

SKRIPSI

**PENGARUH PUTARAN *SPINDLE* TERHADAP LAPISAN  
ALUMINUM CNT DENGAN  
*FRICTION SURFACING PROCESS* MENGGUNAKAN MESIN  
*DRILLING-MILLING* TIPE LC-40 A**

**OLEH:**

**MUH. ALGIFARY HASKA**

**D021171011**



**DEPARTEMEN MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2022**

SKRIPSI

**PENGARUH PUTARAN *SPINDLE* TERHADAP LAPISAN  
ALUMINUM CNT DENGAN  
*FRICTION SURFACING PROCESS* MENGGUNAKAN MESIN  
*DRILLING-MILLING* TIPE LC-40 A**

Oleh:

**MUH. ALGIFARY HASKA**

**D021171011**

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

**DEPARTEMEN MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2022**

## LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan mengikuti ujian akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Pada tanggal 27 September 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

### JUDUL:

**PENGARUH PUTARAN *SPINDLE* TERHADAP LAPISAN ALUMINIUM CNT DENGAN *FRICTION SURFACING PROCESS* MENGGUNAKAN MESIN DRILLING-MILLING TIPE LC-40A**

**MUH ALGIFARY HASKA**

**D021171011**

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT

NIP. 19740415 199903 1 001

Dr. Hairul Arsyad, ST., MT

NIP. 19750322 200212 1 001

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin



Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT

NIP. 19720825 200003 1 001

## LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda -tangan di bawah ini:

NAMA : MUH ALGIFARY HASKA  
NIM : D021 17 1011  
JUDUL SKRIPSI :PENGARUH PUTARAN *SPINDLE* TERHADAP LAPISAN ALUMINUM CNT DENGAN *FRICTION SURFACING PROCESS* MENGGUNAKAN MESIN *DRILLING-MILLING* TIPE LC-40 A

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi ini merupakan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli saya sendiri. Saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan-bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijazah pada Universitas Hasanuddin atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Hasanuddin.

Demikian pernyataan ini saya buat.

Makassar, 27 September 2022

Yang membuat pernyataan,



Muh. Algifary Haska

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, atas berkah dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akbir ini dengan judul **“PENGARUH PUTARAN *SPINDLE* TERHADAP LAPISAN ALUMINUM CNT DENGAN *FRICTION SURFACING PROCESS* MENGGUNAKAN MESIN *DRILLING-MILLING* TIPE LC-40A”** yang terselesaikan dengan baik dan lancar, yang mana merupakan salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) bagi mahasiswa program S1 di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Tak lupa pula penulis haturkan shalawat serta salam atas junjungan Nabi Muhammad SAW beserta para sahabatnya yang telah menghantarkan kita dari zaman jahiliyah menuju zaman terang benderang yang masih kita rasakan hingga saat ini.

Selama proses pengerjaan skripsi ini, penulis menerima begitu banyak bantuan, saran, hingga motivasi dari berbagai pihak mulai dari awal hingga akhir. Untuk itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua saya tercinta Ayahanda Hasnawi dan Ibunda Kartini juga kepada saudara Muh. Adwi Haska yang selalu memberikan doa yang tak henti-hentinya kepada penulis, nasihat, semangat hingga motivasi selama penulis menyelesaikan skripsi hingga akhir.
2. Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammar Isran Ramli, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Dr. Ir. Eng. Jalaluddin, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, S.T., M.T. selaku pembimbing pertama dan Dr. Hairul Arysad, S.T., M.T. selaku pembimbing kedua atas segala arahan, masukan, dan bimbingan yang luar biasa selama penyusunan tugas akhir.
5. Prof. Dr. Ir. Ilyas Renreng, M.T. dan Azwar Hayat, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku penguji atas segala masukan dan arahan selama penyusunan tugas akhir ini.

6. Bapak Edi Iskandar, S.T. sebagai Laboran di Laboratorium Metalurgi Fisik yang membantu penulis memberikan arahan dan bantuan selama di Laboratorium.
7. Seluruh Bapak/Ibu Dosen Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan banyak ilmu kepada penulis selama mengenyam pendidikan di kampus.
8. Seluruh Staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah membantu segala urusan administrasi.
9. Teman-teman Teknik Mesin 2017 (ZYNCROMEZH'17) yang telah memberi bantuan dan semangat dalam menyelesaikan tugas akhir penulis.
10. Teman-teman seperjuangan Laboratorium Metalurgi Fisik yang telah banyak membantu dan mendukung dalam penelitian ini.
11. Teman-teman dari Tim *Friction Surfacing* yaitu Indra Arvito Arman dan Zulfadli yang telah banyak membantu memberikan bantuan dan motivasi kepada penulis.
12. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Dalam penulisan skripsi ini tentunya penulis menyadari bahwa masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya apabila terdapat kesalahan dalam penulisan skripsi ini, penulis memohon saran dan kritik yang membangun demi penyempurnaan skripsi ini.

Makassar, Juni 2022

Penulis

## ABSTRAK

Muh. Algifary Haska (D021171011). Pengaruh Putaran *Spindle* Terhadap Lapisan Aluminium CNT dengan *Friction Surfacing Process* Menggunakan Mesin *Drilling-Milling Tipe LC-40 A* (Dibimbing oleh Lukmanul Hakim Arma dan Hairul Arsyad). Teknologi rekayasa permukaan telah memungkinkan untuk menggabungkan jenis aluminium berbeda dengan cara pelapisan. Dengan sifat tahan korosi dan mampu bentuk yang baik, Al 6061 biasa dipilih sebagai bahan pelapis untuk menutupi jenis aluminium lainnya. Penelitian ini bertujuan mendapatkan pengaruh putaran *spindle* terhadap kualitas lapisan *friction surfacing*. Kualitas lapisan ditandai dengan meningkatnya kekuatan *bending* dan nilai kekerasan lapisan pada *substrate*. Lapisan hasil *friction surfacing* dibentuk di atas permukaan *substrate* aluminium (Al2021) menggunakan *rod* dari material Al6061+1.5%CNT. *Rod* berdiameter 12 mm berputar dengan variasi putaran *spindle* 1400 rpm, 2300 rpm, dan 3400 rpm pada *substrate* dengan kekasaran permukaan 2,21  $\mu\text{m}$  yang bergerak dengan *travel speed* 9 cm/menit, dan *axial force* 2 kg. *Substrate* yang telah terlapis diuji dengan kekerasan *vickers* dan uji *three-point bending*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin rendah kecepatan putaran *spindle* maka nilai kekuatan *bending* akan meningkat. Nilai kekuatan *bending* untuk Al 2021 tanpa lapisan adalah 291,24 MPa, sementara nilai kekuatan *bending* hasil proses *friction surfacing* putaran *spindle* 3400 rpm adalah 338,44 MPa, 2300 rpm adalah 353,76 MPa, dan 1400 rpm adalah 382,55. Sementara untuk nilai kekerasannya, semakin cepat putaran *spindle* maka nilai kekerasannya juga akan meningkat. Nilai kekerasan untuk *rod* adalah 44,8 HV, sementara nilai kekerasan lapisan hasil proses *friction surfacing* putaran *spindle* 1400 rpm adalah 42,96 HV, 2300 rpm adalah 44,44 HV dan 3400 rpm adalah 46,26 HV. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa adanya perbedaan pada daerah *interface* hasil proses *friction surfacing* dari setiap variasi putaran *spindle*. Pada variasi putaran *spindle* 3400 rpm daerah *interface* dapat terlihat dengan jelas sedangkan pada variasi 1400 dan 2300 rpm daerah *interface* tidak terlihat dengan jelas.

Kata Kunci: CNT, Aluminium 6061, Variasi Putaran *Spindle*, *Friction Surfacing Process*.

## ABSTRACT

Muh. Algifary Haska (D021171011). The Effect of Spindle Rotation on CNT Aluminium Layer with Friction Surfacing Process Using Drilling-Milling Machine Type LC-40 A (Supervised by Lukmanul Hakim Arma and Hairul Arsyad). Surface engineering technology has made it possible to join different aluminium types by means of coatings. With good corrosion resistance and formability, Al 6061 is commonly chosen as a coating material to cover other types of aluminium. This study aims to obtain the effect of spindle rotation on the quality of the friction surfacing layer. The quality of the coating is characterized by an increase in the bending strength and hardness of the coating on the substrate. The friction surfacing layer is formed on the surface of the aluminium substrate (Al2021) using a rod made of Al6061+1.5%CNT material. The 12 mm diameter rod rotates with variations in spindle rotation of 1400 rpm, 2300 rpm, and 3400 rpm on a substrate with a surface roughness of 2.21  $\mu\text{m}$  which moves with a travel speed of 9 cm/min, and an axial force of 2 kg. The coated substrate was tested with Vickers hardness and three-point bending test.

