

TUGAS AKHIR – TL184834

**ANALISIS PENGARUH PERSENTASE BESI, FERRONIKEL,
DAN STAINLESS STEEL 304L TERHADAP KEKUATAN
TEKAN DAN SIFAT RHEOLOGI *FEEDSTOCK* BERBAHAN
KOMPOSIT PA6/LOGAM**

JOHAKIM DE BRITO DWIKI LAKASERU
NRP. 0251184000048

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.
NIP. 198012072005011004
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.
NIP. 197906202006042001

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



TUGAS AKHIR – TL184834

**ANALISIS PENGARUH PERSENTASE BESI, FERRONIKEL,
DAN STAINLESS STEEL 304L TERHADAP KEKUATAN
TEKAN DAN SIFAT RHEOLOGI *FEEDSTOCK* BERBAHAN
KOMPOSIT PA6/LOGAM**

JOHAKIM DE BRITO DWIKI LAKASERU
NRP. 0251184000048

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.
NIP.198012072005011004
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.
NIP.197906202006042001

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL184834

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF IRON, FERRONICKEL,
AND STAINLESS STEEL 304L PERCENTAGE ON
COMPRESSIVE STRENGTH AND RHEOLOGICAL
PROPERTY ON PA6/METAL COMPOSITE FEEDSTOCK**

JOHAKIM DE BRITO DWIKI LAKASERU
NRP. 0251184000048

Advisor
Dr.Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.
NIP.198012072005011004
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.
NIP. 197906202006042001

Study Program of Materials Engineering
Departement of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

(This page is intentionally blank)

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH PERSENTASE BESI, FERRONIKEL, DAN STAINLESS STEEL 304L TERHADAP KEKUATAN TEKAN DAN SIFAT RHEOLOGI FEEDSTOCK BERBAHAN KOMPOSIT PA6/LOGAM

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **JOHAKIM DE BRITO DWIKI LAKASERU**
NRP. 0251184000048

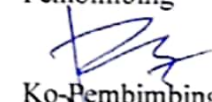
Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr.Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc.



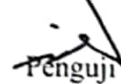
Pembimbing

2. Dr. Widyastuti, S. Si., M.Si



Ko-Pembimbing

3. Lukman Noerochim, S.T., M.Sc., Ph.D



Penguji

4. Azzah Dyah Pramata, S.T., M.Eng., Ph.D



Penguji

SURABAYA
Juli, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF THE EFFECT OF IRON, FERRONICKEL, AND STAINLESS STEEL 304L PERCENTAGE ON COMPRESSIVE STRENGTH AND RHEOLOGICAL PROPERTY OF PA6/METAL COMPOSITE *FEEDSTOCK*

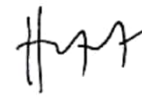
FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree of bachelor of engineering at
Undergraduate Study Program of Materials Engineering
Departement of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **JOHAKIM DE BRITO DWIKI LAKASERU**
NRP. 0251184000048

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Dr.Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.
2. Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.
3. Lukman Noerochim, S.T., M.Sc., Ph.D
4. Azzah Dyah Pramat, S.T., M.Eng., Ph.D



Advisor



Co-Advisor



Examiner



Examiner

SURABAYA
July, 2022

(This page is intentionally blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Johakim De Brito Dwiki Lakaseru/
0251184000048
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing/NIP : Dr.Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc./
198012072005011004

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "ANALISIS PENGARUH PERSENTASE BESI, FERRONIKEL, DAN STAINLESS STEEL 304L TERHADAP KEKUATAN TEKAN DAN SIFAT RHEOLOGI FEEDSTOCK BERBAHAN KOMPOSIT PA6/LOGAM" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 8 Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing



(Dr.Eng. Hosta Ardhyananta, S.T.,
M.Sc)
NIP. 198012072005011004

Mahasiswa



(Johakim De Brito Dwiki Lakaseru)
NRP. 0251184000048

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student/NRP : Johakim De Brito Dwiki Lakaseru/
0251184000048
Departement : Material and Metallurgical Engineering
Advisor/NIP : Dr.Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc./
198012072005011004

Hereby declare that the Final Project with the title of "ANALYSIS OF THE EFFECT OF IRON, FERRONICKEL, AND STAINLESS STEEL 304L PERCENTAGE ON COMPRESSIVE STRENGTH AND RHEOLOGICAL PROPERTY OF PA6/METAL COMPOSITE *FEEDSTOCK*" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

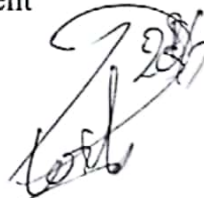
Surabaya, July 8th 2022

Acknowledged
Advisor



(Dr.Eng. Hosta Ardhyananta, S.T.,
M.Sc.)
NIP. 198012072005011004

Student



(Johakim De Brito Dwiki Lakaseru)
NRP.0251184000048

(This page is intentionally blank)

ANALISIS PENGARUH PERSENTASE BESI, FERRONIKEL, DAN STAINLESS STEEL 304L TERHADAP KEKUATAN TEKAN DAN SIFAT RHEOLOGI *FEEDSTOCK* BERBAHAN KOMPOSIT PA6/LOGAM

Nama Mahasiswa / NRP : Johakim De Brito Dwiki Lakaseru
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M. Sc.
Dosen Pembimbing II : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

Abstrak

Agar dapat digunakan sebagai material proyektil frangible, material *feedstock* perlu memiliki kekuatan tekan tertentu. Selain itu, agar dapat digunakan pada injection molding, *feedstock* perlu memiliki sifat rheologi yang sesuai. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh persentase serbuk dan jenis serbuk terhadap sifat rheologi dan kekuatan tekan dari *feedstock* berbahan komposit PA6/Logam. Persentase serbuk logam yang digunakan pada penelitian ini adalah sebesar 85, 90, dan 92 wt%. Adapun jenis serbuk logam yang digunakan pada *feedstock* adalah besi (Fe), ferronikel (FeNi), dan *stainless steel 304L*. *Feedstock* dibuat dengan mencampurkan serbuk logam dan serbuk PA6 pada temperatur 260°C menggunakan barrel dan bor tangan selama 3 menit.. Namun, pada *feedstock* PA6/Fe hanya *feedstock* PA6/85Fe saja yang dapat diekstrusi karena morfologi serbuk Fe yang berbentuk flake. *Feedstock* kemudian diekstrusi untuk menghasilkan filament komposit PA6/Logam yang kemudian dipotong untuk menghasilkan *feedstock*. *Feedstock* hasil ekstrusi ini kemudian dikarakterisasi dengan metode scanning electron (SEM) untuk menganalisis morfologi permukaan *feedstock*, pengujian tekan untuk mengkarakterisasi kekuatan tekan, dan Differential Scanning Calorimetry serta Thermogravimetric Analysis (TGA) untuk mengkarakterisasi sifat thermal *feedstock* PA6/Logam. Sifat rheologi *feedstock* diestimasi menggunakan persamaan berdasarkan literatur. Hasil pengujian SEM menunjukkan adanya aglomerasi dan *void* pada sebagian *feedstock* pada variasi yang berbeda. Hasil pengujian tekan menunjukkan bahwa kekuatan tekan akan berbanding lurus dengan persentase serbuk pada *feedstock* PA6/FeNi. Adapun nilai kekuatan tekan *feedstock* PA6/FeNi sebesar 121,5; 143,56; dan 150,95 MPa berturut – turut untuk *feedstock* PA6/FeNi dengan persentase serbuk 85, 90, dan 92 wt%. Pada *feedstock* PA6/SS304L diperoleh kekuatan tekan 126,0967; 128,57; dan 134,783 MPa berturut – turut untuk *feedstock* dengan persentase serbuk 85, 90, dan 92 wt%. Pada *feedstock* dengan persentase serbuk 85 wt% kekuatan tekan tertinggi diperoleh pada *feedstock* PA6/Fe85 sebesar 144,505 MPa. Adapun berdasarkan perhitungan estimasi viskositas *feedstock*, viskositas berbanding lurus dengan fraksi volume serbuk pada *feedstock* PA6/Logam. Viskositas terendah diperoleh pada *feedstock* PA6/FeNi85 yakni sebesar 121,5 Pa.s dan viskositas tertinggi diperoleh pada *feedstock* PA6/Fe92 yakni sebesar 23.804,402 Pa.s. Viskositas berbanding lurus dengan persentase serbuk karena serbuk menghambat pergerakan molekul polimer sehingga meningkatkan viskositas *feedstock*. Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah kekuatan tekan berbanding lurus dengan persentase serbuk pada *feedstock*. Selain itu, sifat rheologi *feedstock* berbanding terbalik dengan persentase serbuk logam dan berbanding terbalik dengan densitas serbuk pada *feedstock*.

Kata Kunci: *Komposit, Feedstock, SS304L, Ferronikel, Fe, Poliamida 6*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF IRON, FERRONICKEL, AND STAINLESS STEEL
304L PERCENTAGE ON COMPRESSIVE STRENGTH AND RHEOLOGICAL
PROPERTY OF PA6/METAL COMPOSITE *FEEDSTOCK***

Student Name / NRP : Johakim De Brito Dwiki Lakaseru
Departement : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Advisor : Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S. T., M. Sc.
Co-Advisor : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

Abstract

Feedstock material needs to have a certain amount of compressive strength to be used as material for the frangible projectile. Besides, the feedstock is also required to possess suitable rheology properties. This research aims to analyze powder percentage and material's influence on the rheological property and compressive strength of PA6/Metal composite feedstock. Iron, ferronickel, and stainless steel 304L are the types of powder used to make feedstock. The feedstock is made by mixing metal powder and polyamide 6 powder at 260°C using a heated barrel and hand drill for 3 minutes. Powder percentages used in this research are 85, 90, and 92 wt%. For PA6/Fe feedstock, only PA6/85Fe feedstock can be extruded due to the flaky morphology of iron powder. This mixing process produces PA6/Metal composite filament that will be cut to produce feedstock. These feedstocks are characterized by scanning electron microscopy (SEM) to analyze the surface morphology of feedstock, compressive test to characterize the compressive strength of feedstock, differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analysis (TGA) to characterize the thermal properties of feedstock. The rheological property of feedstock is estimated using equations based on the literature. SEM results show that there are powder agglomeration and void on several feedstocks. Compressive test results show that compressive strength is linear with powder percentage on PA6/FeNi feedstock. PA6/FeNi feedstock compressive strength is 121.5; 143.56; and 150.95 MPa consecutively for PA6/FeNi feedstock with 85, 90, and 92 wt% powder. Compressive strength of PA6/SS304L feedstocks are 126.0967; 128.57; and 134.783 MPa consecutively for 85, 90, and 92 wt% powder percentage. For feedstock with 85 wt% powder, the highest compressive strength is attained on PA6/85Fe feedstock with compressive strength of 144.505 MPa. Based on calculations of feedstock's viscosity, feedstock's viscosity is linear with the volume fraction of powder on PA6/Metal feedstock. The lowest viscosity is attained on PA6/FeNi85 with estimated viscosity of 352.850 Pa.s, and the highest viscosity is attained on PA6/Fe92 with estimated viscosity of 23804.402 Pa.s. Viscosity is linear with powder percentage because incorporation of powder in feedstock hinders polymer molecule's mobility, raising feedstock's viscosity. From this research, it can be concluded that compressive strength is linear with powder percentage. Besides, the rheological property is inversely proportional to powder percentage and powder density used in the feedstock.

Keywords: *Composite, Feedstock, SS304L, Ferronickel, Fe, Polyamide 6*

(This page is intentionally blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir yang berjudul “Analisis Pengaruh Persentase Besi, Ferronikel, dan Stainless Steel 304L terhadap Kekuatan Tekan dan Sifat Rheologi *Feedstock* Berbahan Komposit PA6-Logam” untuk memenuhi Mata Kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu syarat kelulusan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama proses penelitian, penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dan memberi dukungan kepada penulis diantaranya adalah:

1. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M. Sc, selaku dosen pembimbing pertama;
2. Ibu Dr. Widyastuti, S. Si. M. Si, selaku dosen pembimbing kedua;
3. Bapak Wikan Jatimurti, S. T., M. Sc, selaku dosen wali penulis;
4. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S. Si., M. Si., Ph.D, selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS – ITS
5. Tim Dosen Penguji seminar dan siding, serta seluruh dosen dan staff Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS – ITS;

Penulis berharap penelitian tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak. Penulis juga menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan ini. Untuk itu, kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak sangat diharapkan.

Surabaya, 2 Juli 2022
Penulis

Johakim De Brito D.L.

DAFTAR ISI

| | |
|--|--------------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| LEMBAR PENGESAHAN | v |
| Abstrak..... | xiii |
| Abstract..... | xv |
| KATA PENGANTAR..... | xvii |
| DAFTAR ISI..... | xviii |
| DAFTAR GAMBAR..... | xxi |
| DAFTAR TABEL | xxiii |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Batasan Masalah | 2 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 2 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | 2 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 3 |
| 2.1 Projektil Frangible..... | 3 |
| 2.1.1 Tembaga (Cu) | 5 |
| 2.1.2 Besi (Fe)..... | 5 |
| 2.1.3 Ferronikel (FeNi) | 5 |
| 2.1.4 Stainless Steel 304L..... | 6 |
| 2.1.5 Poliamida 6 | 7 |
| 2.2 Material Komposit | 8 |
| 2.2.1 Polymer Matrix Composite (PMC)..... | 9 |
| 2.2.2 Metal Matrix Composite (MMC)..... | 9 |
| 2.2.3 Ceramic Matrix Composite (CMC) | 9 |
| 2.2.4 Particle Reinforced Composite | 9 |
| 2.2.5 Fiber Reinforced Composite | 10 |
| 2.2.6 Structural Composite..... | 10 |
| 2.3 Ekstrusi..... | 12 |
| 2.4 <i>Feedstock</i> | 14 |
| 2.5 Sifat Rheologi | 16 |
| 2.6 Penelitian Sebelumnya..... | 19 |
| 2.6.1 State of The Art..... | 25 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | 27 |
| 3.1 Diagram Alir | 27 |
| 3.2 Alat Penelitian..... | 28 |
| 3.2.1 Neraca Digital | 28 |
| 3.2.2 Beaker Glass | 28 |
| 3.2.3 Spatula..... | 28 |
| 3.2.4 Mesin Sieving | 28 |
| 3.2.5 Oven..... | 29 |
| 3.2.6 Barrel | 29 |
| 3.2.7 Mesin Injection | 29 |
| 3.2.8 Mold..... | 30 |
| 3.2.9 Jangka Sorong | 30 |
| 3.3 Bahan Penelitian | 31 |
| 3.3.1 Poliamida 6 | 31 |
| 3.3.2 Stainless Steel 304L..... | 31 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 3.3.3 | Besi (Fe) | 31 |
| 3.3.4 | Ferronikel | 32 |
| 3.4 | Metode Penelitian | 32 |
| 3.4.1 | Preparasi Spesimen | 32 |
| 3.4.2 | Pembuatan <i>Feedstock</i> | 32 |
| 3.5 | Pengujian | 34 |
| 3.5.1 | Differential Scanning Calorimeter (DSC) | 34 |
| 3.5.2 | Pengujian Tekan | 34 |
| 3.5.3 | Pengujian Scanning Electron Microscopy (SEM) | 35 |
| 3.5.4 | Perhitungan Viskositas Relatif <i>Feedstock</i> PA6/Logam | 35 |
| 3.6 | Rancangan Penelitian | 37 |
| BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN | | 39 |
| 4.1 | Karakterisasi Bahan | 39 |
| 4.2 | Analisis Proses Pembuatan <i>Feedstock</i> Komposit PA6/Logam | 42 |
| 4.3 | Analisis Pengaruh Persentase dan Jenis Serbuk terhadap Kekuatan Tekan Feedstock PA6/Logam | 45 |
| 4.4 | Analisis Pengaruh Jenis dan Persentase Serbuk terhadap Sifat Rheologi Feedstock | 51 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | | 55 |
| 5.1 | Kesimpulan | 55 |
| 5.2 | Saran | 55 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 57 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|---------------------|--|----|
| Gambar 2. 1 | Peluru dan komponen penyusunnya | 3 |
| Gambar 2. 2 | Lintasan proyektil saat <i>ricochet</i> | 3 |
| Gambar 2. 3 | Proyektil frangible dan pecahannya | 4 |
| Gambar 2. 4 | Mikrostruktur stainless steel 304L | 7 |
| Gambar 2.5 | Struktur molekul poliamida 6..... | 7 |
| Gambar 2. 6 | Mekanisme <i>transformation toughening</i> pada CMC | 9 |
| Gambar 2. 7 | Co-WC <i>particle reinforced composite</i> . Daerah gelap merupakan <i>filler</i> WC dan daerah terang adalah matriks kobalt | 10 |
| Gambar 2. 8 | Klasifikasi material komposit berdasarkan fasa penguat (<i>reinforcement</i>) | 11 |
| Gambar 2. 9 | Ikatan mekanik pada antarmuka komposit (a) ikatan mekanik ideal (tanpa <i>void</i>) dan (b) ikatan mekanik dengan <i>void</i> | 11 |
| Gambar 2.10 | Mesin ekstrusi..... | 13 |
| Gambar 2. 11 | <i>Screw</i> pada <i>barrel</i> mesin ekstrusi..... | 13 |
| Gambar 2.12 | <i>Feedstock injection molding</i> | 15 |
| Gambar 2.13 | Aliran fluida pada lapisan yang berbeda | 16 |
| Gambar 2.14 | Viskositas pada fluida Newtonian dan non-newtonian | 17 |
| Gambar 2.15 | Viskositas beberapa jenis polimer pada berbagai temperatur dengan <i>shear rate</i> $103s^{-1}$ | 17 |
| Gambar 2.16 | Pengaruh beberapa variabel terhadap viskositas polimer..... | 18 |
| Gambar 2.17 | Pengaruh Bentuk pertikel terhadap viskositas relatif <i>feedstock</i> | 18 |
| Gambar 2.18 | Persebaran <i>filler</i> Fe pada <i>feedstock injection molding</i> | 19 |
| Gambar 2.19 | Viskositas <i>feedstock</i> Fe-36Ni dengan persentase serbuk yang berbeda..... | 20 |
| Gambar 2.20 | <i>Shear viscosity</i> untuk beberapa fraksi volume <i>filler</i> SS316L pada berbagai <i>shear rate</i> | 20 |
| Gambar 2.21 | <i>State of the art</i> penelitian mengenai <i>feedstock injection molding</i> | 25 |
| Gambar 3.1 | Diagram alir penelitian | 27 |
| Gambar 3.2 | Neraca digital..... | 28 |
| Gambar 3.3 | <i>Beaker glass</i> | 28 |
| Gambar 3.4 | Mesin <i>sieving</i> | 29 |
| Gambar 3.5 | (a) Punch, (b) barrel, (c) <i>heater band</i> , dan (d) <i>thermocouple</i> | 29 |
| Gambar 3.6 | Mesin <i>injection</i> | 30 |
| Gambar 3.7 | <i>Mold</i> dan bagian – bagiannya..... | 30 |
| Gambar 3.8 | Jangka Sorong | 30 |
| Gambar 3. 9 | Serbuk Poliamida 6..... | 31 |
| Gambar 3. 10 | Serbuk Stainless Steel 304L | 31 |
| Gambar 3.11 | Serbuk besi | 32 |
| Gambar 3.12 | Serbuk ferronikel | 32 |
| Gambar 3.13 | Proses <i>drying</i> serbuk PA6..... | 33 |
| Gambar 3.14 | Skematik proses mixing komposit PA6/Logam | 33 |
| Gambar 3.15 | Skematik proses ekstrusi | 34 |
| Gambar 3.16 | Spesimen uji tekan..... | 34 |
| Gambar 3.17 | HT-950 Universal Testing Machine | 35 |
| Gambar 3.18 | Grafik viskositas PA6 pada temperatur dan <i>shear rate</i> yang berbeda | 37 |
| Gambar 4.1 | Grafik hasil karakterisasi FTIR Poliamida 6 | 39 |
| Gambar 4.2 | Morfologi serbuk Fe pada perbesaran (a) 500x, (b) 5.000x, (c) distribusi ukuran serbuk, dan (d) hasil EDX serbuk Fe..... | 40 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| Gambar 4.3 | Morfologi Serbuk FeNi dengan perbesaran (a) 1.500x, (b) 5.000x, (c) distribusi ukuran serbuk, dan (d) hasil EDX serbuk FeNi | 41 |
| Gambar 4.4 | Morfologi serbuk SS304L dengan perbesaran (a) 1.500x, (b) 5.000x, (c) distribusi ukuran serbuk SS304L, dan (d) hasil EDX serbuk SS304L | 42 |
| Gambar 4.5 | Serbuk Poliamida 6 (a) sebelum proses <i>grinding</i> dan (b) setelah proses <i>grinding</i> | 43 |
| Gambar 4.6 | <i>Fillament</i> Komposit PA6/Logam..... | 43 |
| Gambar 4.7 | (a) Panjang <i>feedstock</i> PA6/Logam (b) diameter <i>feedstock</i> PA6/Logam..... | 43 |
| Gambar 4.8 | (a) Diameter dan (b) panjang spesimen tekan <i>feedstock</i> PA6/Logam..... | 45 |
| Gambar 4.9 | Pengaruh persentase serbuk terhadap kekuatan tekan <i>feedstock</i> PA6/Logam | 46 |
| Gambar 4.10 | Pola patahan pada speisemen uji tekan PA6/85FeNi..... | 48 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|--------------------|--|----|
| Tabel 2.1 | Sifat mekanik proyektil frangible | 4 |
| Tabel 2. 2 | Sifat Fisik dan mekanik tembaga | 5 |
| Tabel 2. 3 | Sifat fisik dan mekanik besi..... | 5 |
| Tabel 2. 4 | Komposisi Ferronikel | 6 |
| Tabel 2. 5 | Sifat fisik dan mekanik ferronikel | 6 |
| Tabel 2.6 | Komposisi stainless steel 304L | 6 |
| Tabel 2. 7 | Sifat fisik dan mekanik stainless steel 304L..... | 7 |
| Tabel 2. 8 | Sifat fisik dan mekanik poliamida 6..... | 8 |
| Tabel 2.9 | Sifat dan karakteristik feedstock PA6/SS dan PA6/Baja | 15 |
| Tabel 2. 10 | Penelitian sebelumnya mengenai komposisi dan sifat rheologi feedstock..... | 22 |
| Tabel 2.11 | Hasil penelitian sebelumnya mengenai sifat mekanik feedstock | 24 |
| Tabel 3.1 | Fraksi volume serbuk ada <i>Feedstock</i> PA6/Logam | 36 |
| Tabel 3. 2 | Rancangan Penelitian | 37 |
| Tabel 4.1 | Perbandingan <i>Feedstock</i> PA6/Logam | 44 |
| Tabel 4.2 | Morfologi Feedstock PA6/SS304L | 49 |
| Tabel 4.3 | Morfologi feedstock PA6/FeNi dan PA6/85Fe pada perbesaran 1.500x | 50 |
| Tabel 4.4 | Viskositas feedstock PA6/Logam hasil perhitungan..... | 51 |
| Tabel 4.5 | Tabulasi Hasil Penelitian <i>Feedstock</i> PA6/Logam | 52 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proyektil *frangible* merupakan proyektil yang memiliki kemampuan untuk pecah menjadi serpihan – serpihan saat menabrak benda keras. (Bui et al., 2017) Adapun material yang lazim digunakan pada proyektil *frangible* adalah tembaga (Cu) dan timah (Sn). (Morse et al., 2019) Walaupun demikian menghasilkan sifat yang sesuai, tembaga dan timah yang digunakan pada proyektil *frangible* memiliki harga yang mahal. Tingginya harga tembaga ini memunculkan kebutuhan material alternatif yang lebih ekonomis. Dengan penggunaan material alternatif diperlukan juga penyesuaian komposisi material alternatif. Penyesuaian ini diperlukan agar proyektil *frangible* memiliki sifat yang mendekati proyektil *frangible* berbahan tembaga. Oleh karena itu, diperlukan material alternatif dengan komposisi tertentu untuk menggantikan tembaga.

Untuk menghasilkan proyektil *frangible* dengan material alternatif, dilakukan penelitian terhadap jenis material alternatif dan komposisi material alternatif. Penelitian proyektil *frangible* oleh Dewanto menggunakan komposit Cu-Poliamida 6. Adapun poliamida 6 yang digunakan sebesar 0,5; 1,0; dan 1,5%. Variasi komposisi ini menghasilkan kekuatan tekan rerata sebesar 127,76; 129,14; dan 97,54 MPa berturut – turut untuk persentase PA-6 sebesar 0,5; 1,0; dan 1,5%. (Dewanto, 2014) Berdasarkan penelitian oleh Morse, tembaga dapat diganti dengan campuran Zn-80Fe. Proyektil dengan komposisi ini menghasilkan kekuatan tekan maksimum pada rentang 500 – 650 pounds. (Morse et al., 2017) Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Seeman, material alternatif yang digunakan adalah tungsten sebanyak 70-80 wt% dan resin polimer sebanyak 30-20 wt%. Adapun resin polimer yang digunakan adalah *toughened polymer* yang terdiri dari *elastomer-modified epoxy*. Dengan komposisi ini, diperoleh proyektil dengan densitas sebesar 45% dari densitas proyektil dengan timbal. (Seeman & Privette, 2016) Menurut hasil penelitian Falah, komposisi polistirena pada komposit Cu-PS akan memengaruhi sifat mekanik. Komposisi polimer yang digunakan pada komposit ini adalah 70,50, dan 30 wt%. Kekuatan tekan yang diperoleh adalah sebesar 37,15; 43,95; dan 53,08 MPa untuk komposisi PS sebesar 30, 50, dan 70 wt%. (Falah, 2018) Dari penelitian sebelumnya, belum terdapat informasi mengenai sifat reologi material alternatif. Padahal, sifat reologi sangat penting pada material yang akan diproduksi dengan metode *injection molding*. Agar diperoleh proyektil *frangible* dengan sifat mekanik yang sesuai, maka perlu diketahui kekuatan tekan pada material yang akan digunakan sebagai proyektil *frangible*.

Untuk mengetahui sifat reologi pada kandidat material alternatif proyektil *frangible*, dilakukan penelitian yang berfokus pada jenis dan komposisi material *filler*. Penelitian ini menggunakan poliamida 6 dan serbuk logam. Adapun logam yang akan digunakan adalah besi (Fe), ferronikel, dan *stainless steel* 304L. Poliamida 6 dipilih karena memiliki ketahanan abrasi yang baik, laju degradasi yang rendah pada temperatur tinggi, dan memiliki permeabilitas gas yang rendah. (Folaron et al., 2020) Ketiga jenis logam yang digunakan dalam penelitian ini dipilih karena memiliki densitas yang mendekati densitas tembaga (7,87 (Groover, 2013); 8,4; dan 8,0 g/cm³ untuk besi, ferronikel, dan *stainless steel* 304L dibanding 8,96) dan memiliki sifat mekanik yang baik. Berdasarkan penelitian oleh Dewanto, dapat diperkirakan bahwa kekuatan tekan akan berbanding lurus dengan persentase serbuk tembaga. Selain persentase serbuk, kekuatan tekan juga dipengaruhi oleh kekuatan tekan komponen penyusun material tersebut (Callister & Rethwisch, 2015). Selain itu, berdasarkan literatur (Baird et al., 2012) viskositas berbanding lurus dengan fraksi volume serbuk pada feedstock.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan di atas, maka rumusan masalah untuk penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi persentase serbuk besi, ferronikel dan *stainless steel* 304L terhadap *melt flow rate* (MFR) *feedstock* komposit PA6-Logam
2. Bagaimana pengaruh variasi persentase serbuk besi, ferronikel, dan *stainless steel* 304L kekuatan tekan *feedstock* komposit PA6-Logam

1.3 Batasan Masalah

Untuk diperoleh analisa dan kesimpulan yang akurat dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah serta tidak menyimpang dari tinjauan permasalahan, maka batasan – batasan dalam penelitian ini adalah:

1. Lingkungan dianggap tidak berpengaruh
2. Pengotor diabaikan
3. Tekanan dan temperatur ekstrusi dianggap konstan

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa pengaruh variasi persentase serbuk besi, ferronikel, dan *stainless steel* 304L terhadap sifat rheologi *feedstock* komposit PA6/Logam.
2. Menganalisa pengaruh variasi persentase serbuk besi, ferronikel, dan *stainless steel* 304L terhadap kekuatan tekan *feedstock* komposit PA6/Logam.

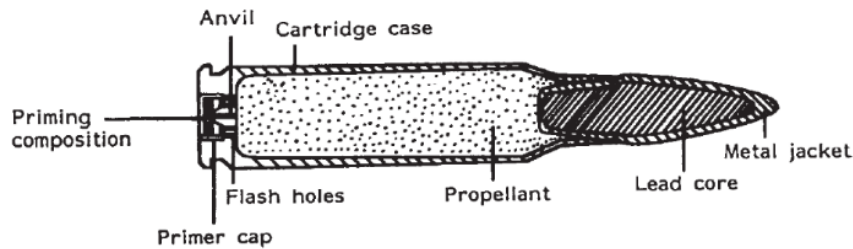
1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan analisa *melt flow rate* dan kekuatan tekan *feedstock* berdasarkan pengaruh variasi komposisi besi, ferronikel, dan *stainless steel* 304L. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

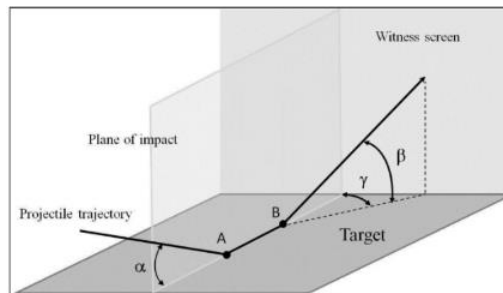
2.1 Proyektil Frangible

Proyektil didefinisikan sebagai bagian dari peluru yang meluncur di udara dan mengenai target akibat transfer energi dari energi kimia hasil reaksi pembakaran serbuk mesiu. (Heard, 2009)



Gambar 2.1 Peluru dan komponen penyusunnya

Untuk mencapai densitas yang tinggi, material yang dipilih sebagai inti (*core*) adalah timbal. Penggunaan timbal secara luas sebagai material inti (*core*) pada proyektil menimbulkan masalah yang serius dan berkelanjutan. Berdasarkan penelitian *The (US) Bureau of Standards*, 80% partikel timbal yang berada di udara lapangan tembak berasal dari proyektil. Untuk mengurangi bahaya timbal bagi kesehatan, dilakukan riset untuk memproduksi proyektil bebas timbal. Logam yang digunakan sebagai pengganti timbal meliputi bubuk baja, *zinc*, tungsten, *zinc*/timah yang dipadukan dengan tungsten, bismuth, dan tembaga. Tembaga dan baja memiliki faktor berat yang sama dengan timbal. Selain berbahaya bagi kesehatan, proyektil konvensional memiliki kecenderungan untuk memantul pada saat mengenai benda keras. Fenomena yang dikenal sebagai *ricochet* ini dapat dilihat pada **Gambar 2.2** (Koene, 2016)



Gambar 2.2 Lintasan proyektil saat *ricochet*

Untuk mengurangi resiko *ricochet* ini, maka dilakukan pengembangan proyektil khusus yang disebut sebagai proyektil *frangible*. Proyektil *frangible* adalah proyektil yang memiliki kemampuan untuk pecah menjadi serpihan – serpihan kecil ketika menabrak benda keras setelah ditembakkan. Kemampuan untuk pecah menjadi serpihan kecil ini meminimalisir resiko terjadinya *ricochet*, yang dapat membahayakan penembak maupun orang lain disekitar penembak. (Hansen, 2008) Untuk dapat dikategorikan sebagai proyektil *frangible*, terdapat beberapa kriteria yang harus dipenuhi. Persyaratan pertama adalah proyektil harus pecah apabila ditembakkan pada pelat baja pada jarak 4,57 m. Persyaratan kedua adalah berat maksimum pecahan terbesar. Berat maksimum pecahan adalah sebesar 1-10, 3-15, 2-8, dan 0,5-5 grain berturut – turut untuk proyektil dengan berat maksimum 25, 20, 15, 10, 7,5; dan 5 grain. Selain mengurangi resiko *ricochet*, proyektil *frangible* juga mengurangi resiko kesehatan dan

lingkungan yang disebabkan oleh timbal. Berkurangnya resiko kesehatan dan lingkungan ini karena proyektil *frangible* tidak mengandung timbal (*lead free*). (Morse et al., 2017)



Gambar 2.3 Proyektil frangible dan pecahannya

Dalam pemilihan material proyektil *frangible* bebas timbal, salah satu faktor yang sangat penting adalah densitas. Proyektil perlu memiliki densitas yang cukup tinggi dan mendekati timbal. Dengan densitas yang tinggi, maka proyektil akan mampu menjaga tekanan dalam laras senjata pada saat penembakan. Tekanan ini sangat krusial, karena tekanan ini akan menjalankan mekanisme penembakan pada senjata. Kriteria lain yang diperlukan agar peluru dapat menjalankan mekanisme penembakan pada senjata adalah jumlah energi yang dapat berpindah dari peluru ke mekanisme penembakan.

