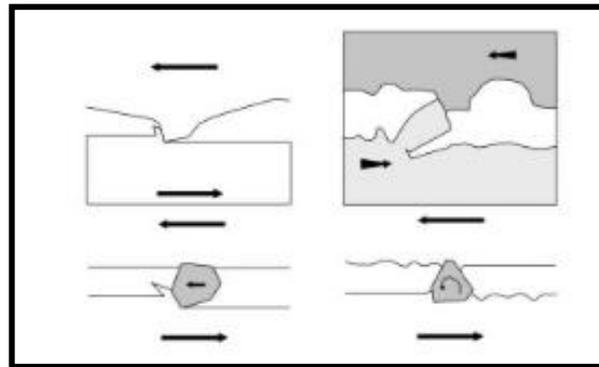
**Gambar 2. 18** Ilustrasi Skematis Keausan Abrasif (*Standart ASTM D 790-20*)

Tingkat keausan pada mekanisme ini ditentukan oleh derajat kebebasan (*degree of freedom*) partikel keras atau *asperity* tersebut. Sebagai contoh partikel pasir silika akan menghasilkan keausan yang lebih tinggi ketika diikat pada suatu permukaan seperti pada kertas amplas, dibandingkan bila partikel tersebut berada di dalam sistem slury. Pada kasus pertama, partikel tersebut kemungkinan akan tertarik sepanjang permukaan dan akhirnya mengakibatkan pengoyakan. Sementara pada kasus terakhir, partikel tersebut mungkin hanya berputar (*rolling*) tanpa efek abrasi. Faktor yang berperan dalam kaitannya dengan ketahanan material terhadap *abrasive wear* antara lain:

- a. Kekerasan material
- b. Kondisi struktur mikro
- c. Ukuran abrasif
- d. Bentuk abrasif

Bentuk kerusakan permukaan akibat abrasive wear, antara lain :

- a. *Scratching*
- b. *Scoring*
- c. *Gouging*



**Gambar 2. 19** Keausan Metode Abrasive (*Standart ASTM D 790-20*)

Pengujian keausan dapat dilakukan dengan berbagai macam metode dan teknik, yang semuanya bertujuan untuk mensimulasikan kondisi keausan aktual. Laju keausan pada pengujian ini dinyatakan sebagai berkurangnya massa atau volume benda uji setelah mengalami penggesekan (penggerusan akibat kontak antara disk yang berputar dan benda uji) tiap satuan waktu, yang dinyatakan dengan :

$$W = \frac{w}{s} \text{ (mg/detik)} \dots\dots\dots (7)$$

dengan:

W = laju keausan (mg/detik)

w = berat material yang hilang (mg)

s = waktu total pengujian (detik)

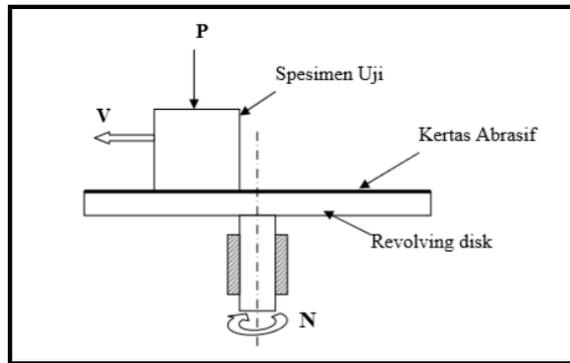
Sedangkan intensitas keausan dinyatakan dengan (Safonov, A. N. dan Aleksenko, 1998) :

$$I = \frac{h_1}{L} \text{ (mg/meter)} \dots\dots\dots (8)$$

dengan :

$h_1$  = keausan linier yang ditentukan dari perubahan massa spesimen setelah pengujian keausan (mg)

$L$  = jalur lintasan gesek (meter)