The results showed that the lower the spindle rotation speed, the higher the bending strength value. The value of bending strength for Al 2021 without coating is 291.24 MPa, while the value of bending strength resulting from the friction surfacing process of spindle rotation at 3400 rpm is 338.44 MPa, 2300 rpm is 353.76 MPa, and 1400 rpm is 382.55. Meanwhile, for the hardness value, the faster the spindle rotation, the hardness value will also increase. The hardness value for the rod is 44.8 HV, while the hardness value of the friction surfacing process of spindle rotation at 1400 rpm is 42.96 HV, 2300 rpm is 44.44 HV and 3400 rpm is 46.26 HV. The results of microstructure observations show that there are differences in the interface area resulting from the surface friction process from each variation of spindle rotation. At the spindle rotation variation of 3400 rpm the interface area can be seen clearly while at the variation of 1400 and 2300 rpm the interface area is not clearly visible.

Keywords: CNT, Aluminium 6061, Spindle Rotation Variation, Friction Surfacing Process.



## DAFTAR ISI

SAMPUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	6
2.1 Aluminium .....	6
2.1.1 Aluminium dan Paduannya .....	6
2.1.2 Pengaplikasian Aluminium .....	10
2.2 <i>Carbon Nanotube</i> (CNT) .....	12
2.2.1 Struktur <i>Carbon Nanotube</i> (CNT) .....	12
2.2.2 Jenis <i>Carbon Nanotube</i> (CNT) .....	13

2.2.3 Metode Pencampuran CNT ( <i>Carbon Nanotube</i> ).....	16
2.2.4 Sifat-Sifat <i>Carbon Nanotubes</i> .....	17
2.3 Proses Friction Surfacing (Fs).....	19
2.3.1 Prinsip Kerja <i>Friction Surfacing</i> (FS) .....	19
2.3.2 Parameter pada Friction surfacing .....	20
2.4 Proses Pengecoran .....	22
2.4.1 Cetakan Logam dan Cetakan Pasir .....	22
2.4.2 Kekerasan Produk Cor Aluminium.....	23
2.5 Uji Mekanik ( <i>Mechanical Test</i> ) .....	24
2.5.1 Pengujian Kekerasan atau <i>Hardness Test</i> .....	24
2.5.2 Uji <i>Bending</i> (Tekuk) .....	27
2.6 Pengamatan Struktur Mikro .....	28
BAB III METODE PENELITIAN.....	30
3.1 Waktu dan Tempat .....	30
3.2 Alat dan Bahan .....	30
3.2.1 Alat Penelitian.....	30
3.2.2 Bahan Penelitian .....	35
3.3 Prosedur Penelitian.....	37
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	43
BAB IV PEMBAHASAN.....	44
4.1 Data Hasil Penelitian .....	44
4.2 Pengukuran Tebal dan Lebar Lapisan .....	44
4.3 Distribusi Thermal pada Proses Friction Surfacing.....	48
4.4 Pengujian Kekuatan <i>Bending</i> /Tekuk dan Kekerasan .....	52
4.5 Struktur Mikro Aluminium6061+CNT .....	57

4.6 Variasi Putaran <i>Spindle</i> yang Menghasilkan Lapisan Kualitas Terbaik dari Hasil Proses <i>Frcition Surfacing</i> .....	60
BAB V PENUTUP.....	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	62
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> KRL Tokyo Metro seri 6000 .....	11
<b>Gambar 2.2</b> Struktur <i>carbon nanotubes</i> dalam bentuk 3 dimensi .....	13
<b>Gambar 2.3</b> Beberapa bentuk struktur SWNT (a) Struktur <i>armchair</i> .....	14
<b>Gambar 2.4</b> Struktur SWNT secara vektor (J. P. McKelvey, 1986) .....	14
<b>Gambar 2.5</b> Struktur MWNT .....	15
<b>Gambar 2.6</b> MWNT yang terpisah 0.34 nm .....	15
<b>Gambar 2.7</b> Bentuk <i>cone shaped end caps</i> yang simetris dan tidak simetris.....	16
<b>Gambar 2.8</b> (a) <i>High energy ball milling</i> (b) <i>Low energy ball milling</i> .....	17
<b>Gambar 2.9</b> Perbandingan sifat mekanik dari <i>carbon</i> dan grafit fiber .....	19
<b>Gambar 2.10</b> Proses <i>friction surfacing</i> .....	20
<b>Gambar 2.11</b> Foto mikro lapisan hasil <i>friction surfacing</i> .....	21
<b>Gambar 2.12</b> (a) Hasil coran cetakan pasir (b) Hasil coran cetakan logam .....	22
<b>Gambar 2.13</b> Grafik hasil pengujian kekerasan coran aluminium menggunakan cetakan logam dengan menggunakan metode <i>brinell</i> .....	23
<b>Gambar 2.14</b> Grafik hasil pengujian kekerasan coran aluminium menggunakan cetakan pasir dengan menggunakan metode <i>brinell</i> .....	24
<b>Gambar 2.15</b> Geometri indentor <i>brinell</i> .....	25
<b>Gambar 2.16</b> Geometri indentor <i>vickers</i> .....	26
<b>Gambar 2.17</b> Jejak hasil penekanan indentor .....	27
<b>Gambar 2.18</b> Indentor <i>rockwell</i> .....	27
<b>Gambar 2.19</b> Penampang uji <i>bending</i> (Standar ASTM D 790-20) .....	28
<b>Gambar 3. 1</b> Mesin <i>Drilling Milling</i> .....	30
<b>Gambar 3.2</b> Cetakan Logam.....	30
<b>Gambar 3.3</b> Pengaduk dan dapur peleburan.....	31
<b>Gambar 3.4</b> <i>Stopwatch</i> .....	31
<b>Gambar 3.5</b> <i>Tachometer</i> .....	32
<b>Gambar 3.6</b> <i>Thermogun</i> .....	32
<b>Gambar 3.7</b> Timbangan elektronik.....	32

<b>Gambar 3.8</b> Sarung tangan .....	33
<b>Gambar 3.9</b> Gergaji tangan.....	33
<b>Gambar 3.10</b> Alat uji kekerasan .....	33
<b>Gambar 3.11</b> <i>Universal testing machine, autograph 5 kN, Shimadzu</i> .....	34
<b>Gambar 3.12</b> Mikroskop optik LEXT OLYMPUS-OLS4100 .....	34
<b>Gambar 3.13</b> <i>Thermal image camera</i> .....	34
<b>Gambar 3.14</b> Alat pembebanan .....	35
<b>Gambar 3.15</b> Aluminium 6061 .....	35
<b>Gambar 3.16</b> <i>Carbon nanotube</i> .....	35
<b>Gambar 3.17</b> Plat aluminium 2025.....	36
<b>Gambar 3.18</b> Kertas Amplas .....	36
<b>Gambar 3.19</b> Gas argon.....	37
<b>Gambar 3.20</b> Tabung Gas LPG .....	37
<b>Gambar 3.21</b> Plat Aluminium.....	39
<b>Gambar 3.22</b> Spesimen Uji <i>Bending</i> .....	40
<b>Gambar 3.23</b> Pengujian Kekerasan <i>Vickers</i> .....	41
<b>Gambar 3.24</b> Pengujian Foto Mikro Permukaan .....	41
<b>Gambar 3.25</b> Pengujian <i>Bending</i> .....	42
<b>Gambar 3.26</b> <i>Flow chart</i> penelitian.....	43
<b>Gambar 4.1</b> Proses <i>friction surfacing</i> .....	44
<b>Gambar 4.2</b> Lapisan hasil <i>friction surfacing</i> (a) Variasi putaran <i>spindle</i> 1400 rpm (b) Variasi putaran <i>spindle</i> 2300 rpm (c) Variasi putaran <i>spindle</i> 3400 rpm.....	45
<b>Gambar 4.3</b> Perbandingan antara ketebalan minimum dan maksimum hasil <i>friction surfacing</i> terhadap variasi putaran <i>spindle</i> dengan diameter rod 12 mm.....	46
<b>Gambar 4.4</b> Perbandingan lebar minimum dan maksimum lapisan terhadap variasi putaran <i>spindle</i> pada hasil <i>friction surfacing</i> dengan diameter rod 12 mm. ....	47
<b>Gambar 4.5</b> Bentuk <i>rod</i> yang terdapat <i>flash</i> .....	48
<b>Gambar 4.6</b> Distribusi panas pada putaran <i>spindle</i> 1400 rpm (a) Posisi sebelum dilakukan <i>friction surfacing</i> (b) Distribusi panas sebelum penghantaran meja, (c) Distribusi panas setelah 15 detik penghantaran meja, (d) Distribusi panas setelah 30 detik penghantaran meja, (e) Distribusi panas setelah 45 detik penghantaran meja,	