Pada penggunaan proyektil dengan densitas yang lebih rendah akan menghasilkan transfer energi yang lebih rendah. Rendahnya energi yang ditransfer ini kemungkinan besar tidak cukup untuk menjalankan mekanisme penembakan pada senjata. Agar mekanisme penembakan berfungsi dengan baik, diperlukan proyektil dengan densitas yang cukup tinggi. (Belanger & Potvin, 1993)

Karakteristik lain yang diperlukan oleh proyektil *frangible* adalah kekuatan. Proyektil *frangible* membutuhkan kekuatan agar dapat tetap mempertahankan bentuknya pada saat proses lanjutan dalam pembuatan proyektil *frangible*, pengisian pada selongsong, dan pada saat penyimpanan. (Morse et al., 2017) Selain itu, dengan kekuatan yang baik proyektil akan mampu memertahankan rigiditasnya pada saat penembakan. Hal ini akan mencegah proyektil untuk pecah pada saat proyektil ditembakkan

Proyektil *frangible* perlu memiliki sifat mekanik dan sifat fisik tertentu agar dapat ditembakkan dengan baik. Sifat dan karakteristik proyektil *frangible* ditunjukkan pada **Tabel 2.1**

Tabel 2.1 Sifat mekanik proyektil frangible

| Karakteristik | Nilai | Referensi |
|------------------------------|-------------|---------------------------|
| Densitas (g/cm^3) | 5,7-5,8 | (Belanger & Potvin, 1993) |
| Kekuatan geser (MPa) | 89,63 | (Joys et al., 2012) |
| Kekerasan permukaan (HRB) | 21,6 – 22,9 | (Banovic et al., 2008) |
| Kekuatan tekan (MPa) | 68,7 | (Rydlo, 2010) |

Untuk menghasilkan proyektil, terdapat beberapa material yang dapat digunakan. Material tersebut adalah sebagai berikut:

2.1.1 Tembaga (Cu)

Tembaga merupakan salah satu logam paling awal yang digunakan oleh manusia. Tembaga murni memiliki sifat sangat lunak dan ulet sehingga sangat mudah untuk diberi perlakuan *cold worked*. Sifat lain yang menonjol dari tembaga adalah ketahanan korosi yang sangat baik pada berbagai kondisi lingkungan, resistifitas listrik yang rendah, dan konduktifitas panas yang sangat baik. (Groover, 2013) Untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan tembaga, maka dilakukan penambahan unsur paduan seperti *zinc*, aluminium, silikon, dan nikel. Sifat fisik dan mekanik tembaga disajikan pada **Tabel 2.2** (Nunes et al., 1990; Yu et al., 2015)

Tabel 2. 2 Sifat Fisik dan mekanik tembaga

| Sifat | Keterangan |
|---------------------------------------|------------|
| Struktur kristal | FCC |
| Densitas (g/cm ³) | 8.96 |
| Titik leleh (°C) | 1.981 |
| Kekakuan (GPa) | 110 |
| Kekuatan Tarik (MPa) | 221 - 455 |
| <i>Yield strength</i> (MPa) | 69 - 365 |
| Kekerasan (VHN) | 107 |
| Koefisien muai (10 ⁻⁶ m/K) | 17 |

2.1.2 Besi (Fe)

Besi (Fe) merupakan unsur transisi yang tergolong sebagai material logam. Besi merupakan salah satu unsur yang paling banyak terdapat pada kerak bumi, yakni sebesar 4.3%. Fe memiliki massa atom sebesar 55,847 gram/mol. Dalam keadaan murni, besi bersifat relatif lunak dan memiliki kekuatan yang rendah sehingga jarang digunakan dalam keadaan murni. Untuk dapat memenuhi persyaratan kekuatan dalam aplikasi di berbagai bidang, besi dipadukan dengan karbon untuk menghasilkan baja. Selain itu, besi juga bersifat magnetik¹⁴. Sifat lain yang dimiliki oleh besi adalah sifat *allotropic*. Dengan sifat *allotropic* ini, besi dapat mengalami perubahan fasa yang disertai perubahan struktur kristal besi. Pada temperatur ruangan, besi berada dalam fasa ferrit (besi α) (Bramfitt et al., 2015). Adapun sifat mekanik dan fisik besi disajikan pada **Tabel 2.3** sebagai berikut

Tabel 2. 3 Sifat fisik dan mekanik besi

| Sifat | Keterangan |
|---|------------|
| Struktur kristal | FCC |
| Densitas (g/cm ³) | 7,87 |
| Titik leleh (°C) | 1.535 |
| Kekakuan (GPa) | 200 |
| Kekuatan Tarik (MPa) | 540 |
| <i>Yield Strength</i> (MPa) | 50 |
| Kekerasan (HRB) | 79 |
| Koefisien muai (10 ⁻⁶ .K ⁻¹) | 12 |

2.1.3 Ferronikel (FeNi)

Ferronikel merupakan paduan antara besi (Fe) dengan nikel (Ni) yang diperoleh dari proses reduksi bijih nikel tipe laterit seperti *serpentine*, *limonite*, maupun *garnierite*. Proses

reduksi dengan metode *smelting*, akan menghasilkan ferronikel dalam bentuk ingots maupun *water-granulated beans*. Adapun komposisi *ferronickel* disajikan pada **Tabel 2.4** (Crundwell et al., 2011)

Tabel 2. 4 Komposisi Ferronikel

| Unsur | Ni | Co | Si | S | C | Fe |
|------------------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| Kadar (%) | 20 - 40 | 0.3 -1,0 | 0,03-0,05 | 0,02-0,05 | 0,03-0,05 | <i>Balance</i> |

Ferronikel banyak digunakan sebagai bahan dasar pembuatan baja tahan karat (*stainless steel*) maupun baja paduan nikel lainnya. Ferronikel memiliki sifat pada **Tabel 2.5** sebagai berikut (Bramfitt et al., 2015)

Tabel 2. 5 Sifat fisik dan mekanik ferronikel

| Sifat | Keterangan |
|------------------------------------|---------------|
| Struktur kristal | FCC |
| Densitas (g/cm³) | 8,1 |
| Titik Leleh (°C) | 1.430 – 1.460 |
| Kekuatan Tarik (MPa) | 72 |
| Yield Strength (MPa) | 37 |
| Kekerasan (HRB) | 80 |

2.1.4 Stainless Steel 304L

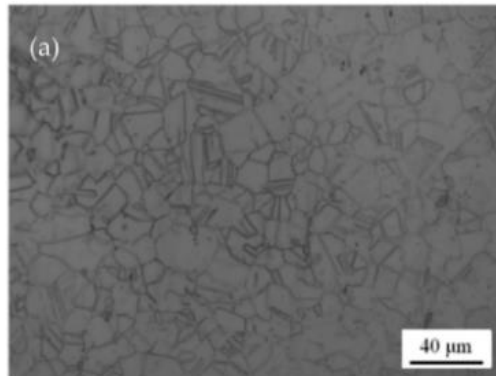
Stainless steel (baja tahan karat) merupakan baja paduan yang mengandung unsur kromium sebesar 11% atau lebih. Sifat tahan karat pada baja ini diperoleh dari pembentukan lapisan tipis *chromium oxide* pada permukaan baja. Lapisan tipis oksida ini terbentuk karena adanya oksigen pada udara bebas. Elemen paduan lain yang ditambahkan pada baja tahan karat meliputi molibdenum, tembaga, titanium, aluminium, silikon, niobium, nitrogen, dan selenium. Komposisi karbon pada baja tahan karat berkisar antara 0.03% hingga lebih dari 1.0%. Komposisi karbon yang rendah pada baja tahan karat bertujuan untuk mengoptimalkan ketahanan korosi. (Bramfitt et al., 2015)

Stainless steel 304 merupakan baja tahan karat yang termasuk dalam *austenitic stainless steel*. Pada temperatur ruangan, SS 304L terdiri atas fasa *austenite* yang memiliki struktur kristal *face-centered cubic* (FCC). SS 304L memiliki komposisi pada **Tabel 2.6** sebagai berikut

Tabel 2.6 Komposisi stainless steel 304L

| Unsur | C | Mn | Si | Ni | P | Cr |
|------------------|------|------|------|----------|-------|-----------|
| Kadar (%) | 0.08 | 2.00 | 1.00 | 8.0-10.5 | 0.045 | 18.0-20.0 |

Dengan kandungan nikel yang cukup tinggi (8-10 wt%), SS 304L memiliki fasa *austenite* pada temperatur kamar. Hal ini diakibatkan karena nikel memiliki sifat penstabil *austenite*. Dengan fasa *austenite*, SS 304 bersifat *non magnetic*, memiliki sifat *cryogenic* yang baik, dan dapat dikeraskan dengan *cold working*. Mikrostruktur dan sifat SS 304L adalah sebagai berikut: (Aggen et al., 1993). Adapun sifat fisik dan mekanik SS304L disajikan pada **Tabel 2.7** sebagai berikut



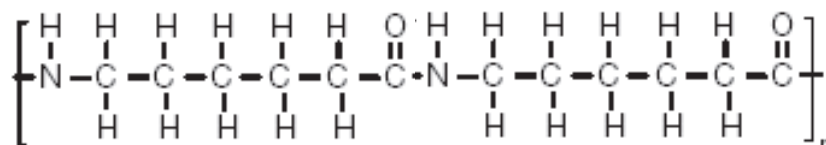
Gambar 2. 4 Mikrostruktur stainless steel 304L

Tabel 2. 7 Sifat fisik dan mekanik stainless steel 304L

| Sifat | Keterangan |
|---------------------------------------|------------|
| Struktur Kristal | FCC |
| Densitas (g/cm ³) | 8,0 |
| Titik Leleh (°C) | 1.535 |
| Kekakuan (GPa) | 200 |
| Kekuatan Tarik (MPa) | 540 - 750 |
| Yield Strength (MPa) | 230 |
| Kekerasan (HRB) | 80 |
| Koefisien muai (10 ⁻⁶ m/K) | 16,5 |

2.1.5 Poliamida 6

Poliamida merupakan polimer sintesis yang mengandung ikatan amida pada rantai karbonnya. Poliamida 6 merupakan polimer yang diperoleh dari *ring opening polymerization* dari *caprolactam* yang terdiri dari 6 atom karbon pada struktur sikliknya. Struktur ini disebut sebagai *poly(hexano-6-lactam)* atau poliamida 6. Polaritas pada grup amida dan tarikan (*attraction*) yang kuat antara rantai karbon menyebabkan poliamida 6 memiliki ketangguhan, kekuatan impak, ketahanan abrasi, dan ketahanan terhadap pelarut yang sangat baik. (Kim et al., 2019) Poliamida 6 merupakan polimer berjenis termoplastik dan memiliki struktur *semi crystalline*. Pada struktur *semi crystalline* ini, sebagian atom penyusun poliamida 6 tidak tersusun dalam struktur yang teratur. Dengan struktur semi kristalin, poliamida 6 memiliki ketahanan korosi dan pelarut yang baik. Sifat lain yang diperoleh pada struktur semi kristalin adalah kemampuan untuk memertahankan sifat mekanik pada temperatur yang melebihi temperatur transisi gelas (T_g) (Bramfitt et al., 2015). Adapun struktur monomer Poliamida 6 adalah sebagai berikut:



Gambar 2.5 Struktur molekul poliamida 6

Dengan struktur semi kristalin, PA6 memiliki 2 temperatur transformasi yaitu temperatur transisi gelas (T_g) dan temperatur leleh (T_m). T_g merupakan temperatur terjadinya perubahan reversible sifat polimer dari kaku, keras, dan getas menjadi *rubbery* dan bersifat elastis. Pada temperatur dibawah T_g , atom – atom pada rantai polimer sangat sulit untuk bergerak. Pemanasan hingga melebihi T_g akan memberikan lebih banyak energi pada atom – atom polimer, sehingga terjadi getaran pada atom – atom polimer dan jarak antar atom semakin renggang. Dengan jarak yang rendah, atom – atom polimer akan semakin mudah bergerak sehingga menghasilkan sifat *rubbery* dan elastis. Dengan adanya kristal, PA6 memiliki temperatur leleh yang tetap. Struktur atom pada bagian kristalin memiliki susunan yang lebih teratur sehingga pergerakan atom pada molekul polimer lebih sulit dibandingkan molekul *amorphous*. Pergerakan atom pada molekul polimer kristalin baru dapat terjadi setelah pemanasan yang melebihi temperatur leleh polimer (Giles et al., 2005). Poliamida 6 memiliki *shrinkage* yang cukup tinggi (0,7 – 1,5%). *Shrinkage* yang cukup tinggi ini diakibatkan oleh struktur atom *semi kristalin* pada poliamida 6. Selain itu, poliamida 6 dapat menyerap air (*water absorption*) sebesar 1,6-1,9%. Hal lain yang menjadi kekurangan dari poliamida adalah ketahanan terhadap api (*fire resistance*). (Groover, 2013) Dengan sifat yang dimiliki, poliamida 6 banyak digunakan sebagai *bearing*, roda gigi, poros, *bushing*, *handle*, dan pelapis (*jacketing*) untuk kawat dan kabel. Adapun sifat PA6 disajikan pada **Tabel 2.8** sebagai berikut (Biron, 2007; Ullman, 2016)

Tabel 2. 8 Sifat fisik dan mekanik poliamida 6

| Sifat | Keterangan |
|--|------------|
| Densitas (cm^3) | 1,14 |
| Kekakuan (GPa) | 0,8-2,9 |
| Kekuatan Tarik (MPa) | 50-95 |
| <i>Yield Strength</i> (MPa) | 50-90 |
| Pertambahan Panjang Saat Patah (%) | 200-300 |
| Temperatur Transisi Gelas ($^{\circ}\text{C}$) | 41 |
| Temperatur Leleh ($^{\circ}\text{C}$) | 228 |

2.2 Material Komposit

Komposit merupakan material multifasa dengan sifat yang merupakan penggabungan dari sifat penyusun material komposit. Penyusun material komposit merupakan 2 material atau lebih yang berbeda secara kimiawi dan dipisahkan oleh antarmuka (*interface*) maupun interfasa yang dapat dibedakan (*distinct*) (X. S. Yi et al., 2017).

Material komposit terdiri dari 2 fasa, yakni matriks dan penguat (*reinforce*). Matriks merupakan fasa yang bersifat kontinyu dan mengelilingi fasa penguat. Matriks berfungsi untuk menyebarkan beban secara merata pada struktur material komposit dan menghubungkan fasa penguat sehingga membentuk struktur yang homogen. Jenis material yang dapat digunakan sebagai matriks meliputi logam, polimer, dan keramik. Penguat (*reinforcement*) berfungsi untuk meningkatkan sifat fisik atau mekanik seperti kekakuan, kekerasan, kekuatan tarik, kekuatan impak, kestabilan dimensi, dan densitas. Jenis material yang dapat digunakan sebagai penguat adalah logam, polimer, dan keramik (Kulshreshtha, 2002).

Komposit dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis matriks dan jenis penguat. Berdasarkan jenis matriks, terdapat 3 jenis komposit yaitu:

2.2.1 Polymer Matrix Composite (PMC)

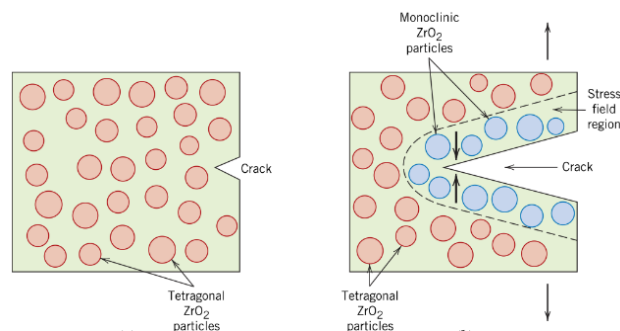
Polymer matrix composite terdiri dari fasa penguat yang diskontinyu dan tersebar secara merata pada fasa matriks yang berupa polimer. Fasa penguat memiliki sifat kuat dan kaku serta memiliki rasio kekuatan dan kekakuan terhadap berat yang tinggi. Selain itu, struktur PMC memiliki ketahanan *fatigue* yang lebih baik, ketangguhan yang lebih tinggi, dan ketahanan *creep* yang lebih tinggi dibandingkan polimer biasa. Polimer pada matriks memiliki ketangguhan yang lebih tinggi dibandingkan fasa penguat. Penguat pada PMC dapat berupa serat maupun partikel dengan persentase 10-60 vol%.

2.2.2 Metal Matrix Composite (MMC)

Metal matrix composite merupakan material komposit dengan fasa matriks yang terbuat dari logam ulet. Penambahan fasa penguat (*reinforcement*) dapat meningkatkan *specific stiffness*, *specific strength*, ketahanan abrasi, ketahanan *creep*, konduktivitas thermal, dan stabilitas dimensi. Selain itu, penambahan fasa penguat juga meningkatkan temperatur kerja material sehingga lebih tinggi dibandingkan logam pada matriks. Dibandingkan PMC, MMC memiliki temperatur operasi yang lebih tinggi, tidak mudah terbakar (*nonflammability*), dan memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap cairan organik. Namun, MMC lebih mahal daripada PMC.

2.2.3 Ceramic Matrix Composite (CMC)

Ceramic matrix composite merupakan material komposit yang menggunakan material keramik sebagai fasa matriks. Material komposit ini digunakan pada temperatur kerja yang sangat tinggi dengan tegangan yang sangat tinggi seperti komponen pada turbin jet. CMC memiliki kelemahan, yaitu *fracture toughness* yang rendah (0,9- 4,5 ksi). Namun, *fracture toughness* pada CMC dapat ditingkatkan secara signifikan dengan penambahan partikulat, serat, maupun *whiskers*. Ketiga *filler* ini bekerja secara *embedded* pada matriks keramik. Penambahan *filler* ini meningkatkan *fracture toughness* hingga mencapai 5,5-18 ksi. Penambahan *filler* akan menghambat perambatan retakan (*crack*) yang terjadi pada matriks keramik (Callister & Rethwisch, 2015).



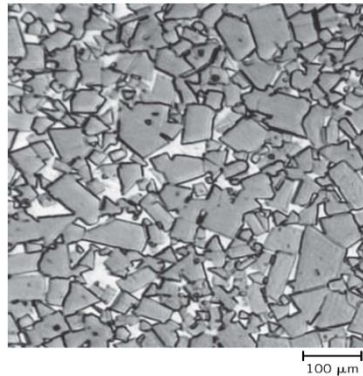
Gambar 2. 6 Mekanisme *transformation toughening* pada CMC

Sedangkan berdasarkan jenis penguat, material komposit diklasifikasikan sebagai berikut

2.2.4 Particle Reinforced Composite

Penguat (*reinforcement*) pada komposit ini berbentuk *equiaxed*, dimana ukuran partikel mendekati sama pada semua arah. Partikel penguat memiliki kekerasan dan kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan matriks. Partikel penguat ini akan menghambat pergerakan pada matriks. Sifat mekanik pada komposit ini dipengaruhi oleh kekuatan ikatan pada antarmuka matriks dengan partikel penguat. *Particulate reinforced composite* diklasifikasikan kembali

berdasarkan ukuran, yakni *large-particle* dan *dispersion-strengthened composite*. *Large particle composite* menggunakan partikulat yang berukuran lebih dari 100 nm sebagai partikel penguat. *Dispersion strengthened composite* menggunakan partikulat berukuran 10-100 nm sebagai partikel penguat. Dengan ukuran yang sangat kecil, partikel ini meningkatkan sifat mekanik dengan menghambat deformasi pada tingkat atom maupun molekul. (Callister & Rethwisch, 2015)



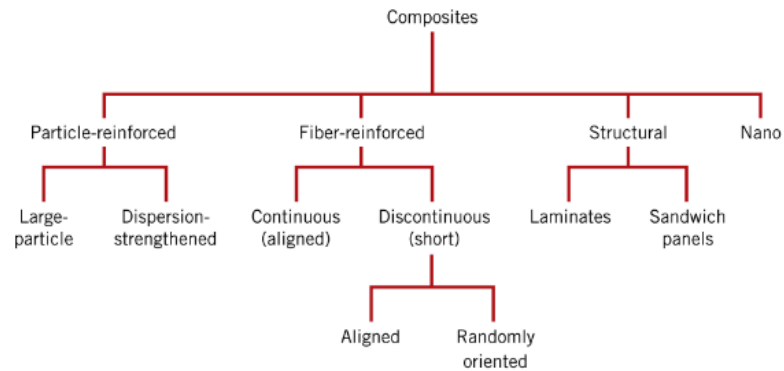
Gambar 2.7 Co-WC *particle reinforced composite*. Daerah gelap merupakan *filler WC* dan daerah terang adalah matriks kobalt

2.2.5 Fiber Reinforced Composite

Fasa penguat (*reinforcement*) pada komposit ini merupakan serat (*fiber*). Serat merupakan penguat dengan penampang lingkaran yang berdiameter 0,0025 – 0,13 mm dan berbentuk memanjang. Terdapat 2 macam serat, yakni *continuous fiber* dan *discontinuos fiber*. *Continuous fiber* memiliki bentuk yang sangat panjang dan tidak terputus. *Discontinuos fiber* merupakan bagian atau potongan dari *continuous fiber*. *Discontinuos fiber* memiliki rasio panjang terhadap diameter (L/D) ≈ 100 . Jenis *discontinuos fiber* yang banyak digunakan adalah *whiskers*. *Whiskers* memiliki diameter minimal 0,001 mm dan memiliki kekuatan yang sangat tinggi. Penguatan dengan serat menghasilkan peningkatan kekuatan tertinggi untuk struktur komposit pada arah yang sama dengan arah orientasi serat penguat. (Groover, 2013).

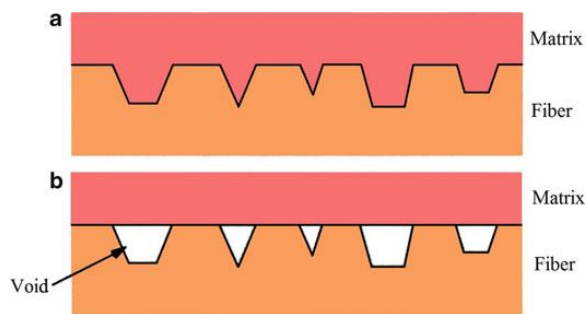
2.2.6 Structural Composite

Structural composite merupakan komposit yang terdiri dari sejumlah lapisan (*multi-layered*) *fiber reinforced composite*. Struktur ini disebut sebagai laminat. Lapisan pada laminat disusun dengan orientasi sudut yang berbeda untuk memaksimalkan kekuatan pada orientasi yang berbeda. Jenis *structural composite* lainnya adalah *sandwich panels*. Pada *sandwich panels*, bagian tengah susunan lamina komposit akan diisi oleh *foam* maupun struktur *honeycomb* (Callister & Rethwisch, 2015).



Gambar 2.8 Klasifikasi material komposit berdasarkan fasa penguat (*reinforcement*)

Penambahan penguat meningkatkan sifat mekanik material komposit. Peningkatan sifat mekanik disebabkan karena adanya ikatan pada antarmuka (*interface*) maupun interfasa (*interphase*) antara penguat dan matriks. Ikatan ini dapat berupa ikatan kimia (*chemical bonding*), ikatan fisik (*physical bonding*), maupun ikatan mekanik. Ikatan mekanik pada *interface* matriks dengan penguat terjadi karena adanya *interlocking effect* antara permukaan matriks dan penguat. Energi ikatan pada ikatan mekanik lebih rendah dibandingkan ikatan kimia. Agar terjadi ikatan mekanik, matriks harus menutup seluruh permukaan penguat. Selain itu, ikatan mekanik akan semakin baik dengan *wettability* matriks yang baik. Namun apabila matriks tidak mampu menutup permukaan penguat, akan terjadi rongga atau *void*. Ikatan mekanik dapat dilihat pada **Gambar 2.8** sebagai berikut:



Gambar 2.9 Ikatan mekanik pada antarmuka komposit (a) ikatan mekanik ideal (tanpa *void*) dan (b) ikatan mekanik dengan *void*

Salah satu faktor yang memengaruhi kekuatan ikatan pada antarmuka matriks-penguat adalah *wettability*. *Wettability* adalah kemampuan *liquid* untuk menyebar pada permukaan benda padat. Tingkat *wettability* dapat ditentukan dari sudut yang terbentuk antara tetesan *liquid* dengan permukaan padat. Sudut kontak (θ) yang kecil menandakan *wettability* yang baik, dimana $\theta = 0^\circ$ menandakan *wettability* sempurna dan $\theta = 180^\circ$ menandakan tidak ada *wetting* yang terjadi. Sedangkan $0 < \theta < 180^\circ$ menandakan *partial wetting*. (Chawla, 2020)

Sifat mekanik pada komposit dapat ditentukan oleh persentase jumlah fasa matriks dan penguat yang menyusun material komposit. Modulus elastisitas pada komposit dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Callister & Rethwisch, 2015)

$$E_c(u) = E_m V_m + E_f V_f \quad (2.1)$$

$$E_c(l) = \frac{E_m V_m}{V_m E_f + V_f E_m} \quad (2.2)$$

Dimana

$E_c(u)$ = Batas atas modulus elastisitas (GPa)

E_m = Modulus elastisitas matriks (Gpa)

V_m = Fraksi volume matriks

E_f = Modulus elastisitas penguat (Gpa)

V_f = Fraksi volume penguat

$E_c(l)$ = Batas bawah modulus elastisitas (Gpa)

Penghitungan massa matriks dan penguat dalam suatu komposit dapat dilakukan dengan rumus *Rule of Mixture* (ROM) yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut

$$\rho_c = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \quad (2.3)$$

Dimana:

ρ_c = densitas komposit

ρ_m = densitas matriks

ρ_f = densitas penguat

V_m = fraksi volume matriks

V_f = fraksi volume penguat

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.4)$$

Dimana:

ρ = densitas

m = massa

v = volume

Dengan menggunakan persamaan 2.2 maka dapat diperoleh fraksi massa matriks dan penguat dengan rumus sebagai berikut:

$$M_m = a \times m_c \text{ dan } m_m = b \times m_c \quad (2.5)$$

Dimana:

m_m = massa matriks

m_f = massa penguat

m_c = massa komposit

a = fraksi massa matriks

b = fraksi massa penguat

Massa teoritis dari matriks dan penguat dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$m_m = a \frac{\rho_m \cdot \rho_f}{a \cdot \rho_f + b \cdot \rho_m} \cdot V_c \quad (2.6)$$

$$m_f = b \frac{\rho_m \cdot \rho_f}{a \cdot \rho_f + b \cdot \rho_m} \cdot V_c \quad (2.7)$$

Dimana:

V_c = volume komposit

a = fraksi massa matriks

b = fraksi massa penguat

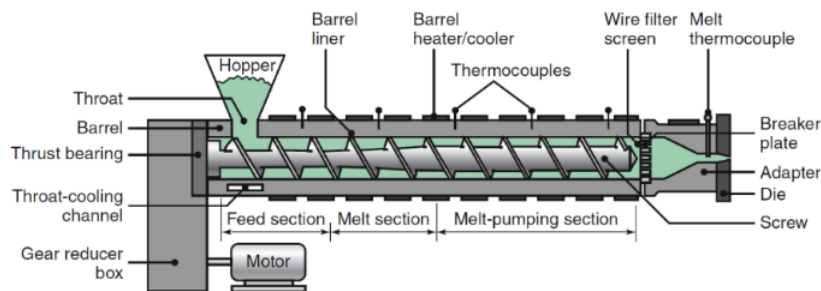
2.3 Ekstrusi

Metode *extrusion* menghasilkan sebuah produk dari *feed* dengan melelehkan *feed* dan menginjeksikan *feed* pada cetakan (*die*). *Feed* yang digunakan pada metode ini dapat berupa

pellet, granules, maupun serbuk. *Feed* akan ditampung pada *hopper* dan dialirkan menuju *barrel* untuk diekstrusi. Pada saat berada dalam *barrel*, *feed* akan dipanaskan dengan *heater* hingga mencair. Panas yang digunakan untuk melelehkan *feed* tidak hanya berasal dari *heater* saja, namun juga berasal dari proses pencampuran oleh *screw*. Untuk mencegah *overheating* pada polimer, terdapat sistem pendingin eksternal untuk mendinginkan *barrel*. *Barrel* dilengkapi dengan *helical screw* yang mencampur *feed* dan mengalirkan *feed* menuju cetakan. *Screw* yang terdapat pada *barrel* juga berfungsi untuk menghasilkan tekanan pada *barrel*. Secara garis besar, *screw* terdiri dari tiga bagian sebagai berikut:

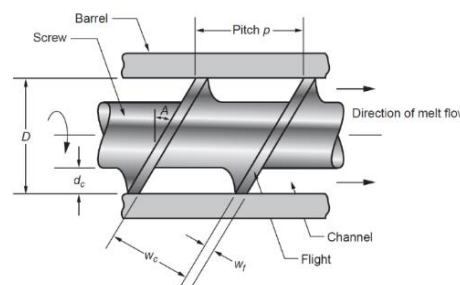
1. *Feed section*: mengalirkan *feed* dari *hopper* menuju bagian tengah *barrel*
2. *Melt section*: bagian dimana *feed* akan dipanaskan
3. *Metering/pumping section*: bagian dimana terjadi gaya gesek yang besar dan *feed* mencair

Feed akan mengalir melewati *barrel* menuju *die opening* dengan dorongan dari *screw extruder* yang berputar. *Screw* berputar pada kecepatan 60 rpm. Sebelum polimer cair mencapai *die*, polimer cair akan melewati *screen pack*, sebuah bagian yang terdiri dari jaring – jaring dengan lubang pada bagian tengahnya. Untuk mempertahankan posisinya, *screen pack* ditahan oleh *breaker plate*. *Screen pack* memiliki beberapa fungsi, yaitu menyaring polimer yang belum mencair (*polymer lump*), meningkatkan tekanan pada *metering zone*, dan meluruskan aliran polimer. (Groover, 2013) Bagian dan komponen yang terdapat pada mesin ekstrusi dapat dilihat pada **Gambar 2.9** sebagai berikut: (Kalpakjian, SeropeSchmid, 2010)



Gambar 2.10 Mesin ekstrusi

Sebagian besar *barrel* pada mesin extruder memiliki rasio panjang terhadap diameter (L/D) sebesar 10 hingga 30. *Barrel* dengan rasio L/D tinggi digunakan pada polimer *thermoplastic*, sedangkan *barrel* dengan rasio L/D rendah digunakan untuk elastomer. Di dalam *barrel* terdapat *screw* yang terdiri dari beberapa bagian seperti pada **Gambar 2.10**



Gambar 2.11 *Screw* pada *barrel* mesin ekstrusi

Proses ekstrusi pada *screw* dipengaruhi oleh bentuk dan kecepatan putar *screw*. *Screw* terdiri dari ulir yang disebut sebagai *flight* yang memiliki ruang agar polimer cair dapat mengalir diantara *flight*. Ruang diantara dua *flight* ini disebut sebagai *channel*. *Channel* memiliki lebar w_c dan kedalaman d_c . Pada saat *screw* berputar, *flight* akan mendorong material maju melewati

channel dari ujung *hopper* menuju cetakan (*die*). Untuk mencegah polimer cair mengalir kembali menuju *hopper*, selisih diameter *barrel* (D) dan *flight* dirancang sangat kecil (0,05 mm). *Flight* memiliki lebar w_f dan terbuat dari baja yang telah dikeraskan. Penggunaan baja yang telah dikeraskan bertujuan untuk mengurangi aus (*wear*) akibat gesekan antara *flight* dengan *barrel*. *Screw* memiliki *pitch* yang ukurannya hampir sama dengan diameter *barrel* (D). Sudut *flight* (α) merupakan sudut *helix* pada *screw* dan dapat dihitung dengan persamaan 2.8

$$\tan \alpha = \frac{p}{\pi D} \quad (2.8)$$

Dimana:

- α = sudut *helix*
- p = *pitch* pada *screw*
- D = diameter *barrel*

Peningkatan tekanan pada polimer cair yang berada pada tiga bagian *barrel* sebagian besar dipengaruhi oleh kedalaman *channel* d_c . Pada **Gambar 2.10**, d_c berukuran relatif besar pada bagian *feed* untuk mengalirkan sejumlah besar *feed* ke dalam *barrel*. Pada *compression section*, kedalaman d_c akan berkurang secara bertahap sehingga terjadi peningkatan tekanan pada *feed* polimer saat mulai meleleh. Pada *metering section*, kedalaman d_c cukup dangkal sehingga tekanan menjadi maksimum. Hal ini terjadi karena aliran polimer cair tertahan pada ujung *barrel*. Ketiga bagian *barrel* memiliki panjang yang hampir sama dan sesuai untuk polimer yang meleleh secara bertahap seperti *low density polyethylene* (LDPE). Tiap jenis polimer memiliki panjang optimal yang berbeda. Pada polimer berjenis kristalin seperti *nylon*, proses meleleh terjadi secara tiba – tiba pada temperatur leleh tertentu. Oleh karena itu, *melt section* pendek dapat digunakan. Sedangkan pada polimer *amorphous* seperti PVC diperlukan *melt section* yang panjang. Untuk mengakomodasi berbagai jenis polimer yang digunakan, maka dapat digunakan *general purpose screw*. (Groover, 2013)

Terdapat beberapa faktor yang dapat memengaruhi proses ekstrusi dan produk hasil ekstrusi. Beberapa faktor yang dapat memengaruhi proses ekstrusi dan hasilnya adalah sebagai berikut:

1. Temperatur *die*
2. Temperatur *barrel*
3. Temperatur polimer cair
4. Tekanan polimer cair
5. *Motor load*
6. Daya yang digunakan pada heater (Giles et al., 2005)

2.4 Feedstock

Feedstock pada proses *injection molding* didefinisikan sebagai campuran serbuk logam dengan polimer. Persentase binder pada *feedstock* berkisar 35 – 50 vol% (Liu et al., 2003). Kualitas *feedstock* yang diinjeksikan pada *mold cavity* merupakan salah satu faktor krusial dalam teknologi *metal injection molding* (MIM). Karena merupakan salah satu faktor krusial, kualitas *feedstock* memengaruhi sifat pada produk hasil MIM. Penentuan komposisi *feedstock* harus memenuhi persyaratan pada beberapa aspek seperti *mixing torque* selama proses pencampuran (Nm), *critical powder loading* (%vol), viskositas *feedstock* (Pa.s), dan homogenitas campuran *feedstock*. Pada proses preparasi *feedstock*, polimer dan serbuk logam yang dipilih akan dicampurkan secara uniform pada temperatur yang melebihi temperatur leleh polimer.



