



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN PENGUMPAN MATERIAL MESIN *RAPID*
PROTOTYPING BERBASIS FDM (*FUSED DEPOSITION*
MODELING)**

SKRIPSI

Hadi Maryadi
0606073165

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
DEPOK
Desember 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN PENGUMPAN MATERIAL MESIN *RAPID*
PROTOTYPING BERBASIS FDM (*FUSED DEPOSITION*
MODELING)**

SKRIPSI

(Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik)

**Hadi Maryadi
0606073165**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
DEPOK
Desember 2010**

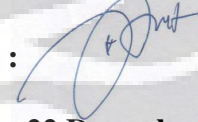
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya Saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah Saya nyatakan dengan benar**

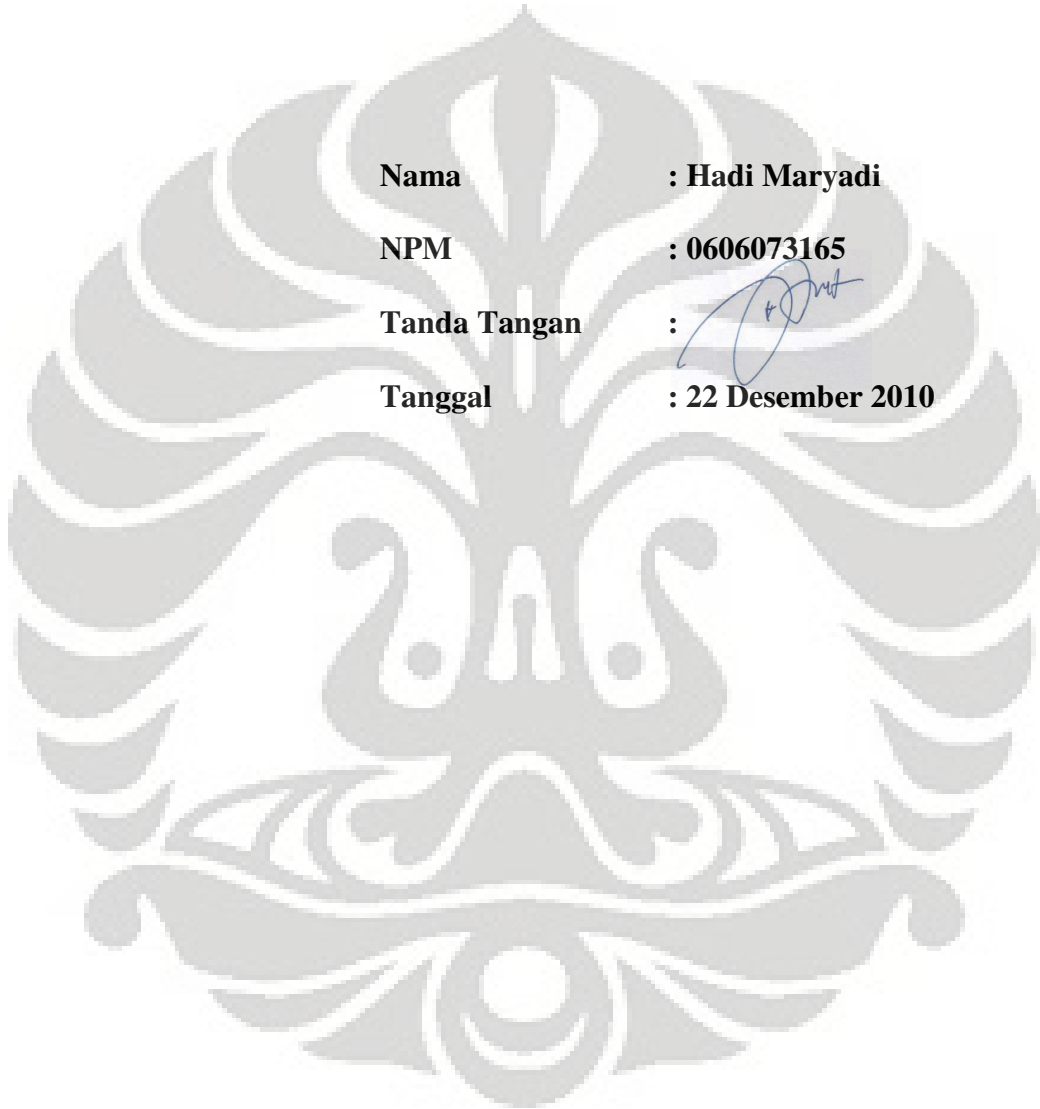
Nama : Hadi Maryadi

NPM : 0606073165

Tanda Tangan :



Tanggal : 22 Desember 2010



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Hadi Maryadi
NPM : 0606073165
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : PENGEMBANGAN PENGUMPAN MATERIAL MESIN
RAPID PROTOTYPING BERBASIS FDM (*FUSED
DEPOSITION MODELLING*)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian dari persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi, Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Gandjar Kiswanto, M.Eng

Penguji : Ir. Hendri D. S. Budiono, M.Eng.

Penguji : Ir. Hengky S. Nugroho, M.T.

Penguji : Dr. Ir. Danardono, AS.

Penguji : Dr. Ir. Ario Sunar Baskoro, ST., MT., M.Eng.

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 22 Desember 2010

ABSTRAK

Nama : Hadi Maryadi
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Pengembangan Pengumpan Material Mesin Rapid Prototyping Dengan Metode FDM (*Fused Deposition Modeling*)

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pengumpan (*feeder*) material termoplastik yang digunakan sebagai bahan baku pembuatan prototipe pada mesin Rapid Prototyping berbasis FDM (*Fused Deposition Modelling*). Material termoplastik padat berbentuk batang dengan diameter tertentu dimasukkan kedalam barel pemanas yang akan mendefomasinya menjadi wujud semi cair. Setelah berwujud semi cair, material diekstrusi melalui lubang nosel yang memiliki diameter sangat kecil untuk kemudian dibentuk sebuah produk prototipe dengan bantuan robot artikulasi 3 derajat kebebasan. Parameter proses tersebut adalah temperatur kawat pemanas, kecepatan putar motor dan dimensi masukan dan keluaran material. Analisa keluaran material dilakukan untuk mengetahui karakteristik dan kualitas keluaran material pada sistem. Proses ekstrusi berjalan kontinyu dengan dibantu oleh gerakan *rolling pulley driver* yang digerakkan motor DC dan *pulley driven*. Elemen pemanas adalah kawat berhambatan yang dialiri arus listrik yang dililitkan pada barel pemanas. Temperatur dijaga sehingga material masukan dapat mencapai titik lelehnya. Pada proses pemanasan material terjadi kehilangan panas yang disebabkan konduksi dan konveksi permukaan-permukaan pemanas. Untuk mengurangi kehilangan panas digunakan isolator panas. Sistem feeder dapat bekerja dengan baik pada keluaran yang kontinyu dengan diameter keluaran 1 mm.

Kata kunci:

Rapid prototyping, Pengumpan Material

ABSTRACT

Name : Hadi Maryadi

Study Program : Mechanical Engineering

Title : Material Feeder Development for Rapid Prototyping Machine with FDM method (Fused Deposition Modeling)

This research aims to design a feeder system for thermoplastic materials used as raw material for Rapid Prototyping based on FDM. Rod-shaped solid thermoplastic material with a certain diameter is inserted into the barrel heater that will deform become semi-liquid form. After the semi-liquid form, the material is extruded through a nozzle hole having a very small diameter and then formed a prototype product with the help of robotic articulation 3 degrees of freedom. The Continuous Extrusion process running with the rolling motion is assisted by the driver pulley driven by a DC motor and pulley driven. The process parameters are temperature heater wire, the motor rotational speed and the dimension of input and output material. Output analysis of material made to understand the characteristics and quality of material on the system. The heating element is a wire that has electrified resistance that wrapped around the barrel heaters. The temperature is maintained so that the input material to reach its melting point. In the heating process the material, heat loss occurs due to conduction and convection heating surfaces. To reduce heat loss heat insulator used. Feeder system to work properly on a continuous output with 1 mm diameter output.

Keywords:

Rapid prototyping, Material feeder

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur Saya panjatkan kehadiran Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa hanya dengan bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, Saya dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu, Saya mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Kedua orang tua dan Adik Saya yang telah memberikan dukungan moril dan materiil tiada habisnya;
- 2) Dr. Ir. Gandjar Kiswanto, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk menginspirasi dan membimbing Saya dalam pengerjaan skripsi ini;
- 3) Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng selaku kepala Departemen Teknik Mesin;
- 4) Teman-teman tim skripsi dan Lab Manufaktur, Rendi Kurniawan, Sriyanto, dan Andry Sulaiman, Achmad Saroni, Jediel Billy R, Teguh Santoso, S.T., Hendra P.S., S.T, yang telah menemani dan membantu penulis dalam mengerjakan skripsi ini;
- 5) Muchadist Ramadhan dan Ari Wibowo sahabat Saya yang telah mendukung dan membantu menyelesaikan tugas-tugas Saya di perusahaan selama penelitian ini;
- 6) Pak Martinus Herlinsen, yang telah membantu pembuatan konstruksi mesin *Rapid Prototyping* dan bersedia membimbing kami;
- 7) Kawan-kawan yang telah menemani penulis mengisi waktu luang dan memberikan suntikan motivasi kepada Saya dalam mengerjakan skripsi ini;
- 8) Kutipan-kutipan motivatif yang memberi inspirasi dan instrumental akustik *Depapepe* yang menemani penulisan skripsi ini;

Akhir kata, semoga Allah SWT membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Desember 2010