(f) Distribusi panas setelah 60 detik penghantaran meja, (g) Lapisan hasil <i>friction surfacing</i> .....	49
<b>Gambar 4.7</b> Distribusi panas pada putaran <i>spindle</i> 2300 rpm (a) Posisi sebelum dilakukan <i>friction surfacing</i> (b) Distribusi panas sebelum penghantaran meja, (c) Distribusi panas setelah 15 detik penghantaran meja, (d) Distribusi panas setelah 30 detik penghantaran meja, (e) Distribusi panas setelah 45 detik penghantaran meja, (f) Distribusi panas setelah 60 detik penghantaran meja, (g) Lapisan hasil <i>friction surfacing</i> .....	50
<b>Gambar 4.8</b> Distribusi panas pada putaran <i>spindle</i> 3400 rpm (a) Posisi sebelum dilakukan <i>friction surfacing</i> (b) Distribusi panas sebelum penghantaran meja, (c) Distribusi panas setelah 15 detik penghantaran meja, (d) Distribusi panas setelah 30 detik penghantaran meja, (e) Distribusi panas setelah 45 detik penghantaran meja, (f) Distribusi panas setelah 60 detik penghantaran meja, (g) Lapisan hasil <i>friction surfacing</i> .....	51
<b>Gambar 4.9</b> Hubungan nilai kekuatan <i>bending</i> (MPa) terhadap variasi putaran <i>spindle</i> .....	52
<b>Gambar 4.10</b> (a) Proses pengujian <i>bending</i> (b) Spesimen setelah pengujian <i>bending</i> .....	53
<b>Gambar 4.11</b> (a) Lapisan hasil <i>friction surfacing</i> (b) Spesimen <i>rod</i> (c) Titik pengujian kekerasan hasil <i>friction surfacing</i> (d) Titik pengujian kekerasan <i>rod</i> ..	54
<b>Gambar 4.12</b> Hubungan nilai kekerasan lapisan dan <i>substrate</i> setelah proses <i>friction surfacing</i> .....	54
<b>Gambar 4.13</b> Titik ordinat hasil pengujian kekerasan <i>vickers</i> .....	56
<b>Gambar 4.14</b> Grafik hasil pengujian kekerasan <i>vickers</i> .....	56
<b>Gambar 4.15</b> Struktur mikro hasil <i>friction surfacing</i> variasi putaran <i>spindle</i> 3400 rpm .....	58
<b>Gambar 4.16</b> Struktur mikro hasil <i>friction surfacing</i> variasi putaran <i>spindle</i> 2300 rpm .....	58
<b>Gambar 4.17</b> Struktur mikro hasil <i>friction surfacing</i> variasi putaran <i>spindle</i> 1400 rpm .....	59

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Daftar seri paduan aluminium tempa .....	6
<b>Tabel 2.2</b> Daftar seri paduan aluminium tuang .....	7
<b>Tabel 2.3</b> Parameter <i>friction surfacing</i> (Sumber: Gandra et al. 2014) .....	21
<b>Tabel 4.1</b> Perbandingan variasi putaran <i>spindle</i> terhadap tebal minimum dan maksimum hasil <i>friction surfacing</i> .....	45
<b>Tabel 4.2</b> Perbandingan variasi putaran <i>spindle</i> terhadap lebar minimum dan maksimum lapisan hasil <i>friction surfacing</i> . .....	46
<b>Tabel 4.3</b> Hasil pengujian kekerasan vickers .....	56

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam dunia industri saat ini pemilihan bahan dan proses dalam pembuatan sebuah produk yang diproduksi oleh sebuah perusahaan, harus sesuai dengan fungsi dan tujuan diproduksinya produk tersebut. Dengan demikian konsumen akan merasa puas dalam menggunakan produk hasil produksi perusahaan tersebut karena kualitas yang dicapai sesuai. Aluminium merupakan salah satu logam yang umum digunakan sebagai matrik dalam pembuatan komposit logam pada industri, hal ini dikarenakan aluminium memiliki massa yang ringan serta memiliki kelebihan dalam kekuatan, ketahanan aus, kekakuan, dan stabilitas dimensi yang baik. (Subagyo, 2017)

Jenis aluminium yang sering digunakan dalam industri yaitu aluminium seri 6061. Aluminium 6061 tergolong aluminium seri 6xxx dengan elemen paduan magnesium dan silikon, paduan jenis ini mempunyai sifat mampu potong dan daya tahan korosi yang cukup baik dan dapat dilakukan *heat treatment* (Pungky Eka Setyawan dkk, 2014).

Kelemahan aluminium dan paduannya ditinjau dari proses penyambungannya yaitu sulit dilakukan dengan pengelasan cair, hal ini disebabkan karena aluminium mempunyai lapisan aluminium oksida pada permukaannya, sehingga untuk dapat dilas, lapisan aluminium oksida tersebut harus dihancurkan terlebih dahulu. Salah satu solusi dalam memecahkan permasalahan dalam teknik penyambungan logam yang sulit dilakukan dengan pengelasan cair yaitu penyambungan dengan pengelasan gesek (*friction welding*). Metode pengelasan gesek termasuk dalam jenis pengelasan bertekanan, proses pengelasan gesek dilakukan dalam keadaan *solid state* dimana tidak ada listrik atau sumber energi lain yang digunakan, energi panas dihasilkan dengan memanfaatkan adanya gesekan pada permukaan dari bagian yang akan dilas (Pungky Eka Setyawan dkk, 2014). Pada penelitian ini, penulis



menggunakan metode yang hampir sama dengan *friction welding* yaitu *friction surfacing*. Perbedaan dari dua metode ini yaitu *friction welding* digunakan untuk menyambungkan dua logam atau lebih sedangkan *friction surfacing* digunakan untuk melapisi material atau logam.

Ada beberapa parameter dari *friction surfacing* yang memengaruhi hasil dan karakteristik lapisan yaitu tekanan (*axial force*), kecepatan rotasi (*rotational speed*) dan kecepatan gesekan (*travel speed*). Hubungan antara kecepatan pelapisan dan input panas selama proses pengelasan sangat kompleks, tetapi umumnya dapat dikatakan bahwa meningkatnya kecepatan rotasi dan berkurangnya kecepatan melintas akan mengakibatkan titik las lebih panas. Jika material tidak cukup panas maka arus pelunakan tidak akan optimal sehingga dimungkinkan akan terjadi cacat rongga atau cacat lain pada *stir zone*, dan kemungkinan *tool* akan rusak. Pada proses tersebut pengoptimalan dari parameter ini sangat menunjang tingkat kelekatan lapisan terhadap media lapisan.

Penelitian tentang penggunaan aluminium sebagai bahan pelapis (*coating*) telah dilakukan oleh Aditya Rizki Karambe Bulu' dengan pengaruh *travel speed* terhadap lapisan aluminium 6061 pada tahun 2021. Penelitian tersebut menggunakan putaran *spindle* maksimum pada alat *Drilling/Milling Machine* tipe LC-40A yakni 3000 rpm untuk membangkitkan panas dari efek gesekan antara ujung *rod* aluminium 6061 dengan permukaan *substrate* aluminium 7075 untuk memasuki keadaan *visco-plastis* sebelum pelapisan berlangsung. Dengan mesin dan putaran yang sama, Nurhudaedah dan Asruddin (2019) berhasil melapisi *substrate* baja dengan bahan *rod* yang lebih keras daripada aluminium pada umumnya yakni aluminium-1%CNT. Hasil penelitian mereka menginformasikan bahwa putaran yang kurang dari 3000 rpm pada mesin tersebut akan sulit membangkitkan panas dengan cepat, dan jika kekerasan material *rod* lebih tinggi daripada material *substrate* maka proses *friction* justru akan merusak *substrate*.

Pada penelitian ini, penulis mencoba meningkatkan kekerasan lapisan dengan membuat *rod* dari bahan aluminium+CNT dan menggunakan *substrate* aluminium yang relatif lebih rendah kekerasannya. Untuk meningkatkan panas

lebih cepat, permukaan *substrate* aluminium akan ditingkatkan kekerasannya sehingga menghasilkan efek gesekan yang lebih kuat. Parameter permesinan terutama putaran *spindle* akan menyesuaikan kebutuhan gaya torsi yang akan meningkat karena permukaan yang lebih kasar.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka akan dilakukan penelitian dengan judul: “**Analisis Pengaruh Putaran *Spindle* terhadap Pelapisan Aluminium-CNT dengan proses *Friction Surfacing* Menggunakan Mesin *Drilling-Milling Tipe LC-40*”.**

## **1.2 Rumusan Masalah**

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

1. Bagaimana bentuk dan ukuran lapisan aluminium hasil proses *friction surfacing* dengan penambahan 1.5% CNT, pada berbagai variasi putaran *spindle* 1400, 2300 dan 3400 rpm?
2. Bagaimana nilai kekuatan tekuk dan nilai kekerasan dari spesimen hasil proses *friction surfacing*?
3. Bagaimana penampakan struktur mikro hasil proses *friction surfacing*?
4. Variasi putaran *spindle* mana yang menghasilkan lapisan kualitas terbaik dari hasil proses *friction surfacing*?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Beberapa tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini, yakni sebagai berikut:

1. Menganalisis bentuk dan ukuran lapisan aluminium hasil proses *friction surfacing* dengan penambahan 1.5% CNT, pada berbagai variasi putaran *spindle* 1400, 2300 dan 3400 rpm.
2. Menganalisis hasil nilai kekuatan tekuk dan nilai kekerasan dari spesimen hasil proses *friction surfacing*.
3. Menganalisis struktur mikro lapisan hasil proses *friction surfacing* melalui pengujian metalografi.