Gambar 2.12 *Feedstock injection molding*

Serbuk logam merupakan material utama pada *feedstock*. Jenis logam yang banyak digunakan pada *feedstock* adalah stainless steel, terutama pada aplikasi biomedik. Selain *stainless steel*, logam lain yang sedang dikembangkan penggunaannya pada *feedstock* adalah titanium. Serbuk titanium digunakan sebagai material alat operasi, bidang dirgantara, dan implant biomedik. Paduan logam lain yang sedang dikembangkan sebagai *feedstock* adalah Inconel 718 dengan ketahanan korosi yang tinggi, ketahanan oksidasi yang tinggi, dan mampu untuk mempertahankan kekuatan pada temperatur tinggi.

Polimer pada *feedstock* berfungsi untuk membantu mengalirkan partikel serbuk menuju *die cavity* pada *mold*, melapisi permukaan serbuk, mengisi celah diantara partikel serbuk, dan membantu proses pencampuran (mixing) (Moon et al., 2021).

Feedstock harus memiliki komposisi yang homogen dan memiliki perilaku *pseudo-plastic*. Dengan perilaku pseudo-plastik, viskositas *feedstock* akan berkurang seiring dengan peningkatan *shear rate*. Penurunan viskositas ini disebabkan karena adanya deformasi makromolekul pada polimer, sehingga menurunkan resistensi untuk mengalir (Malkin & Isayev, 2017). *Shear rate* pada *injection molding* berkisar antara $10 - 10.000 \text{ s}^{-1}$. Pada rentang *shear rate* ini, viskositas maksimum adalah 100 Pa.s pada temperatur *molding* (German, 2016; Virdhian et al., 2020). Viskositas *feedstock* dapat dihitung dari viskositas relative *feedstock*. Viskositas relative adalah rasio viskositas *feedstock* terhadap viskositas polimer yang digunakan. Adapun viskositas relative *feedstock* dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Shaw, 2012)

$$\eta_r = \left[1 - \frac{\theta}{\theta_{max}} \right]^{-2} \quad (2.10)$$

Dimana:

η : viskositas relative *feedstock*

θ : fraksi volume serbuk (powder loading)

θ_{max} : fraksi volume serbuk maksimum (*maximum powder loading*)

Adapun sifat dan karakteristik *feedstock* PA6/Stainless steel dan PA6/Baja komersil adalah sebagai berikut (Technologies, 2018; Tehcnologies, 2018)

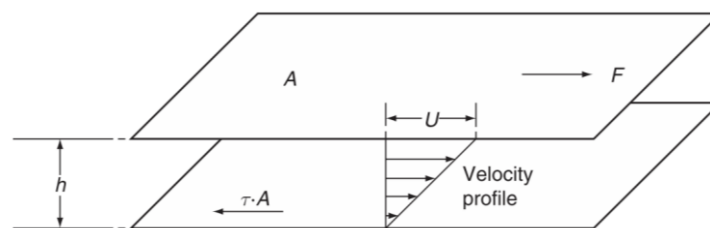
Tabel 2.9 Sifat dan karakteristik *feedstock* PA6/SS dan PA6/Baja

| Karakteristik | Feestock PA6/SS | PA6/Fe |
|--------------------------------------|-----------------|--------|
| Densitas (g/cm ³) | 4,0 | 2,5 |
| Kekuatan tarik (MPa) | 25 | 31,0 |
| Flexural modulus (MPa) | 7.500 | 2.800 |
| Elongation at break (%) | 0,5 | 10,0 |
| Izod impact strength, notched (kJ/m) | 5,0 | 7,5 |

Salah satu jenis cacat permukaan yang dapat terjadi pada feedstock adalah *sharkskin*. Pada jenis cacat ini, terdapat sebagian permukaan *feedstock* yang seakan – akan tertarik sehingga menimbulkan tekstur kasar. *Sharkskin* disebabkan karena tingginya gaya gesek pada ujung *nozzle barrel*. Pada saat akan keluar dari *nozzle*, terdapat bagian permukaan *feedstock* yang tertahan pada ujung *nozzle*, sedangkan bagian tengah/dalam *feedstock* tetap bergerak keluar. Tertahannya sebagian permukaan *feedstock* ini menimbulkan kontur seperti gelombang pada permukaan *feedstock*. *Sharkskin* terjadi secara berkala. *Sharkskin* dapat dicegah dengan menggunakan *additive* untuk mengurangi gaya gesek pada ujung *nozzle* (Rane et al., 2020; Vergnes, 2015)

2.5 Sifat Rheologi

Rheologi didefinisikan sebagai ilmu yang mempelajari deformasi dan aliran. Rheologi melibatkan pengukuran pada aliran yang terkontrol (*controlled flow*), khususnya *viscometric flow*, dimana gradien kecepatan mendekati *uniform*. Pada aliran ini, terdapat gaya yang bekerja dimana kecepatan (*equivalent shear rate*) diukur atau sebaliknya. Salah satu sifat rheologi yang sering digunakan adalah viskositas. Viskositas didefinisikan sebagai hambatan untuk mengalir pada liquid. Pada fluida yang mengalir, kecepatan aliran fluida pada tiap lapisan akan berbeda, dimana lapisan fluida yang paling dekat dengan dinding memiliki kecepatan terendah. Adapun kecepatan tertinggi dimiliki oleh fluida pada bagian tengah. Adanya perbedaan kecepatan alir pada lapisan fluida menimbulkan gaya gesek antar lapisan fluida dengan arah yang berlawanan dengan aliran fluida, sehingga menimbulkan hambatan bagi fluida untuk mengalir. Timbulnya viskositas diilustrasikan pada **Gambar 2.13**



Gambar 2.13 Aliran fluida pada lapisan yang berbeda

Viskositas juga didefinisikan sebagai rasio shear stress terhadap shear rate. Viskositas dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut

$$\eta = \frac{\sigma_{xy}}{\dot{\gamma}} \quad (2.11)$$

Dimana:

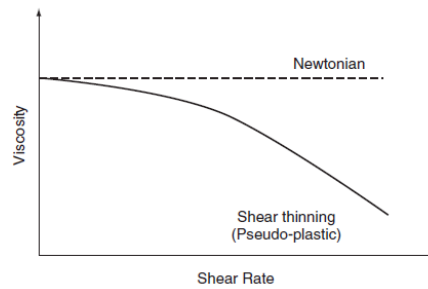
σ_{xy} = Tegangan geser

$\dot{\gamma}$ = Shear rate (s^{-1})

η = Viskositas (Pa.s)

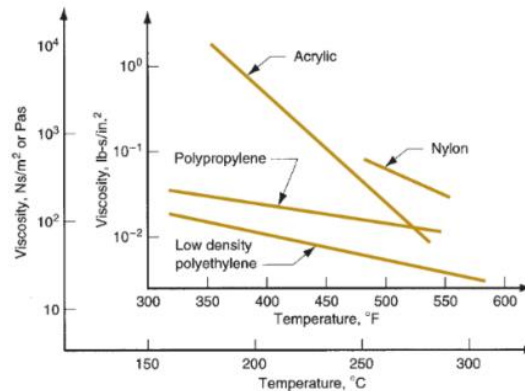
Dalam keadaan cair, polimer merupakan material viskoelastik. Viskositas geser (*shear viscosity*) pada material viskoelastik dipengaruhi oleh *shear rate*, dimana *shear viscosity* akan menurun seiring dengan peningkatan *shear rate*. Fenomena ini disebut juga sebagai *shear thinning* dan terjadi pada fluida non-Newtonian.

Fenomena *shear thinning* ini terjadi karena pelurusan (*alignments*) dan pemisahan (*disentanglement*) pada molekul penyusun rantai polimer. Dengan *shear rate* yang semakin tinggi, polimer cair akan lebih mudah mengalir melalui *die* dan peralatan manufaktur lainnya.



Gambar 2.14 Viskositas pada fluida Newtonian dan non-newtonian

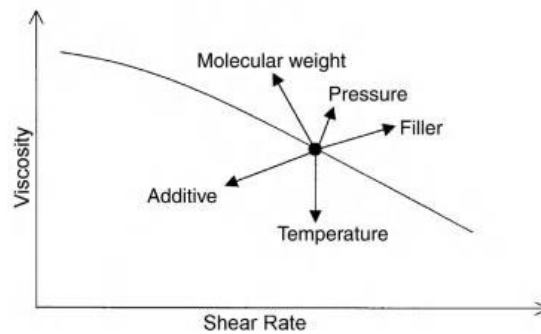
Selain *shear rate*, viskositas pada polimer cair juga dipengaruhi oleh temperatur. Viskositas akan mengalami penurunan seiring dengan peningkatan temperatur. Pengaruh temperatur terhadap viskositas dapat dilihat pada **Gambar 2.13**



Gambar 2.15 Viskositas beberapa jenis polimer pada berbagai temperatur dengan *shear rate* $103s^{-1}$

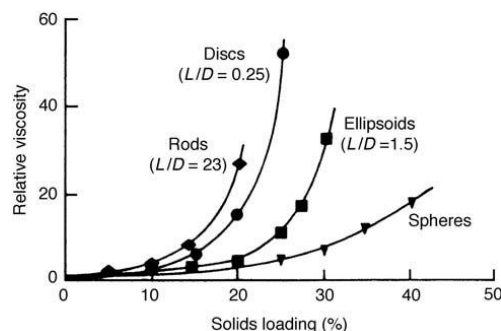
Nilai koefisien sensitivitas temperatur berkisar antara $0,01 - 0,1^{\circ}C$. Faktor lain yang memengaruhi viskositas adalah tekanan. Peningkatan tekanan sebesar 10 MPa akan meningkatkan viskositas sebesar 22%. Pengaruh tekanan terhadap viskositas hanya memiliki pengaruh yang kecil pada proses ekstrusi, namun akan berpengaruh besar pada proses *injection molding*. Penurunan tekanan pada proses ekstrusi dapat mencapai 5 MPa, sedangkan tahap *cavity filling* dalam proses *injection molding* dapat mencapai 200 MPa.

Faktor lain yang berpengaruh pada viskositas adalah penambahan *filler* dan zat aditif. Penambahan *filler* akan meningkatkan viskositas polimer secara signifikan. Penggunaan zat aditif seperti pelumas (*lubricant*) akan menurunkan viskositas. Selain itu, viskositas akan meningkat secara signifikan seiring dengan peningkatan berat molekul. Pengaruh beberapa variabel terhadap viskositas polimer ditunjukkan pada **Gambar 2.13**(Baird et al., 2012)



Gambar 2.16 Pengaruh beberapa variabel terhadap viskositas polimer

Viskositas pada *feedstock* akan meningkat dengan semakin kecilnya ukuran partikel. Serbuk dengan ukuran yang semakin kecil memiliki luas permukaan yang semakin besar, sehingga menimbulkan gesekan antar partikel dan meningkatkan viskositas. Serbuk dengan *packing density* yang tinggi membutuhkan jumlah *binder* yang lebih sedikit untuk memperoleh viskositas yang dibutuhkan untuk *injection molding*. Persentase serbuk dapat ditingkatkan dengan serbuk yang memiliki *packing density* tinggi. Bentuk partikel *filler* memiliki pengaruh yang signifikan pada viskositas relatif pada *feedstock*. Serbuk dengan bentuk tidak beraturan akan menghasilkan gesekan antar partikel yang besar dan *packing density* yang rendah, sehingga menghasilkan *feedstock* dengan viskositas yang tinggi. Serbuk berbentuk *spherical* dan berukuran kecil merupakan serbuk yang sesuai untuk *injection molding* karena memiliki *flowability* yang baik dan gesekan antar partikel yang rendah. *Critical solid loading* akan berkurang pada *feedstock* dengan serbuk yang berbentuk tidak beraturan, sedangkan *critical solid loading* yang maksimum dapat dicapai dengan serbuk berbentuk *spherical*. Aglomerasi serbuk pada *feedstock* akan meningkatkan viskositas pada *feedstock*. Peningkatan viskositas menjadi semakin besar seiring dengan membesarnya ukuran aglomerat dan jumlah partikel pada aglomerat. Pengaruh bentuk partikel terhadap viskositas relatif adalah sebagai berikut (Heaney, 2012)



Gambar 2.17 Pengaruh Bentuk partikel terhadap viskositas relatif *feedstock*

Sifat reologi lain yang sering digunakan dalam proses manufaktur polimer adalah *melt index* (MI). MI dapat juga disebut sebagai *melt flow index* (MFI) maupun *melt flow rate* (MFR). MFI mengukur nilai *volumetric flow* polimer cair selama 10 menit. *Volumetric flow* diukur pada temperatur, pembebanan, ukuran kapiler dan ukuran *reservoir* yang telah ditentukan. MFI dinyatakan dalam g/10 min. (Malkin & Isayev, 2017) Pengukuran MFI dapat dilakukan dengan *oscillating plate rheometry* maupun *capillary rheometry*. (Wagner, 2014) Adapun standard yang digunakan dalam pengukuran MFI adalah ASTM D-1238.

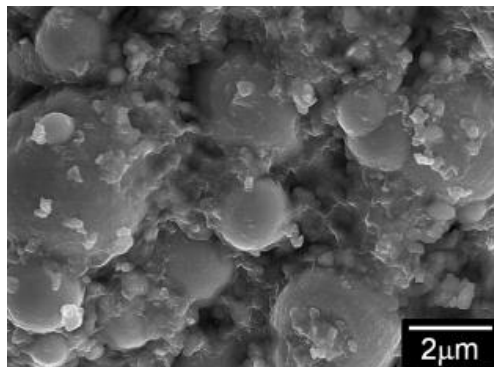
Melt index yang rendah menunjukkan bahwa polimer memiliki berat molekul yang tinggi dan viskositas yang tinggi. Sedangkan *melt index* yang tinggi menunjukkan polimer memiliki

berat molekul yang rendah dan viskositas yang rendah. Polimer yang sesuai untuk proses ekstrusi memiliki indeks MFI kurang dari 12, sedangkan indeks MFI yang sesuai untuk *injection molding* berkisar antara 5 – 50 (Baird et al., 2012).

2.6 Penelitian Sebelumnya

Material alternatif pengganti tembaga (Cu) pada proyektil *frangible* telah diteliti oleh beberapa peneliti sebelumnya. Penelitian yang dilakukan oleh Swanson menggunakan material bismuth, timah, dan timbal. Bismuth yang digunakan berkisar antara 50-100 wt%, timah (Sn) antara 0-50 wt%, dan timbal (Pb) antara 0-25 wt%. (Swanson et al., 2021) Material alternatif lain yang digunakan adalah tungsten (W), poliamida (PA), dan karbon (C). Berdasarkan penelitian oleh Folaron, komposisi tungsten yang digunakan berkisar antara 85-95 wt%, PA ≤ 10 wt%, dan karbon sebesar 5%. (Folaron et al., 2020) Material lain yang dapat digunakan adalah paduan ferrotungsten (Fe-W). Penelitian yang dilakukan oleh Hansen (2008) menggunakan ferrotungsten (35%), *hydroxypropylcellulose* (40%), kalsium karbonat (20%), dan asam stearat (5%). Proyektil dengan komposisi ini tidak menghasilkan *ricochet* pada saat pengujian tembak. (Hansen, 2008)

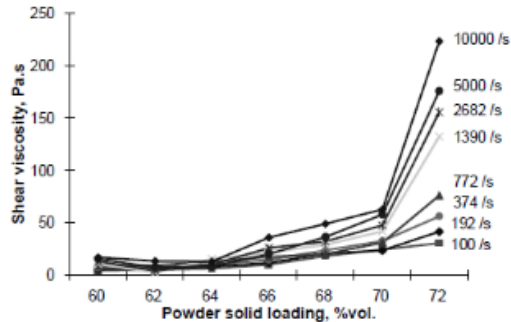
Terdapat beberapa penelitian yang telah dilakukan terhadap sifat rheologi pada *feedstock* dengan besi (Fe) sebagai *filler*. Tafti menggunakan *feedstock* dengan komposisi Fe 55 vol%, *paraffin wax* (PW) 42 vol%, asam stearat (SA) 2 vol%, dan EVA 1 vol%. PW, SA, dan EVA berperan sebagai *binder*. Campuran serbuk dan *binder* dicampurkan pada temperatur 70°C. *Feedstock* yang dihasilkan memiliki viskositas 1,5-3 Pa.s pada *shear rate* 10-100 s⁻¹, sehingga sesuai untuk digunakan pada *low pressure injection molding*. (Tafti et al., 2021) Penelitian lain yang dilakukan oleh You menggunakan serbuk Fe dengan ukuran yang berbeda. *Feedstock* terdiri dari 60 vol% serbuk Fe yang terdiri dari serbuk berukuran 4 μm (75%) dan serbuk berukuran 100 nm (25%). Adapun *feedstock* yang digunakan sebanyak 40 vol% dan terdiri dari *paraffin wax* (75%) dan asam stearat (25%). *Feedstock* ini menghasilkan *apparent viscosity* pada temperatur 70°C sebesar 110 Pa.s. Selain itu, serbuk *filler* dapat terdistribusi dengan homogen pada *feedstock* (You et al., 2012)



Gambar 2.18 Persebaran *filler* Fe pada *feedstock injection molding*

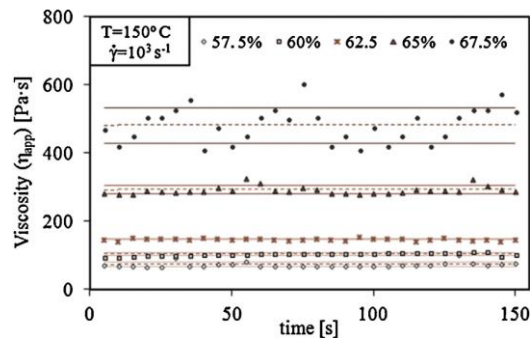
Material lain yang akan digunakan pada penelitian ini adalah Fe-Ni. Pada penelitian yang dilakukan oleh Afrilianda, digunakan *feedstock* yang terdiri dari serbuk Fe-2Ni (65 vol%) dan binder (79 vol%) yang terdiri dari *paraffin wax* (79%), EVA (20%), dan asam stearat (1%). Pencampuran serbuk dan *binder* dilakukan dengan *screw speed* 50 rpm pada temperatur 150, 170, 190, 210, dan 230°C. *Feedstock* yang dihasilkan berturut – turut memiliki viskositas 10,37; 8,26; 6,94; 6,17; dan 5,86 Pa.s pada *shear rate* 2.020,83 s⁻¹. Sifat reologi ini memenuhi kriteria *feedstock injection molding*. (Afrilinda et al., 2017) Penelitian lain yang dilakukan oleh Hidalgo

menggunakan *feedstock* yang terdiri dari serbuk Fe-36Ni (57,5-70 vol%) dan *binder* (42,5-30 vol%). Serbuk dan *binder* ini dicampurkan pada temperatur 150°C dengan *screw speed* 50 rpm selama 1 jam. Pada *shear rate* 1.000 s⁻¹ menghasilkan viskositas sebagai berikut:(Hidalgo et al., 2014)



Gambar 2.19 Viskositas *feedstock* Fe-36Ni dengan persentase serbuk yang berbeda

Austenitic stainless steel merupakan salah satu logam yang digunakan pada *feedstock injection molding*. Asmawi menggunakan *feedstock* dengan SS 316L sebanyak 60 vol% sebagai *filler* dan *binder* sebanyak 40 vol%. *Binder* terdiri dari limbah *polystyrene* (60%) dan *palm kernel oil* (40%). *Mixing* dilakukan pada temperatur 190°C dengan *screw speed* 30 rpm selama 30 menit. *Feedstock* yang dihasilkan memiliki nilai *temperature sensitivity* (n) 0,17; energi aktivasi aliran (E) 28,3 kJ/mol, dan *power binder separation* (α) sebesar 1.821,1. Dengan sifat reologi ini, *feedstock* sesuai untuk *injection molding*.(Asmawi et al., 2016) Penelitian lain yang dilakukan oleh Kong menggunakan *filler* SS 316L sebanyak 60-72 vol% dan *binder* sebanyak 40-28 vol%. Campuran ini kemudian dicampurkan pada temperatur 160°C dengan *screw speed* 30 rpm selama 30 menit. *Shear viscosity* yang dihasilkan dengan fraksi volume dapat dilihat pada **Gambar 2.17**(Kong et al., 2009)



Gambar 2.20 *Shear viscosity* untuk beberapa fraksi volume *filler* SS316L pada berbagai *shear rate*

Penelitian ini menggunakan poliamida (PA) sebagai matriks. Berdasarkan penelitian oleh Kim, penambahan partikel *filler* pada polimer menurunkan nilai *melt flow rate* (MFR). Penelitian ini menemukan bahwa nilai MFR untuk PA6, PA6-60Al₂O₃, dan PA6-65Al₂O₃ berturut – turut sebesar 63; 46,4; dan 44,4 g/10 min. Penurunan MFR ini disebabkan karena penambahan *filler* menghambat pergerakan molekul polimer.(Kim et al., 2019) Penelitian lain yang dilakukan oleh Abdullah juga memperoleh hasil yang sama. *Feedstock* yang diteliti terdiri dari matriks PA12 dan *filler* ZrO₂ serta β -TCP. PA12 murni memiliki MFR sebesar 13,12 g/10 min. Penambahan ZrO₂ dan β -TCP sebanyak 15-15, 15-20, dan 15-25 wt% menghasilkan MFR

yang lebih rendah. MFR yang dihasilkan sebesar 8,48; 8,1; dan 9,5 g/ 10 min.(Abdullah et al., 2018)

Tabel 2. 10 Penelitian sebelumnya mengenai komposisi dan sifat rheologi feedstock

| No | Komposisi | Metode <i>Mixing</i> | Sifat Rheologi | Referensi |
|----|--|----------------------------|--|--|
| 1. | Fe: 55 vol% <i>Binder</i> : 45 vol% | 70°C | Viskositas: 1,5–3 Pa.s, <i>Shear rate</i> : 10-100 s ⁻¹ | Tafti et al, 2021(Tafti et al., 2021) |
| 2. | SS 17-4 PH: 60 vol% | 90°C, 45 menit | Viskositas: 1-0,7 Pa.s, <i>Shear rate</i> : 1-3.500 s ⁻¹ | Trad et al, 2019(Aziz et al., 2019) |
| 3. | Al ₂ O ₃ : 50-65 wt% <i>Carbon fiber</i> : 0-10 wt% PA6: 30-45 wt% | 250-290°C | MFR (g/10 min) PA6-60Al ₂ O ₃ : 46,2 PA6-65Al ₂ O ₃ : 44,4 PA6-50Al ₂ O ₃ -5CF: 37,2 PA6-50Al ₂ O ₃ -10CF PA6-60Al ₂ O ₃ -10CF:22,8 | Kim et al, 2019(Kim et al., 2019) |
| 4. | SS 316L-50HA: 61 vol% <i>Binder</i> : 39 vol% | 180°C | Viskositas:35,01-229,20 Pa.s, <i>Shear rate</i> : 1.070 – 11.210 s ⁻¹ | Arif et al,2019(Arif et al., 2019) |
| 5. | ZrO ₂ : 15 wt% βTCP: 15-25 wt% PA12: 60-100 wt% | 180-200°C | MFR (g/10 min) PA12: 13,12 PA12-15ZrO ₂ -15βTCP: 8,48 PA12-15ZrO ₂ -20βTCP: 8,1 PA12-15ZrO ₂ -25βTCP: 9,5 | Abdullah, 2018(Abdullah et al., 2018) |
| 6. | Fe-2Ni: 65 vol% <i>Binder</i> : 35 vol% | 150-230°C, 50 rpm | Viskositas: 10,37-5,86 Pa.s, <i>Shear rate</i> : 2.020,83 s ⁻¹ | Afrilianda et al, 2017(Afrilinda et al., 2017) |
| 7. | SS 316L: 60 vol% <i>Binder</i> : 40 vol% | 190°C, 30 rpm, 30 menit | Viskositas:30-14 Pa.s, <i>Shear rate</i> : 5.000-17.500 s ⁻¹ | Asmawi et al, 2016(Asmawi et al., 2016) |

| | | | | |
|-----|---|----------------------------|---|---|
| | | | Viskositas (150°C, <i>shear rate</i> 1000 s ⁻¹) | |
| 8. | Fe-36Ni: 57,5-67,5 vol% Binder: 42,5-32,5 vol% | 150°C, 50 rpm, 60 menit | 57,5 vol%: 85-90 Pa.s 60 vol%: 100-105 Pa.s 62,5 vol%: 155-160 Pa.s 65 vol%: 290-320 Pa.s 67,5 vol%: 400-600 Pa.s | Hidalgo, 2013(Hidalgo et al., 2014) |
| 9. | Fe: 66 vol% Binder: 34 vol% | 70°C, 600 rpm | <i>Apparent viscosity</i> : 110 Pa.s | You et al, 2012(You et al., 2012) |
| | | | Viskositas (160°C, <i>shear rate</i> 100-10.000 s ⁻¹) | |
| 10. | SS 316L: 60-72 vol% Binder: 28-40 vol% | 160°C, 30 rpm, 30 menit | 60 vol%: 5-20 Pa.s 62 vol%: 5-15 Pa.s 64 vol%: 7-14 Pa.s 66 vol%: 10-40 Pa.s 68 vol%: 18-48 Pa.s 70 vol%: 20-60 Pa.s 72 vol%: 25-225 Pa.s | Kong et al, 2009(Kong et al., 2009) |
| | | | Viskositas (135°C, <i>shear rate</i> 1.413 s ⁻¹) | |
| 11. | SS 17-4 PH: 60-72% Binder: 28-40% | 175°C | 60 vol%: 25 Pa.s 64 vol%: 40 Pa.s 68 vol%: 62 Pa.s 72 vol%: 99 Pa.s | Li et al, 2007(Li et al., 2007) |

Tabel 2.11 Hasil penelitian sebelumnya mengenai sifat mekanik feedstock

| No | Komposisi | Metode Ekstrusi | Sifat Mekanik | Referensi |
|----|--|--|---|---|
| 1. | Poliamida 6 <i>α-zirconium phosphate</i> (ZrP) : 0,99-4,76 wt% | 215°C, 50-80 rpm | Modulus elastisitas: 3,08 GPa <i>Yield Strength</i> : 66,44 MPa Elongasi: 124,86% | Zhang et al, 2017(Zhang et al., 2017) |
| 2. | Poliamida 6: 30% Al ₂ O ₃ : 70% | 235-250°C, 79 rpm | Kekuatan tarik: 88 MPa Kekkuatan impak: 4,2 kJ/m ² | Ren et al, 2017(Ren et al., 2017) |
| 3. | Poliamida 6: 70% Serat karbon: 30% | 285°C, 100 rpm, 3 menit | Kekuatan tarik: 208 MPa Kekuatan impak: 61 kJ/m ² | Karsli et al, 2013(Karsli et al., 2013) |
| 4. | Poliamida 6 Grafit: 0-10 wt% | 210-240°C, <i>screw frequency</i> 360 Hz | Kekuatan tarik: 68 MPa Modulus elastisitas: 1,4 GPa <i>Flexural strength</i> : 100 MPa <i>Flexural modulus</i> : 2,5 GPa Kekuatan impak: 10 kJ/m ² | Xin et al, 2011(Xin et al., 2011) |

2.6.1 State of The Art

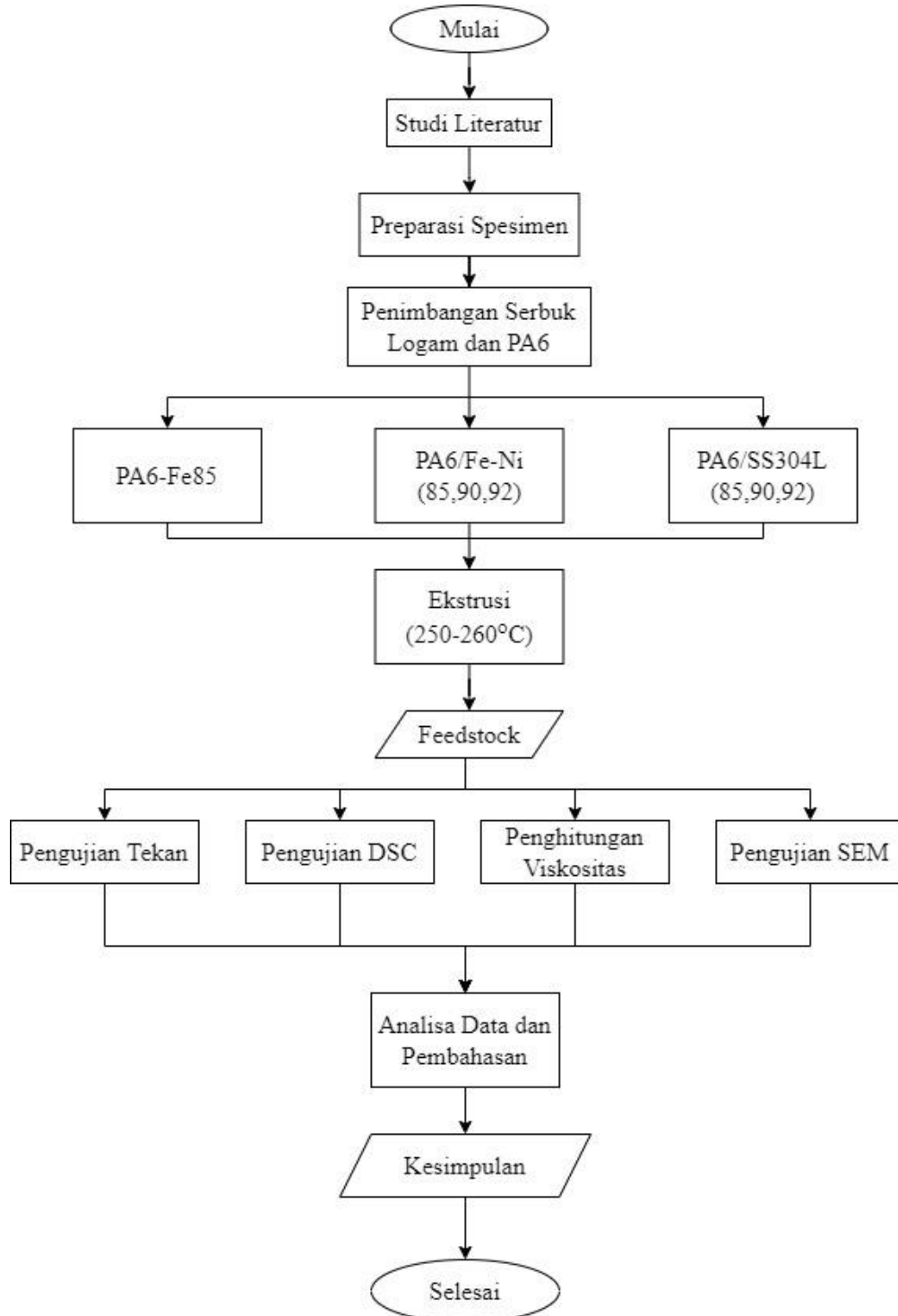


Gambar 2.21 *State of the art* penelitian mengenai *feedstock injection molding*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Alat Penelitian

3.2.1 Neraca Digital

Neraca digital merk Metler Toledo digunakan untuk menimbang massa serbuk logam dan serbuk PA6. Spesifikasi alat yaitu kapasitas maksimum 220 g, ketelitian 0,0001 g, berat alat 4,6 kg, diameter *weighing pan* 90 mm, dan tinggi benda maksimum 237 mm.