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| PERNYATAAN ORISINALITAS | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iii |
| ABSTRAK | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| UCAPAN TERIMAKASIH..... | vi |
| DAFTAR ISI..... | vii |
| DAFTAR GAMBAR | ix |
| DAFTAR TABEL..... | x |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xi |
| DAFTAR ISTILAH..... | xii |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Tujuan Penelitian..... | 2 |
| 1.3 Perumusan Masalah..... | 2 |
| 1.4 Pembatasan Masalah..... | 3 |
| 1.5 Metodologi Penelitian..... | 3 |
| 1.6 Sistematika Penulisan | 5 |
| BAB 2 PENGENALAN RAPID PROTOTYPING..... | 6 |
| 2.1 Stereolithography..... | 7 |
| 2.2 Selective Laser Sintering..... | 9 |
| 2.3 Laminated Object Manufacturing | 11 |
| 2.4 Fused Deposition Modelling | 13 |
| 2.5 Three Dimensional Printing..... | 15 |
| BAB 3 PENGEMBANGAN SISTEM MEKANIKAL DAN KONSTRUKSI FEEDER..... | 18 |
| 3.1 Konstruksi Extruder Nozzle (Feeder)..... | 19 |
| 3.1.1 Feeder Wheels..... | 20 |
| 3.1.2 PTFE Barrel dan PTFE Bracket..... | 22 |
| 3.1.3 Heater Barrel dan Nozzle | 23 |
| 3.2 Histori Perkembangan Desain Sistem Feeder | 26 |
| 3.2.1 Desain Awal..... | 27 |
| 3.2.2 Desain Modifikasi Pertama..... | 29 |
| 3.2.3 Desain Modifikasi Kedua..... | 33 |
| 3.2.4 Desain Modifikasi Ketiga | 35 |
| 3.3 Analisis Pembebanan Pada Poros Motor Dan Driver Pulley..... | 36 |
| BAB 4 HEAT TRANSFER DAN KALKULASI ENERGI PADA FEEDER | 42 |
| 4.1 Perhitungan Panjang Kawat NiChrome | 42 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2 Perhitungan Kalor yang Dibutuhkan..... | 47 |
| BAB 5 KARAKTERISASI DAN ANALISA PROSES PADA FEEDER | 57 |
| 5.1 Analisa Keluaran Material Feeder | 57 |
| 5.2 Analisa Pengaruh Panjang Kawat Pemanas | 65 |
| BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT..... | 69 |
| 6.1 Kesimpulan | 69 |
| 6.2 Saran Penelitian Lanjutan | 70 |
| DAFTAR REFERENSI | 71 |
| LAMPIRAN..... | 72 |



DAFTAR GAMBAR

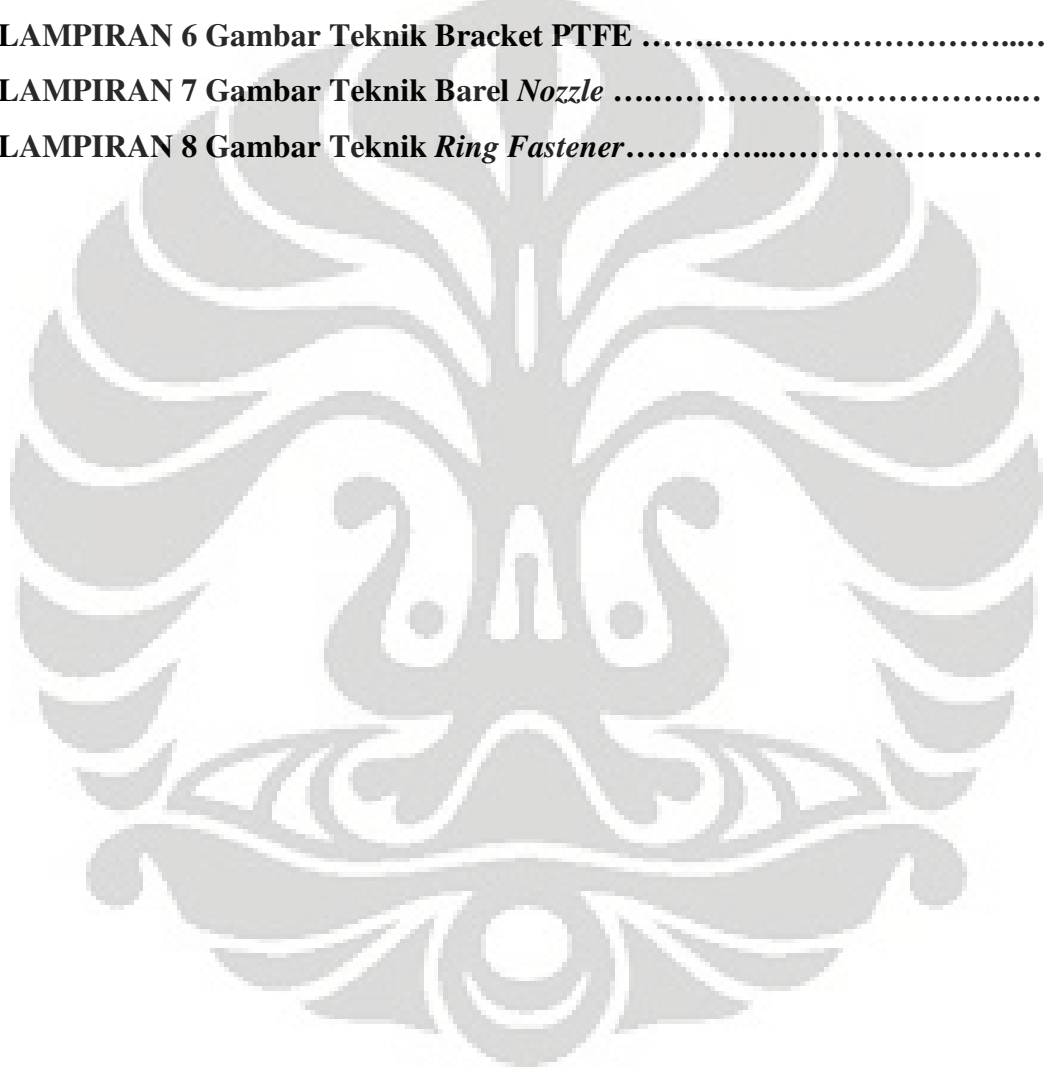
| | |
|--|----|
| Gambar 1.1 Contoh Produk Hasil <i>Rapid Prototyping</i> | 2 |
| Gambar 1.2 Sistem Mesin <i>Rapid Prototyping</i> | 3 |
| Gambar 1.3 Diagram Alir Penelitian..... | 4 |
| Gambar 2.1 Stereolithography..... | 8 |
| Gambar 2.2 Selective Laser Sintering | 10 |
| Gambar 2.3 Laminated Object Manufacturing..... | 12 |
| Gambar 2.4 Fused Deposition Modelling..... | 14 |
| Gambar 2.5 Three Dimensional Printing..... | 16 |
| Gambar 3.1 Mekanisme <i>Extruder Nozzle FDM</i> | 18 |
| Gambar 3.2 Sistem <i>Feeder FDM</i> | 19 |
| Gambar 3.3 Desain <i>Feeder FDM</i> | 20 |
| Gambar 3.4 Sistem <i>Roller Feeder</i> | 21 |
| Gambar 3.5 PTFE Bracket dan PTFE Barrel | 23 |
| Gambar 3.6 Barel Pemanas dan <i>Nozzle</i> | 24 |
| Gambar 3.7 Komponen Pemanas dan isolator | 25 |
| Gambar 3.8 <i>Nozzle</i> dan Barel Pemanas setelah Proses <i>Assembly</i> | 26 |
| Gambar 3.9 Desain awal (<i>injection molding base</i>)..... | 27 |
| Gambar 3.10 Sistem <i>Feeder</i> Pertama Tampak Depan dan Atas | 28 |
| Gambar 3.11 Desain Modifikasi Pertama dari Rancangan Awal | 30 |
| Gambar 3.12 Modifikasi Pertama Rancangan Tampak Depan dan Atas | 31 |
| Gambar 3.13 Barel Pemanas dan <i>Nozzle (steel)</i> | 32 |
| Gambar 3.14 Sistem <i>Feeder</i> Modifikasi Kedua | 34 |
| Gambar 3.15 Gambar Diagram Benda Bebas Pada Poros Motor..... | 37 |
| Gambar 3.16 Gambar Diagram Benda Bebas Pada Driven | 40 |
| Gambar 4.1 <i>NiChrome wire</i> | 42 |
| Gambar 4.2 Skema isolator <i>heater barrel</i> | 50 |
| Gambar 5.1 Keluaran Material PA6..... | 58 |
| Gambar 5.2 Grafik PWM Motor dengan Panjang Keluaran Material Sisa..... | 60 |
| Gambar 5.3 Grafik PWM Motor dengan Waktu Keluaran Material Sisa | 62 |
| Gambar 5.4 Grafik PWM Motor dengan Kecepatan Keluaran Material Sisa | 64 |
| Gambar 5.5 Grafik Perbandingan Kecepatan Kenaikan Kawat <i>NiChrome</i> | 67 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|-----------|
| Tabel 2.1 Contoh Spesifikasi SLA | 9 |
| Tabel 2.2 Contoh Spesifikasi SLS..... | 11 |
| Tabel 2.3 Contoh Spesifikasi LOM..... | 13 |
| Tabel 2.4 Contoh Spesifikasi FDM..... | 15 |
| Tabel 2.5 Contoh Spesifikasi 3DP..... | 17 |
| Tabel 4.1 AWG vs ohm/ft..... | 44 |
| Tabel 4.2 <i>Properties</i> dari berbagai macam material <i>heater</i> | 45 |
| Tabel 4.3 Arus pada temperatur dan tipe kawat | 46 |
| Tabel 5.1 Data Keluaran Material Sisa | 60 |
| Tabel 5.2 <i>Error</i> fungsi linear Panjang Keluaran Sisa..... | 61 |
| Tabel 5.3 <i>Error</i> fungsi linear Waktu Keluaran Sisa | 63 |
| Tabel 5.4 <i>Error</i> fungsi linear Kecepatan rata-rata Keluaran Sisa..... | 64 |
| Tabel 5.5 <i>Properties</i> kawat <i>NiChrome</i> | 65 |
| Tabel 5.6 Kenaikan Temperatur Kawat <i>NiChrome</i> | 66 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|---|-----------|
| LAMPIRAN 1 Gambar Teknik Braket Motor 1..... | 72 |
| LAMPIRAN 2 Gambar Teknik Braket Motor 2..... | 73 |
| LAMPIRAN 3 Gambar Teknik <i>Driver Pulley</i>..... | 74 |
| LAMPIRAN 4 Gambar Teknik <i>Driven Pulley</i>..... | 75 |
| LAMPIRAN 5 Gambar Teknik Barel PTFE..... | 76 |
| LAMPIRAN 6 Gambar Teknik Bracket PTFE | 77 |
| LAMPIRAN 7 Gambar Teknik Barel <i>Nozzle</i> | 78 |
| LAMPIRAN 8 Gambar Teknik <i>Ring Fastener</i>..... | 79 |