4. Menentukan variasi putaran *spindle* yang menghasilkan lapisan kualitas terbaik dari hasil proses *friction surfacing*.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Agar penulisan tugas akhir ini lebih terarah, maka penulis memberikan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Jenis material *rod* pembentuk lapisan adalah Aluminium tipe A6061.
2. Melakukan variasi putaran *spindle* 1400, 2300 dan 3400 rpm, kekerasan *substrate* 2.21  $\mu\text{m}$ , menjaga pergerakan meja kerja 9 cm/menit serta beban 2 kg tetap konstan pada proses *friction surfacing*.
3. Dimensi lapisan yang terbentuk harus memenuhi syarat ukuran panjang 30 mm, tebal 1,5 mm dan lebar 9 mm.
4. Mesin yang digunakan untuk proses ini yaitu *Drilling/Milling Machine* tipe LC-40 A.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan penulis dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat mengetahui sifat mekanik dan kualitas material dengan metode *friction surfacing*.
2. Mengembangkan metode baru dalam proses pelapisan material dalam ilmu metalurgi.
3. Diharapkan dapat bermanfaat sebagai bahan kajian atau informasi untuk penelitian selanjutnya.
4. Dapat diaplikasikan untuk praktikum pelapisan material dalam skala laboratorium.
5. Menambah referensi sebagai pengembangan ilmu di bidang material logam.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

### **BAB I Pendahuluan**

Berisi latar belakang yang memperkenalkan gambaran mengenai fatik korosi, serta rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, metode pengumpulan data dan sistematika penulisan.

### **BAB II Landasan Teori**

Berisi tentang tinjauan pustaka atau teori-teori penunjang yang berhubungan dengan penelitian.

### **BAB III Metodologi Penelitian**

Berisi tentang proses penelitian secara lengkap.

### **BAB IV Hasil dan Pembahasan**

Berisi tentang hasil dari eksperimen fatik korosi pada lingkungan NaCl dengan pembahasan dan analisisnya.

### **BAB V Penutup**

Berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian serta saran yang diajukan untuk penelitian selanjutnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Aluminium

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 (Mujiyo, 2014).

Aluminium ditemukan pada tahun 1825 oleh Hans Christian Oersted. Baru diakui secara pasti oleh F. Wohler pada tahun 1827. Sumber unsur ini tidak terdapat bebas, bijih utamanya adalah Bauksit. 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, amplas dan permata sintetis (Mujiyo, 2014).

##### 2.1.1 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 2.1

**Tabel 2.1** Daftar seri paduan aluminium tempa

Paduan Tempa	Penandaan
Aluminium (min.) 99.00%	1XXX
Tembaga	2XXX
Mangan	3XXX

Silikon	4XXX
Magnesium	5XXX
Magnesium dan Silikon	6XXX
Seng	7XXX

(Sumber: Smallman, R.E. dan Bishop, R.J., 2000)

Paduan aluminium tempa, seri 1xxx digunakan untuk aluminium murni, paduan aluminium diidentifikasi dengan sistem empat digit berdasarkan elemen paduan utamanya. Untuk paduan tempa (*wrought*, 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. dan Bishop, R.J., 2000)

**Tabel 2.2** Daftar seri paduan aluminium tuang

Paduan Tuang	Penandaan
Aluminium (min.) 99.00%	1XXX
Tembaga	2XXX
Silikon, Tembaga dan Magnesium	3XXX
Silikon	4XXX
Magnesium	5XXX
Seng	6XXX
Timah Putih	7XXX

(Sumber: Smallman, R.E. dan Bishop, R.J., 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. Beberapa kombinasi penambahan unsur pepadu, mekanisme penguatannya, serta perkiraan nilai kekuatan yang dapat dicapai dapat dilihat dalam Tabel 2.2. (Hatch, 1984)

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, di dalam 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 dalam 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 tetapi masih terbatas. beberapa paduan dalam seri ini memiliki kemampuan mesin yang baik.

c. *Grade* aluminium Seri 3xxx

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 persentase 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, 2017)

### **2.1.2 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 (Hetherington et. all, 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 2.1** KRL Tokyo Metro seri 6000

- b. Pada kereta api terdapat *Rigid Overhead Conductor*, mempunyai kawat kontak yang ditopang pada sebuah batangan kaku yang disebut “*rigid bar*”, dan bukan 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. Membuat termit, yaitu campuran serbuk aluminium dengan serbuk besi (III) oksida, digunakan untuk mengelas baja ditempat, misalnya untuk menyambung rel kereta api.
- m. Pembuatan Aluminium Sulfat ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ) digunakan untuk industri kertas dan karton, pewarna pada industri tekstil, dan pemadam kebakaran jenis busa. (bila dicampur dengan  $NaHCO_3$  dan zat pengemulsi).

## **2.2 Carbon Nanotube (CNT)**

CNT merupakan material yang terbuat dari struktur karbon berskala nanometer dan mempunyai karakteristik mekanik dan dielektrik yang baik. Struktur CNT ditemukan pertama kali oleh Sumio Iijima pada tahun 1991 ketika mempelajari permukaan elektroda graphite dengan menggunakan mikroskop elektron beresolusi tinggi, mempunyai struktur yang terbentuk dari setidaknya dua lapisan graphene (grafit berbentuk lembaran) dan secara umum mempunyai diameter berorde nanometer.

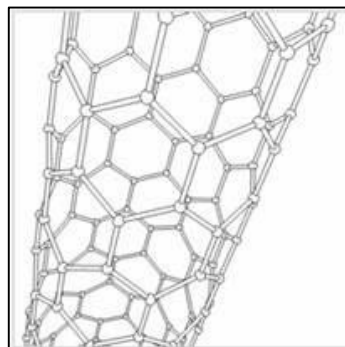
### **2.2.1 Struktur Carbon Nanotube (CNT)**

CNT adalah salah satu struktur karbon yang berbentuk seperti silinder dengan diameter dalam orde nanometer. Salah satu keunikan dalam struktur ini adalah kelebihanannya dalam hal kekuatan, sifat kelistrikannya, dan juga sifat dalam penghantaran panas yang baik. Struktur ini memiliki bermacam bentuk turunan yang masing-masing memiliki sifatnya tersendiri.

Keistimewaan *carbon nanotube* membuatnya menjadi harapan baru dalam perkembangan teknologi nano.

CNT merupakan turunan dari struktur karbon yang dideskripsikan sebagai lembaran grafit setebal 1 atom yang digulung menyerupai silinder dan memiliki diameter dengan orde nanometer. Lembaran ini memiliki struktur seperti sarang lebah (*honeycomb*) yang terdiri dari ikatan-ikatan atom karbon.

Struktur CNT yang unik memungkinkannya memiliki sifat kenyal, daya regang, dan stabil dibandingkan struktur karbon lainnya. Kelebihannya ini dapat dimanfaatkan dalam pengembangan struktur bangunan yang kuat, struktur kendaraan yang aman, dan lainnya. Hal ini dikarenakan CNT memiliki ikatan  $sp^3$  menyerupai struktur di grafit. Ikatan ini lebih kuat dibandingkan dengan struktur ikatan  $sp^2$  yang dimiliki oleh intan. Dengan demikian secara alami *carbon nanotube* akan membentuk ikatan yang sangat kuat.



**Gambar 2.2** Struktur *carbon nanotubes* dalam bentuk 3 dimensi.

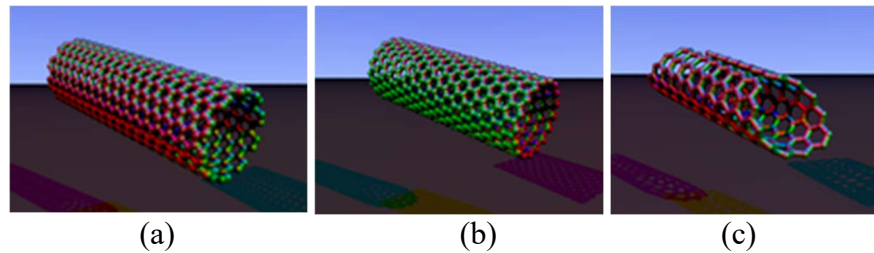
### 2.2.2 Jenis *Carbon Nanotube* (CNT)

Berdasarkan jumlah dindingnya, CNT dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu *Single Walled Carbon Nanotube* (SWNT) dan *Multiwalled Carbon Nanotube* (MWNT).