Gambar 3.2 Neraca digital

3.2.2 Beaker Glass

Alat ini digunakan untuk menempatkan serbuk logam dan serbuk PA6 setelah penimbangan.



Gambar 3.3 Beaker glass

3.2.3 Spatula

Alat ini digunakan Untuk melakukan penuangan serbuk logam dan serbuk PA6 serta menempatkan material hasil penimbangan dalam *mixer*

3.2.4 Mesin Sieving

Alat ini digunakan untuk menyeleksi serbuk berdasarkan ukuran. Ukuran *mesh* yang digunakan pada penelitian ini adalah 120, 140, dan 200 *mesh*.



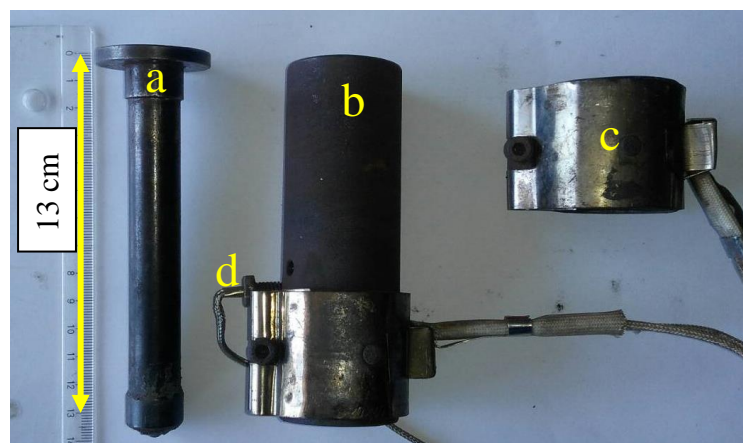
Gambar 3.4 Mesin *sieving*

3.2.5 Oven

Oven digunakan untuk melakukan pengeringan pada serbuk logam dan serbuk PA6. Oven yang digunakan memiliki ventilasi udara untuk membantu mengurangi kelembapan serbuk logam dan PA6 hasil penimbangan.

3.2.6 Barrel

Barrel digunakan sebagai tempat pencampuran serbuk logam dengan serbuk PA6. Barrel terdiri dari 5 komponen, yakni *punch*, *barrel*, *heater band*, dan *thermocouple*. *Punch* berfungsi untuk mendorong komposit PA6/logam hasil pencampuran keluar dari *barrel*. *Punch* akan ditekan untuk mendorong komposit PA6/Logam keluar melalui *nozzle* pada ujung *barrel*. *Barrel* berfungsi sebagai tempat pencampuran serbuk PA6 dengan serbuk logam. *Heater* berfungsi untuk memanaskan *barrel* dan melelehkan serbuk PA6. Adapun *thermocouple* berfungsi untuk mengetahui temperatur *barrel*.



Gambar 3.5 (a) *Punch*, (b) *barrel*, (c) *heater band*, dan (d) *thermocouple*

3.2.7 Mesin *Injection*

Mesin *injection* digunakan untuk membentuk feedstock menjadi spesimen tekan. *Feedstock* akan diletakkan di dalam *barrel* yang telah dipanaskan dengan *heater band*. *Feedstock*

kemudian diinjeksikan menuju mold melalui nozzle. Adapun tekanan maksimum dari mesin *injection* adalah 10 MPa.



Gambar 3.6 Mesin *injection*

3.2.8 Mold

Cavity pada *mold* yang digunakan pada penelitian ini berbentuk silinder dengan diameter 12,57 dan panjang 25,7 mm. Diameter dan panjang mold ini merujuk pada standard ASTM D695 ditambah dengan estimasi *shrinkage* pada PA6. *Mold* terdiri dari penutup *mold*, badan *mold*, dan penutup bawah. *Mold* terbuat dari baja VCN 150.



Gambar 3.7 *Mold* dan bagian – bagiannya

3.2.9 Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur diameter spesimen uji tekan. Jangka sorong yang digunakan memiliki akurasi hingga 0.01 mm.



Gambar 3.8 Jangka Sorong

3.3 Bahan Penelitian

Bahan – bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.3.1 Poliamida 6

Poliamida 6 yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk serbuk dengan spesifikasi sebagai berikut:

| | |
|--------------------------------|--------------------------|
| Densitas | : 1,14 g/cm ³ |
| Temperatur transisi gelas (Tg) | : 41°C |
| Temperatur leleh (Tm) | : 228°C |



Gambar 3. 9 Serbuk Poliamida 6

Adapun spesifikasi PA6 yang digunakan pada perhitungan viskositas feedstock adalah sebagai berikut: ditambah sitasi

| | |
|---------------------|----------------------------------|
| Nama dagang | : Novamid-1010C2 |
| Manufacturer | : DSM Japan Engineering Plastics |
| Material structure | : Crystalline |
| Temperatur transisi | : 185°C |
| Melt temperature | : 230 – 300°C |
| Mold temperature | : 70 – 110°C |

3.3.2 Stainless Steel 304L

Serbuk *stainless steel* 304L yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

| | |
|-----------------|-----------------------|
| Densitas | : 8 g/cm ³ |
| Ukuran partikel | : <106 μm |



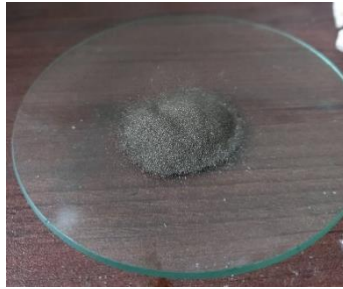
Gambar 3. 10 Serbuk Stainless Steel 304L

3.3.3 Besi (Fe)

Serbuk besi yang digunakan pada penelitian ini memiliki spesifikasi sebagai berikut:

| | |
|----------|--------------------------|
| Densitas | : 7,87 g/cm ³ |
|----------|--------------------------|

Ukuran partikel : <math><106 \mu\text{m}</math>



Gambar 3.11 Serbuk besi

3.3.4 Ferronikel

Serbuk ferronikel yang digunakan pada penelitian ini memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Densitas : 8,1 g/cm³
Ukuran partikel : <math><106 \mu\text{m}</math>



Gambar 3.12 Serbuk ferronikel

3.4 Metode Penelitian

3.4.1 Preparasi Spesimen

Preparasi spesimen yang akan digunakan pada penelitian ini dilakukan dengan menyeleksi serbuk logam sesuai dengan ukuran yang telah ditentukan. Penyeleksian dilakukan dengan proses *sieving* menggunakan *mesh* dengan ukuran 120, 140, dan 200 *mesh*. Selain preparasi serbuk logam, dilakukan juga preparasi serbuk PA6. Pellet PA6 di – *grinding* untuk mendapatkan serbuk PA6 yang akan dicampurkan dengan serbuk logam.

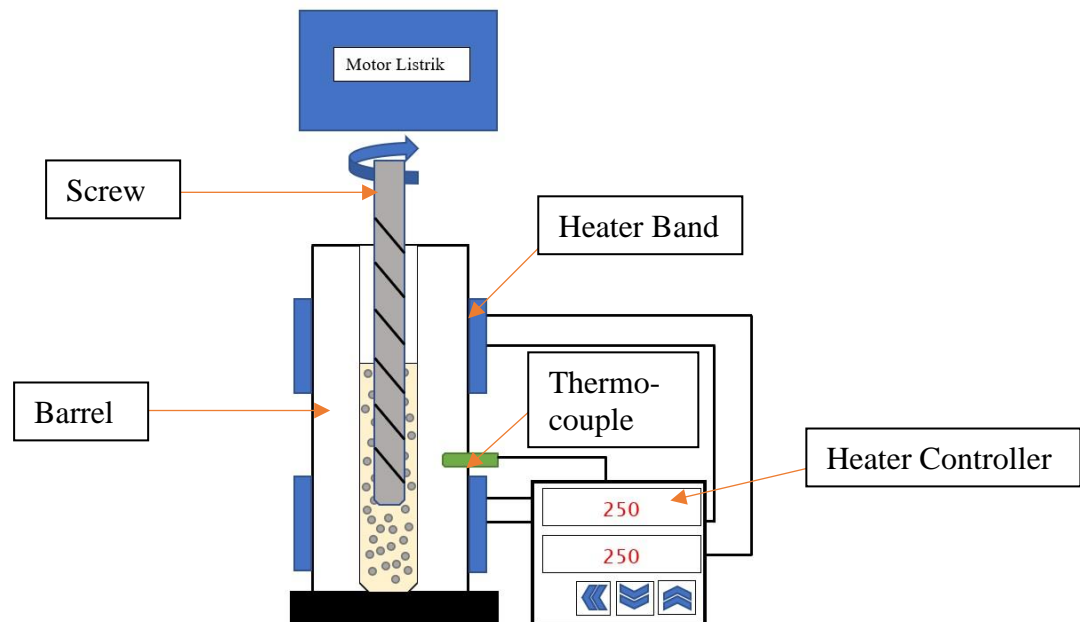
3.4.2 Pembuatan *Feedstock*

Metode pembuatan *feedstock* yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode ekstrusi. Proses pembuatan *feedstock* diawali dengan menimbang masing – masing serbuk (besi, ferronikel, dan *stainless steel* 304L) dan PA6 menggunakan neraca digital dengan variasi persentase serbuk logam sebesar 85, 90, dan 92 wt%. Setelah itu dilakukan pengeringan serbuk logam dan PA6 menggunakan oven. Pengeringan dilakukan pada temperatur 160°C selama 2 jam untuk mengurangi kandungan air pada serbuk logam dan PA6. Proses pengeringan dapat dilihat pada **Gambar 3.13** sebagai berikut



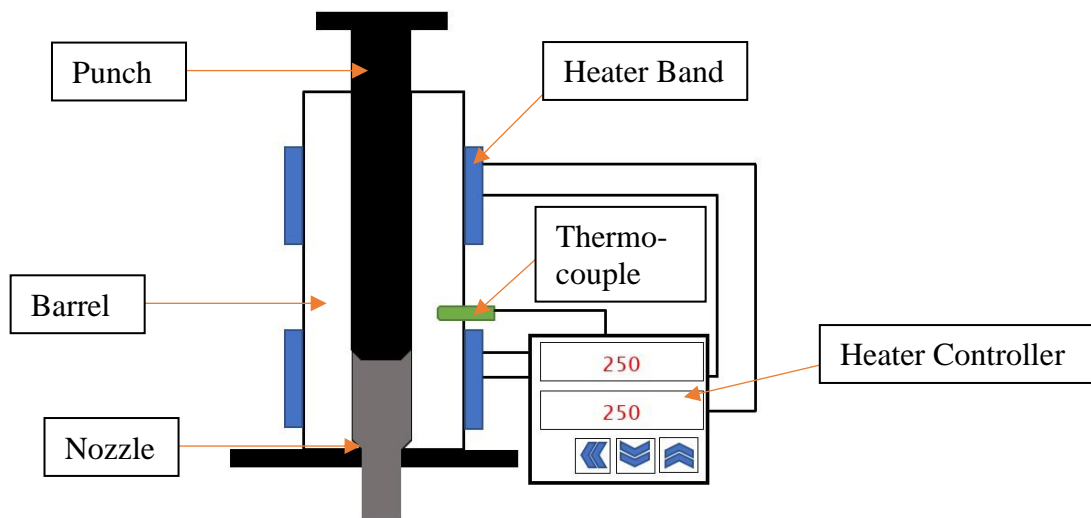
Gambar 3.13 Proses *drying* serbuk PA6

Serbuk PA6 dan logam kemudian dicampurkan pada *barrel* menggunakan bor tangan pada temperatur 250 – 260°C selama 3 menit. Proses *mixing* dapat dilihat pada **Gambar 3.14** sebagai berikut



Gambar 3.14 Skematik proses mixing komposit PA6/Logam

Motor listrik berfungsi untuk memutar *screw* saat proses *mixing*. *Heater controller* berfungsi untuk mengatur temperatur barrel dengan mengirimkan sinyal listrik pada *heater band* yang akan diubah menjadi energi panas. *Heater controller* tersambung dengan *thermocouple*, sehingga temperatur barrel dapat terpantau secara bersamaan. Pada proses pencampuran, *screw* akan berputar untuk mencampurkan PA6 dengan serbuk logam. *Feedstock* kemudian diekstrusi dengan cara ditekan sehingga menghasilkan *filament* komposit PA6/Logam, Adapun proses ekstrusi dapat dilihat pada **Gambar 3.15**



Gambar 3.15 Skematik proses ekstrusi

Punch berfungsi menekan komposit PA6/Logam untuk keluar dari barrel melalui nozzle. Proses ekstrusi menghasilkan filament komposit PA6/Logam. Filament ini kemudian dipotong untuk menghasilkan *feedstock* dengan panjang 4 mm.

3.5 Pengujian

3.5.1 Differential Scanning Calorimeter (DSC) – Thermogravimetry Analysis (TGA)

Pengujian *Differential Scanning Calorimeter* (DSC) bertujuan untuk mengkarakterisasi temperatur leleh (T_m) *feedstock* PA6/logam. Pengujian DSC dilakukan dengan pemanasan dari temperatur ruangan hingga 600°C dengan laju 10°C/menit. Diameter maksimum spesimen DSC adalah 4 mm dengan ketebalan maksimum 0,5 mm. Prinsip kerja dari pengujian DSC adalah dengan memberikan panas pada spesimen dan *reference material* sehingga menghasilkan reaksi endotermik maupun eksotermik. Pengujian DSC menghasilkan kurva *heat flux* vs temperatur. Adapun pengujian TGA bertujuan untuk mengkarakterisasi temperatur dekomposisi *feedstock* PA6/Logam. Prinsip kerja dari pengujian TGA adalah mengukur massa sampel pada saat proses pemanasan sampel. Dekomposisi pada *feedstock* ditandai dengan adanya penurunan massa sampel secara signifikan. Pengujian TGA menghasilkan kurva persen massa sampel vs temperatur. Selain itu, pengujian TGA menghasilkan kurva laju pengurangan massa vs temperatur.

3.5.2 Pengujian Tekan

Pengujian tekan bertujuan untuk mengkarakterisasi kekuatan tekan *feedstock* komposit PA6/Logam. Pengujian dilakukan dengan standard ASTM D-695. Adapun spesimen yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 12,7 mm dan tinggi 25,4 mm.



Gambar 3.16 Spesimen uji tekan

Pengujian tekan dilakukan dengan memberikan beban berupa penekanan pada spesimen hingga terjadinya *fracture* pada spesimen. Hasil dari pengujian tekan adalah grafik tegangan dan regangan. Berdasarkan grafik tersebut dapat diperoleh beberapa sifat mekanik seperti kekuatan luluh, kekuatan tekan, dan modulus elastisitas. Langkah pengujian tekan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan preparasi spesimen untuk meratakan permukaan atas dan bawah spesimen
2. Mengukur diameter dan tinggi spesimen dengan jangka sorong
3. Memilih laju pembebanan tekan pada *universal testing machine*
4. Meletakkan sampel pada *holder* mesin *universal testing machine*
5. Menurunkan penekan pada *universal testing machine* hingga menyentuh spesimen
6. Memberikan pembebanan tekan pada spesimen hingga terjadi *fracture*

Pengujian tekan dilakukan menggunakan HT-950 Universal Testing Machine dengan kapasitas beban sebesar 300 ton.



Gambar 3.17 HT-950 Universal Testing Machine

3.5.3 Pengujian Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy atau SEM memanfaatkan pantulan elektron untuk menghasilkan gambar dengan perbesaran yang tinggi dan depth of field. Dengan perbesaran dan depth of field yang tinggi diperoleh gambar dengan area fokus yang lebih luas dan resolusi yang lebih baik. Mesin SEM yang digunakan pada penelitian ini adalah merk HITACHI SU3500.

3.5.4 Perhitungan Viskositas Relatif *Feedstock* PA6/Logam

Perhitungan viskositas *feedstock* PA6/Logam diawali dengan menghitung fraksi volume serbuk pada *feedstock* PA6/Logam. Fraksi volume serbuk dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\%vol\ serbuk = \frac{\left(\frac{m_{serbuk}}{\rho_{serbuk}}\right)}{\left(\frac{m_{serbuk}}{\rho_{serbuk}}\right) + \left(\frac{m_{PA6}}{\rho_{PA6}}\right)}$$

Dimana:

- m_{serbuk} : massa serbuk (g)
 ρ_{serbuk} : densitas serbuk (g/cm^3)
 m_{PA6} : massa PA6 (g)
 ρ_{PA6} : densitas PA6 (g/cm^3)

Basis perhitungan massa *feedstock* adalah 40 gram dengan persentase massa serbuk sebesar 85, 90, dan 92%. Adapun data yang diketahui adalah sebagai berikut:

| | |
|-----------------|--------------------------|
| ρ_{PA6} | : 1,14 g/cm ³ |
| ρ_{Fe} | : 7,87 g/cm ³ |
| ρ_{FeNi} | : 8,1 g/cm ³ |
| ρ_{SS304L} | : 8,0 g/cm ³ |

Sehingga perhitungan fraksi volume *feedstock* PA6/85Fe adalah sebagai berikut:

$$\%vol\ serbuk = \frac{\left(\frac{0,85 \times 40}{7,87}\right)}{\left(\frac{0,85 \times 40}{7,87}\right) + \left(\frac{0,15 \times 40}{1,14}\right)}$$

$$\%vol\ serbuk = 0,4507$$

Perhitungan ini kemudian dilakukan pada variasi *feedstock* lain sehingga diperoleh hasil fraksi volume serbuk pada *feedstock* sebagai berikut:

Tabel 3.1 Fraksi volume serbuk ada *Feedstock* PA6/Logam

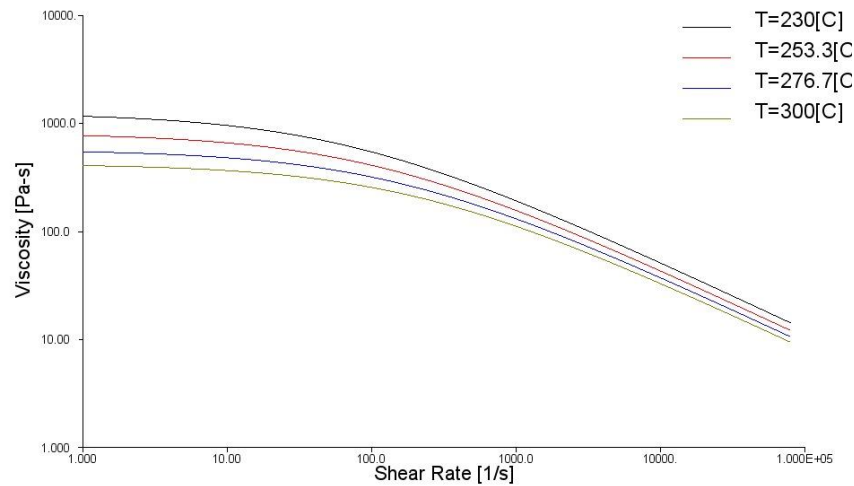
| Material Serbuk | Persentase Serbuk (wt%) | Fraksi Volume Serbuk |
|----------------------|-------------------------|----------------------|
| Besi (Fe) | 85 | 0,4507 |
| | 90 | 0,565917 |
| | 92 | 0,62481 |
| Feronikel (FeNi) | 85 | 0,443688 |
| | 90 | 0,558828 |
| | 92 | 0,6181 |
| Stainless Steel 304L | 85 | 0,446757 |
| | 90 | 0,561889 |
| | 92 | 0,621034 |

Data fraksi volume serbuk kemudian digunakan untuk menghitung viskositas relatif *feedstock*. Fraksi volume serbuk maksimum pada *feedstock* diasumsikan sebesar 65 vol% (Liu et al., 2003). Adapun perhitungan viskositas relatif *feedstock* PA6/85Fe adalah sebagai berikut:

$$\eta_r = \left[1 - \frac{0,4507}{0,65}\right]^{-2}$$

$$\eta_r = 10,647778$$

Perhitungan viskositas relatif ini kemudian digunakan untuk semua variasi *feedstock* PA6/Logam. Hasil dari perhitungan viskositas relatif *feedstock* kemudian dikalikan dengan viskositas PA6 pada shear rate dan temperatur tertentu. Adapun *shear rate* maksimum pada metode *injection molding* adalah 10.000 s⁻¹ (Baird et al., 2012). Sedangkan temperatur yang dipilih adalah 253,3°C. Grafik Viskositas PA6 diperoleh dari database material *feedstock* pada aplikasi Autodesk Moldflow Adviser. Grafik viskositas PA6 adalah sebagai berikut:



Gambar 3.18 Grafik viskositas PA6 pada temperatur dan *shear rate* yang berbeda

Pada temperatur 253,3°C dan *shear rate* 10.000 Pa.s-1 diperoleh viskositas PA6 sebesar 35,5501 Pa.s Perhitungan viskositas *feedstock* ini kemudian dilakukan pada semua variasi *feedstock* PA6./Logam.

3.6 Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain eksperimen sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Rancangan Penelitian

| Material Serbuk | Persentase Serbuk (vol%) | Pengujian | | | |
|----------------------|--------------------------|------------|-------|-----|-----|
| | | Viskositas | Tekan | SEM | DSC |
| Besi (Fe) | 85 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | 90 | ✓ | - | - | - |
| | 92 | ✓ | - | - | - |
| Ferronikel (FeNi) | 85 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | 90 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | 92 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Stainless steel 304L | 85 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | 90 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | 92 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

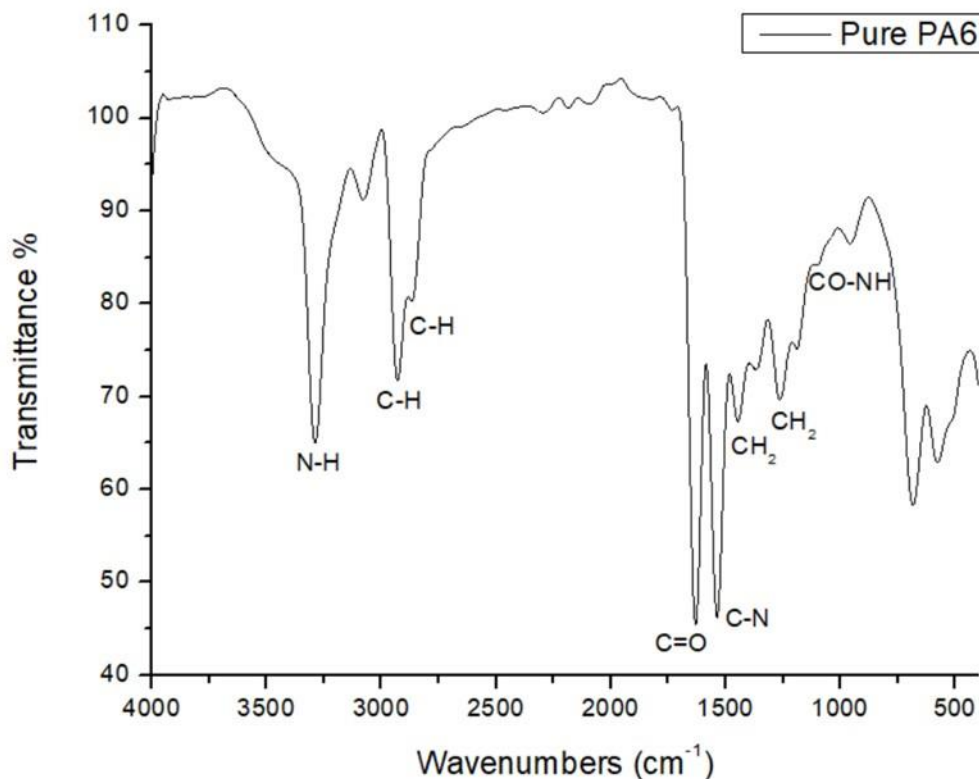
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Bahan

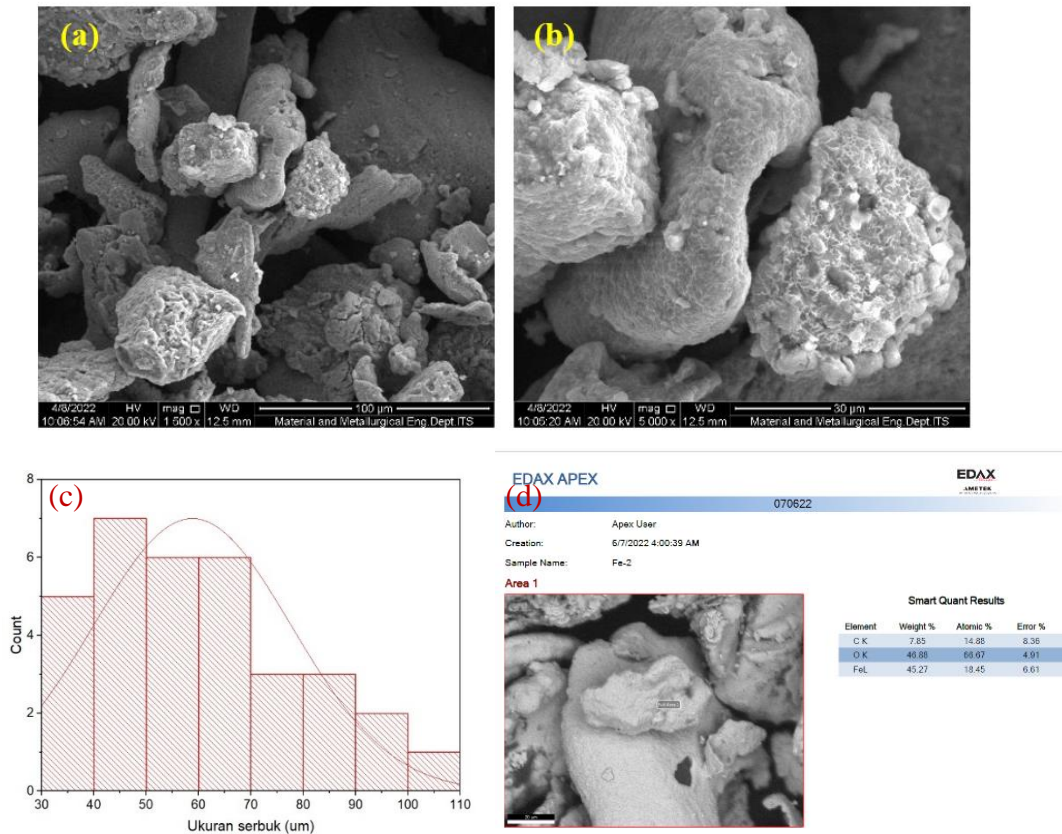
Penelitian ini menggunakan serbuk besi, ferronikel, stainless steel 304L dan serbuk Poliamida 6. Poliamida 6 yang digunakan pada penelitian ini dikarakterisasi dengan pengujian Fourier Transformed Infra-Red (FTIR). Pengujian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi ikatan yang terdapat pada senyawa organik. Adapun hasil FTIR dari serbuk PA6 adalah sebagai berikut:



Gambar 4.1 Grafik hasil karakterisasi FTIR Poliamida 6

Dari Gambar 4.1 terdapat beberap kelompok peak yang dapat diidentifikasi. *Peak* pada *wavenumber* 3292.66 cm^{-1} , 2933 cm^{-1} , dan 2861 cm^{-1} berturut – turut menandakan adanya N-H *bending vibration* pada *primary amine*, ikatan C-H *in phase*, dan ikatan C-H *out phase stretching vibration*. Adapun *peak* pada *wavenumber* 1634.05 cm^{-1} dan 1537.7 cm^{-1} menandakan adanya ikatan C=O *amide I* dan N-H and C-N *combination amide II stretch*. Keberadaan kristal α ditunjukkan dengan *peak* pada *wavenumber* 1476 cm^{-1} , sedangkan *peak* pada *wavenumber* 1415.7 cm^{-1} menandakan adanya CH₂ *scissors vibration*. Keberadaan *Amide III* dan CH₂ *wag* diketahui dengan adanya *peak* pada *wavenumber* 1370.62 cm^{-1} dan 1199.62 cm^{-1} . Adapun *peak* pada *wavenumber* 959.30 cm^{-1} dan 928.21 cm^{-1} menandakan adanya *characteristic CO-NH in plane vibration*. Ikatan yang diperoleh dari hasil karakterisasi FTIR menandakan polimer yang digunakan pada penelitian ini adalah Poliamida 6. Penelitian yang dilakukan oleh Mindivan memiliki hasil yang sesuai dengan hasil karakterisasi FTIR pada penelitian ini (Mindivan, 2016)

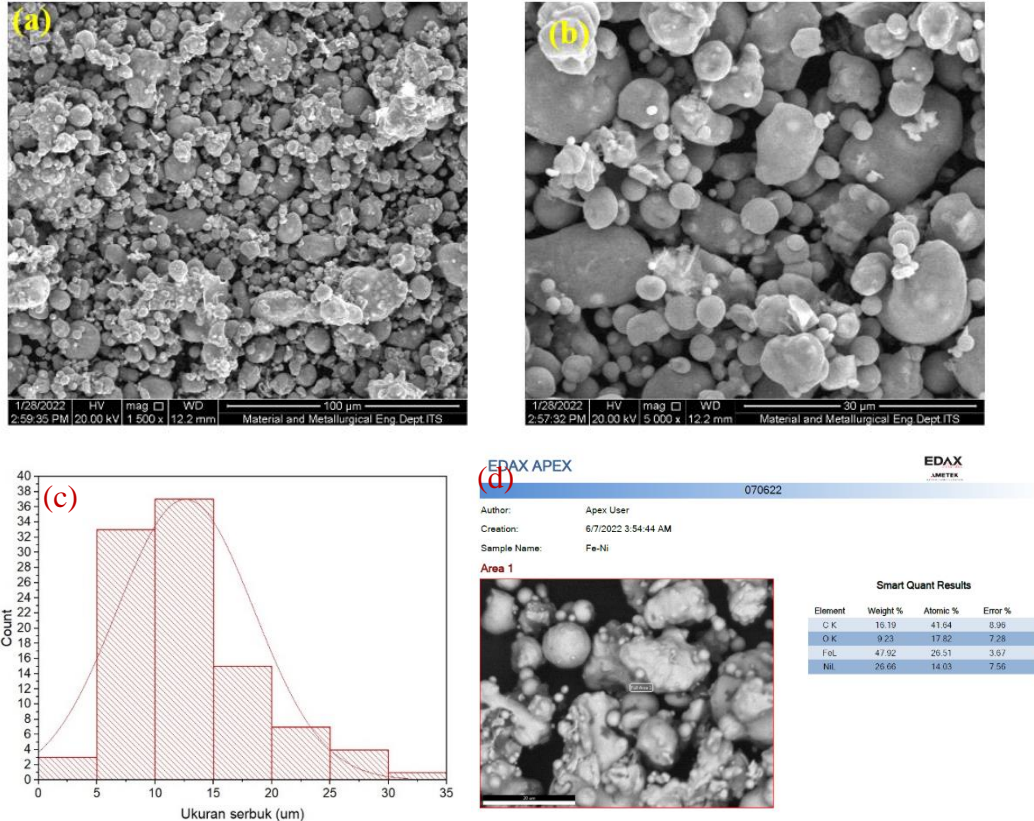
Serbuk besi yang digunakan pada penelitian ini dikarakterisasi dengan pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Pengujian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi morfologi serbuk besi yang digunakan. Adapun morfologi serbuk besi yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 4.2 Morfologi serbuk Fe pada perbesaran (a) 500x, (b) 5.000x, (c) distribusi ukuran serbuk, dan (d) hasil EDX serbuk Fe

Berdasarkan **Gambar 4.2** dapat diketahui bahwa serbuk besi yang digunakan pada penelitian ini berbentuk seperti serpihan (*flake*) dengan sudut – sudut yang tajam. Selain itu sebagian partikel memiliki permukaan yang kasar. Ukuran serbuk Fe berkisar antara 30 – 110 μm . Distribusi ukuran serbuk tertinggi terdapat pada ukuran serbuk 50 – 70 μm . Metode karakterisasi lain yang digunakan adalah EDX. EDX digunakan untuk mengkarakterisasi komposisi serbuk besi. Berdasarkan hasil karakterisasi EDX, diperoleh komposisi Fe 45,27; C 7,85; dan O 46,88 wt%. Tingginya kandungan oksigen pada serbuk Fe kemungkinan disebabkan oleh adanya gas oksigen pada permukaan serbuk Fe pada saat karakterisasi, sehingga memengaruhi hasil karakterisasi EDX.