DAFTAR ISTILAH

| | |
|------------|------------------------------|
| AWG | : American Wire Gauge |
| FDM | : Fused Deposition Modelling |
| PA6 | : Polyamide 6 |
| PC | : Polycarbonate |
| PU | : Polyurethane |
| RP | : Rapid Prototyping |



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Pembuatan prototipe sebuah produk merupakan salah satu proses yang penting dalam proses produksi. Dengan didahului pembuatan prototipe, kita dapat melihat secara nyata gambaran produk yang nantinya akan dibuat. Bukan lagi sekedar gambaran dua dimensi dimana sang Insinyur atau mungkin konsumen yang harus dengan cermat membayangkan dan meneliti gambar satu persatu, sebuah prototipe dapat diamati dengan seksama pada objek tiga dimensi berskala. Gambaran tiga dimensi jelas lebih mudah dipahami apalagi untuk berkomunikasi dengan pihak lain yang notabene tidak mampu membaca gambar dua dimensi. Disini prototipe berperan penting bagi kelanjutan sebuah proses produksi yang akan dilakukan selanjutnya.

Pembuatan prototipe terkadang memerlukan proses yang tidak mudah. Mengingat pentingnya sebuah prototipe bagi kelanjutan proses produksi, berbagai teknik pembuatan prototipe banyak dikembangkan. Kemudahan dalam proses dan ketepatan penggambaran hasil desain *engineering* merupakan beberapa pertimbangan dalam pemilihan teknik pembuatan prototipe. Perkembangan teknik pembuatan prototipe ini didukung oleh perkembangan teknologi mekanikal, elektrikal, teknologi informasi, dan beberapa hal lainnya yang memungkinkan pembuatan prototipe dapat dilakukan dengan mudah, cepat (*rapid*) dan bahkan lebih baik lagi jika semuanya berjalan otomatis.

Rapid Prototyping menjadi salah satu hal yang penting dalam dunia industri karena kemudahan dan kecepatannya dalam menghasilkan produk prototipe. Di Indonesia sendiri, penggunaan teknik *Rapid Prototyping* masih sangat minim. Hanya beberapa perusahaan manufaktur saja yang telah memiliki mesin-mesin pembuat prototipe cepat, mengingat harga mesin *Rapid Prototyping* yang terbilang mahal, sementara penggunaan mesin-mesin pembuat prototipe sangatlah penting bagi industri. Oleh karena itu Laboratorium Manufaktur dan Otomasi DTM FTUI mengembangkan mesin *Rapid Prototyping* dengan teknik *Fused Deposition Modelling* sebagai basis dasar mesin tersebut.



Gambar 1.1. Contoh produk hasil *Rapid Prototyping*

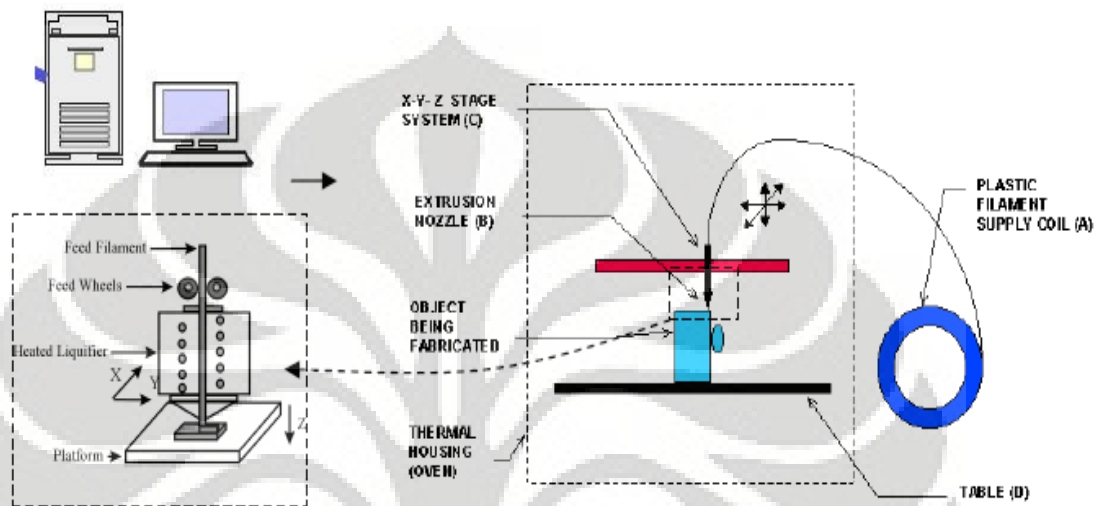
1.2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini merupakan bagian riset pada Laboratorium Manufaktur dan Otomasi DTM UI yang ditujukan untuk mengembangkan sebuah desain mesin *Rapid Prototyping* dengan teknik *Fused Deposition Modelling*. Penelitian ini sekaligus sebagai pelopor penelitian mengenai mesin pembuat prototipe di Indonesia. Bagian dari penelitian ini adalah bertujuan untuk mendesain sistem konstruksi *Feeder*, kalkulasi energi pada proses-proses yang terjadi didalamnya, dan karakterisasi dan Analisis parameter-parameter yang mempengaruhi kinerja *feeder* dan material keluarannya.

1.3. Perumusan Masalah

Extruder nozzle (Feeder) sebagai perangkat pada mesin FDM digunakan untuk mendeformasi bahan baku yang berupa material termoplastik dari padatan menjadi *semi liquid* dengan metode *extruding* yang dibantu oleh pemanas berupa

kawat *NiChrome* dan *Motor DC*. Sebagai bagian penting dari mesin RP dibutuhkan desain ideal *feeder* untuk mendukung proses-proses pada berjalannya sistem mesin RP ini. Untuk itu dibutuhkan sistem konstruksi yang kompak pada *feeder* dan parameter-parameter yang jelas untuk diintegrasikan dalam sistem kontrol mesin secara keseluruhan agar tercipta sistem *feeder* FDM yang baik.



Gambar 1.2. Rancangan Sistem Mesin *Fused Deposition Modelling* [11]

1.4. Pembatasan Masalah

Skripsi ini membahas mengenai perancangan mesin *Fused Deposition Modelling (FDM)* mulai dari mekanisme konstruksi mesin, sistem kontrol elektronik, material bahan baku dan pendeformasiannya (Perpindahan Panas), serta perangkat lunak sebagai pendukung komunikasi data antara komputer dengan mikrokontrol pada sistem kontrol elektronik. Namun demikian pada khususnya skripsi ini akan banyak dibahas mengenai mekanisme konstruksi dan pengembangan *Extruder Nozzle (Feeder)* serta kalkulasi energi pada proses didalamnya.

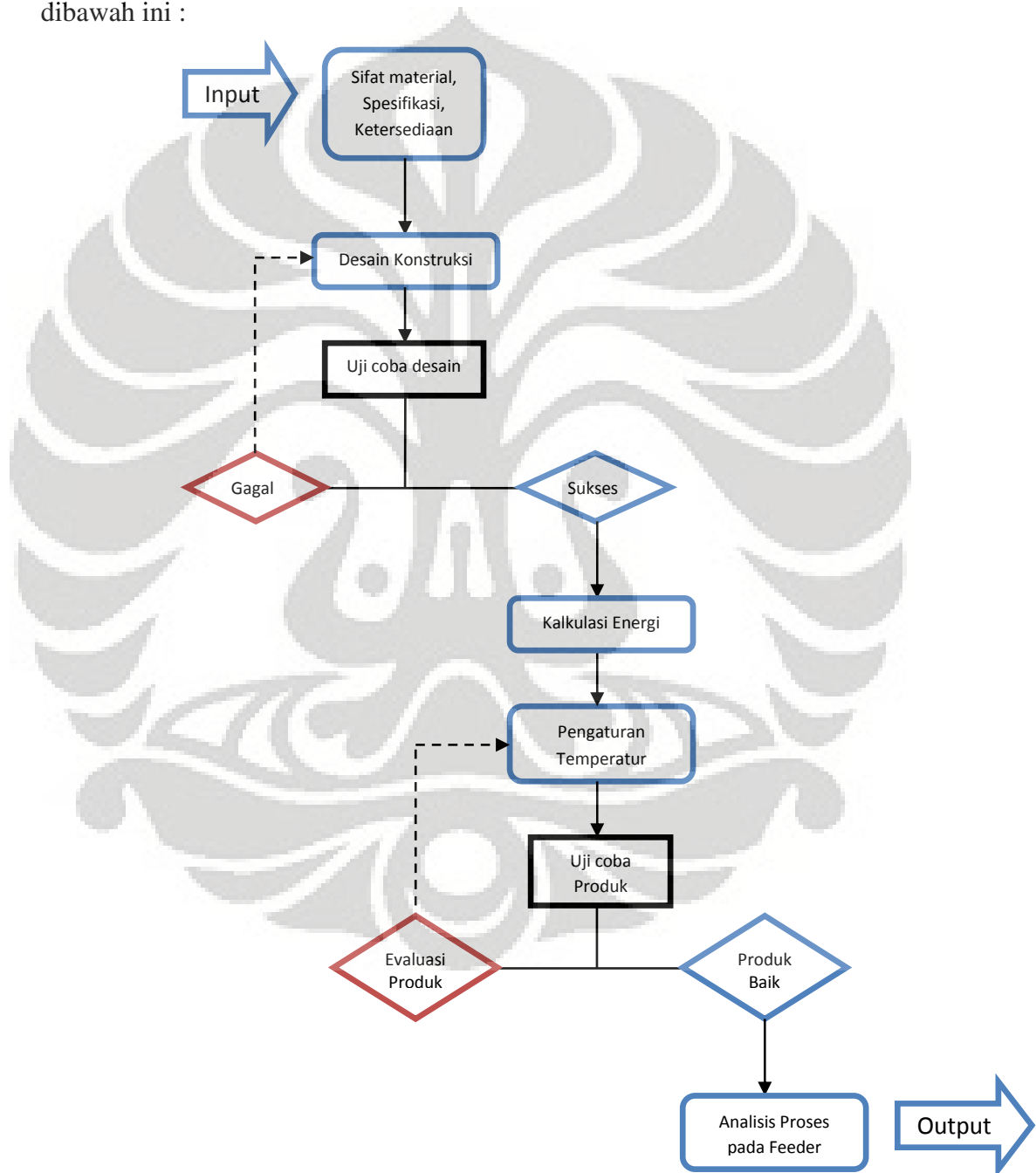
1.5. Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi lapangan melalui akses *web*.
2. Studi literatur mengenai *Rapid Prototyping*.
3. Penentuan spesifikasi *Feeder* berdasarkan ketersediaan material.