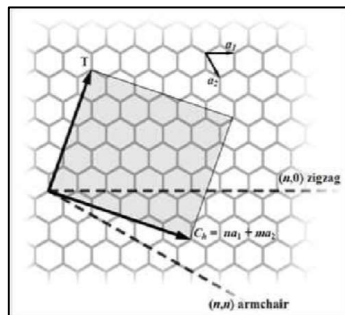
#### a. *Single Walled Nanotubes* (SWNT)

Struktur ini memiliki diameter kurang lebih 1 nanometer dan memiliki panjang hingga ribuan kali dari diameternya. Struktur SWNT dapat dideskripsikan menyerupai sebuah lembaran panjang struktur

grafit (disebut graphene) yang tergulung. Umumnya SWNT terdiri dari dua bagian dengan properti fisik dan kimia yang berbeda. Bagian pertama adalah bagian sisi dan bagian kedua adalah bagian kepala. SWNT memiliki beberapa bentuk struktur berbeda yang dapat dilihat bilamana struktur tube dibuka.



**Gambar 2.3** Beberapa bentuk struktur SWNT (a) Struktur *armchair* (b) Struktur *zigzag* (c) Struktur *chiral*.



**Gambar 2.4** Struktur SWNT secara vektor (J. P. McKelvey, 1986).

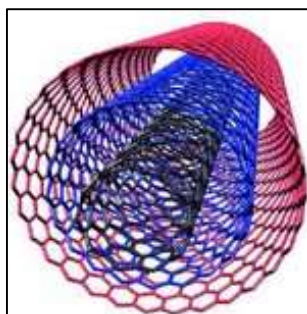
Pada gambar 2.4 terlihat cara lembaran grafit (*graphene*) dilipat dapat dijabarkan oleh *chiral vector*  $C_h$  yang direpresentasikan oleh pasangan  $(n, m)$ .  $n$  dan  $m$  menunjukkan jumlah unit vektor di antara 2 vektor di dalam *crystal lattice* dari *graphene*. Jika  $m=0$  maka struktur nanotube dinamakan struktur zigzag. Jika  $n=m$  maka struktur nanotube dinamakan struktur *armchair*. Selebihnya dinamakan struktur *chiral*. Perbedaan dalam *chiral vector* akan menyebabkan perbedaan sifat struktur, misalnya sifat struktur terhadap cahaya, kekuatan mekanik, dan konduktivitas elektrik.

SWNT memiliki sifat keelektrikan yang tidak dimiliki oleh struktur MWNT. Hal ini memungkinkan pengembangan struktur SWNT menjadi *nanowire* karena SWNT dapat menjadi konduktor yang baik. Selain itu SWNT telah dikembangkan sebagai pengganti dari *field effect*

*transistors* (FET) dalam skala nano. Hal ini karena sifat SWNT yang dapat bersifat sebagai n-FET juga p-FET ketika bereaksi terhadap oksigen. Karena dapat memiliki sifat sebagai n-FET dan p-FET maka SWNT dapat difungsikan sebagai *logic gate*.

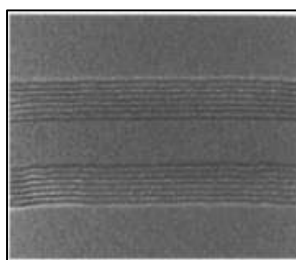
b. Multi Walled Nanotubes (MWNT)

MWNT dibentuk dari beberapa lapisan struktur grafit yang digulung membentuk silinder. Atau dapat juga dikatakan MWNT tersusun oleh beberapa SWNT dengan berbeda diameter. MWNT jelas memiliki sifat yang berbeda dengan SWNT.

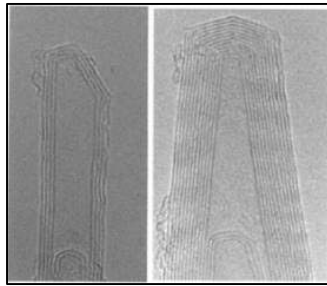


**Gambar 2.5** Struktur MWNT.

Pada MWNT yang hanya memiliki 2 lapis dinding (*Double-Walled Carbon Nanotubes-DWNT*) memiliki sifat yang menyerupai SWNT dengan *chemical resistance* yang lebih baik. Hal ini dikarenakan pada SWNT hanya memiliki 1 lapis dinding sehingga bilamana terdapat ikatan C=C yang rusak maka akan menghasilkan lubang di SWNT dan hal ini akan mengubah sifat mekanik dan elektrik dari ikatan SWNT tersebut. Sedangkan pada DWNT masih terdapat 1 lapisan lagi di dalam yang akan mempertahankan sifatnya.



**Gambar 2.6** MWNT yang terpisah 0.34 nm.

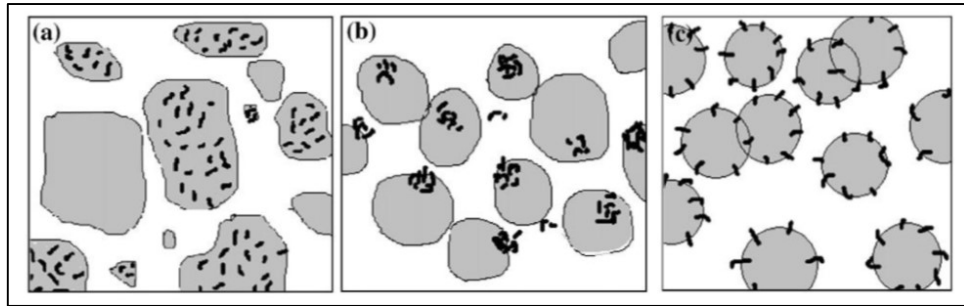


**Gambar 2.7** Bentuk *cone shaped end caps* yang simetris dan tidak simetris.

Kemudian ada bentuk *torus*, bentuk struktur ini masih berupa teoritis. Bentuk *torus* adalah bentuk struktur melingkar seperti donut. Struktur ini memiliki beberapa sifat yang menonjol seperti momen magnetik yang lebih besar, stabil dalam suhu, dan sebagainya. Sifat ini akan bervariasi tergantung dari diameter *torus* dan diameter dari *nanotube*. Terakhir ada bentuk *peapod*, yang mana struktur ini cukup unik karena terdapat molekul  $C_{60}$  yang terbungkus di tengah *nanotube*.

### 2.2.3 Metode Pencampuran CNT (*Carbon Nanotube*)

Sejak ditemukannya pada tahun 1991, CNT telah menjadikan penguat yang menjanjikan untuk nano komposit, karena sifat mekanik dan fisik yang luar biasa dari nanotube, yaitu high strength yang luar biasa untuk rasio berat, aspek rasio yang tinggi, dan high fracture strain dan fleksibilitas yang tinggi. Penelitian ini mengamati kondisi dispersi CNT dalam serbuk logam. Serbuk aluminium dipilih sebagai matriks untuk campuran CNT. Terdapat tiga metode pencampuran yang berbeda, yaitu *high energy ball milling*, *low energy ball milling* dan dengan teknik pencampuran *Polyester Binder Assisted* (PBA). Dalam penelitian Jinzhi Liao ini fraksi massa yang digunakan 0,5% dari CNT ditambahkan pada serbuk aluminium, dengan perbedaan metode *mixing*, yaitu *high energy ball milling*, *low energy ball milling* dan dengan teknik pencampuran *Polyester Binder Assisted* (PBA). Didapat gambaran skema dari CNTs dan serbuk aluminium setelah dicampur dengan teknik yang berbeda.



**Gambar 2.8** (a) *High energy ball milling* (b) *Low energy ball milling*  
(c) Dengan teknik pencampuran *Polyester Binder Assisted* (PBA)

Skema dari CNTs dan serbuk aluminium setelah dicampur dengan teknik yang berbeda. (a) *high energy ball milling*, CNT efektif tersebar meskipun kurang merata pada serbuk Al; dan pada (b) *low energy ball milling*, CNT tersebar pada serbuk Al akan tetapi masih ada gumpalan; dan pada (c) dengan teknik pencampuran *Polyester Binder Assisted* (PBA), CNT melapisi serbuk aluminium akan tetapi masih terdapat gumpalan (Alif Maulana, 2012).

Dikutip dari jurnal yang ditulis Esawi A.M.K dkk, berisi tentang komposit matrik aluminium yang diperkuat CNT menghasilkan, komposit dengan persen berat CNT yang semakin banyak menunjukkan peningkatan kekuatan tariknya. Tren yang sama dapat diamati pada pengukuran *Young modulus* dengan peningkatan maksimum (+23%), pada sample 2%wt CNT. Tidak seperti pada kekuatan tarik, pada *Modulus Young* terjadi penurunan sedikit sebesar 5%, akan tetapi masih melampaui kekakuan aluminium murni 20%.