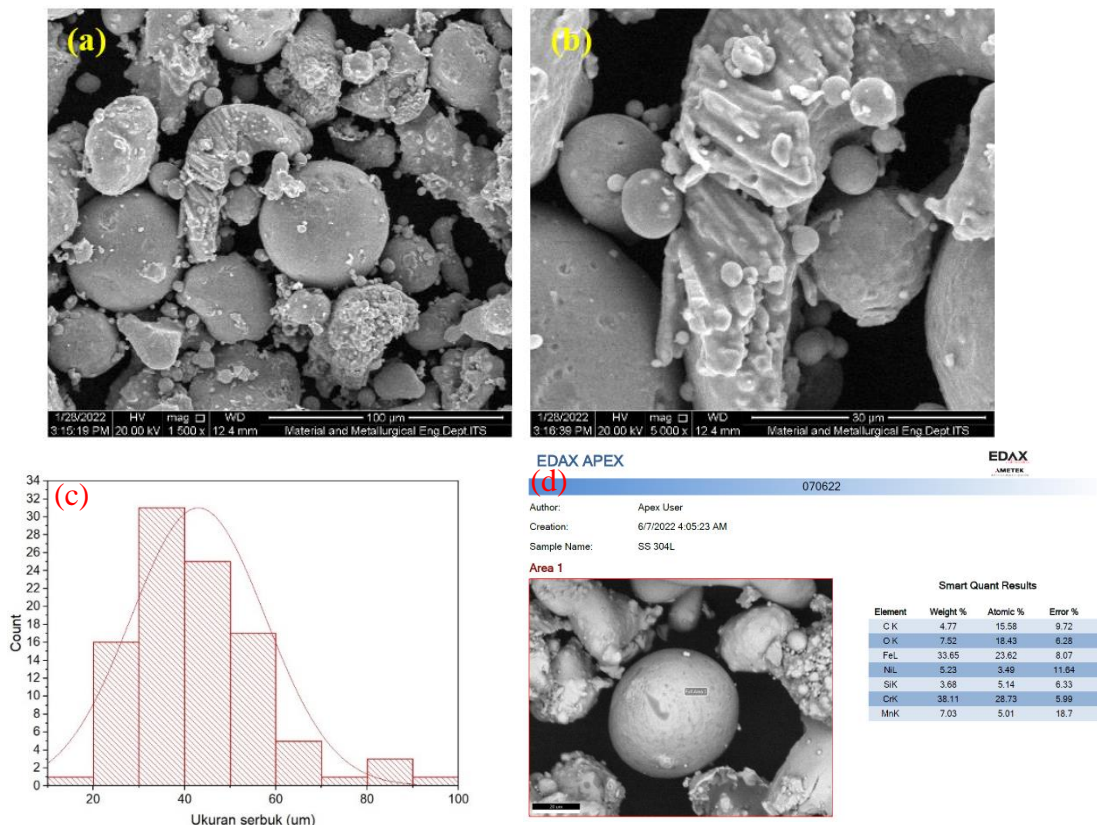
Jenis serbuk keuda yang digunakan pada penelitian ini adalah serbuk ferronikel (FeNi). Serbuk FeNi yang digunakan pada penelitian ini dikarakterisasi menggunakan pengujian Scanning Electron Microscopy (SEM). Pengujian SEM bertujuan untuk mengkarakterisasi morfologi serbuk FeNi. Adapun morfologi serbuk FeNi yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 4.3 Morfologi Serbuk FeNi dengan perbesaran (a) 1.500x, (b) 5.000x, (c) distribusi ukuran serbuk, dan (d) hasil EDX serbuk FeNi

Berdasarkan **Gambar 4.4** dapat diketahui bahwa terdapat beberapa jenis bentuk serbuk, seperti *spherical*, *semi spherical*, dan *pipih*. Pada serbuk FeNi tidak ditemukan adanya sudut tajam seperti pada serbuk besi. Ukuran maksimal serbuk FeNi adalah 35 µm dengan distribusi ukuran serbuk tertinggi pada ukuran serbuk 10 – 15 µm. Untuk mengkarakterisasi komposisi serbuk FeNi dilakukan karakterisasi komposisi menggunakan metode EDX. Berdasarkan hasil karakterisasi EDX, diperoleh komposisi Fe 47,92; Ni 26,66; dan O 9,23 wt%. Kandungan oksigen sebesar 9,23 wt% kemungkinan terjadi karena adanya gas O₂ yang menempel pada permukaan serbuk FeNi pada saat karakterisasi EDX sehingga memengaruhi hasil karakterisasi EDX.

Jenis serbuk logam ketiga yang digunakan pada penelitian ini adalah serbuk SS304L. Serbuk SS 304L yang digunakan pada penelitian ini dikarakterisasi dengan pengujian Scanning Electron Microscopy (SEM) dan EDX. Pengujian SEM bertujuan untuk mengkarakterisasi morfologi serbuk. Adapun morfologi serbuk SS 304L dengan perbesaran 1.500x dan 5.000x adalah sebagai berikut:

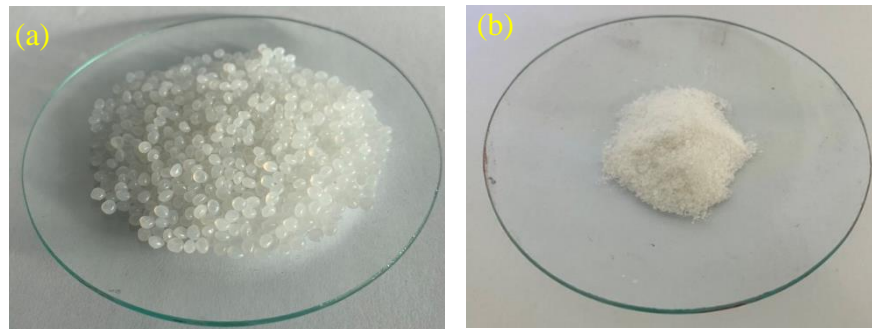


Gambar 4.4 Morfologi serbuk SS304L dengan perbesaran (a) 1.500x, (b) 5.000x, (c) distribusi ukuran serbuk SS304L, dan (d) hasil EDX serbuk SS304L

Berdasarkan **Gambar 4.4** dapat diketahui bahwa terdapat beberapa jenis bentuk serbuk, yakni *spherical*, *near-spherical*, dan tidak beraturan. Selain itu pada partikel dengan morfologi *spherical* terdapat *satteliting*, yaitu terdapat partikel kecil yang menempel pada permukaan partikel lain yang berukuran jauh lebih besar. Ukuran maksimal serbuk SS304L adalah 100 μm dengan distribusi ukuran serbuk tertinggi pada ukuran serbuk 40 – 50 μm . Selain itu, berdasarkan hasil karakterisasi EDX diperoleh komposisi Fe 33,65; Ni 5,23; Cr 38,11; dan C 4,77 wt%.

4.2 Analisis Proses Pembuatan *Feedstock* Komposit PA6/Logam

Proses pembuatan *feedstock* PA6/Logam diawali dengan melakukan *grinding* pada *pellet* poliamida 6. Proses ini bertujuan untuk mengurangi ukuran *pellet* poliamida 6, sehingga poliamida 6 dapat lebih mudah melapisi seluruh permukaan serbuk dan mengisi rongga diantara serbuk saat proses *mixing*.



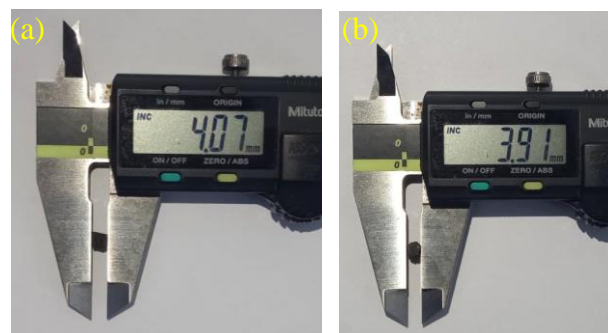
Gambar 4.5 Serbuk Poliamida 6 (a) sebelum proses *grinding* dan (b) setelah proses *grinding*

Serbuk PA6 hasil *grinding* memiliki ukuran 0,5 mm. Serbuk PA6 kemudian dicampurkan dengan serbuk logam dengan komposisi sesuai dengan rancangan penelitian. Adapun persentase serbuk yang digunakan adalah 85, 90, dan 92 wt%. Proses pencampuran dilakukan menggunakan barrel pada temperatur 260°C selama 3 menit. Komposit PA6/Logam kemudian diekstrusi untuk menghasilkan *filament* komposit PA6/Logam. Pada *feedstock* PA6/Fe, hanya *feedstock* PA6/Fe85 saja yang dapat dibuat. Hal ini terjadi karena serbuk Fe memiliki morfologi *flake*. Dengan morfologi *flake*, gesekan yang timbul antara serbuk dengan PA6 maupun antara serbuk dengan serbuk akan lebih tinggi sehingga menurunkan persentase *solid loading* pada *feedstock*. Tingginya gesekan pada *feedstock* menyebabkan *feedstock* tidak dapat diekstrusi (Heaney, 2012). *Filament* yang dihasilkan adalah sebagai berikut:



Gambar 4.6 *Filament* Komposit PA6/Logam



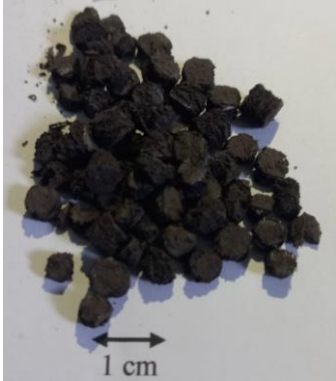

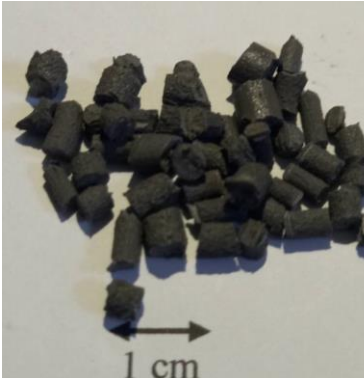


Filament komposit PA6/Logam kemudian dipotong – potong untuk menghasilkan *feedstock* PA6/Logam. *Feedstock* dipotong menggunakan tang potong dan menghasilkan *feedstock* dengan diameter 4 mm dan panjang 3,9 mm. Adapun *feedstock* hasil pemotongan adalah sebagai berikut:



Gambar 4.7 (a) Panjang *feedstock* PA6/Logam (b) diameter *feedstock* PA6/Logam

Adapun untuk *feedstock* yang dihasilkan dari proses *pelletizing* adalah sebagai berikut:

Tabel 4.1 Perbandingan *Feedstock* PA6/Logam

| Material Serbuk | 85 wt% | 90 wt% | 92 wt% |
|-----------------|---|---|--|
| Fe |  | - | - |
| FeNi |  |  |  |
| SS304L |  |  |  |

Pada semua variabel *feedstock* kecuali *feedstock* PA6/85FeNi dan PA6/85SS304L, terjadi cacat permukaan *sharkskin*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Vergnes dan Rane, jenis cacat ini, terdapat sebagian permukaan *feedstock* yang seakan – akan tertarik sehingga menimbulkan tekstur kasar. *Sharkskin* disebabkan karena gaya gesek pada ujung *nozzle barrel* yang sangat tinggi. Pada saat mengalir, tiap lapisan komposit PA6/logam akan memiliki kecepatan yang berbeda, dimana lapisan terluar yang bersentuhan dengan dinding memiliki kecepatan terendah. Sesaat setelah keluar dari *nozzle*, pada lapisan terluar akan terjadi peningkatan kecepatan untuk menyamai kecepatan lapisan dalam komposit PA6/logam. Adanya peningkatan kecepatan ini mengakibatkan bagian yang masih akan keluar dari *nozzle*

mengalami tegangan tarik. Untuk menyesuaikan tegangan tarik, komposit PA6/logam akan bergerak untuk keluar. Namun, permukaan komposit PA6/logam yang bersentuhan langsung dengan dinding *nozzle* tidak dapat bergerak akibat gaya gesek yang tinggi pada dinding *nozzle*. Tertahannya sebagian permukaan *feedstock* ini menimbulkan kontur seperti gelombang pada permukaan *feedstock*. *Sharkskin* terjadi secara berkala. *Sharkskin* dapat dicegah dengan menggunakan *additive* untuk mengurangi gaya gesek pada ujung *nozzle*. (Rane et al., 2020; Vergnes, 2015).

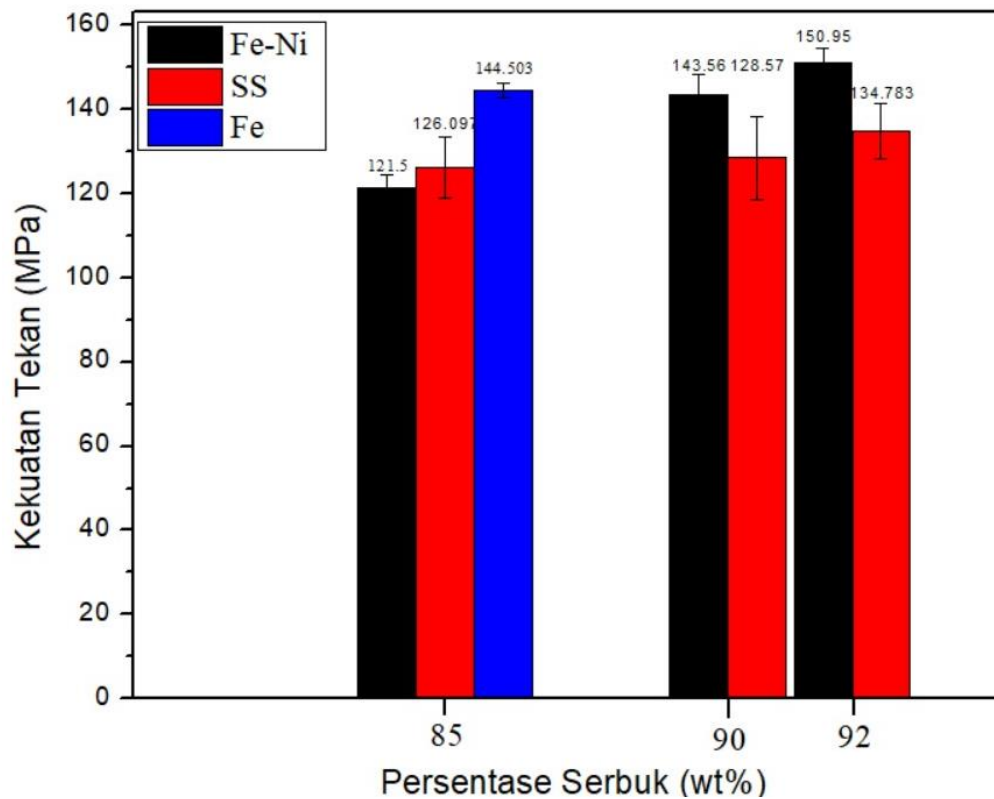
Untuk mengkarakterisasi kekuatan tekan *feedstock*, dilakukan pengujian tekan. Adapun standard pengujian yang digunakan pada penelitian ini adalah ASTM D-695. Berdasarkan ASTM D-695, spesimen berbentuk silinder dengan diameter 12,57 mm dan tinggi 25,4 mm. Spesimen uji tekan dibentuk menggunakan mesin injection dan mold. Barrel temperatur yang digunakan adalah sebesar 253°C dan tekanan injeksi sebesar 10 MPa. Adapun dwelling time yang digunakan sebesar 5 s dan mold temperature sebesar 90°C. Spesimen tekan yang dihasilkan adalah sebagai berikut:



Gambar 4.8 (a) Diameter dan (b) panjang spesimen tekan *feedstock* PA6/Logam

4.3 Analisis Pengaruh Persentase dan Jenis Serbuk terhadap Kekuatan Tekan *Feedstock* PA6/Logam

Pengujian tekan bertujuan untuk mengkarakterisasi kekuatan tekan *feedstock* PA6-logam. Agar dapat digunakan sebagai material proyektil frangible, *feedstock* membutuhkan kekuatan tekan sebesar 68,7 MPa. Kekuatan tekan ini bertujuan agar proyektil dapat memertahankan bentuknya saat proses pengisian pada selongsong dan saat penembakan (Rydlo, 2010). Adapun hasil pengujian tekan *feedstock* PA6/Logam adalah sebagai berikut:



Gambar 4.9 Pengaruh persentase serbuk terhadap kekuatan tekan *feedstock* PA6/Logam

Pada *feedstock* PA6/SS304L, rata – rata kekuatan tekan adalah 126,0967; 128,57; dan 134,783 MPa berturut – turut untuk *feedstock* dengan persentase serbuk 85, 90, dan 92 wt%. Kekuatan tekan tertinggi diperoleh pada *feedstock* PA6/SS304L92 (134,783 MPa). Sedangkan kekuatan tekan terendah diperoleh pada *feedstock* PA6/SS304L85 (126,09 MPa). Dengan bertambahnya jumlah fasa penguat (serbuk SS304L) pada *feedstock* PA6/SS304L maka beban yang dapat diterima oleh *feedstock* juga meningkat. Serbuk SS304L memiliki kekuatan yang lebih baik dibandingkan PA6, sehingga serbuk SS304L mampu menahan beban yang lebih banyak dibandingkan PA6. Dengan persentase serbuk tertinggi (92 wt%) *feedstock* PA6/SS304L92 memiliki kemampuan untuk menanggung beban yang lebih baik karena jumlah fasa penguat yang menanggung sebagian besar beban lebih banyak dibandingkan *feedstock* dengan persentase serbuk 85 dan 90 wt%. sehingga terjadi peningkatan kekuatan *feedstock* PA6/SS304L. Kekuatan material komposit yang berbanding lurus dengan jumlah fasa penguat sesuai dengan literatur (Callister & Rethwisch, 2015).

Kekuatan tekan pada *feedstock* PA6/FeNi berbanding lurus dengan persentase serbuk FeNi. Rata – rata kekuatan tekan *feedstock* PA6/FeNi adalah 121,5; 143,56; dan 150,851 MPa berturut – turut untuk persentase serbuk 85, 90, dan 92 wt%. Kekuatan tekan tertinggi diperoleh pada *feedstock* PA6-FeNi92 (150,8513 MPa). *Feedstock* PA6/FeNi92 memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan *feedstock* PA6/FeNi lainnya karena memiliki persentase serbuk tertinggi. Dengan peningkatan persentase serbuk FeNi, maka jumlah fasa penguat pada *feedstock* FeNi akan semakin banyak. Serbuk FeNi sebagai penguat memiliki kekuatan yang lebih baik dibandingkan PA6. Dengan kekuatan yang lebih baik, serbuk FeNi dapat menanggung beban lebih tinggi sebelum mengalami kegagalan., Semakin banyaknya fasa penguat maka jumlah beban yang dapat ditanggung oleh *feedstock* FeNi juga semakin tinggi sebelum mengalami kegagalan, sehingga meningkatkan kekuatan tekan *feedstock* FeNi.

Kekuatan tekan pada feedstock PA6/FeNi92 lebih tinggi dibandingkan feedstock PA6/FeNi85. Peningkatan kekuatan tekan ini disebabkan karena persentase serbuk FeNi pada feedstock PA6/FeNi90 lebih tinggi. Dengan penguat yang lebih banyak, maka kemampuan feedstock untuk menanggung beban lebih besar. Peningkatan persentase serbuk yang diikuti oleh peningkatan kekuatan tekan sesuai dengan teori pada literatur (Callister & Rethwisch, 2015).

Sifat mekanik lain yang dapat diketahui dari pengujian tekan adalah kekakuan atau modulus elastisitas (E). Semakin tinggi kekakuan, maka semakin sulit sebuah material untuk terdeformasi. Pada feedstock PA6/FeNi dan PA6/SS304L, dapat diketahui bahwa kekakuan berbanding lurus dengan persentase serbuk pada feedstock. Pada feedstock PA6/FeNi diperoleh kekakuan sebesar 15,680; 20,377; dan 21,927 GPa secara urut untuk feedstock dengan persentase serbuk 85, 90, dan 92 wt%. Adapun pada feedstock PA6/SS304L diperoleh kekakuan sebesar 17,229; 18,785; dan 20,498 GPa untuk feedstock dengan persentase serbuk 85, 90, dan 92 wt%. Menurut Callister, salah satu fungsi fasa penguat pada material komposit adalah menghambat deformasi pada material komposit. Karena memiliki kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan matriks, fasa penguat khususnya *filler* membutuhkan beban yang lebih tinggi agar dapat terdeformasi. Dengan bertambahnya beban yang dibutuhkan untuk mendeformasi *filler*, maka material akan lebih sulit untuk terdeformasi. Peningkatan ketahanan deformasi ditandai dengan meningkatnya kekakuan material komposit, dalam hal ini feedstock PA6/FeNi dan PA6/SS304L (Callister & Rethwisch, 2015).

Selain menganalisis persentase serbuk, penelitian ini juga menganalisis pengaruh jenis logam serbuk yang digunakan pada feedstock PA6/Logam. Kekuatan tekan pada feedstock dengan persentase 85 wt% digunakan untuk menganalisa pengaruh jenis serbuk terhadap kekuatan tekan feedstock PA6/Logam. Rata – rata kekuatan tekan adalah 126,0967; 121,5; dan 144,503 MPa berturut – turut untuk feedstock PA6/SS304L85, PA6/FeNi85, dan PA6/Fe85. Kekuatan tekan tertinggi diperoleh pada feedstock PA6/85Fe, sedangkan kekuatan tekan terendah diperoleh pada feedstock PA6/FeNi85. Tingginya kekuatan tekan pada feedstock PA6/85Fe disebabkan karena permukaan serbuk Fe yang kasar. Permukaan yang kasar, menghasilkan luas permukaan yang lebih besar, sehingga menghasilkan *surface energy* yang lebih besar dibandingkan permukaan halus. Peningkatan *surface energy* ini meningkatkan *wettability* matriks sehingga meningkatkan kekuatan ikatan pada antar muka matriks dengan penguat. Selain itu, pada permukaan kasar terdapat celah maupun lembah yang dapat diisi oleh matriks. Terisinya celah dan lembah pada penguat menghasilkan *mechanical interlocking* atau *mechanical bonding*. Dengan semakin banyaknya celah dan lembah maka akan semakin banyak *mechanical interlocking* yang terjadi. Berdasarkan literatur yang ditulis oleh Chawla, permukaan fasa penguat yang kasar akan meningkatkan kekuatan ikatan pada komposit, sehingga meningkatkan kekuatan material komposit (Chawla, 2020).

Kekuatan terendah pada feedstock dengan persentase serbuk 85 wt% diperoleh pada feedstock PA6/FeNi. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Zheng, kekuatan tekan yang rendah ini disebabkan karena adanya konsentrasi tegangan. Dalam penelitian ini konsentrasi tegangan pada permukaan bagian atas feedstock PA6/FeNi85. Konsentrasi tegangan ini disebabkan karena bagian pinggir permukaan spesimen yang bersudut. Adanya sudut ini disebabkan karena profil tutup *mold* yang melengkung, sehingga spesimen memiliki profil melengkung yang sama dan membentuk sudut ketika bertemu dengan bagian dinding spesimen. Keberadaan sudut menjadi tempat konsentrasi tegangan. Konsentrasi tegangan mengakibatkan *localized stress* yang lebih tinggi dibandingkan area sekitarnya. Adanya *localized stress* ini menjadi tempat awal timbulnya *crack*, sehingga memisahkan fasa matriks dan penguat dan mengurangi kekuatan ikatan material komposit. Menurunnya kekuatan ikatan

matriks dengan penguat mengurangi kekuatan *feedstock* PA6/FeNi85 (Zheng et al., 2021), Adapun pola retakan pada *feedstock* PA6/FeNi85 dapat dilihat pada **Gambar 4.10**



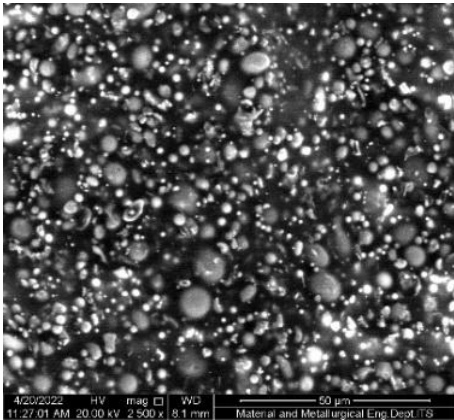
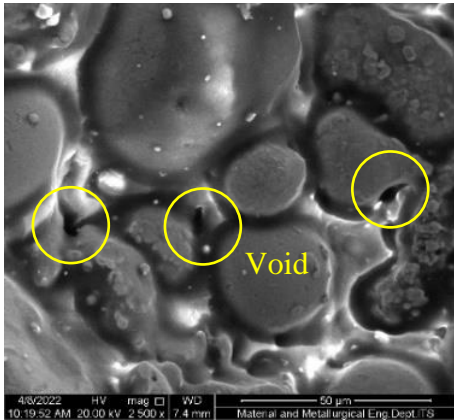
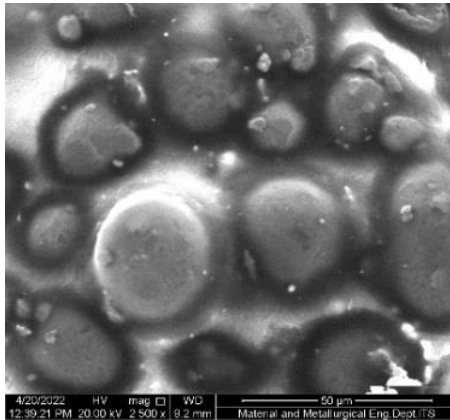
Gambar 4.10 Pola patahan pada speismen uji tekan PA6/85FeNi

Untuk mendukung pengujian tekan, dilakukan karakterisasi morfologi *feedstock* PA6/Logam. Berdasarkan **Tabel 4.2** serbuk SS304L yang digunakan pada *feedstock* PA6/SS304L92 berbentuk *spherical*, *rounded*, dan *semi spherical*. Selain itu, Poliamida 6 yang pada *feedstock* PA6/SS304L85 dan PA6/SS304L92 mampu melapisi permukaan serbuk dan mengisi celah diantara serbuk SS304L. Hal ini terbukti dengan tidak adanya *void* pada hasil karakterisasi SEM. Namun, pada *feedstock* PA6/SS304L90 terdapat *void* yang terbentuk karena PA6 tidak dapat melapisi seluruh permukaan serbuk dan mengisi celah diantara serbuk SS304L. Berdasarkan Chawla adanya *void* dapat mengurangi kemampuan material komposit untuk menanggung beban. Dengan adanya *void*, serbuk tidak berikatan dengan PA6 sehingga tidak terbentuk *mechanical interlocking* yang berperan dalam penyebaran beban yang ditanggung oleh komposit (Chawla, 2020). Serbuk SS304L pada *feedstock* PA6/SS304L dapat tersebar secara merata dan tidak terdapat aglomerasi serbuk SS304L. Adapun morfologi *feedstock* PA6/FeNi ditunjukkan pada **Tabel 4.3**.