4. Perancangan konstruksi *Feeder* dan pengembangan.
5. Perancangan sistem pemanas dan isolasi panas yang keluar ke lingkungan
6. Pengaturan temperatur kerja dari *Feeder*
7. Eksperimen rancangan sistem *feeder* mesin.
8. Pengujian dan Analisis proses-proses pada *feeder*.

Gambaran metodologi atau tahapan penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir dibawah ini :



Gambar 1.3. Diagram Alir Penelitian

1.6.Sistematika Penulisan

BAB 1. PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang penelitian, tujuan penelitian, perumusan masalah, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2. PENGENALAN *RAPID PROTOTYPING*

Pada bab ini dijelaskan mengenai *Rapid Prototyping* itu sendiri dan berbagai metode yang biasa digunakan dalam dunia industri.

BAB 3. PENGEMBANGAN SISTEM MEKANIKAL DAN KONSTRUKSI *FEEDER*

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai sebagian sistem konstruksi mesin FDM yaitu pada *extruder nozzle (Feeder)* dan perkembangannya dari awal pendesainan sampai dengan desain akhir saat ini. Selain itu akan dijelaskan analisis pembebanan pada beberapa bagian konstruksi.

BAB 4. PERPINDAHAN PANAS DAN KALKULASI ENERGI PADA *FEEDER*

Pada bab ini dijelaskan mengenai kalkulasi energi yang berkaitan dengan proses-proses pada *feeder* dan pemilihan Sifat kawat pemanas yang paling ideal.

BAB 5. KARAKTERISASI DAN ANALISIS PROSES PADA *FEEDER*

Pada bab ini digambarkan Analisis keluaran material sisa yang keluar secara kontinyu dan pengaruh panjang kawat terhadap proses pemanasan pada *feeder*.

BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT

Pada bab ini berisi kesimpulan penelitian dan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

PENGENALAN *RAPID PROTOTYPING*

Rapid Prototyping (RP) dapat didefinisikan sebagai metode-metode yang digunakan untuk membuat model berskala (prototipe) dari mulai bagian suatu produk (*part*) ataupun rakitan produk (*assembly*) secara cepat dengan menggunakan data *Computer Aided Design* (CAD) tiga dimensi. *Rapid Prototyping* memungkinkan visualisasi suatu gambar tiga dimensi menjadi benda tiga dimensi asli yang mempunyai volume. Selain itu produk-produk *Rapid Prototyping* juga dapat digunakan untuk menguji suatu *part* tertentu. Metode RP pertama ditemukan pada tahun 1986 di California, USA yaitu dengan metode *Stereolithography*. Setelah penemuan metode tersebut berkembanglah berbagai metode lainnya yang memungkinkan pembuatan prototipe dapat dilakukan secara cepat.

Saat ini, pembuatan prototipe menjadi syarat tersendiri pada beberapa perusahaan dalam upaya penyempurnaan produknya. Beberapa alasan mengapa *Rapid Prototyping* sangat berguna dan diperlukan dalam dunia industri adalah:

- Meningkatkan efektifitas komunikasi di lingkungan industri atau dengan konsumen.
- Mengurangi kesalahan-kesalahan produksi yang mengakibatkan membengkaknya biaya produksi.
- Mengurangi waktu pengembangan produk.
- Meminimalisasi perubahan-perubahan mendasar.
- Memperpanjang jangka pakai produk misalnya dengan menambahkan beberapa komponen fitur atau mengurangi fitur-fitur yang tidak diperlukan dalam desain.

Rapid Prototyping mengurangi waktu pengembangan produk dengan memberikan kesempatan-kesempatan untuk koreksi terlebih dahulu terhadap produk yang dibuat (prototipe). Dengan menganalisis prototipe, insinyur dapat mengoreksi beberapa kesalahan atau ketidaksesuaian dalam desain ataupun memberikan sentuhan-

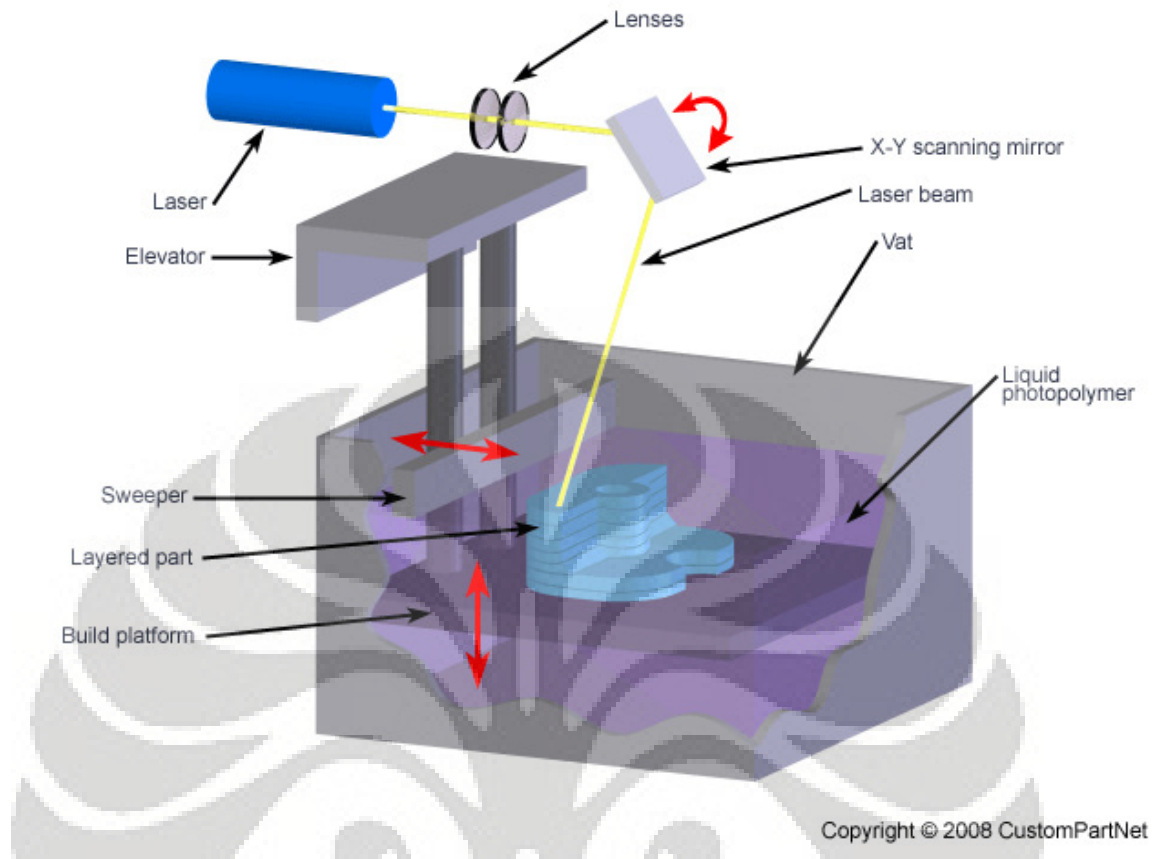
sentuhan engineering dalam penyempurnaan produknya. Saat ini tren yang sedang berkembang dalam dunia industri adalah pengembangan variasi dari produk, peningkatan kompleksitas produk, produk umur pakai pendek, dan usaha penurunan biaya produksi dan waktu pengiriman. *Rapid Prototyping* meningkatkan pengembangan produk dengan memungkinkannya komunikasi yang lebih efektif dalam lingkungan industri.