Dari kutipan jurnal tersebut diketahui bahwa sifat mekanik yang dihasilkan meningkat secara signifikan dengan meningkatnya kandungan CNT dan baik melebihi atau yang dekat dengan nilai-nilai diprediksi berdasarkan teori komposit kecuali pada penambahan 5%wt.

## 2.2.4 Sifat-Sifat *Carbon Nanotubes*

### a. Konduktivitas Listrik dan Panas

Sifat keelektrikan yang dimiliki oleh *carbon nanotube* ditentukan oleh struktur yang dimilikinya. Struktur ini menyangkut diameter dan bagaimana *tube* “digulung” menjadi *nanotube*. Bilamana mengacu pada

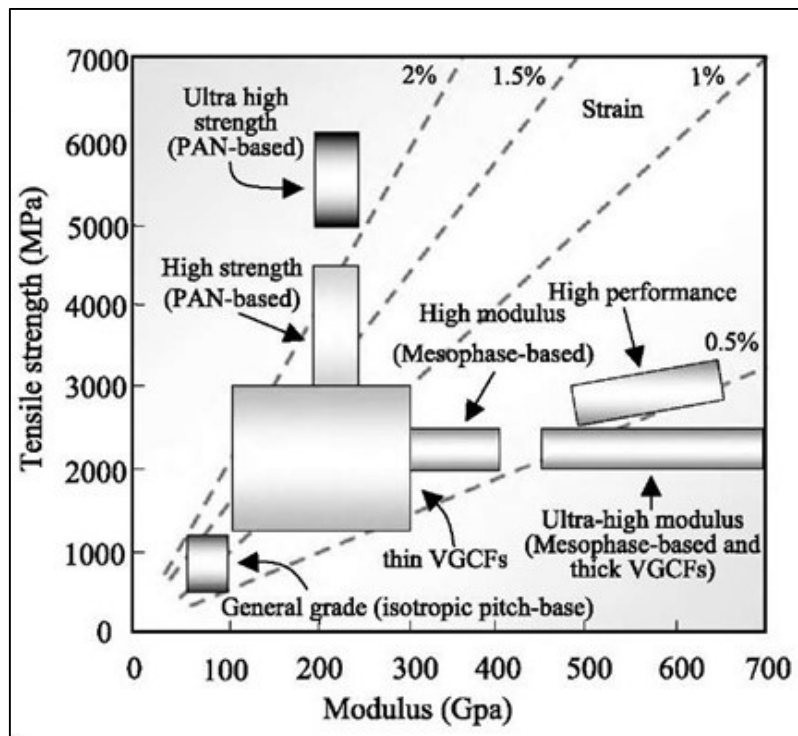


gambar 2.4, maka untuk *nanotube* (n,m), bila n-m adalah kelipatan dari 3 maka *nanotube* tersebut bersifat konduktor, dan selain itu bersifat semikonduktor. Sehingga untuk struktur armchair akan selalu bersifat logam (n=m). *Nanotube* memiliki densitas arus listrik 1000 kali lebih besar daripada logam seperti perak dan tembaga.

Ketika *nanotube* bersifat sebagai konduktor, *nanotube* memiliki konduktivitas yang sangat tinggi. Diperkirakan pada saat *nanotube* bersifat sebagai konduktor maka ia mempunyai konduktivitas listrik sebesar 1 milyar Ampere per 1 cm<sup>2</sup>. Hal ini tidak mungkin terjadi pada bahan tembaga karena akan terjadi panas yang dapat melelehkan tembaga. Pada *nanotube* tidak akan terjadi panas yang tinggi karena hambatan yang rendah. *Nanotube* juga memiliki konduktivitas panas yang baik. Hal ini yang kemudian *nanotube* diberi sebutan *ballistic conduction*. *Nanotube* memiliki kemampuan untuk mentransmisikan 6000 W/m/K di suhu ruangan (pada tembaga hanya 385 W/m/K). Selain itu *nanotube* tetap stabil hingga suhu 2800 °C di ruang hampa udara dan sekitar 750 °C di udara bebas.

b. Kekuatan Mekanik

*Nanotube* memiliki modulus elastik dan sifat peregangan yang sangat baik. Sifat ini karena ikatan sp<sup>2</sup> yang dimiliki oleh *carbon nanotube* ini. Pada gambar 2.10 nampak bahwa tipe MWNT dapat menangani hingga 63 GPa regangan yang diberikan padanya (pada baja karbon terbaik saat ini hanya mampu menahan peregangan hingga 1.2 GPa). Sedangkan modulus elastik yang dimiliki oleh *nanotube* dapat mencapai 1 TPa. Saat ini telah diketahui pula *nanotube* memiliki kekuatan hingga 48462 kN.m/kg (dibandingkan baja karbon terbaik hanya 154 kN.m/kg).



Gambar 2.9 Perbandingan sifat mekanik dari carbon dan grafit fiber.

c. Sifat Vibrasi

Atom memiliki pola getaran yang kontinu dan periodik. Pada MWNT, dimana beberapa nanotube saling terpola satu di dalam yang lain, memperlihatkan bahwa pada lapisan yang di dalam akan bergetar sedemikian hingga mendekati pola gerakan yang berputar sempurna tanpa adanya gesekan dengan lapisan di atasnya. Pendekatan ini kemudian dapat dikembangkan menjadi motor dalam skala nanometer. Pergetaran ini sangat ditentukan oleh diameter dari *nanotube*.

**2.3 Proses Friction Surfacing (Fs)**

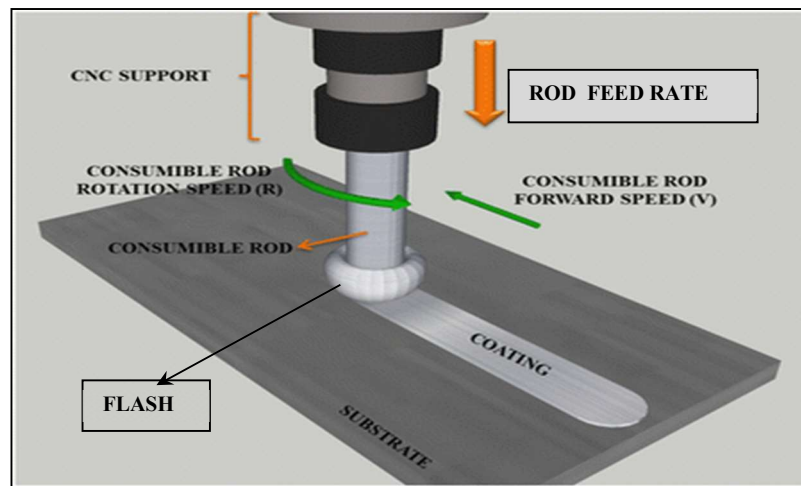
*Friction surfacing* (FS) adalah sebuah proses membuat lapisan pada keadaan yang padat dengan cara pendeformasian batang logam ke dalam bentuk setipis dan sehalus mungkin.

**2.3.1 Prinsip Kerja *Friction Surfacing* (FS)**

Dalam *friction surfacing*, *consumable* yang berputar yang mengarah terhadap media (beban axial). Pada proses FS, panas akan timbul akibat gesekan, hal itu akan menghasilkan suatu lapisan *viscoplastic* (sebuah

lapisan yang padat, tetapi mengalir seperti cairan yang kental). Kondisi suhu dan tekanan yang menyebabkan proses difusi menghasilkan lapisan logam antara bahan dan media. Proses konduksi ke dalam media memungkinkan pembentukan lapisan dan lapisan *viscoplastic* terbentuk bersamaan. Proses konduksi dilakukan dari awal untuk menambah ketebalan dari lapisan. Lapisan viscoplastic akan tersimpan untuk melapisi media permukaan pada proses selanjutnya.

Proses kerja FS dapat dilihat pada gambar 2.10 hal penting dalam proses *friction surfacing* adalah gabungan gesekan permukaan dan proses deformasi sebagai penghasil panas.



Gambar 2.10 Proses *friction surfacing*.

Proses termomekanikal adalah suatu proses dimana terdapat dua perlakuan pada suatu material. Proses termomekanikal digunakan untuk proses pelapisan yang bertujuan untuk memberikan suatu lapisan yang mempunyai mikrostruktur yang baik (Barnabas, Godwin. 2014).

### 2.3.2 Parameter pada Friction surfacing

Terdapat 3 variabel atau parameter pada pengujian metode *friction surfacing* yaitu *axial force*, *travel speed*, dan *rotational speed*. Dari ketiga parameter ini masing-masing akan memberi pengaruh dari hasil *friction surfacing* yang dilakukan. Sebelumnya Al-Amin telah melakukan penelitian dengan melakukan variasi pada 3 parameter tersebut dan terdapat 18 sampel

penelitian yang berbeda-beda. Pada penelitian tersebut telah mendekati nilai minimum yang diinginkan hal ini ditunjukkan pada gambar 2.11.