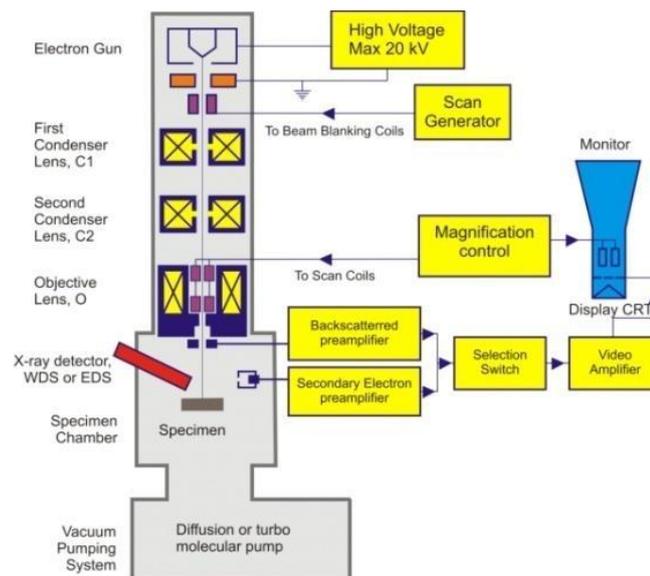


**Gambar 2. 20** Mekanisme alat uji keausan *abrasif* (Kandeva et al., 2011)

#### 4. Pengujian SEM

Analisa mikro adalah suatu analisa mengenai struktur logam melalui pembesaran dengan menggunakan mikroskop khusus *metallography*. Dengan ana lisa mikro struktur, kita dapat mengamati bentuk dan ukuran kristal logam, kerusakan logam akibat proses deformasi, proses perlakuan panas, dan perbe- daan komposisi. Sifat-sifat logam terutama sifat mekanis dan sifat teknologis sangat mempengaruhi dari mikro struktur logam dan paduannya. Struktur mikro dari logam dapat diubah dengan jalan perlakuan panas ataupun dengan proses perubahan bentuk

(deformasi) dari logam yang akan diuji. Pengamatan *metallography* dengan mikroskop optik dapat dibagi dua, yaitu *metallography* makro yaitu pengamatan struktur dengan perbesaran 10-100 kali dan *metallography* mikro yaitu pengamatan struktur dengan perbesaran diatas 100 kali. (Sujatno et al., 2017)



**Gambar 2. 21** Blok diagram SEM (Sujatno et al., 2017)

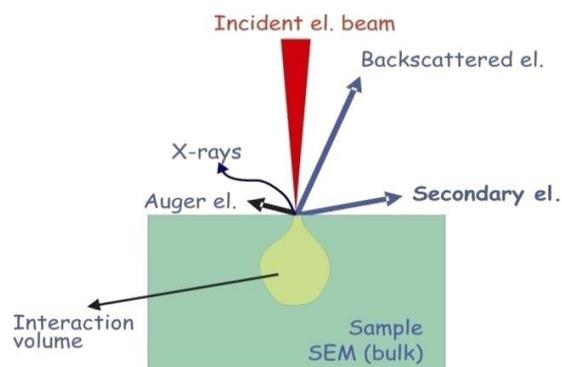
Dalam Gambar 2.21 adalah skema diagram standar SEM JSM-6510LA dari fabrik JEOL yang digunakan dalam penelitian ini dengan fasilitas analisis komposisi kimia berupa detektor sinar X. Komponen utama alat SEM ini pertama adalah tiga pasang lensa elektromagnetik yang berfungsi memfokuskan berkas elektron menjadi sebuah titik kecil, lalu oleh dua pasang scan coil discan-kan dengan frekuensi variabel pada permukaan sampel. Semakin kecil berkas difokuskan semakin besar resolusi lateral yang dicapai. Kesalahan fisika pada lensa-lensa

elektromagnetik berupa astigmatismus dikoreksi oleh perangkat stigmator. Kedua adalah sumber elektron, biasanya berupa filamen dari bahan kawat tungsten atau berupa jarum dari paduan Lantanum Hexaboride LaB<sub>6</sub> atau Cerium Hexaboride CeB<sub>6</sub>, yang dapat menyediakan berkas elektron yang teoretis memiliki energi tunggal (monokromatik), Ketiga adalah imaging detector, yang berfungsi mengubah sinyal elektron menjadi gambar/image. Sesuai dengan jenis elektronnya, terdapat dua jenis detektor dalam SEM ini, yaitu detektor SE dan detektor BSE.

Untuk menghindari gangguan dari molekul udara terhadap berkas elektron, seluruh jalur elektron (column) divakum hingga 10<sup>-6</sup> torr. Tetapi kevakuman yang tinggi menyebabkan naiknya sensitifitas pendeteksian alat terhadap non-konduktifitas, yang menyulitkan analisis pada bahan non-konduktif, seperti keramik dan oksida. Untuk mengatasi hal tersebut SEM ini memiliki opsi untuk dapat dioperasikan dengan vakum rendah, yang disebut LowVaccum Mode. Dengan teknik low vaccum kita dapat menganalisis bahan yang non konduktif sekalipun. Tekanan pada mode ini berkisar antara 30 hingga 70Pa (*Sujatno et al., 2017*).