Beberapa metode *Rapid Prototyping* yang berkembang saat ini adalah:

1. *Stereolithography (SLA)*
2. *Selective Laser Sintering (SLS)*
3. *Laminated Object Manufacturing (LOM)*
4. *Fused Deposition Modelling (FDM)*
5. *3D Printing (3DP)*

2.1. *Stereolithography (SLA)*

Stereolithography atau biasa disebut SLA adalah metode *Rapid Prototyping* yang pertama kali dikembangkan. 3D Systems of Valencia, CA, USA mengembangkan metode ini pada tahun 1986. Materialnya adalah Resin yang sensitif terhadap cahaya tertentu (*photosensitive resin*) yang ditembakkan sesuai gerakan yang dikontrol oleh sistem komputer dan pembacaan data 3D CAD yang dimasukkan. *Stereolithography* juga biasa disebut *3D-layering*. Menggunakan wadah yang menampung resin bahan baku dan pada bagian tertentu (elevator) dapat bergerak vertikal (keatas kebawah atau sumbu-z positif negatif). Cahaya Laser UV jatuh tepat pada *layer per layer* dan mengeraskan resin yang sensitif. Setelah *layer* pertama terbentuk, maka laser UV ditembakkan kembali pada resin tersebut untuk membentuk *layer* kedua. Setiap *layer* yang telah terbentuk, elevator bergerak ke bawah dengan jarak yang sama selama proses berlangsung (pada umumnya 0.003 – 0.002 inch per *layer*). Jadi *layer* kedua terbentuk tepat diatas *layer* pertama dan begitu seterusnya pada *layer* selanjutnya.



Gambar 2.1. *Stereolithography (SLA)* [16]

Pada gambar diatas dapat dilihat proses dari metode SLA. Laser UV ditembakkan melalui lensa dan X-Y scanning mirror yang bergerak sesuai kontrol dan pembacaan data 3D CAD membentuk *layer perlayer* ke resin fotosensitif dalam wadah. Setelah resin yang ditembakkan laser tadi mengeras, *Sweeper* bergerak diatas *layer* tersebut untuk membersihkan bagian atas *layer* (*finishing layer*). Kemudian *platform* (elevator) bergerak kebawah yang menandakan proses pembuatan *layer* pertama telah selesai. Selanjutnya adalah proses yang sama sampai dengan *layer* terakhir terbentuk. Setelah selesai dalam tahap ini, *platform* bergerak keatas. Benda yang disusun dari lapisan per lapisan tadi menjadi satu benda yang utuh. Benda kemudian dilepaskan dari *platform*. Kebanyakan kasus dalam SLA, *finishing* terakhir benda ditaruh dalam UV oven kemudian dipoles.

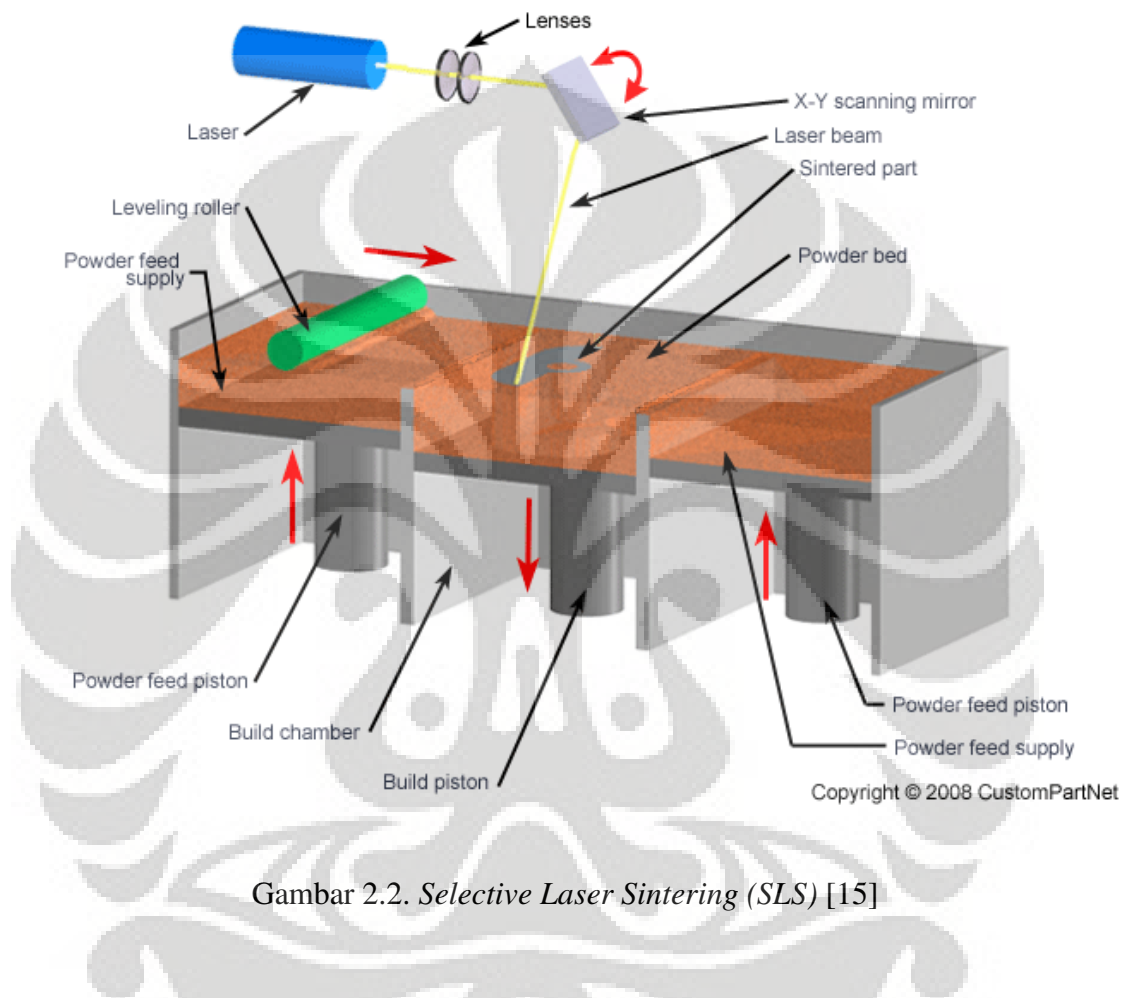
Tabel 2.1. Contoh Spesifikasi SLA [16]

| | |
|-----------------------------|--|
| Abbreviation: | SLA |
| Material type: | Liquid (Photopolymer) |
| Materials: | Thermoplastics (Elastomers) |
| Max part size: | 59.00 x 29.50 x 19.70 in. |
| Min feature size: | 0.004 in. |
| Min layer thickness: | 0.0010 in. |
| Tolerance: | 0.0050 in. |
| Surface finish: | Smooth |
| Build speed: | Average |
| Applications: | Form/fit testing, Functional testing, Rapid tooling patterns, Snap fits, Very detailed parts, Presentation models, High heat applications |

2.2. Selective Laser Sintering (SLS)

Selective Laser Sintering atau biasa disebut SLS pertama dikembangkan oleh Carl Deckard di University of Texas pada tahun 1989. Konsep dasar dari SLS pada dasarnya sama dengan *Stereolithography (SLA)* yaitu dengan menggunakan tembakan sinar laser yang bergerak untuk membentuk *layer* pada material bahan baku sehingga terbentuk benda tiga dimensi. Seperti metode RP lainnya, *part* dibuat diatas sebuah *platform* dimana *platform* tersebut dapat bergerak untuk menyesuaikan pembentukan *layer* perlayer sesuai kepresisian gerak *platform* tersebut. Perbedaan dengan SLA adalah pada tipe materialnya. Jika SLA menggunakan resin (liquid), SLS menggunakan bubuk (*powder*) yang jenisnya lebih beragam seperti termoplastik, elastomer, dan komposit. Tidak seperti SLA, SLS tidak membutuhkan material pendukung untuk menopang struktur yang dibentuk karena tiap *layer* yang dibuat merupakan pendukung pembentuk struktur pada saat dibuat. Dengan material *metal composite*, proses SLS mengeraskan material polimer disekitar bubuk metal (100 mikron diameter) membentuk *part*.

Part tersebut kemudian dimasukkan dalam tungku dengan temperatur lebih dari 900°C dimana binder polimer dibakar dan disusupi dengan serbuk perunggu untuk meningkatkan densitas. Biasanya pembakaran memerlukan waktu kurang lebih satu hari yang setelah itu proses *machining* dan *finishing* dilakukan.



Gambar 2.2. *Selective Laser Sintering (SLS)* [15]