**Gambar 2.11** Foto mikro lapisan hasil *friction surfacing*.

Gambar 2.11 memperlihatkan struktur mikro lapisan hasil *friction surfacing*, dengan nilai pada variabel *axial force* = 8,5 kN, *traverse speed* = 60 mm/min, dan *rotational speed* = 1500 rpm. Dengan nilai-nilai parameter demikian, maka tingkat ketebalan lapisan rata-rata sudah masuk dalam kisaran tingkat minimum yang diinginkan (kisaran 0,17-0,18). Dengan error di bawah 0,02.

**Tabel 2.3** Parameter *friction surfacing* (Sumber: Gandra et al. 2014)

Consumable rod		Substrate		Process parameters			Coating	
Material	Dia. [mm]	Material	Thick. [mm]	Force [kN]	Rotation speed [rpm]	Travel speed [mm/s]	Width [mm]	Thick. [mm]
Mild steel	10	Mild steel	10	5	2500	7.5	15	1.8
	20	AA6063	10	6	2000	2	n.a.	n.a.
	20	Copper	10	8	2400	2	18	3
	20	Inconel 800	10	10	1600	2	n.a.	n.a.
Alloy steel								
- AISI 4140	20	AISI	9	10.3	3500	8.5	15.35	0.78
- AISI 8620	20	1070	9	10.3	3500	8.5	15.2	1.18
Stainless steel								
- AISI 304	15		12	8.3 <sup>a</sup>	2400	3.2	13.2	1.4
- AISI 310	18		8	10	800	4	18	1.5
- AISI 316	19	Mild steel	10	2.9	1400	8.2	12	1
- AISI 321	19		10	4.4	1400	2.9	17	2.4
- AISI 410	18		10	9.9 <sup>a</sup>	1200	3	19	1.8
- AISI 440	16		10	10 <sup>a</sup>	1150	3	14	1
Tool Steel								
- AISI O1	12	Mild steel	n.a.	2.5 <sup>a</sup>	2500	2.9	n.a.	n.a.
- AISI H13	18	steel	8	10	800	4	18	1.3
Stellite 6	15	Mild steel	10	10	800	1.2	n.a.	n.a.
Inconel 600	12	Mild steel	n.a.	2.5 <sup>a</sup>	3000	1.6	n.a.	n.a.
Aluminium								
- AA1100	22	Mild steel	6	5.3 <sup>a</sup>	2500	16	20.22	0.89
- AA2017	20	AA5052	5	9.4 <sup>a</sup>	1200	9	21.3	1.1
- AA5052	20	AA5052	5	7.8 <sup>a</sup>	2000	9	19.6	3.8
- AA6082	20	AA2024	4.8	5	3000	7.5	20	2
Magnesium								
- AZ91	18	AZ31	6	10 <sup>a</sup>	1000	5	15	0.4
Titanium								
- Ti-6Al-4V	20	Ti-6Al-4V	10	0.22 <sup>a</sup>	4000	5	23	1.7
NiAl Bronze								
- 81.60	20	80.90	10	15 <sup>a</sup>	4000	5	20	0.66

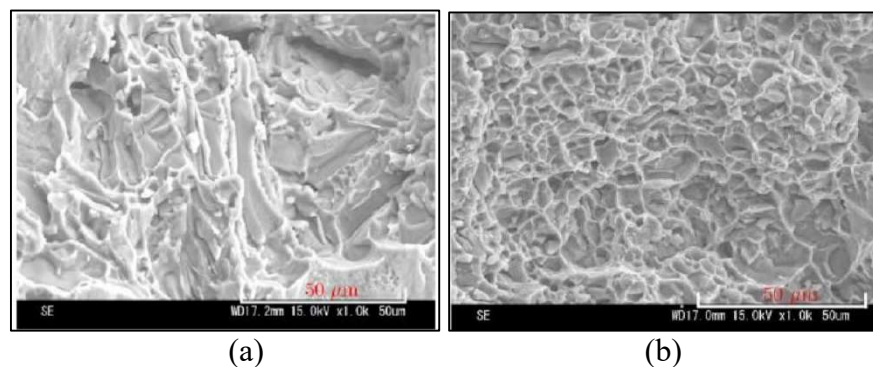
## 2.4 Proses Pengecoran

Pengecoran adalah proses pembentukan logam dengan cara dicairkan, lalu dituang ke dalam cetakan dan dibiarkan sampai membeku.

### 2.4.1 Cetakan Logam dan Cetakan Pasir

Bahan cetakan bervariasi. Beberapa diantaranya dibuat dari bahan pasir, semen, keramik, dan logam. Masing-masing bahan cetakan ini akan memberikan pengaruh terhadap kualitas logam cair. Kualitas ini terutama mengenai sifat mekanik dan cacat yang terbentuk selama proses penuangan dan pembekuan. Hal ini berpengaruh sangat penting terutama pada komponen-komponen mesin yang bergerak dan memerlukan keamanan yang tinggi.

Cetakan logam dan cetakan pasir sering digunakan karena untuk mengontrol kecepatan pembekuan logam cair. Pada cetakan logam, proses pembekuan berlangsung cepat sehingga meningkatkan kekuatan dan kekerasan logam. Sedangkan pada cetakan pasir, proses pembekuan lebih lambat, sehingga meningkatkan keuletan logam. Kecepatan pembekuan ini amat berpengaruh terhadap pertumbuhan dan besar butir. Pada Gambar 2.12 ditunjukkan perbedaan besar butir aluminium coran yang dicetak dengan menggunakan cetakan pasir dan cetakan logam.



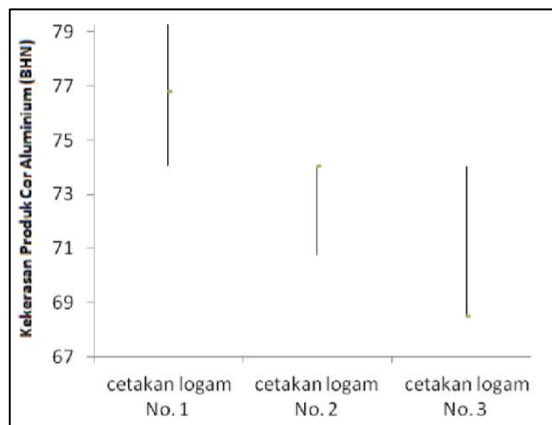
**Gambar 2.12** (a) Hasil coran cetakan pasir (b) Hasil coran cetakan logam.

Gambar 2.12 Permukaan patahan aluminium coran yang dikenai kombinasi tegangan tarik dan tegangan geser pada spesimen butterfly pada sudut  $\alpha+20^\circ$ . Survei menunjukkan bahwa kekerasan dan porositas produk cor yang menggunakan cetakan pasir dan cetakan logam bervariasi.

Porositas ini terjadi karena pengaruh proses penuangan dan jenis cetakan yang digunakan. Porositas ini berasal dari gelembung- gelembung gas yang larut dan terperangkap selama proses pencairan dan penuangan. Bagian permukaan aluminium cair akan mereduksi uap air yang terdapat dalam atmosfer (Diah Kusuma Pratiwi, 2012).

#### 2.4.2 Kekerasan Produk Cor Aluminium

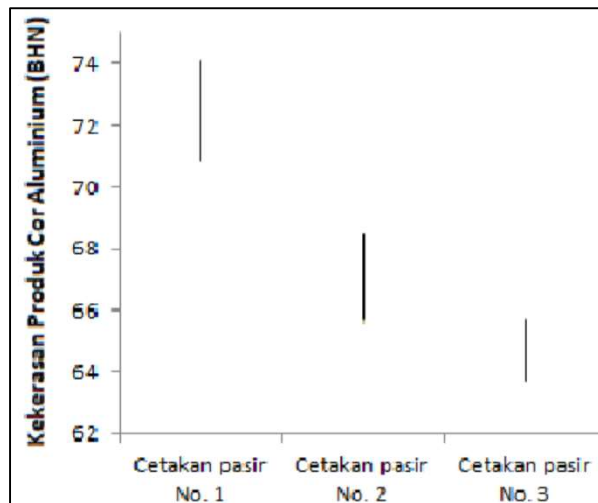
Pengujian kekerasan untuk produk cor aluminium yang menggunakan cetakan logam menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran cetakan kekerasan semakin tinggi. Grafik hasil pengujian kekerasan ini ditunjukkan pada Gambar 2.13 berikut ini.



**Gambar 2.13** Grafik hasil pengujian kekerasan coran aluminium menggunakan cetakan logam dengan menggunakan metode *brinell* (Diah Kusuma Pratiwi, 2012).

Semakin besar ukuran spesimen, kekerasan menurun. Hal ini berhubungan dengan besar butir. Pada spesimen yang lebih kecil proses pembekuan berlangsung cepat. Sehingga butir tidak sempat tumbuh. Sedangkan pada spesimen yang lebih besar butir sempat tumbuh, sehingga ukuran butir menjadi lebih besar. Pada butir yang berukuran kecil, luas permukaan yang menghalangi deformasi plastis akibat gaya dari luar lebih besar. Sehingga kekerasan menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan butir yang masih sempat tumbuh pada spesimen nomor dua dan nomor tiga yang lebih besar. Kekerasan produk cor aluminium yang menggunakan cetakan logam berkisar antara 79,61–68,49 BHN.