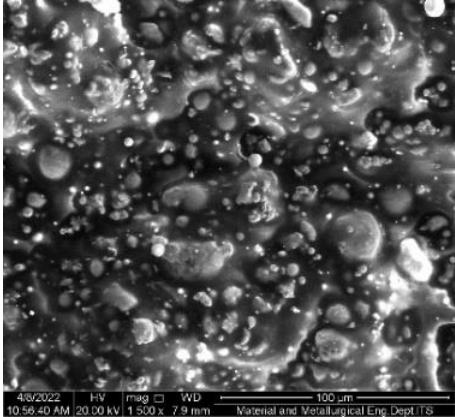
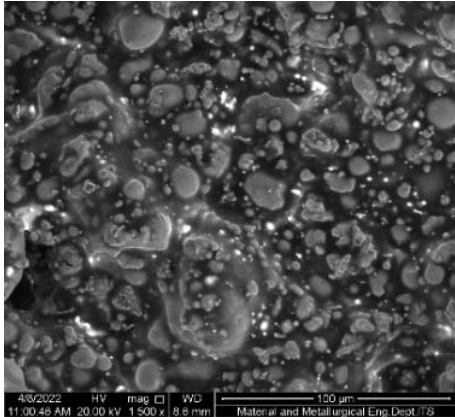
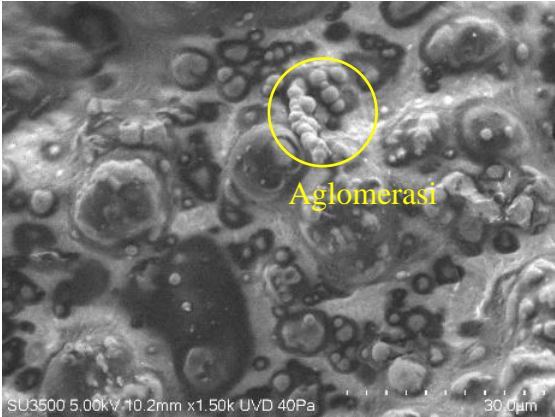
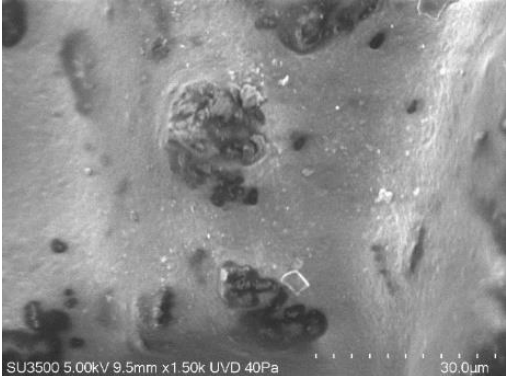
Berdasarkan **Tabel 4.3** tidak ditemukan adanya *void* pada *feedstock* PA6/FeNi. *Void* dapat muncul apabila matriks tidak mampu melapisi seluruh permukaan serbuk dan mengisi ruang diantara serbuk. Dengan tidak adanya *void*, akan lebih banyak *mechanical interlocking* yang terjadi pada antarmuka matriks dengan penguat sehingga tidak terjadi penurunan kekuatan tekan. Hal ini sesuai dengan literatur (Chawla, 2020). Pada *feedstock* PA6/FeNi92 terdapat aglomerasi serbuk. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Li, adanya aglomerasi diperkirakan akan meningkatkan viskositas *feedstock* PA6/92FeNi sehingga mengurangi *flowability feedstock*. (Li et al., 2007).

Serbuk Fe yang digunakan memiliki permukaan yang kasar. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Song, permukaan yang kasar meningkatkan luas area antar muka penguat dan matriks, sehingga menambah luas area terjadinya *mechanical interlocking* pada antar muka komposit. Dengan *mechanical interlocking* yang lebih banyak, distribusi beban antara matriks dan penguat akan efektif sehingga meningkatkan kekuatan material komposit (Song et al., 2011). Pada hasil karakterisasi SEM, tidak ditemukan *void* pada *feedstock* PA6/Fe85. Tidak terbentuknya *void* ini menandakan matriks dapat melapisi seluruh permukaan serbuk, sehingga mengisi ruangan diantara serbuk Fe. Dengan tidak adanya *void*, maka akan terbentuk *mechanical interlocking* yang baik pada antarmuka matriks dengan serbuk. *Mechanical interlocking* tanpa *void* ini sesuai dengan referensi (Chawla, 2020). Selain tidak adanya *void*, pada hasil karakterisasi SEM juga tidak ditemukan aglomerasi serbuk Fe.

Tabel 4.2 Morfologi Feedstock PA6/SS304L dengan perbesaran 2.500x

| 85 wt% | 90 wt% | 90 wt% |
|--|--|--|
|  <p>4/20/2022 HV mag □ WD 11:27:01 AM 20.00 kV 2.500 x 8.1 mm Material and Metallurgical Eng Dept ITS</p> |  <p>4/8/2022 HV mag □ WD 10:19:52 AM 20.00 kV 2.500 x 7.4 mm Material and Metallurgical Eng Dept ITS</p> |  <p>4/20/2022 HV mag □ WD 12:39:21 PM 20.00 kV 2.500 x 9.2 mm Material and Metallurgical Eng Dept ITS</p> |

Tabel 4.3 Morfologi feedstock PA6/FeNi dan PA6/85Fe pada perbesaran 1.500x

| Material Feedstock | 85 wt% | 90 wt% | 92 wt% |
|--------------------|--|--|---|
| PA6/FeNi |  |  |  |
| PA6/Fe |  | | |

4.4 Analisis Pengaruh Jenis dan Persentase Serbuk terhadap Sifat Rheolog Feedstock

Feedstock injection molding memiliki beberapa sifat yang diperlukan agar *feedstock* dapat diproses dengan baik dan menghasilkan produk. Salah satu sifat ini adalah viskositas *feedstock* PA6/Logam. Viskositas relatif *feedstock* dapat diestimasi dengan perhitungan. Perhitungan viskositas didasarkan pada viskositas relatif *feedstock* dan viskositas PA6 pada temperatur 253,3°C dan shear rate 10.000 s⁻¹. Adapun viskositas PA6 pada temperatur dan shear rate ini adalah sebesar 35,0551 Pa.s. Pada temperatur ini, *feedstock* telah mencair dan memiliki tampilan seperti pasta. Adapun hasil estimasi viskositas *feedstock* PA6/Logam disajikan pada **Tabel 4.4**

Tabel 4.4 Viskositas *feedstock* PA6/Logam hasil perhitungan

| Jenis <i>Feedstock</i> | %vol Serbuk | Viskositas relatif | Viskositas <i>Feedstock</i> (Pa.s) |
|------------------------|-------------|--------------------|------------------------------------|
| PA6/85Fe | 45,08025 | 10,647778 | 378,52958 |
| PA6/90Fe | 56,5913 | 59,75407 | 2.124,263 |
| PA6/92Fe | 62,4881 | 669,6016 | 23.804,40208 |
| PA6/85FeNi | 44,36813 | 9,9254363 | 352,85025 |
| PA6/90FeNi | 55,8824 | 50,8231 | 1.806,766 |
| PA6/92FeNi | 61,1033 | 415,3101 | 14.764,31407 |
| PA6/85SS304L | 44,67497 | 10,227374 | 363,58416 |
| PA6/90SS304L | 56,1884 | 54,41469 | 1.934,448 |
| PA6/92SS304L | 62,1033 | 503,5125 | 17.899,91975 |

Pada hasil perhitungan viskositas *feedstock* PA6/Logam, terlihat bahwa viskositas meningkat seiring dengan peningkatan fraksi volume serbuk pada *feedstock*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Abdullah dan Kim, serbuk logam pada *feedstock* menimbulkan hambatan geser (*frictional resistance*) yang menghambat mobilitas rantai molekul pada polimer. (Abdullah et al., 2018; Kim et al., 2019). Terhambatnya mobilitas rantai molekul ini menyebabkan *feedstock* lebih sulit terdeformasi dan mengalir. Adapun kesulitan untuk *feedstock* untuk mengalir ditunjukkan dengan meningkatnya viskositas *feedstock*. Peningkatan viskositas *feedstock* menurunkan sifat rheologi *feedstock* PA6/Logam.

Selain persentase serbuk, hal lain yang memengaruhi viskositas relatif *feedstock* adalah densitas partikel logam. Semakin tinggi densitas partikel maka viskositas akan menurun. Hal ini terjadi karena dengan densitas yang tinggi maka persentase volume serbuk pada persentase massa yang sama akan lebih sedikit. Sebagai contoh, fraksi *feedstock* PA6/Fe85 lebih tinggi dibandingkan fraksi volume serbuk pada *feedstock* PA6/FeNi85. Hal ini disebabkan karena densitas serbuk FeNi lebih tinggi (8,1 g/cm³) dibandingkan densitas serbuk besi (7,87 g/cm³). Penambahan serbuk akan menimbulkan hambatan geser yang menghambat mobilitas rantai molekul polimer. Dengan jumlah serbuk yang sedikit, hambatan bagi rantai polimer untuk bergerak atau mengalir akan sedikit sehingga viskositas menjadi lebih rendah.

Dalam perhitungan viskositas *feedstock* PA6/Logam, *shear rate* diasumsikan sebesar 10.000 s⁻¹ dan temperatur 253,3°C. Berdasarkan hasil pengujian DSC, pada temperatur 253,3°C *feedstock* telah melewati temperatur leleh (T_m). Pada temperatur 253°C PA6 pada *feedstock* telah meleleh sepenuhnya dan mengisi rongga diantara serbuk sehingga *feedstock* dapat mengalir. Pengujian lain yang digunakan untuk mengkarakterisasi sifat thermal dari *feedstock* PA6/Logam adalah pengujian Thermogravimetric Analysis (TGA). Dengan karakterisasi TGA, dapat diperoleh informasi mengenai temperatur dekomposisi PA6 pada *feedstock*. Adapun hasil pengujian DSC/TGA disajikan dengan **Tabel 4.5** sebagai berikut

Tabel 4.5 Hasil karakterisasi DSC/TGA *feedstock* PA6/Logam

| <i>Feedstock</i> | T_m (°C) | <i>Decomposition onset</i> (°C) | <i>Decomposition Peak</i> (°C) | <i>Exothermic Peak</i> (°C) |
|------------------|------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| PA6/85Fe | 222,32 | 375,28 | 419.73 | 451.89 |
| PA6/85FeNi | 221.21 | 383.71 | 415.49 | 463.42 |
| PA6/90FeNi | 210.99 | 380.66 | 417.22 | 457.43 |
| PA6/92FeNi | 222.61 | 378.44 | 417.46 | 456.14 |
| PA6/85SS304L | 222.23 | 376.10 | 414.13 | 470.21 |
| PA6/90SS304L | 216.48 | 361.95 | 405.74 | 452.24 |
| PA6/92SS304L | 229.78 | 369.35 | 410.10 | 454.14 |

Temperatur leleh (T_m) *feedstock* diperoleh dari puncak endothermic (*endothermic peak*) pada grafik *heat flux* vs temperatur. Pada temperatur mendekati T_m , *feedstock* akan menyerap energi sehingga molekul polimer memiliki energi untuk bergerak. Pada leleh, polimer akan memiliki energi yang cukup sehingga mudah untuk mengalir. Penyerapan energi ini ditunjukkan pada puncak *endothermic* yang menandakan adanya energi yang mengalir masuk kedalam spesimen. Seluruh *feedstock* pada penelitian ini menggunakan polimer dengan jenis yang sama yakni poliamida 6 (PA6), sehingga tidak terdapat perbedaan signifikan pada temperatur leleh *feedstock* (Kim et al., 2019).

Temperatur awal (*onset*) dekomposisi PA6 pada *feedstock* dapat diketahui melalui grafik temperatur vs massa spesimen hasil karakterisasi TGA. Temperatur *onset* dapat diketahui dari terjadinya penurunan massa spesimen secara signifikan. Pemanasan molekul polimer menyebabkan molekul polimer mudah untuk bergerak. Namun, pemanasan pada temperatur yang terlalu tinggi menyebabkan putusannya ikatan antar atom pada molekul polimer. Terputusnya ikatan antar atom ini mengurangi massa *feedstock*. Seiring dengan meningkatnya temperatur, laju degradasi polimer akan semakin tinggi hingga mencapai temperatur puncak (*peak*). Setelah melewati temperatur puncak, laju degradasi molekul polimer akan berkurang. Adapun temperatur awal degradasi dan temperatur puncak degradasi pada *feedstock* PA6/logam tidak ada perubahan signifikan. Hal ini disebabkan karena jenis polimer yang digunakan sama, yakni PA6. Poliamida 6 mulai terdegradasi pada temperatur 380°C dan proses depolimerisasi terjadi pada temperatur 400 – 500°C (Majka et al., 2018).

Hasil pengujian dari penelitian ini dirangkum dalam **Tabel 4.5** sebagai berikut. Data yang sesuai dengan teori atau parameter keberhasilan yang digunakan diberi warna biru.

Tabel 4.6 Tabulasi Hasil Penelitian *Feedstock* PA6/Logam

| <i>Feedstock</i> | Viskositas (Pa.s) | Kekuatan Tekan (MPa) | Keterangan |
|------------------|-------------------|----------------------|------------|
| Standard | 1.000 * | 68,7** | Standard |
| PA6/85Fe | 378,52958 | 144,503 | ✓ |
| PA6/85FeNi | 352,85025 | 121,5 | ✓ |
| PA6/90FeNi | 1.806,766 | 143,56 | X |
| PA6/92FeNi | 14.764,31407 | 150.95 | X |
| PA6/85SS304L | 363,58416 | 126,096 | ✓ |
| PA6/90SS304L | 1.934,448 | 128,57 | X |
| PA6/92SS304L | 17.899,91975 | 134,783 | X |

*Viskositas *feedstock* MIM dengan komposisi 91 wt% M2 HSS dan 9 wt% PAN 250 polymer binder (Liu et al., 2003)

**Proyektil frangible SR (Rydlo, 2010)

Berdasarkan pengujian tekan dan perhitungan viskositas terhadap *feedstock* PA6/Logam dapat diketahui dari **Tabel 4.5** bahwa semua variasi memiliki sifat mekanik yang melampaui batas minimum kekuatan tekan untuk material proyektil *frangible* berdasarkan Rydlo (2010) sebesar 68,7 MPa. Kekuatan tekan tertinggi diperoleh pada *feedstock* PA6/Fe85 sebesar 144,503 MPa dan kekuatan tekan terendah pada *feedstock* PA6/FeNi85 sebesar 121,5 MPa. Namun, hanya terdapat tiga variasi *feedstock* yang memenuhi standard viskositas maksimum berdasarkan Afrilianda (2007). Variasi *feedstock* yang memenuhi standard viskositas maksimum adalah *feedstock* PA6/Fe85, PA6/FeNi85, dan PA6/SS304L85. Berdasarkan hasil penelitian ini, *feedstock* yang memenuhi spesifikasi viskositas dan kekuatan tekan sebagai *feedstock* proyektil *frangible* adalah *feedstock* PA6/Fe85, PA6/FeNi85, dan PA6/SS304L85.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Persentase serbuk logam berbanding terbalik dengan sifat rheologi *feedstock* PA6/Logam. Semakin tinggi persentase serbuk logam maka sifat rheologi akan berkurang. Berdasarkan variasi jenis logam Fe, FeNi, dan SS304L sifat rheologi tertinggi diperoleh pada semua jenis logam dengan persentase 85 wt%. Hal ini menunjukkan pada persentase serbuk 85 wt% *feedstock* memenuhi persyaratan sifat rheologi.
2. Persentase serbuk logam berbanding lurus dengan kekuatan tekan *feedstock* PA6/Logam. Peningkatan persentase serbuk logam meningkatkan kekuatan tekan *feedstock* komposit PA6/Logam. Seluruh variabel *feedstock* pada penelitian ini telah melampaui kekuatan tekan minimum *feedstock* proyektil frangible. Namun hanya *feedstock* PA6/Fe85, PA6/FeNi85, PA6/SS304L85 yang memenuhi persyaratan kekuatan tekan dan viskositas *feedstock*.

5.2 Saran

Saran pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pembuatan *feedstock* berbahan komposit PA6/Logam dilakukan menggunakan mesin *twin screw extruder* sehingga kecepatan *screw*, dan durasi proses pencampuran dapat seragam untuk *feedstock*
2. Melakukan pengujian sifat rheologi menggunakan *rheometer* maupun *melt flow indexer* yang sesuai untuk material komposit

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A. M., Rahim, T. N. A. T., Hamad, W. N. F. W., Mohamad, D., Akil, H. M., & Rajion, Z. A. (2018). Mechanical and Cytotoxicity Properties of Hybrid Ceramics Filled Polyamide 12 Filament Feedstock for Craniofacial Bone Reconstruction via Fused Deposition Modelling. *Dental Materials*, 34(11), e309–e316. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.09.006>
- Afrilinda, E., Virdhian, S., & Doloksaribu, M. (2017). Studi Awal Pembuatan Feedstock Metal Injection Moulding Menggunakan Torque Rheometer. *Metal Indonesia*, 39(1), 33. <https://doi.org/10.32423/jmi.2017.v39.33-44>
- Aggen, G., Akstens, F. W., Allen, C. M., Avery, H. S., Babu, P., Bayer, A. M., Bello, F., Bhat, S. P., Blair, M., Boardman, B., Boehm, K. W., Boulger, F. w., Bouse, G. K., Bowles, J. L., Boyd, J. D., Bramfitt, B. L., Bratt, R. W., Brentnall, W. D., Brinkmann, C. R., ... Cantwell, A. P. (1993). ASM Handbook Volume 1 Properties and Selections: Iron Steels and High Performance Alloys. In *Metals* (Vol. 9, Issue 5). ASM International. <https://doi.org/10.3390/met9050560>
- Arif, A., Sulong, A. B., Muhamad, N., Muchtar, A., & Ramli, M. I. (2019). Processing of Stainless Steel (SS316L)-Hydroxyapatite (HA) Powder Composite through Powder Injection Molding. *Symposium of Emerging Nuclear Technology and Engineering Novelty*, 1198.
- Asmawi, R., Ibrahim, M. H. I., Amin, A. M., & Mustafa, N. (2016). Characterization of Stainless Steel 316L Feedstock for Metal Injection Molding (MIM) Using Waste Polystyrene and Palm Kernel Oil Binder System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 160(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/160/1/012062>
- Aziz, M., Trad, B., Demers, V., & Dufresne, L. (2019). Effect of Powder Shape and Size on Rheological , Thermal , and Segregation Properties of Low-Pressure Powder Injection Molding Feedstocks. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(9), 5551–5562. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04276-9>
- Baird, D. G., Barres, C., Cassagnau, P., Chatterjee, T., Choi, H. J., Cloitre, M., Eberle, A. P. R., Fang, F. F., Gotsis, A., Vlachopoulos, J., & Vlassopoulos, D. (2012). *Applied Polymer Rheology: Polymeric Fluids with Industrial Applications* (M. Kontopoulou (ed.)). John Wiley & Sons, Inc.
- Banovic, S., Mates, S. P., Rhorer, R., Whinton, E., & Fields, R. (2008). Tensile Strength Measurements of Frangible Bullets Using the Diametral Compression Test. *International Journal of Impact Engineering*, 35(6), 511–520. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.04.005>
- Belanger, G., & Potvin, M. (1993). *Frangible Practice Ammunition* (Patent No. 5,237,930). the United States Patent and Trademark Office.
- Biron, M. (2007). *Thermoplastics and Thermoplastic Composites - Technical Information for Plastics Users*. Elsevier Science.
- Bramfitt, B. L., Kelly, J., Kaufman, J. G., Weed, R. D., Kundig, K. J. A., Donachie, M. J., Baker, B. A., Smith, G. D., & Brown, R. E. (2015). *Mechanical Engineer's Handbook: Materials dan Engineering Mechanics Volume 1* (M. Kutz (ed.)). Wiley.
- Bui, X. S., Komenda, J., & Vitek, R. (2017). Frangibility of Frangible Bullet Upon Impact on A Hard Target. *ICMT 2017 - 6th International Conference on Military Technologies*, 7–11. <https://doi.org/10.1109/MILTECHS.2017.7988721>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2015). *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*. Wiley.
- Chawla, K. K. (2020). *Composite Materials: Science and Engineering* (Third, Vol. 263).

- Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35098-7_11
- Crundwell, F., Moats, M., Robinson, T., Ramachandran, V., & Davenport, W. . (2011). *Extractive Metallurgy of Nickel and Cobalt*. Elsevier.
- Dewanto, H. A. (2014). *Pengaruh Persen Massa Poliamida-6 dan Temperatur Sintering Terhadap Mikrostruktur dan Sifat Mekanik Proyektil Komposit Tembaga - Poliamida (Cu-PA6)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Falah, F. M. (2018). *Pengaruh Jenis Polimer Dan Wt% Tembaga Terhadap Sifat Fisik Dan Mekanik Material Komposit Tembaga/Polimer Sebagai Kandidat Material Peluru Frangible*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Folaron, R., Kent, H. D., & Folaron, J. (2020). *Multifunctional Composite Projectiols and Methods of Manufacturing The Same* (Patent No. US 10,760,885 B2). the United States Patent and Trademark Office.
- German, R. M. (2016). *Particulate composites: Fundamentals and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29917-4>
- Giles, H. F., Wagner, J. R., & Mount, E. M. (2005). Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook. In *New York* (Issue November). <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Extrusion+:+The+Definitive+Processing+Guide#0>
- Groover, M. P. (2013). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Process, and System Fifth Edition* (G. L. Tonkay (ed.)). Wiley.
- Hansen, R. D. (2008). Bullet Composition (Patent No. US 7,392,746 B2). In *United State Patent* (US 7,392,746 B2). the United States Patent and Trademark Office.
- Heaney, D. F. (2012). *Handbook of Metal Injection Molding* (D. F. Heaney (ed.); First). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096234>
- Heard, B. J. (2009). *Handbook of Firearms and Ballistics: Examining and Interpreting Forensic Evidence by 2nd edn B.J. Heard and Truth Machine: The Contentious History of DNA Fingerprinting by M. Lynch, S.A. Cole, R. McNally and K. Jordan* (Vol. 49, Issue 1). WILEY-BLACKWELL. https://doi.org/10.1111/j.1468-2311.2009.00600_2.x
- Hidalgo, J., Jiménez-Morales, A., Barriere, T., Gelin, J. C., & Torralba, J. M. (2014). Water Soluble Invar 36 Feedstock Development for μ IM. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(2), 436–444. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.014>
- Joys, J., Anshutz, S., & Ramsey, K. C. (2012). *LEAD FREE FRANGIBLE BULLETS* (Patent No. US 8,312,815 B1). the United States Patent and Trademark Office.
- Kalpakjian, SeropeSchmid, S. R. (2010). Manufacturing Engineering and Technology. In H. Stark (Ed.), *Choice Reviews Online* (Sixth, Vol. 27, Issue 09). Prencie Hall. <https://doi.org/10.5860/choice.27-5145>
- Karsli, N. G., Ozkan, C., Aytac, A., & Deniz, V. (2013). Effects of Sizing Materials on the Properties of Carbon Fiber-Reinforced Polyamide 6,6 Composites. *POLYMER COMPOSITES*, 16(2), 1583–1590. <https://doi.org/10.1002/pc>
- Kim, Y. S., Kim, J. K., & Jeon, E. S. (2019). Effect of The Compounding Conditions of Polyamide 6, Carbon Fiber, and Al₂O₃ on The Mechanical and Thermal Properties of The Composite Polymer. *Materials*, 12(18), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ma12183047>
- Koene, L. (2016). Modelling Bullet ricochet From Wooden Targets. *Proceedings - 29th International Symposium on Ballistics, BALLISTICS 2016*, 2(May), 1952–1963.
- Kong, X., Quinard, C., Barrière, T., & Gelin, C. (2009). Mixing and Characterisation of Stainless Steel 316L Feedstock. *International Journal of Material Forming*, 2(SUPPL. 1), 709–712. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0652-0>
- Kulshreshtha, A. K. (2002). *Handbook of Polymer Blends and Composites, Volume 4B* (C. Vasile (ed.); Vol. 4B, Issue 0). Rapra Technology Limited.

- <https://books.google.com/books?id=k8IWp2Z33yQC&pgis=1>
- Li, Y., Li, L., & Khalil, K. A. (2007). Effect of Powder Loading on Metal Injection Molding Stainless Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 183(2–3), 432–439. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.039>
- Liu, Z. Y., Loh, N. H., Tor, S. B., & Khor, K. A. (2003). Characterization of Powder Injection Molding Feedstock. *Materials Characterization*, 49(4), 313–320. [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(02\)00282-6](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(02)00282-6)
- Majka, T. M., Cokot, M., & Pielichowski, K. (2018). Studies on The Thermal Properties and Flammability of Polyamide 6 Nanocomposites Surface-Modified via Layer-by-Layer Deposition of Chitosan and Montmorillonite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(1), 405–416. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6849-4>
- Malkin, A. Y., & Isayev, A. (2017). Rheology: Concepts, Methods, and Applications: Concepts, Methods, and Applications 3rd Edition. In *Rheology. Concepts, Methods, and Applications: 3rd Edition (Third)*. ChemTec Publishing.
- Mindivan, F. (2016). Effect of Crystalline Form (Γ) of Polyamide 6 / Graphene Nanoplatelets (Pa6/Gn) Nanocomposites on Its Structural and Thermal Properties. *Machines. Technologies. Materials.*, 10(11), 56–59.
- Moon, A. P., Dwarapudi, S., Sista, K. S., Kumar, D., & Sinha, G. R. (2021). Opportunity and Challenges of Iron Powders for Metal Injection Molding. *ISIJ International*, 61(7), 2015–2033. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-050>
- Morse, J. F., Nauman, R., & Nichols, R. C. (2017). *FRANGIBLE FIREARM PROJECTILES, METHODS FOR FORMING THE SAME, AND FIREARM CARTRIDGES CONTAINING THE SAME* (Patent No. WO 2017/213727 A2). World Intellectual Property Organization.
- Morse, J. F., Nauman, R., & Nichols, R. C. (2019). *Frangible Firearm Projectiles, Method for Forming The Same, and Firearm Cartridges Containing The Same* (Patent No. US 10,260,850 B2). the United States Patent and Trademark Office.
- Nunes, R., Adams, J. H., Ammons, M., Avery, H. S., Barhurst, R. J., Bean, J. C., Beaudry, B. J., Berry, D. F., Black, W. T., Bess, M., Biermann, R. J., Blackmon, C. M., Blaugher, R. D., Bounds, C. O., Bray, J. W., Brodsky, M. B., Brog, T. K., & Capellen, J. (1990). *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* (Vol. 157, Issue 7). ASM International. <https://doi.org/10.1007/s004310050884>
- Rane, K., Barriere, T., & Strano, M. (2020). Role of Elongational Viscosity of Feedstock in Extrusion-Based Additive Manufacturing of Powder-Binder Mixtures. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(11–12), 4389–4402. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05323-9>
- Ren, F., Zhou, R., Sun, F., Ma, H., Zhou, Z., & Xu, W. (2017). Blocked Isocyanate Silane Modified Al₂O₃/Polyamide 6 Thermally Conductive and Electrical Insulation Composites with Outstanding Mechanical Properties. *RSC Advances*, 7(47), 29779–29785. <https://doi.org/10.1039/c7ra04454b>
- Rydlo, M. (2010). Theoretical Criterion for Evaluation of The Frangibility Factor. *Advances in Military Technology*, 5(2).
- Seeman, D. J., & Privette, D. (2016). *Composite Projectile and Cartridge with Composite Projectile* (Patent No. US 2016/0252336 A1). the United States Patent and Trademark Office. US 2016/0252336 A1
- Shaw, M. T. (2012). *Introduction to Polymer Rheology: Vol.* John Wiley & Sons, Inc.
- Song, W., Gu, A., Liang, G., & Yuan, L. (2011). Effect of The Surface Roughness on Interfacial Properties of Carbon Fibers Reinforced Epoxy Resin Composites. *Applied Surface Science*, 257(9), 4069–4074. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.11.177>

- Swanson, T., Kosak, J., Us, C. O., Nellums, R., Hill, S., Us, T. N., Wikstrom, K., & Us, C. O. (2021). *Castable Frangible Projectile* (Patent No. US 11,105,597 B1). the United States Patent and Trademark Office.
- Tafti, A. A., Demers, V., Majdi, S. M., Vachon, G., & Brailovski, V. (2021). Effect of Thermal debinding Conditions on The Sintered Density of Low-Pressure Powder Injection Molded Iron Parts. *Metals*, *11*(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/met11020264>
- Technologies, E. (2018). *Technical data sheet*. <http://www.ecomass.com/wp-content/uploads/TDS/TDS-1850ZN66T1-092018.pdf>
- Tehcnologies, E. (2018). *Technical data sheet*. <http://www.ecomass.com/wp-content/uploads/TDS/TDS-1850ZC84-092018.pdf>
- Ullman, F. (2016). *Ullmann's Polymer and Plastics: Product and Processes* (B. Elvers (ed.)). Wiley-VCH GmbH & Co.KGaA.
- Vergnes, B. (2015). Extrusion Defects and flow Instabilities of Molten Polymers. *International Polymer Processing*, *30*(1), 3–28. <https://doi.org/10.3139/217.3011>
- Virdhian, S., Doloksaribu, M., Supriadi, S., Balfas, N. M., Suharno, B., & Shieddieque, A. D. (2020). Characterization of 17-4 PH Stainless Steel Metal Injection Molding Feedstock Using Mixing Torque Data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *980*(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/980/1/012053>
- Wagner, J. R. (2014). *Polymer Rheology* (Second, pp. 233–240). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3481-2.00020-X>
- Xin, L. Du, Juan, L. W., Ying, X., & Xiang, L. X. (2011). Effects of Solid Lubricants on Friction and Wear Behaviors of Polyamide 6. *Journal of Applied Polymer Science*, *124*(5), 4239–4248. <https://doi.org/10.1002/app>
- Yi, X. S., Du, S., & Zhang, L. (2017). *Composite Materials Engineering* (X.-S. Yi, L. Zhang, & S. Du (eds.); Vol. 1). Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5696-3>
- You, W. K., Choi, J. P., Yoon, S. M., & Lee, J. S. (2012). Low Temperature Powder Injection Molding of Iron Micro-Nano Powder Mixture. *Powder Technology*, *228*, 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.05.016>
- Yu, J., Wang, G., & Rong, Y. (2015). Experimental Study onTthe Surface Integrity and Chip Formation in the Micro Cutting Process. *Procedia Manufacturing*, *1*(January 2016), 655–662. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.063>
- Zhang, H., Chen, L., Han, X., Jiang, F., Sun, H., & Sun, D. (2017). Enhanced Mechanical Properties of Nylon6 Nanocomposites Containing Pristine α -zirconium Phosphate Nanoplatelets of Various Sizes by Melt-Compounding. *RSC Advances*, *7*(52), 32682–32691. <https://doi.org/10.1039/c7ra05458k>
- Zheng, J. Y., Fu, M. W., & Zeng, F. (2021). Design and Development of Multi-Scaled Metallic Parts and Structures. In *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00137-X>

LAMPIRAN

A. Tabel Sifat Mekanik Feedstock PA6/Logam

| Jenis Spesimen | Yield Strength (MPa) | Yield Strain | Kekuatan Tekan (MPa) | Elongation (%) | Standard deviasi | Rerata (MPa) | E (MPa) | Rerata |
|----------------|----------------------|--------------|----------------------|----------------|------------------|--------------|-------------|-------------|
| PA6/85Fe | 137.78501 | 0.00767 | 142.67 | 1.915 | 1.860573388 | 144.5033333 | 17964.14733 | 18094.6457 |
| | 139.57645 | 0.0077 | 144.45 | 1.917 | | | 18126.81169 | |
| | 141.17751 | 0.00776 | 146.39 | 1.98 | | | 18192.97809 | |
| PA6/85FeNi | 109.46612 | 0.00837 | 118.02 | 3.771 | 3.067197418 | 121.5 | 13078.38949 | 15680.65713 |
| | 115.47715 | 0.00749 | 123.81 | 3.363 | | | 15417.51001 | |
| | 113.50196 | 0.00612 | 122.67 | 2.698 | | | 18546.0719 | |
| PA6/90FeNi | 138.46404 | 0.00748 | 146.14 | 1.982 | 4.748515558 | 143.56 | 18511.23529 | 20377.20727 |
| | 140.78073 | 0.00749 | 146.46 | 1.822 | | | 18795.8251 | |
| | 135.8 | 0.0057 | 138.08 | 1.43 | | | 23824.5614 | |
| PA6/92FeNi | 142.73789 | 0.00717 | 147.16 | 1,575 | 3.57030811 | 150.95 | 19907.65551 | 21927.38094 |
| | 148.6097 | 0.00585 | 154.25 | 1.474 | | | 25403.36752 | |
| | 146.98264 | 0.00718 | 151.44 | 1.681 | | | 20471.11978 | |
| PA6/85SS304L | 114.48682 | 0.00632 | 117.75 | 2.261 | 7.297268896 | 126.0966667 | 18115.00316 | 17229.42922 |
| | 116.06035 | 0.00716 | 129.27 | 2.204 | | | 16209.54609 | |
| | 123.45618 | 0.00711 | 131.27 | 2.365 | | | 17363.7384 | |
| PA6/90SS304L | 136.05384 | 0.006166 | 138.38 | 1.8 | 9.845186 | 128.57 | 1269.158955 | 18785.3465 |
| | 125.86057 | 0.0062 | 128.64 | 1.483 | | | 20300.09194 | |
| | 106.19 | 0.00759 | 118.69 | 0.9867 | | | 13990.77734 | |
| PA6/92SS304L | 139.5238 | 0.00655 | 139.97 | 1.383 | 6.544748531 | 134.7833333 | 21301.34351 | 20498.8231 |
| | 136.40039 | 0.00662 | 136.95 | 1.505 | | | 20604.28852 | |
| | 124.01 | 0.00633 | 127.43 | 1.159 | | | 19590.83728 | |