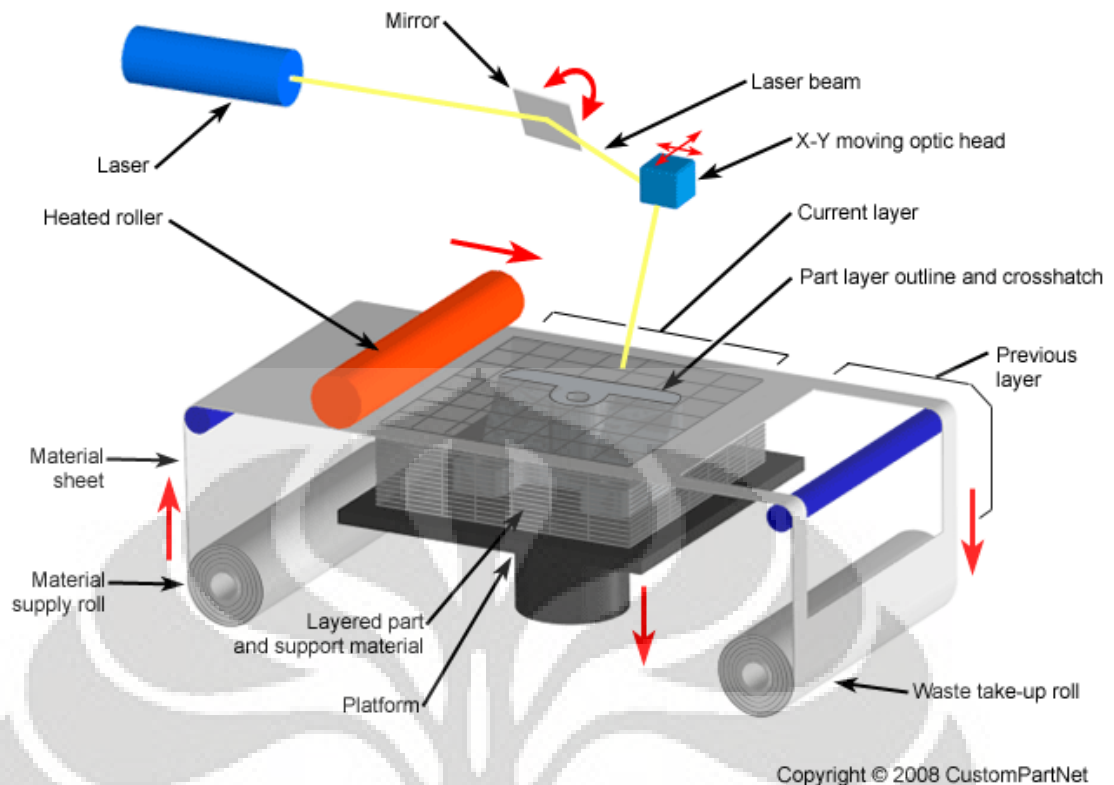
Laser ditembakkan melalui lensa dan dibiaskan oleh cermin yang bergerak mengarahkan sinar pada aksis X-Y sesuai sistem kontrol dan 3D CAD yang diinginkan. *Build piston* bergerak kebawah membentuk *layer* perlayer. Material bahan baku berupa bubuk (*powder*) diumpan dari *Powder feed* piston disampingnya dengan bantuan *roller* yang bergerak melintasi *build piston* bolak-balik selama proses. *Powder* piston bergerak keatas sedangkan *build piston* bergerak kebawah sesuai level *layer* yang dibentuk setelah *layer* pertama terbentuk dan begitu seterusnya.

Tabel 2.2. Contoh Spesifikasi SLS [15]

| | |
|-----------------------------|---|
| Abbreviation: | SLS |
| Material type: | Powder (Polymer) |
| Materials: | Thermoplastics such as Nylon, Polyamide, and Polystyrene; Elastomers; Composites |
| Max part size: | 22.00 x 22.00 x 30.00 in. |
| Min feature size: | 0.005 in. |
| Min layer thickness: | 0.0040 in. |
| Tolerance: | 0.0100 in. |
| Surface finish: | Average |
| Build speed: | Fast |
| Applications: | Form/fit testing, Functional testing, Rapid tooling patterns, Less detailed parts, Parts with snap-fits & living hinges, High heat applications |

2.3. Laminated Object Manufacturing (LOM)

Laminated Object Manufacturing atau biasa disebut LOM pertama dikembangkan pada tahun 1991. Komponen utama dari sistem LOM ini adalah sebuah material metal lembaran yang diumpun diatas *platform*, roller yang dipanaskan untuk memberikan tekanan untuk *layer* dibawahnya dan sinar laser yang ditembakkan pada material tersebut untuk memotong material lembaran pada tiap *layer* tersebut dan seterusnya sehingga terbentuk sebuah *part* tiga dimensi. *Part* terbentuk dengan menumpuk, mengikat, dan memotong *layer* atau lapisan dari lembaran yang dibalut material adesif diatas *layer* sebelumnya. Sinar laser memotong outline *part* tersebut pada tiap *layer*. Setelah *layer* selesai terbentuk, *platform* bergerak turun (umumnya 0.05 – 0.5 mm) dan kemudian lembaran yang lainnya ditempatkan diatas struktur yang telah terbentuk sebelumnya.



Gambar 2.3. *Laminated Object Manufacturing (LOM)* [14]

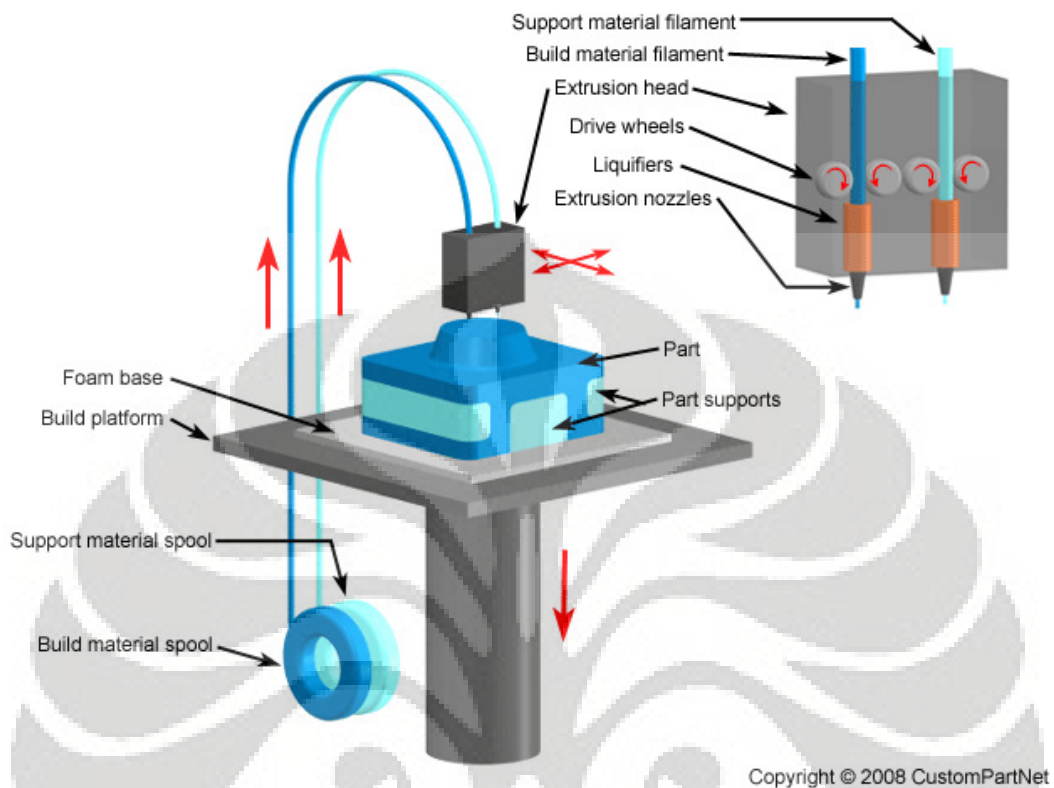
Terlihat pada gambar diatas, sinar laser ditembakkan dan dibiaskan oleh cermin khusus mengarahkan sinar laser ke lembaran material diatas *platform*. Sinar laser memotong outline pada material sesuai desain per*layer*. Setelah terbentuk *layer*, *platform* bergerak turun kebawah, waste roller menggulung dan supply roller yang dipanaskan mensuplai lembaran baru diatas *layer* yang terbentuk sebelumnya. Pada saat proses berlangsung, support material tetap pada tempatnya untuk membantu pembentukan *layer* selanjutnya. Begitu seterusnya sampai dengan *layer* terakhir dan terbentuklah benda tiga dimensi.

Tabel 2.3. Contoh Spesifikasi LOM [14]

| | |
|-----------------------------|--|
| Abbreviation: | LOM |
| Material type: | Solid (Sheets) |
| Materials: | Thermoplastics such as PVC; Paper; Composites (Ferrous metals; Non-ferrous metals; Ceramics) |
| Max part size: | 32.00 x 22.00 x 20.00 in. |
| Min feature size: | 0.008 in. |
| Min layer thickness: | 0.0020 in. |
| Tolerance: | 0.0040 in. |
| Surface finish: | Rough |
| Build speed: | Fast |
| Applications: | Form/fit testing, Less detailed parts, Rapid tooling patterns |

2.4. Fused Deposition Modelling (FDM)

Fused Deposition Modelling (FDM) adalah metode *Rapid Prototyping* yang sedikit berbeda dengan metode RP lain yang menggunakan sinar laser dalam proses utamanya. FDM memanfaatkan material yang diekstrusi dari sebuah *nozzle* yang kemudian digerakkan oleh motor. Material adalah termoplastik berbentuk benang (koil) yang dipanaskan diatas *melting point* oleh *heater* kemudian diekstrusi lewat lubang ekstruder *nozzle*. *Heater* mempertahankan temperatur tersebut dan mendeformasi material dari padatan menjadi semi-solid (liquid) agar mudah untuk diekstrusi. *Nozzle* yang bergerak dan mengeluarkan cairan ekstrusi membentuk *layer*. Material plastik ekstrusi akan mengeras secara cepat setelah dikeluarkan melewati *nozzle*. Setelah *layer* pertama terbentuk, *platform* bergerak kebawah dan kemudian adalah proses pembentukan *layer* selanjutnya. Ketebalan *layer* berkisar antara 0.33 – 0.13 mm. Pada aksis xy resolusi 0.025 mm dapat dicapai. Beberapa material yang dapat digunakan untuk bahan baku adalah ABS, *Polyamide (PA)*, *Polycarbonate (PC)*, *Polyethylene (PE)*, *Polypropilene (PP)*, dan *Investment Casting Wax*.



Gambar 2.4. *Fused Deposition Modelling (FDM)* [13]

Ketika mesin *Rapid Prototyping* ini akan beroperasi, material bahan untuk membangun keluar dari *nozzle* akibat pemanasan *filament (liquefier)* pada *heating system* dengan pengaturan laju *feeder* oleh *drive wheel* yang digerakkan oleh motor DC. Setelah dicapai temperatur yang sesuai *drive wheel* berputar (saklar *feeder* akan on pada saat program *trajectory* berjalan) untuk menyuplai dan menekan keluar *nozzle* dalam bentuk *semi-solid* (fase antara *solid* dan *liquid*). Gerakan *nozzle* akan diarahkan sesuai dengan program *trajectory*. Setelah *layer* pertama terbentuk, *platform* bergerak kebawah dan proses sebelumnya berulang sampai dengan *layer* terakhir dan terbentuk benda tiga dimensi.