Grafik hasil uji keras pada produk cor aluminium yang menggunakan cetakan pasir menunjukkan bahwa angka kekerasan yang paling tinggi adalah 74,67 BHN dan yang paling rendah adalah 63,69 BHN. Hal ini disebabkan karena konduktivitas panas pasir yang hanya 1,93–2,90 W/m.K menyebabkan proses pembekuan lebih lambat dibandingkan dengan cetakan baja yang mempunyai konduktivitas panas 36–55W/m.K. Selain itu, semakin besar ukuran cetakan maka proses perpindahan kalor selama pembekuan menjadi lebih lambat lagi. Sehingga semakin besar ukuran spesimen, kekerasan semakin menurun. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.14 berikut ini.



**Gambar 2.14** Grafik hasil pengujian kekerasan coran aluminium menggunakan cetakan pasir dengan menggunakan metode brinell (Diah Kusuma Pratiwi, 2012).

Pada penelitian ini penulis akan menggunakan cetakan logam karena mengacu pada uraian di atas dan penelitian yang telah ada sebelumnya.

## 2.5 Uji Mekanik (*Mechanical Test*)

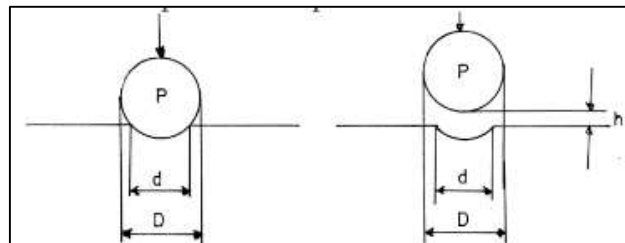
### 2.5.1 Pengujian Kekerasan atau *Hardness Test*

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 indenter. 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 indenter yang berbentuk bola dengan beban dan waktu tertentu, seperti terlihat pada Gambar 2.15. Harga kekerasan diperoleh dari persamaan berikut ini:



Gambar 2.15 Geometri indenter *brinell*

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

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 indenter 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*:

- a) Kekerasan permukaan.
- b) Posisi spesimen saat pengujian.
- c) Kebersihan permukaan spesimen.

b. Metode *Vickers*

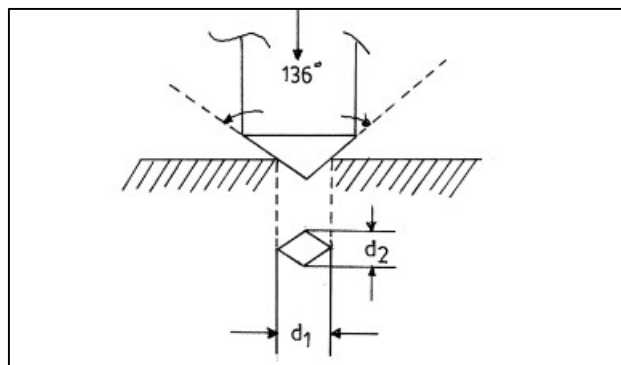
Pengujian dengan metode ini prosesnya sama dengan metode *Brinell* yang berbeda hanya pada bentuk indentor yaitu berbentuk piramida bujur sangkar dengan sudut puncak 136 terbuat dari intan, seperti terlihat pada Gambar 2.12. Harga kekerasan *Vickers* diperoleh dengan rumus:

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

dengan:

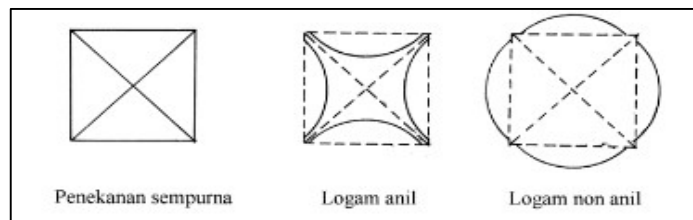
- P =Beban yang diberikan (kg),
- L = Diagonal rata-rata (mm) = (d1+d2)/2,
- O = Sudut puncak 136.

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 2.16 Geometri indentor *vickers*

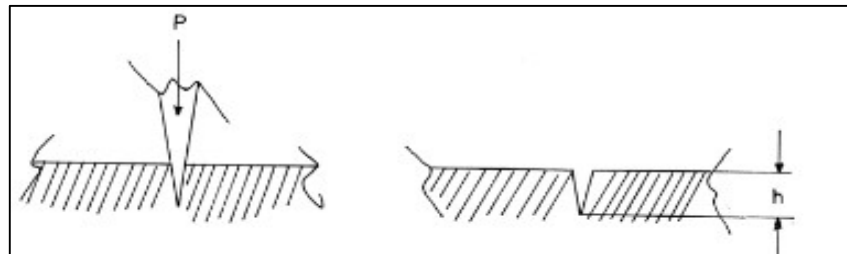
Hasil penekanan akan berbentuk bujur sangkar dengan diagonal yang akan diukur dengan mikroskop, seperti dalam Gambar 2.17.



**Gambar 2.17** Jejak hasil penekanan indentor

c. Metode *Rockwell*

Pada metode ini digunakan indentor intan yang berbentuk kerucut, seperti terlihat pada Gambar 2.18. Kerucut akan menekan permukaan logam sedalam “h” dari permukaan. Jarak “h” menentukan kekerasan dari logam uji.



**Gambar 2.18** Indentor *rockwell*

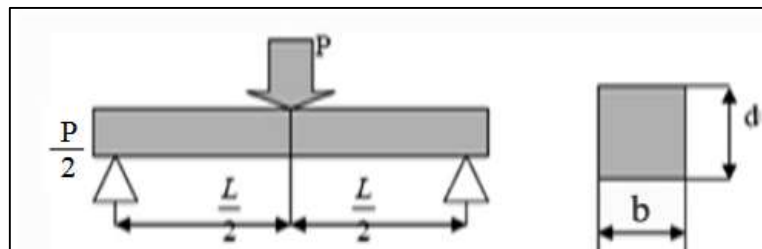
Harga kekerasan diperoleh dari pembacaan langsung pada skala alat pengujian *Rockwell* antara lain:

- 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*.

**2.5.2 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 proses tarik 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 2.16 berikut ini: (Standar ASTM D 790-02)



**Gambar 2.19** Penampang uji *bending* (Standar 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:

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

dengan:

$E_b$  = 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)

## 2.6 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro digunakan untuk mengetahui keadaan atau kondisi suatu logam Aluminium ditinjau dari strukturnya dengan menggunakan

mikroskop. Serta dapat digunakan sebagai salah satu sarana untuk mengetahui kerusakan suatu komponen. Berdasarkan hasil metalografi yang dilakukan dapat diketahui bahwa tidak ditemukan adanya cacat pada permukaan, sehingga material masih layak digunakan (Pancatatva 2016).

Sifat-sifat fisis dan mekanik dari material tergantung dari struktur mikro material tersebut. Struktur mikro dalam logam (paduan) di tunjukkan dengan besar, bentuk dan orientasi butirnya, jumlah fasa, proporsi dan kelakuan dimana mereka tersusun atau terdistribusi. Struktur mikro dari paduan tergantung dari beberapa faktor seperti, elemen paduan, konsentrasi dan perlakuan panas yang diberikan. Pengujian struktur mikro atau metalografi dilakukan dengan bantuan mikroskop dengan koefisien pembesaran dan metode kerja yang bervariasi.

Adapun beberapa tahap yang perlu dilakukan sebelum melakukan pengujian struktur mikro adalah:

a. Sectioning (Pemotongan)

Pemotongan ini dipilih sesuai dengan bagian yang akan diamati struktur mikronya. Spesimen uji dipotong dengan ukuran seperlunya.

b. Grinding (Pengamplasan kasar)

Tahap ini untuk menghaluskan dan meratakan permukaan spesimen uji yang ditujukan untuk menghilangkan retak dan goresan. Grinding dilakukan secara bertahap dari ukuran yang paling kecil hingga besar.

c. Polishing (Pemolesan)

Tahap ini bertujuan untuk menghasilkan permukaan spesimen yang mengkilap, tidak boleh ada goresan.

d. Etching (Pengetsaan)

Hasil dari proses pemolesan akan berupa permukaan yang mengkilap seperti cermin. Agar struktur terlihat jelas maka permukaan tersebut dietsa. Dalam pengetsaan jangan terlalu kuat karena akan terjadi kegosongan pada benda uji.

e. Pemotretan

Pemotretan digunakan untuk mendapatkan gambar dari struktur mikro dari spesimen uji setelah difokuskan dengan mikroskop.