B. Grafik Tegangan – Regangan dan Load – Displacement *Feedstock* PA6/Fe
a. Feedstock PA6/85Fe

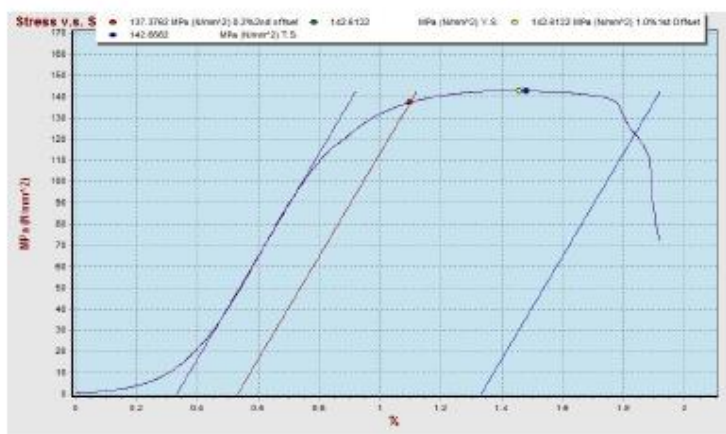
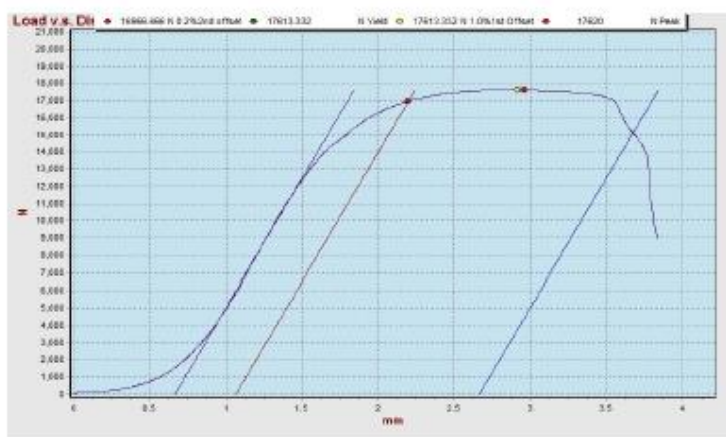
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|-----------------|---|
| Jenis Pengujian | Uji Tekan |
| Type of test | |
| Peralatan | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| Equipment | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample Fe85

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 1. | 16966,67 | 17620.0 | 137,38 | 142,67 |



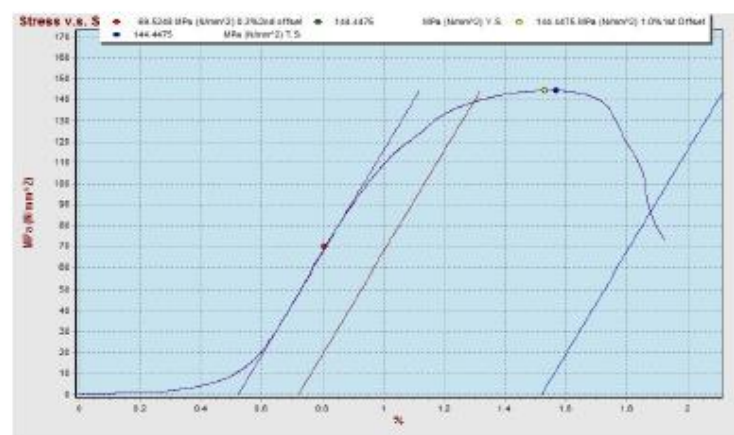
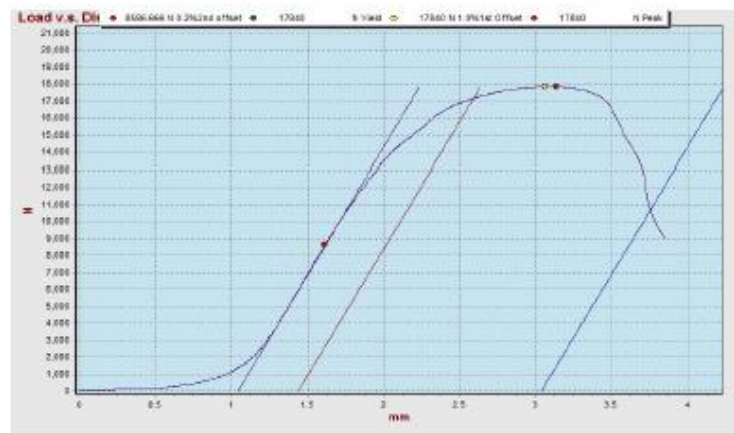
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample Fe85

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 2 | 8586,67 | 17840.0 | 69,52 | 144,45 |



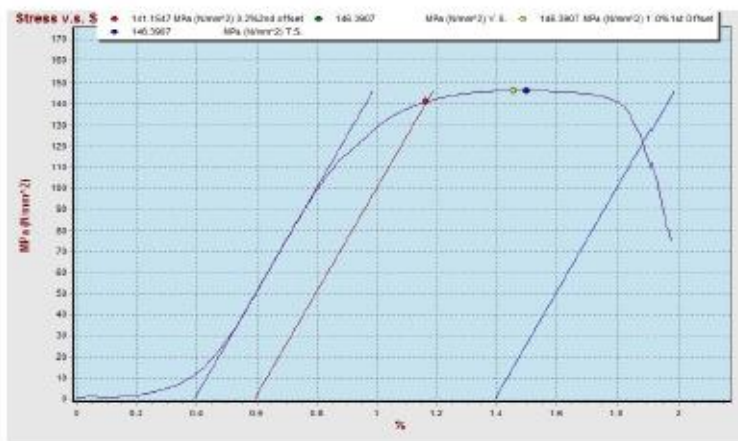
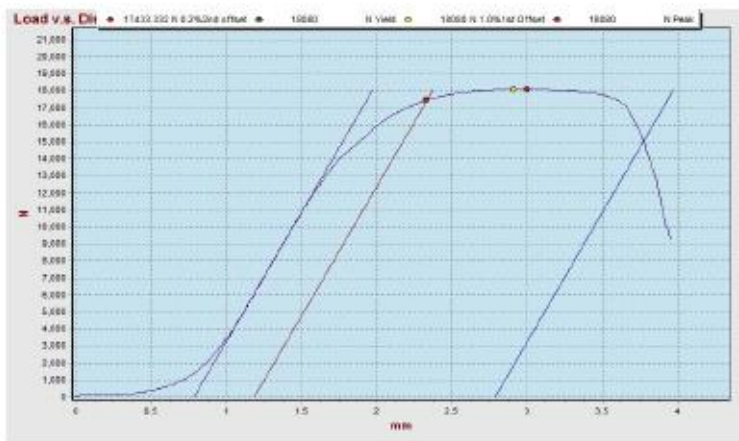
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|-----------------|---|
| Jenis Pengujian | Uji Tekan |
| Type of test | |
| Peralatan | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| Equipment | |

**HASIL PENGUJIAN
RESULT**

Sample Fe85

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 3 | 17433,33 | 18080.0 | 141,15 | 146,39 |



C. Grafik Tegangan – Regangan dan Load – Displacement *Feedstock* PA6/FeNi
a. *Feedstock* PA6/85FeNi

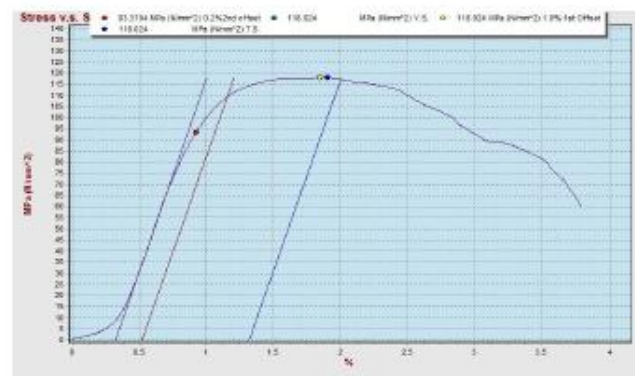
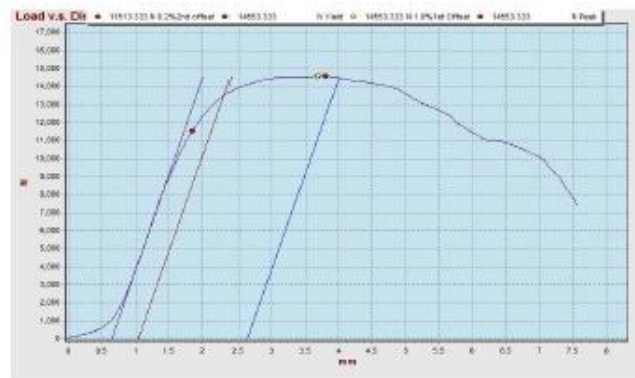
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample FeNi 85

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 1. | 11513,33 | 14553,33 | 93,37 | 118,02 |



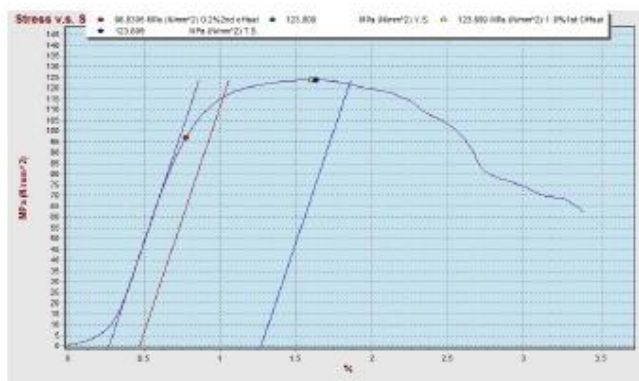
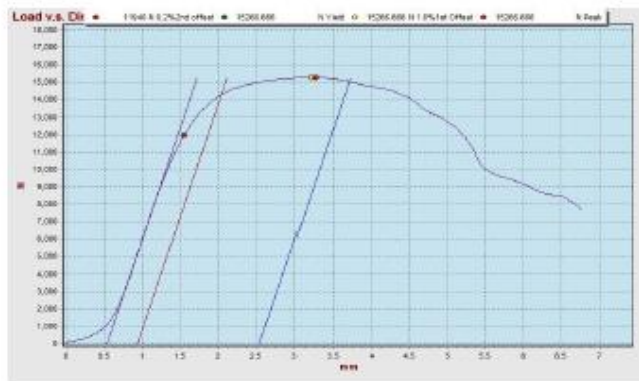
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample FeNi 85

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 2. | 11940,00 | 15266,67 | 96,83 | 123,81 |



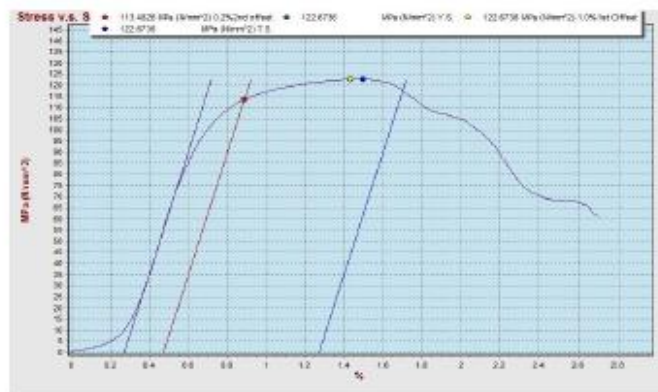
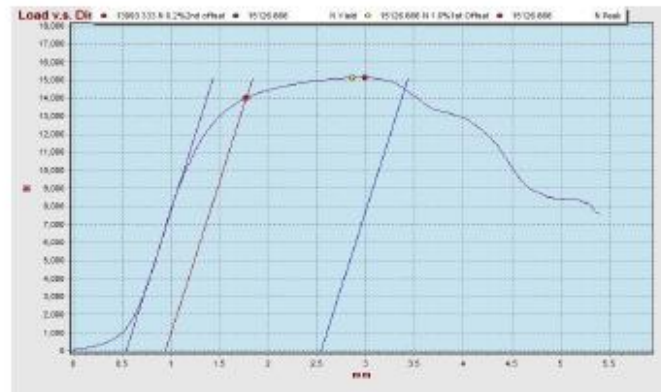
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample FeNi 85

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 3. | 13993,33 | 15126,67 | 113,48 | 122,67 |



b. Feedstock PA6/90FeNi

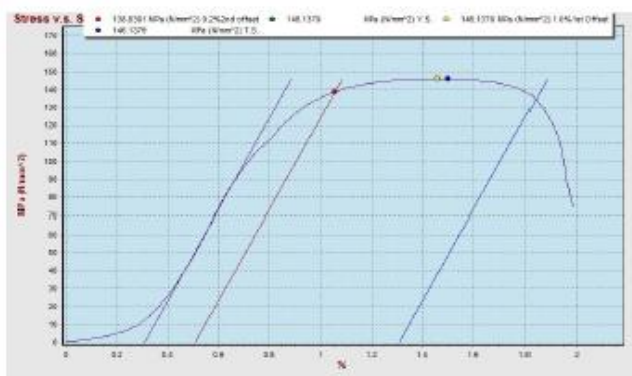
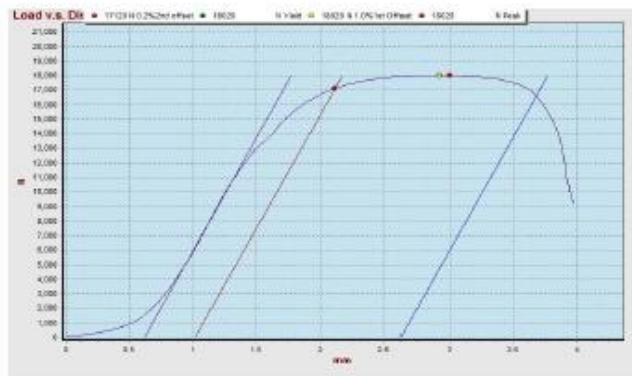
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|-----------------|---|
| Jenis Pengujian | Uji Tekan |
| Type of test | |
| Peralatan | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| Equipment | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample FeNi 90

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 1. | 17120,00 | 18020,00 | 138,84 | 146,14 |



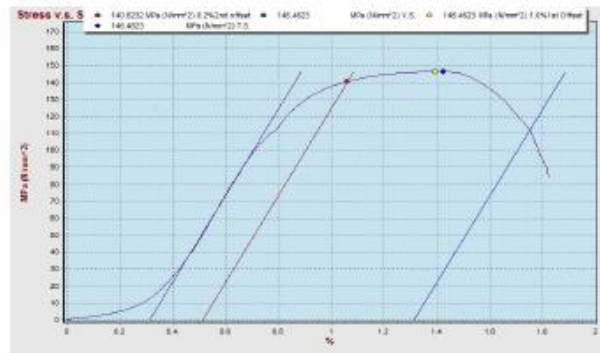
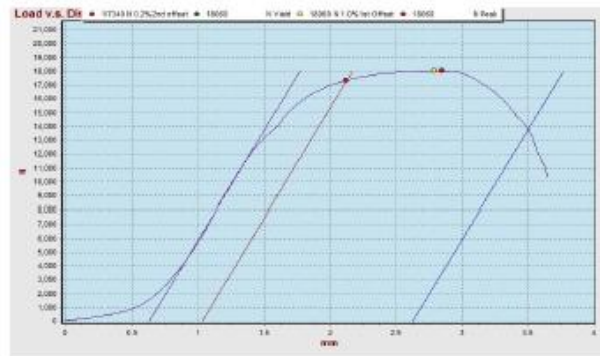
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

**HASIL PENGUJIAN
RESULT**

Sample FeNi 90

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 2. | 17340,00 | 18060,00 | 140,62 | 146,46 |



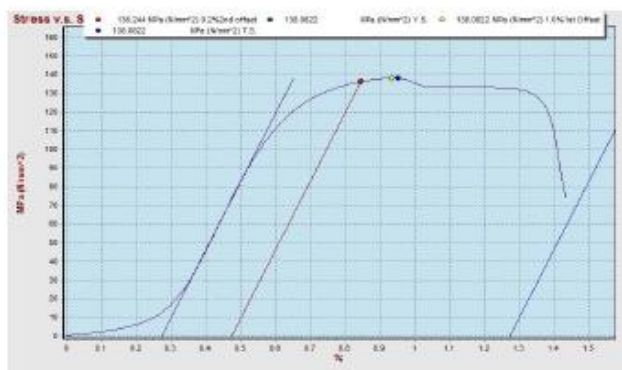
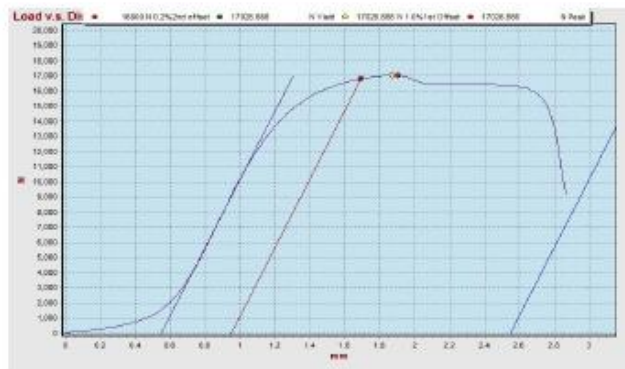
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample FeNi 90

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 3. | 16800,00 | 17026,67 | 136,24 | 138,08 |



c. Feedstock PA6/92FeNi

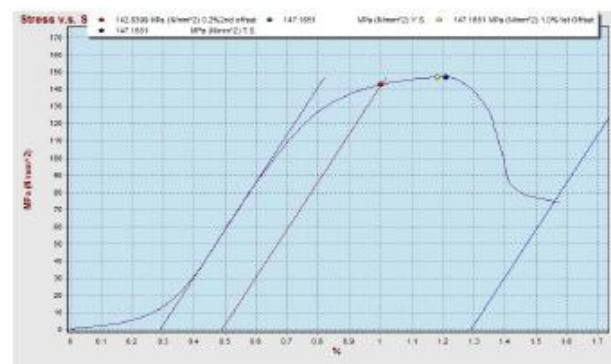
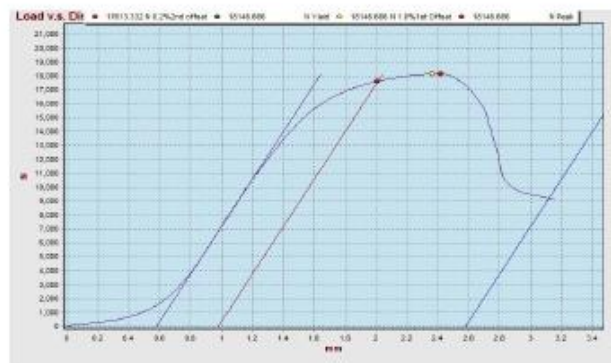
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

**HASIL PENGUJIAN
RESULT**

Sample FeNi 92

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 1. | 17613,33 | 18146,67 | 143,84 | 147,16 |



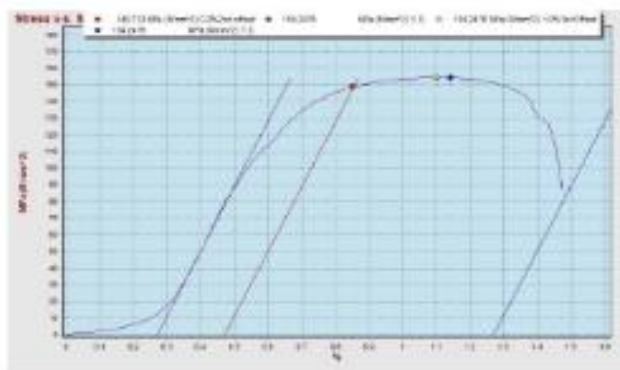
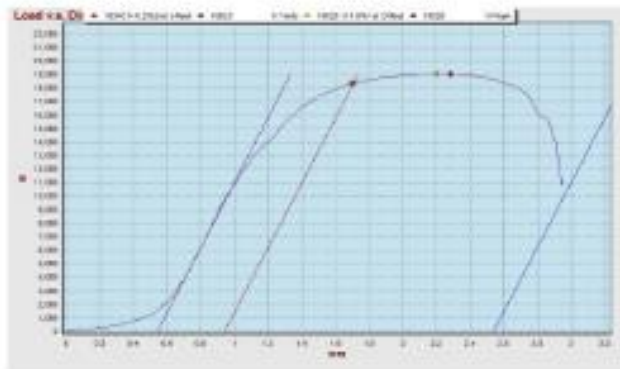
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|-----------------|---|
| Jenis Pengujian | Uji Tekan |
| Type of test | |
| Peralatan | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| Equipment | |

**HASIL PENGUJIAN
RESULT**

Sample FeNi 92

| No | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 2. | 18340,00 | 19020,00 | 148,73 | 154,25 |



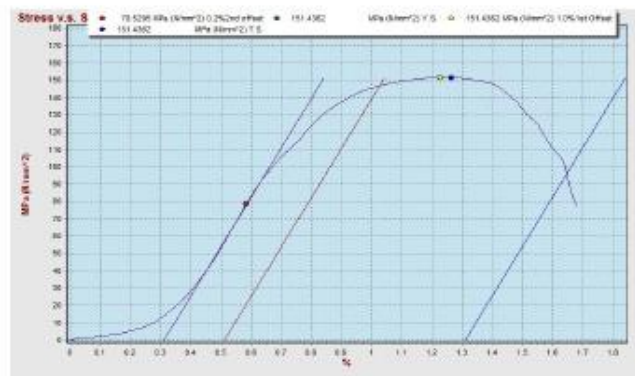
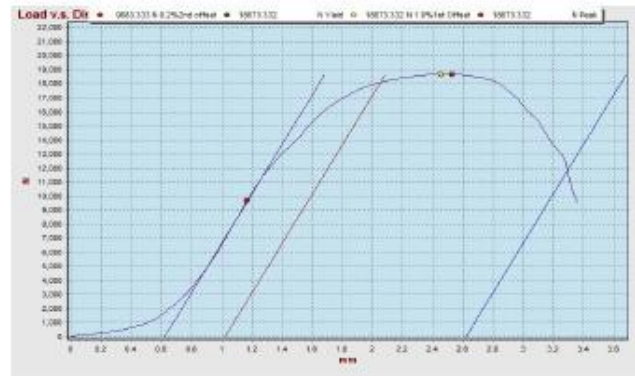
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample FeNi 92

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 3. | 9683,33 | 18673,33 | 78,53 | 151,44 |



D. Feedstock PA6/85SS304L
a. Feedstock PA6/85SS304L

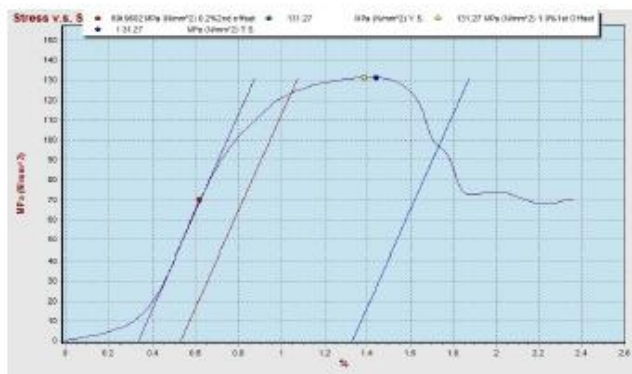
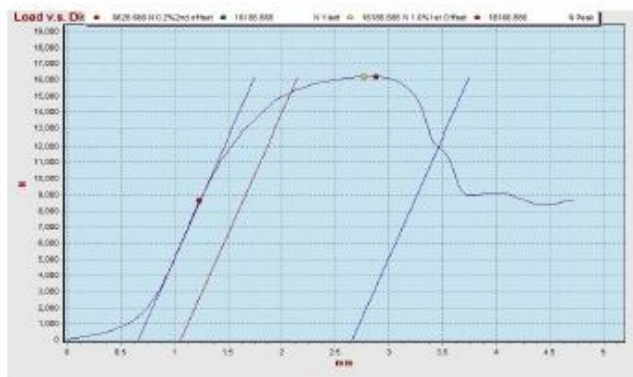
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|-----------------|---|
| Jenis Pengujian | Uji Tekan |
| Type of test | |
| Peralatan | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| Equipment | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample SS 85

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 3. | 8626,67 | 16186,67 | 69,96 | 131,27 |



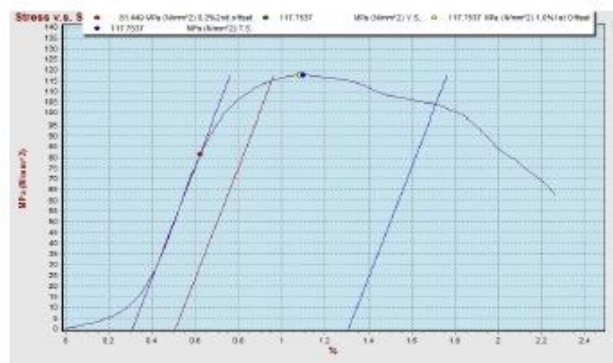
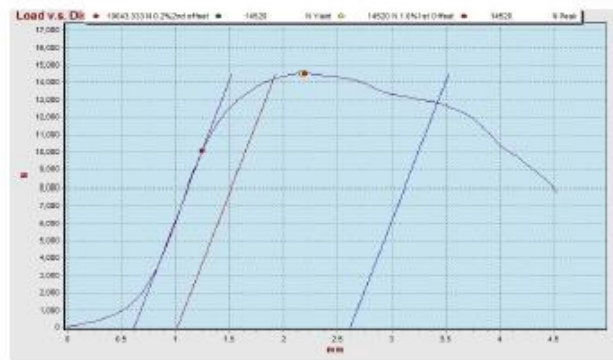
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample SS 85

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 1. | 10043,33 | 14520,00 | 81,45 | 117,75 |



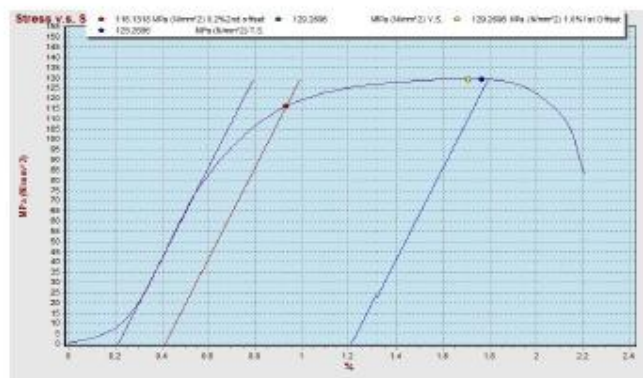
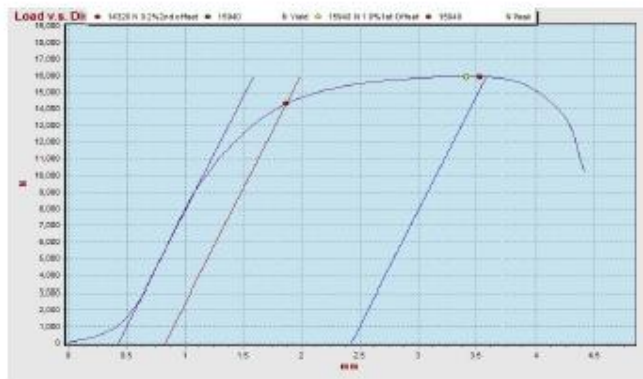
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | Uji Tekan |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample SS 85

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 2. | 14320,00 | 15940,00 | 116,14 | 129,27 |



b. Feedstock PA6/90SS304L

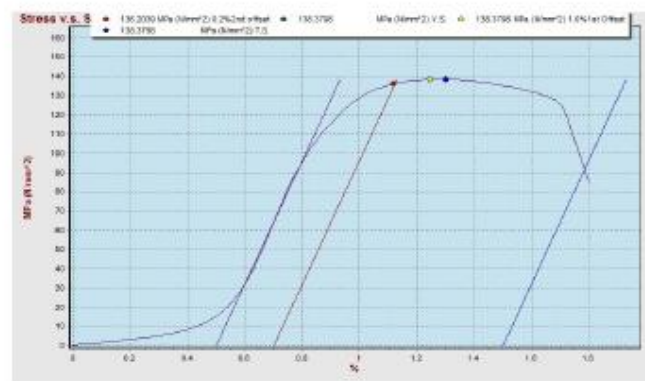
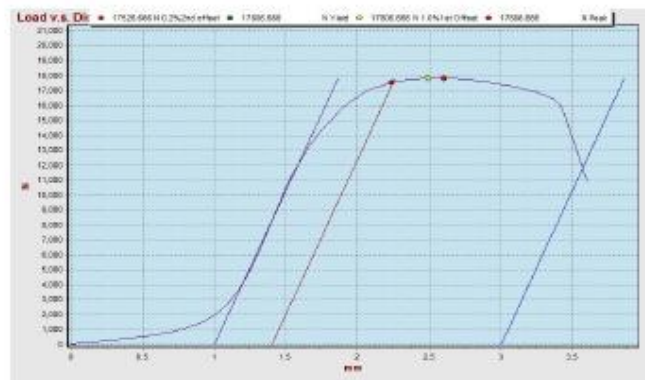
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample SS 90

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 1. | 17526,67 | 17806,67 | 136,20 | 138,38 |



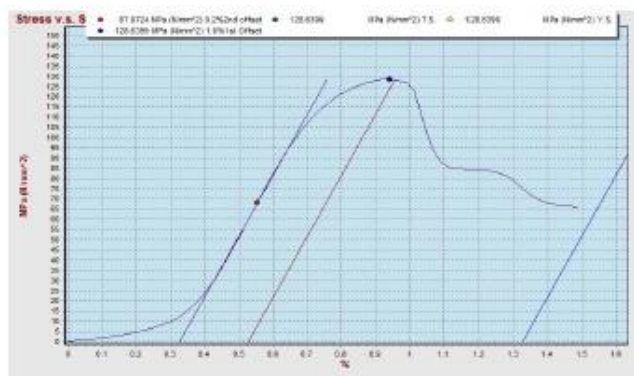
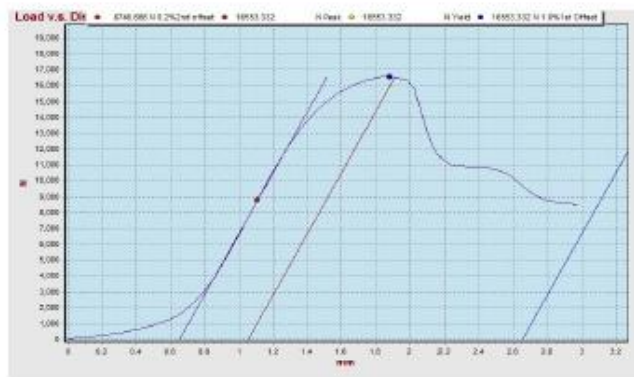
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample SS 90