Ada beberapa variasi dari mesin FDM yang berkembang. Beberapa misalnya posisi *nozzle* yang tetap sedangkan *platform* yang bergerak mengikuti program *trajectory*

kearah aksis xyz. Beberapa pengembangan telah memungkinkan support material yang digunakan untuk mendukung pembentukan struktur selama proses. *Support material* adalah material yang heterogen dengan material utama. Umumnya diatas *platform* juga diletakkan beberapa material *platform* tambahan seperti gabus yang memungkinkan perekatan material pada *layer* pertama. Aksis xyz digerakkan oleh motor *stepper* yang bergerak perpulsa.

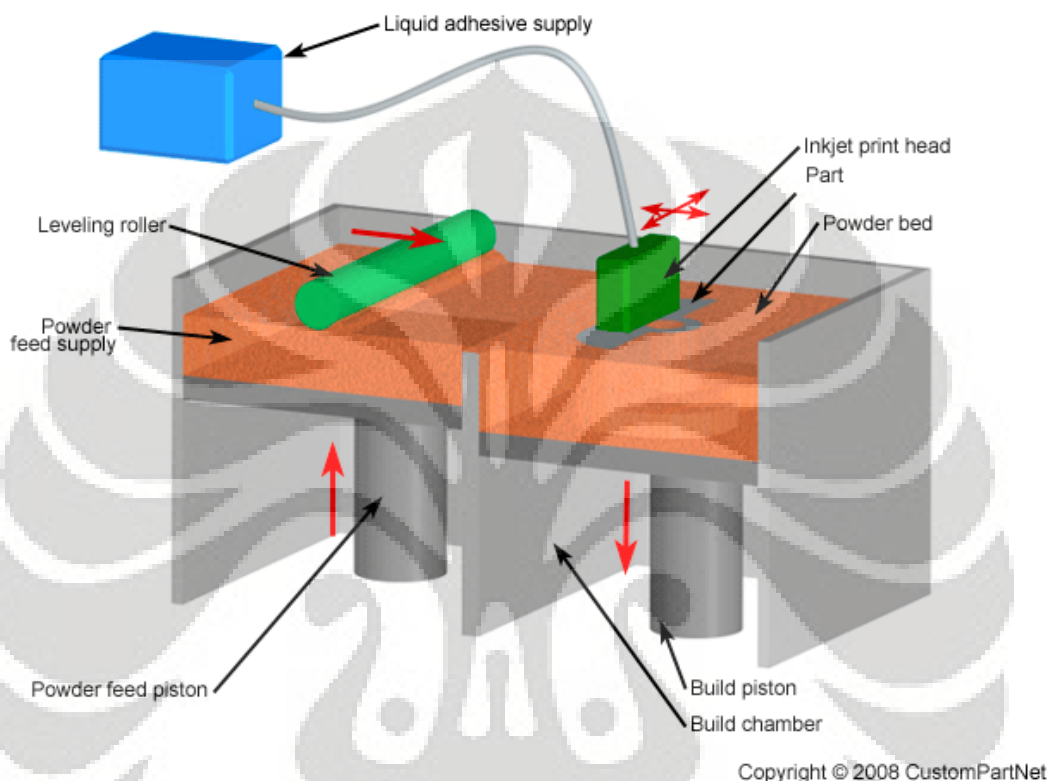
Tabel 2.4. Contoh Spesifikasi FDM [13]

| | |
|-----------------------------|--|
| Abbreviation: | FDM |
| Material type: | Solid (Filaments) |
| Materials: | Thermoplastics such as ABS, Polycarbonate, and Polyphenylsulfone; Elastomers |
| Max part size: | 36.00 x 24.00 x 36.00 in. |
| Min feature size: | 0.005 in. |
| Min layer thickness: | 0.0050 in. |
| Tolerance: | 0.0050 in. |
| Surface finish: | Rough |
| Build speed: | Slow |
| Applications: | Form/fit testing, Functional testing, Rapid tooling patterns, Small detailed parts, Presentation models, Patient and food applications, High heat applications |

2.5. Three Dimensional Printing (3DP)

Three Dimensional Printing (3DP) adalah merupakan metode yang mirip dengan metode SLS yaitu dengan menggunakan *powder bed* namun tidak menggunakan sinar laser seperti FDM. Jadi bisa dikatakan 3DP merupakan perpaduan antara keduanya. 3DP menggunakan *ink jet* untuk memberikan perekat cair sebagai pengikat *powder bed* pada tiap *layernya*. Beberapa pilihan material yang dapat digunakan untuk metode ini adalah bubuk keramik yang sangat terbatas

namun lebih murah dibandingkan dengan material lainnya. Metode ini merupakan salah satu metode RP yang cepat. Umumnya dapat mencapai 2 – 4 *layer* dalam satu menit. Akan tetapi dalam hal keakuratan, *surface finish*, dan kekuatan tidak sebaik metode lainnya.



Gambar 2.5. *Three Dimensional Printing (3DP)* [12]

Proses 3DP dimulai dengan suplai *powder bed* dari *feed piston* yang dibantu oleh roller yang mendistribusikan sehingga terbentuk lapisan tipis diatas *platform*. *Inkjet print head* mendistribusikan perekat cair diatas *layer powder* tersebut sesuai kontrol gerakan dan desain *layer perlayer*. *Powder bed* yang direkatkan oleh cairan adesif berikatan sehingga terbentuk sebuah *layer*. Selanjutnya *platform* bergerak kebawah dan proses berulang sampai terbentuk *layer* terakhir. Setelah selesai, bubuk sisa yang tidak termasuk dalam struktur dapat dibuang dan dibersihkan.

Tabel 2.5. Contoh Spesifikasi 3DP [12]

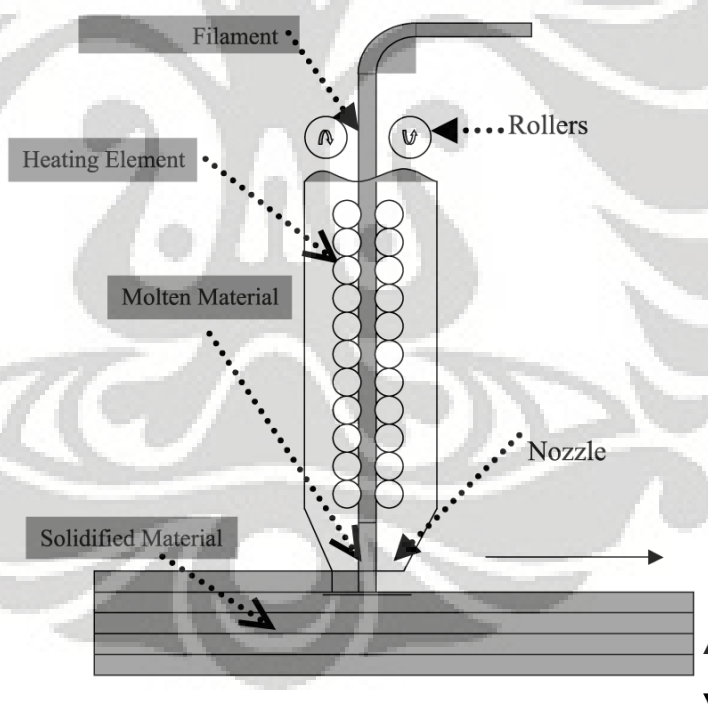
| | |
|-----------------------------|--|
| Abbreviation: | 3DP |
| Material type: | Powder |
| Materials: | Ferrous metals such as Stainless steel; Non-ferrous metals such as Bronze; Elastomers; Composites; Ceramics |
| Max part size: | 59.00 x 29.50 x 27.60 in. |
| Min feature size: | 0.008 in. |
| Min layer thickness: | 0.0020 in. |
| Tolerance: | 0.0040 in. |
| Surface finish: | Rough |
| Build speed: | Very Fast |
| Applications: | Concept models, Limited functional testing, Architectural & landscape models, Color industrial design models, Consumer goods & packaging |

BAB 3

PENGEMBANGAN SISTEM MEKANIKAL DAN KONSTRUKSI *FEEDER*

Beberapa metode *RP* dapat digunakan untuk menghasilkan produk prototipe yang baik dan cepat. Mesin *RP* yang dikembangkan ini menggunakan salah satu metode *RP* yaitu *Fused Deposition Modelling* dimana material diekstrusi melalui mekanisme *feeder* (pengumpan).

Material termoplastik di deformasi pada temperatur leleh dengan mekanisme Pemanasan oleh pemanas dimana material tersebut akan berubah dari bentuk padatan menjadi semi *liquid* dan kemudian diekstrusi melalui ujung *nozzle* yang berdiameter lebih kecil. Material yang telah terdeformasi diekstrusi untuk membentuk lapisan per lapisan dengan mekanisme konstruksi robot *Cartesian 3* aksis.