Interaksi bahan dan elektron Ketika berkas elektron discan pada permukaan sampel, terjadi interaksi elektron dengan atom-atom di permukaan maupun di bawah permukaan sampel. Seperti terlihat pada Gambar 2.22, akibat interaksi tersebut sebagian besar berkas elektron berhasil keluar kembali, elektron-elektron tersebut disebut sebagai

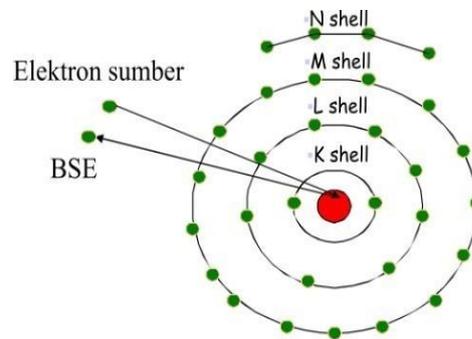
Backscattered Electrons (BSE), sebagian kecil elektron masuk ke dalam bahan kemudian memindahkan sebagian besar energi pada elektron atom sehingga terpental ke luar permukaan bahan, yaitu Secondary Electrons (SE). Pembentukan elektron-elektron sekunder selalu diikuti proses munculnya X-ray yang karakteristik untuk setiap elemen, sehingga dapat digunakan untuk mengukur kandungan elemen yang ada di dalam bahan yang diteliti.



**Gambar 2. 22** Skema interaksi antara bahan dan elektron di dalam SEM (Sujatno et al., 2017)

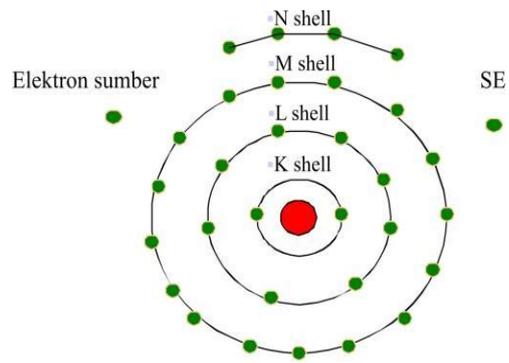
Proses pembentukan BSE terjadi pada atom-atom di bagian permukaan sampel yang lebih dalam. Ini disebabkan tumbukan antara elektron dari sumber dengan inti atom, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.23. Karena massa proton yang membentuk inti hingga 2000 kali lebih besar dari elektron, maka setiap tumbukan akan menyebabkan terpentalnya sebagian besar elektron ke arah 180. Artinya, sebagian akan dipantulkan kembali ke arah di mana mereka datang yaitu ke luar permukaan bahan. Elektron-elektron BSE ini membawa informasi tentang atom-atom yang ditumbuknya beserta ikatannya dalam fasa. Sehingga kontras pada image

yang terbentuk dari elektron-elektron BSE dalam batas-batas tertentu dapat dipandang sebagai kontras fasa.



**Gambar 2. 23** Proses terbentuknya BSE (Sujatno et al., 2017).

Jika elektron sumber dalam perjalanannya di dalam bahan hanya melewati awan elektron atau orbital sebuah atom maka elektron tersebut dapat saja memindahkan sebagian energi kinetiknya kepada satu atau lebih elektron pada orbit tersebut. Elektron itu akan menjadi tidak stabil dan dalam kondisi tereksitasi sehingga meninggalkan posisinya dan keluar dari permukaan bahan, maka elektron tersebut dikenal sebagai secondary electron (SE) atau elektron sekunder, Gambar 2.24. Karena elektron-elektron SE memiliki energi yang rendah, maka hanya elektron-elektron yang berada atau sangat dekat permukaan bahan saja yang dapat lolos ke luar. Dengan bantuan detektor khusus elektron SE dapat dimanfaatkan untuk membentuk image morfologi permukaan bahan dengan baik. Struktur permukaan berikut ciri-cirinya, seperti batas butir, edge, porositas, puncak atau lembah akan terlihat lebih detail dengan resolusi yang lebih tinggi dibanding BSE.



**Gambar 2. 24** Proses pembentukan SE dan X-ray (Sujatno *et al.*, 2017)