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 2. | 8746,67 | 16553,33 | 67,97 | 128,64 |



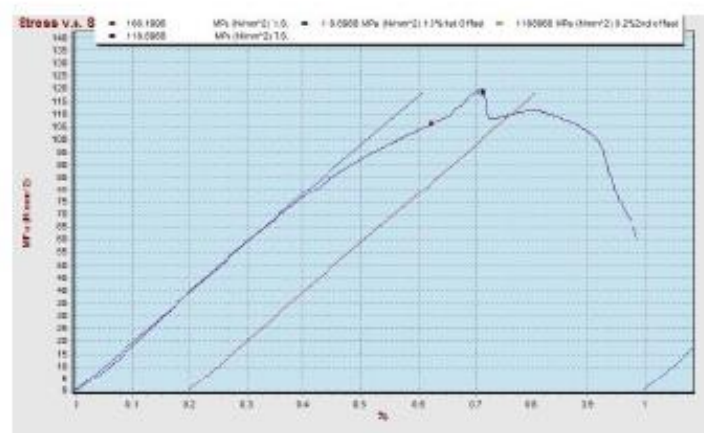
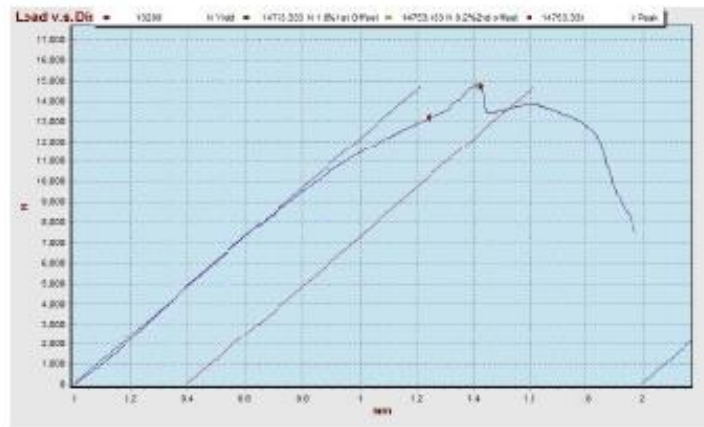
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample PA5/90SS304L

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|-------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec: | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 2. | 13200,00 | 14753,33 | 106,19 | 118,69 |



c. Feedstock PA6/92SS304L

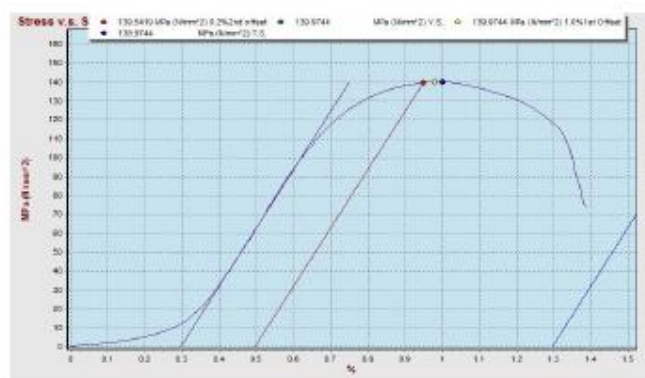
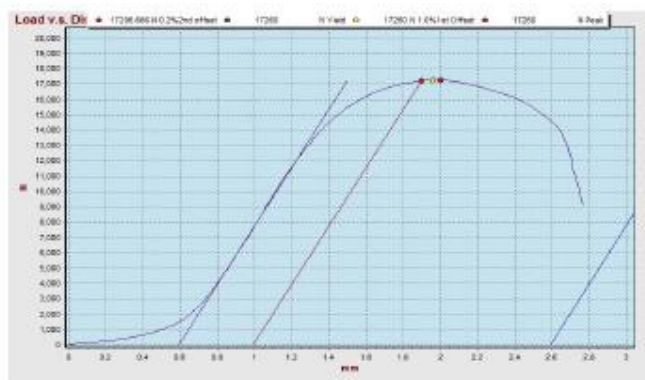
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|-----------------|---|
| Jenis Pengujian | Uji Tekan |
| Type of test | |
| Peralatan | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| Equipment | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample SS 92

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 1. | 17206,67 | 17260,00 | 139,54 | 139,97 |



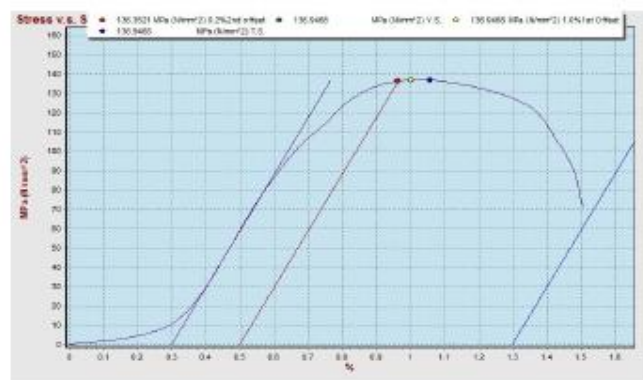
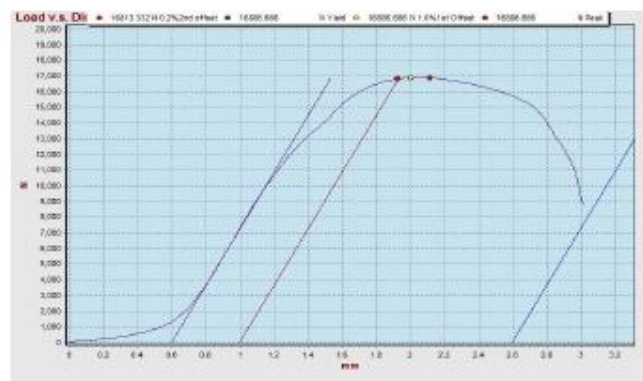
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

**HASIL PENGUJIAN
RESULT**

Sample SS 92

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 2. | 16813,33 | 16886,67 | 136,35 | 136,95 |



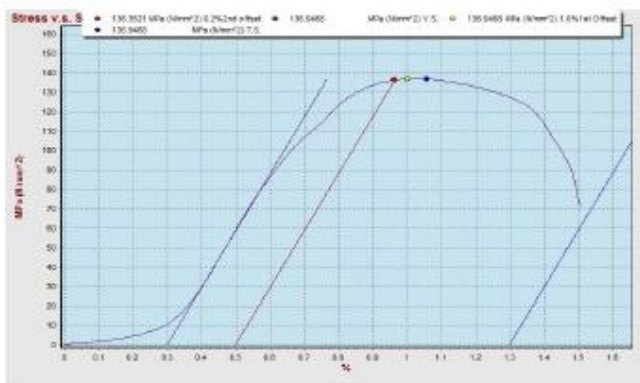
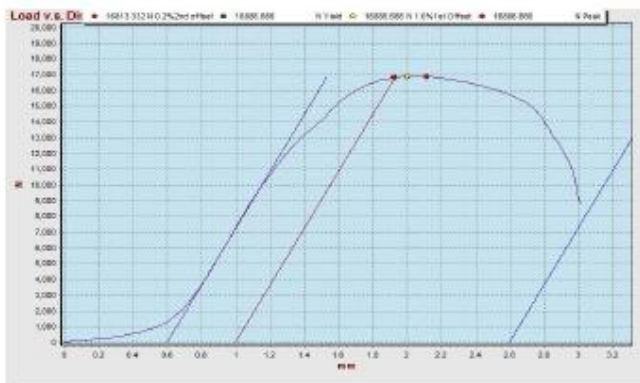
LAPORAN UJI LABORATORIUM TENSILE

| | |
|------------------------|---|
| <u>Jenis Pengujian</u> | Uji Tekan |
| <u>Type of test</u> | |
| <u>Peralatan</u> | Mesin Uji Universal " Hung Ta " Kapasitas 1000 kN |
| <u>Equipment</u> | |

HASIL PENGUJIAN
RESULT

Sample SS 92

| No. | Yield Load | Peak Load | Yield Strength | Tensile Strength |
|------|------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Spec | (N) | (N) | (N/mm ²) | (N/mm ²) |
| 2. | 16813,33 | 16886,67 | 136,35 | 136,95 |

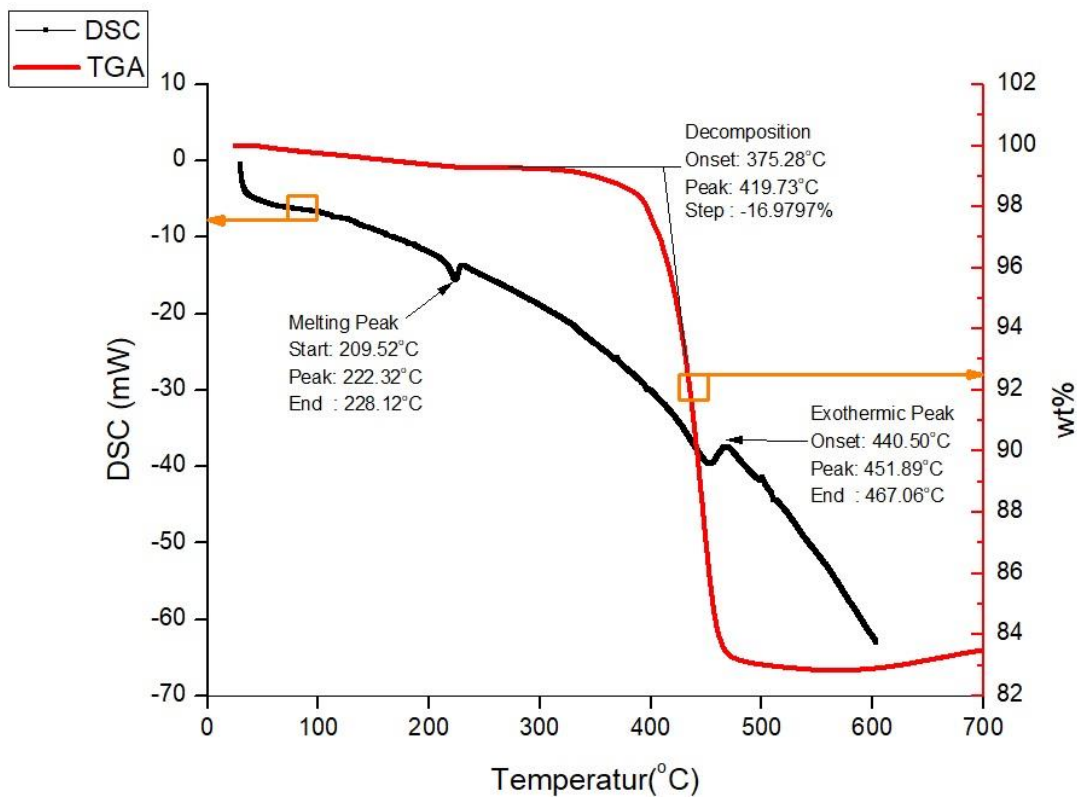


E. Tabel Perhitungan Viskositas Feedstock PA6/Logam

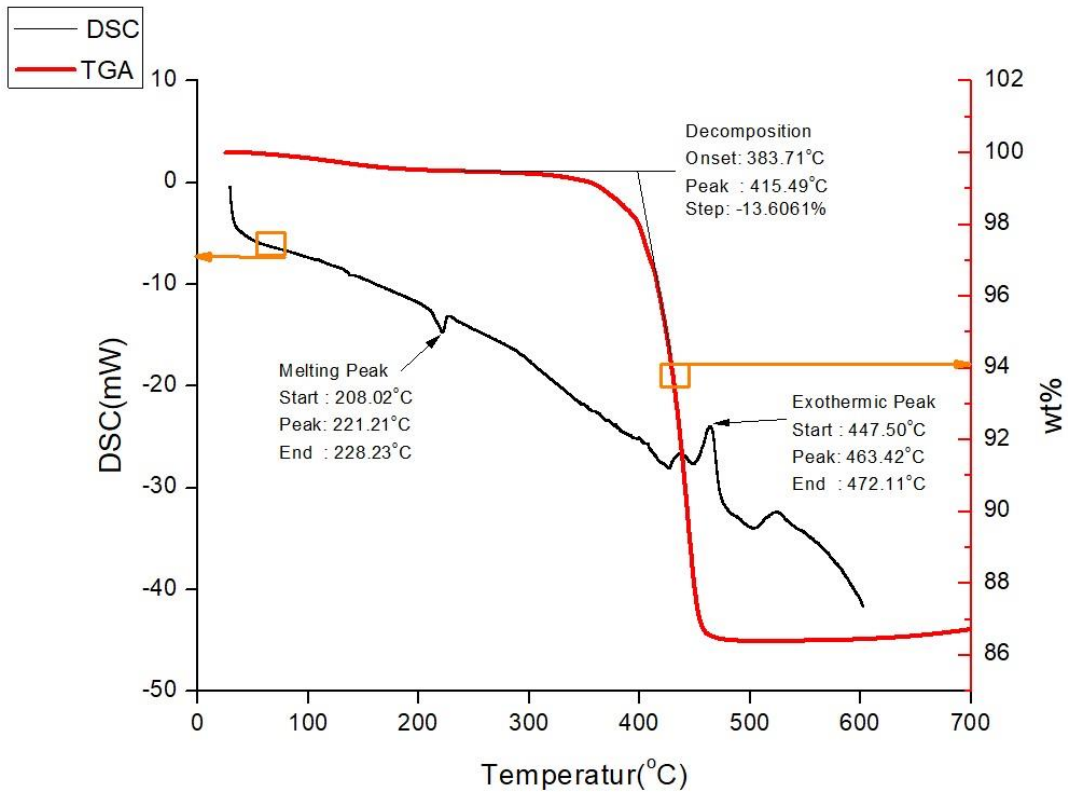
| Feedstock | Massa serbuk (%wt x 40 g) | % vol serbuk | Viskositas relatif | Viskositas feedstock (Pa.s) |
|--------------|------------------------------|--------------|-----------------------|--------------------------------|
| PA6/85Fe | 34 | 0,4507 | 10,647778 | 378,52958 |
| PA6/90Fe | 36 | 0,565917 | 59,75407 | 2.124,263 |
| PA6/92Fe | 36.8 | 0,62481 | 669,6016 | 23.804,40208 |
| PA6/85FeNi | 34 | 0,443688 | 9,9254363 | 352,85025 |
| PA6/90FeNi | 36 | 0,558828 | 50,8231 | 1.806,766 |
| PA6/92FeNi | 36.8 | 0,6181 | 415,3101 | 14.764,31407 |
| PA6/85SS304L | 34 | 0,446757 | 10,227374 | 363,58416 |
| PA6/90SS304L | 36 | 0,561889 | 54,41469 | 1.934,448 |
| PA6/92SS304L | 36.8 | 0,621034 | 503,5125 | 17.899,91975 |

F. Hasil Karakterisasi Differential Scanning Electrometry (DSC)-TGA *Feedstock* PA6/Logam

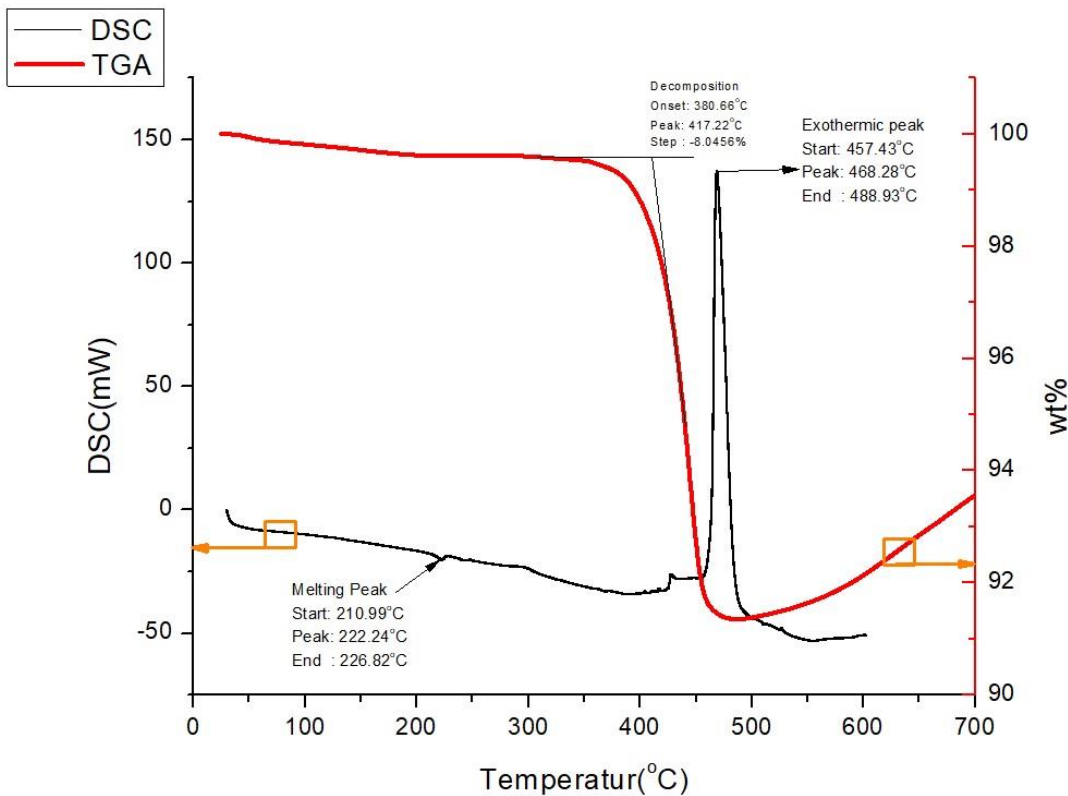
a. *Feedstock* PA6/85Fe



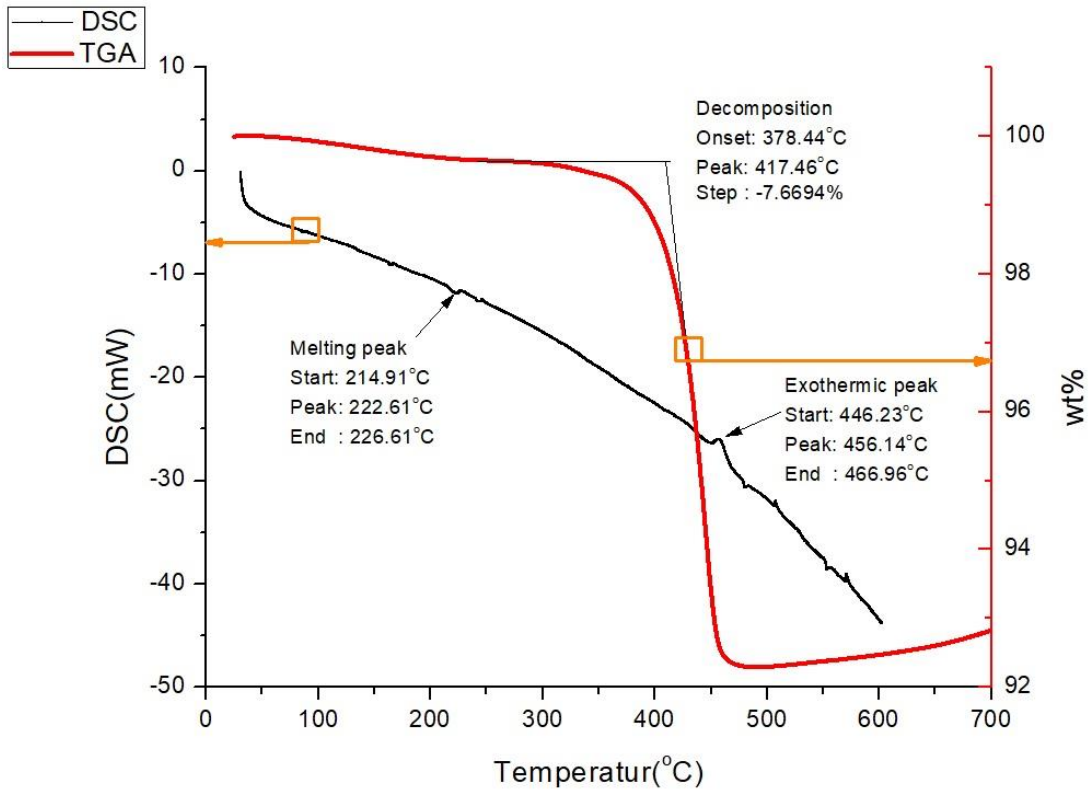
b. Feedstock PA6/85FeNi



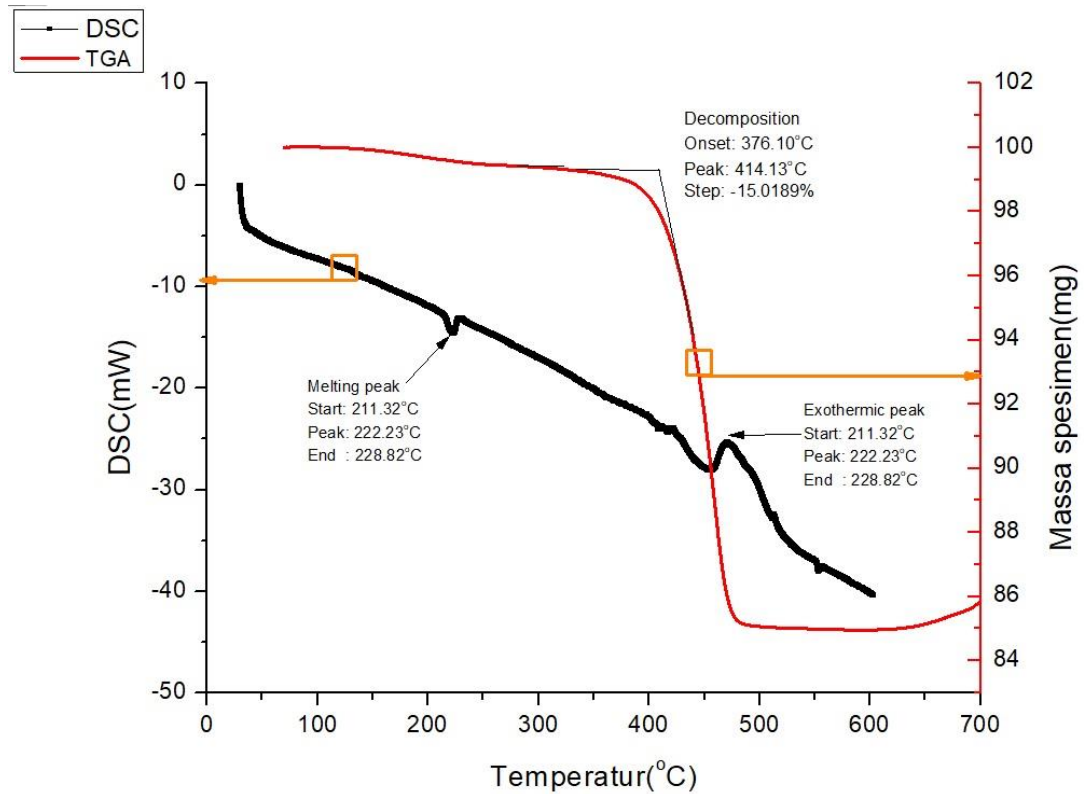
c. Feedstock PA6/90FeNi



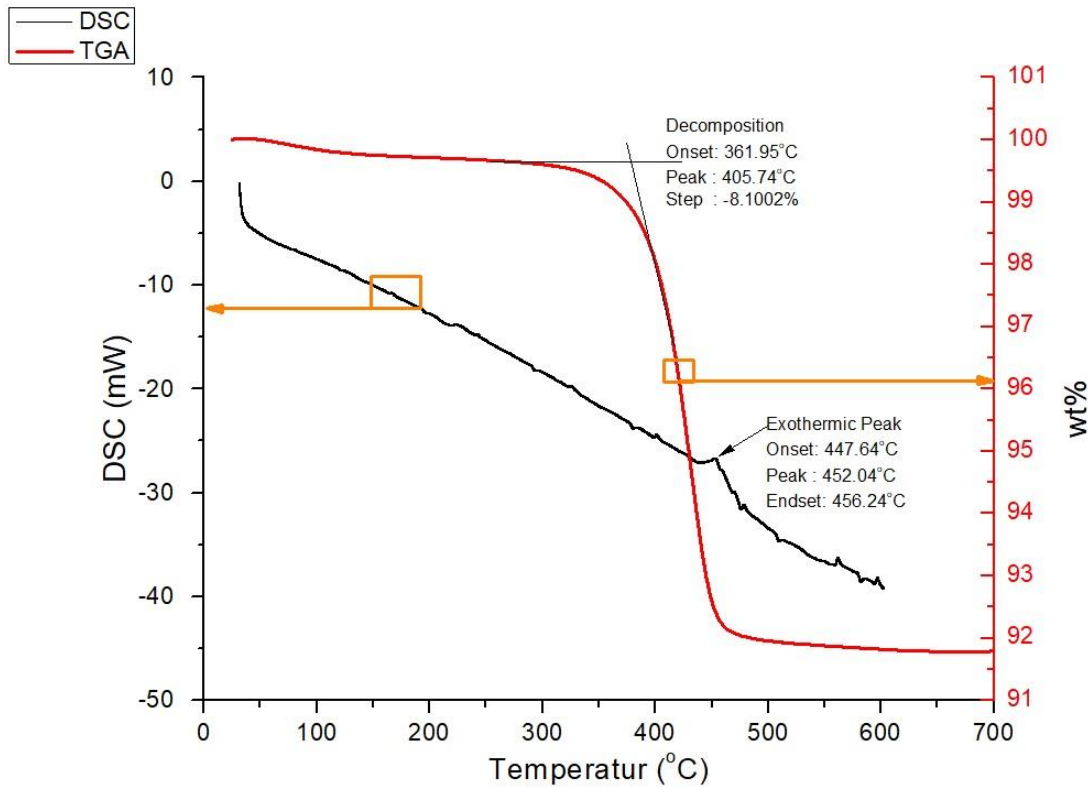
d. Feedstock PA6/92FeNi



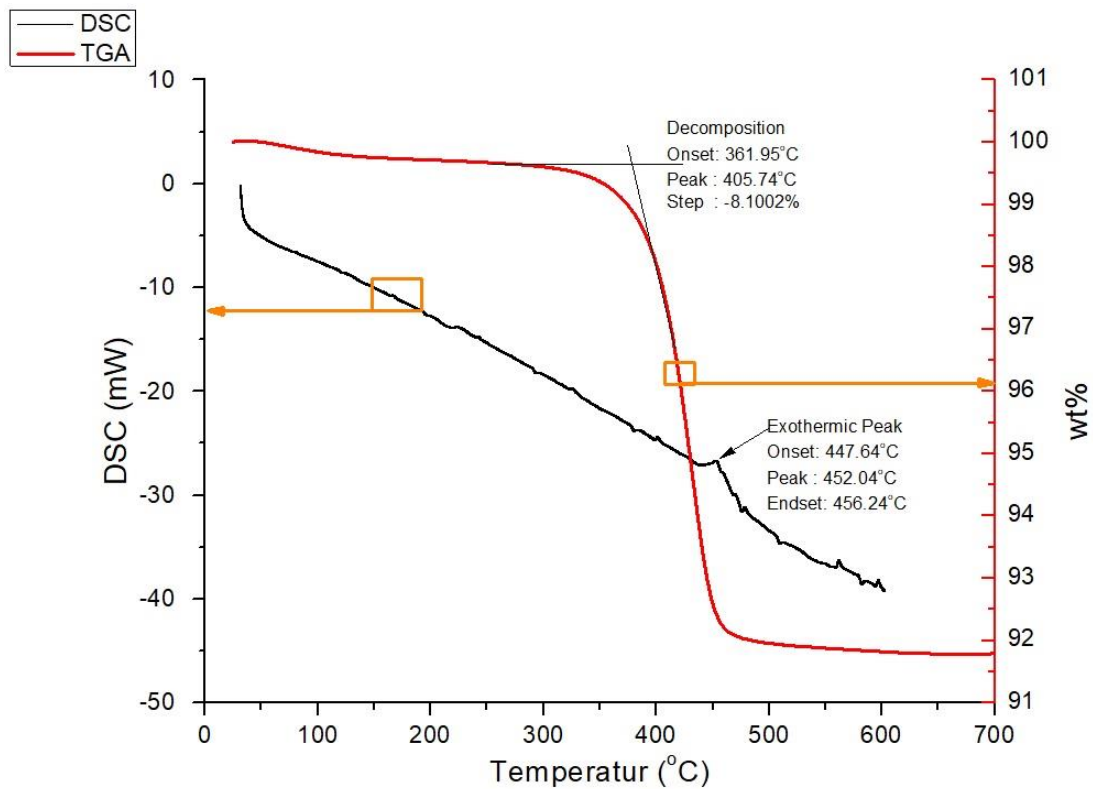
e. Feedstock PA6/85SS304L



f. Feedstock PA6/90SS304L



g. Feedstock PA6/92SS304L



UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam mengerjakan laporan penelitian tugas akhir ini, penulis juga mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada pihak – pihak yang telah mendukung dan membantu. Diantaranya:

1. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S. T., M. Sc., selaku dosen pembimbing pertama.
2. Ibu Dr. Widyastuti, S. Si, M. Si., selaku dosen pembimbing kedua
3. Bapak Wikan Jatimurti, S. T., M. Sc., selaku dosen wali penulis
4. Kedua orang tua dan saudara penulsi yang selalu menyemangati dan mendoakan selama pengerjaan tugas akhir ini
5. Aprilio Mori Syamra, Fransisca Angela Maria Rochdiyanti, Mochamad Ichwan Al Shafa, Aditya Bramantyo, dan Daffa Rizqi selaku partner Tugas akhir penulis yang selalu berbagi motivasi dan bantuan selama pengerjaan Tugas Akhir
6. Alvin, Mischell, Leon, dan Edrick yang menjadi tempat berbagi ilmu dan pandangan mengenai perkuliahan di semester akhir.
7. Keluarga besar PKKTM 2018 yang selalu dapat diandalkan dan selalu menuntun penulis ke jalan yang benar
8. Departemen Eksternal KMK St. Ignatius Loyola ITS 2021 yang telah menemani penulis selama 2 semester, melalui banyak tantngan, dan senantiasa menghibur dan menyembangati penulis
9. Rekan grader metalurgi dan perlakuan panas MT20 yang menjadi tempat berbagi ilmu penulis
10. Keluarga MT20 yang telah bersama penulis sejak awal memasuki perkuliahan hingga sekarang
11. MT17, MT18, MT19, MT21, dan MT22 yang banyak memberikan pengalaman, pembelajaran, dan pengalaman berharga semasa penulis berkuliah
12. HMMT FTIRS ITS yang telah memberikan wadah bagi penulis untuk belajar dan berkembang
13. Seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terima kasih atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan

Surabaya, Juli 2022

Penulis

Johakim De Brito Dwiki Lakaseru

0251184000048

BIODATA PENULIS



Penulis dengan nama Johakim De Brito Dwiki Lakaseru, lahir di Makassar pada tanggal 16 Juli 1999. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Taranita, SMP Taranita, dan SMA Pangudi Luhur Van Lith. Setelah lulus dari SMA pada tahun 2018, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Departemen Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Semasa kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi, pelatihan dan seminar. Penulis pernah menjabat sebagai staff Eksternal KMK St. Ignatius Loyola ITS 2019/2020, staff Keprofesional dan Keilmiah HMMT FTIRS ITS 2020/2021, Kepala Departemen Eksternal KMK St. Ignatius Loyola ITS 2021, dan Kepala Biro PKM HMMT FTIRS ITS 2021. Selain itu penulis juga aktif berpartisipasi dalam kegiatan laboratorium sebagai grader (asisten) Metalurgi I dan II pada tahun 2020/2022, dan koordinator grader (asisten) Perlakuan Panas pada tahun 2021.

Email: dwikilakaseru12345678@gmail.com