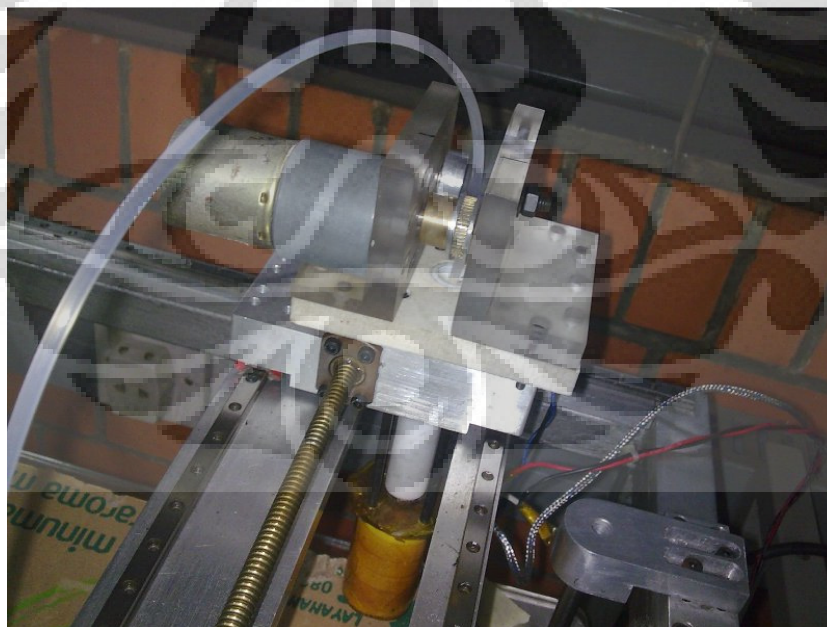
Gambar 3.1. Mekanisme *Extruder Nozzle FDM* [17]

Gambar diatas menjelaskan mengenai konstruksi utama dari *Feeder* yang digunakan dalam *FDM*. Komponen *Feeder* terdiri dari filamen yang berupa material termoplastik, *roller/wheel*, *liquefier* yang berupa pemanas, ujung *nozzle*, dan motor

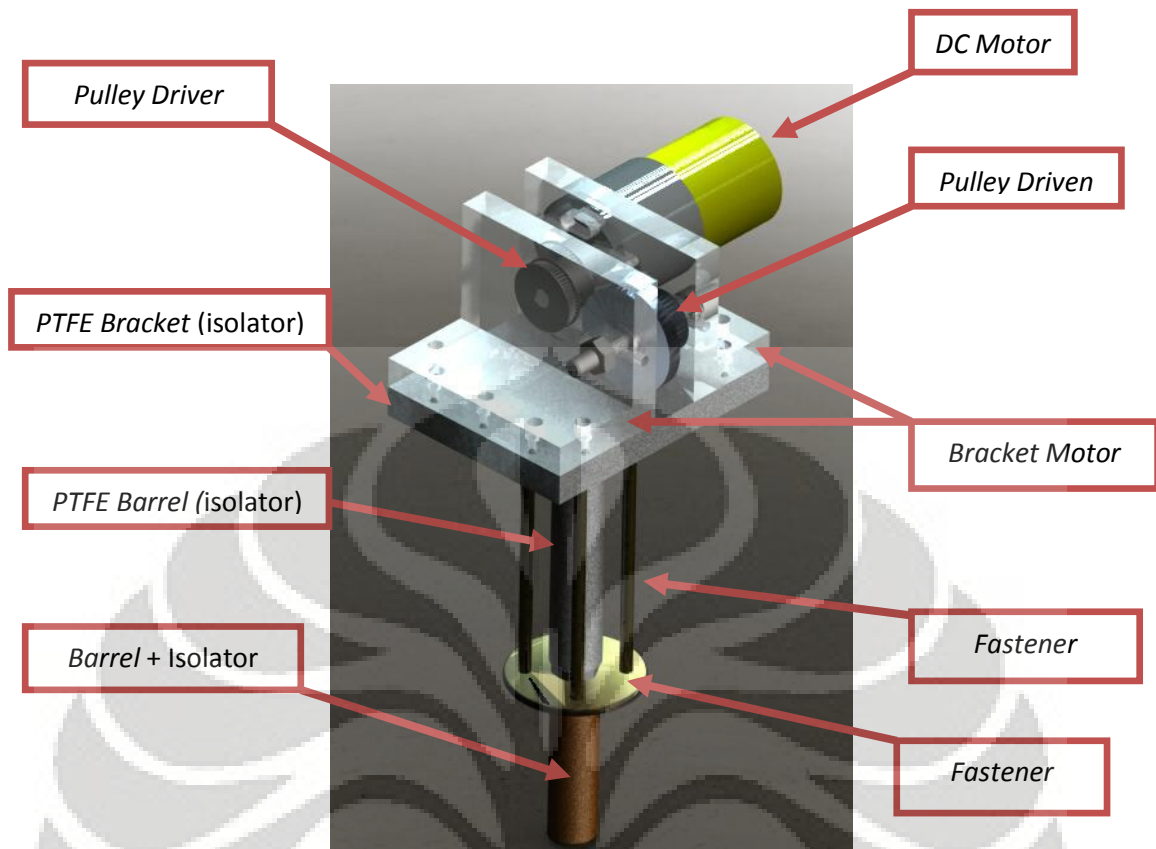
penggerak. Ditambahkan komponen isolator khususnya pada komponen *liquefier* untuk mencegah perambatan panas yang akan mempengaruhi konstruksi sistem secara keseluruhan. Dalam pengembangannya dapat digunakan *extruder* material pendukung yang umumnya digunakan untuk mengisi atau menyangga konstruksi produk yang dibuat. Pada penelitian kali ini tidak menggunakan material pendukung tersebut dan terbatas menggunakan satu *ekstruder nozzle* serta lebih kepada pembuatan produk dengan desain yang rumit.

3.1. Konstruksi *Extruder Nozzle (Feeder)*

Feeder didesain sedemikian rupa menyerupai sistem ekstrusi material termoplastik yang dideformasi dengan sistem pemanas. Material sendiri dideformasi dengan cepat oleh *heater* sepanjang *barel* yang pendek sampai dengan ujung *nozzle*. Material padatan dengan diameter kurang lebih 3 mm dimasukkan dengan sistem paksa oleh *Feeder Wheels* ke dalam sebuah ruang pemanas berdiameter mendekati ukuran diameter material yaitu 3.5 mm yang telah dikelilingi pemanas dan berubah menjadi semi *liquid*. Secara keseluruhan sistem *feeder* dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 3.2. Sistem *Feeder* FDM



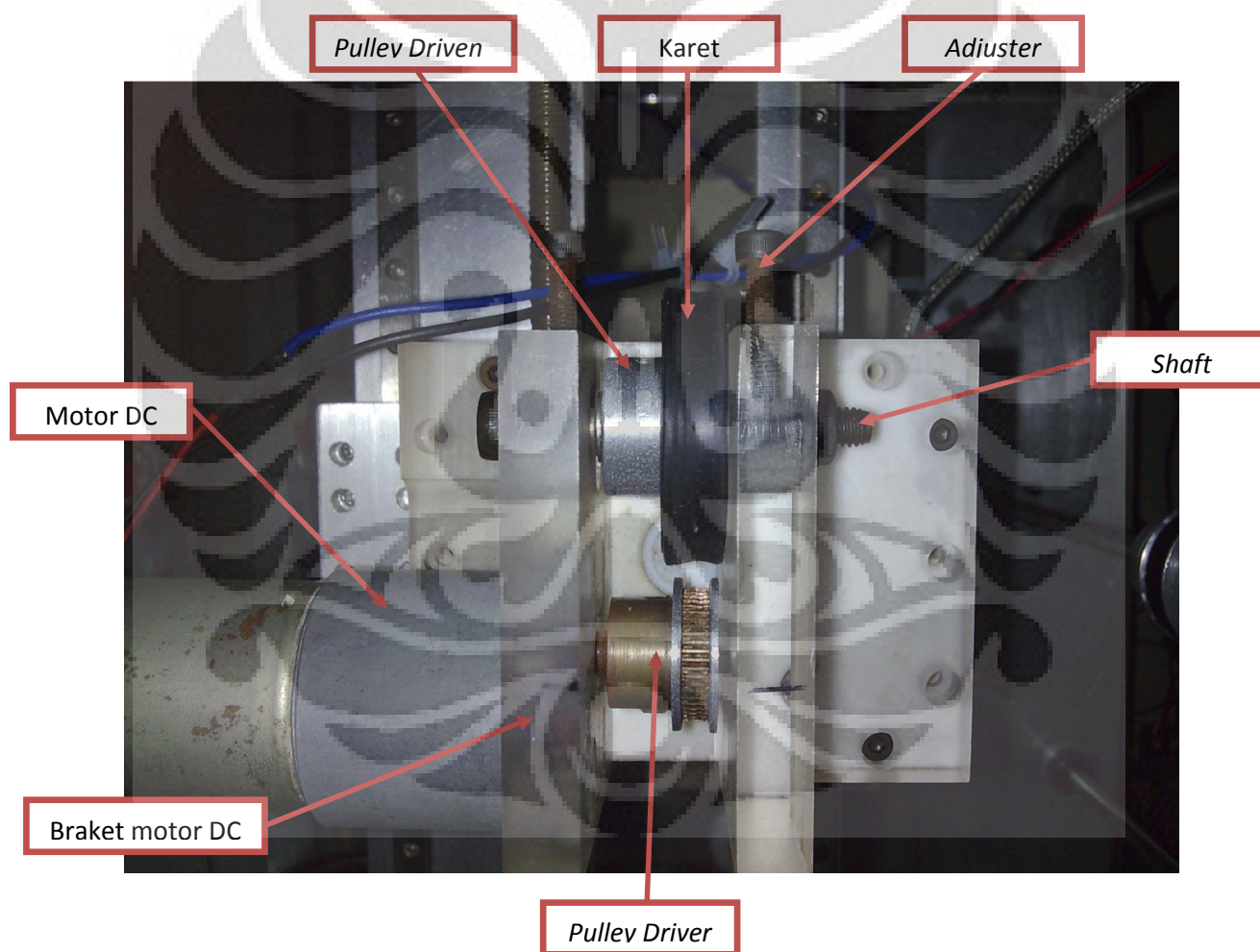
Gambar 3.3. Desain *Feeder FDM*

3.1.1. *Feeder Wheels*

Feeder wheels adalah bagian konstruksi *Feeder* yang berfungsi untuk mendorong material masuk ke dalam pemanas yang akan mendeformasi material menjadi *semi liquid*. Dengan mekanisme seperti pada proses *rolling*, *roller wheels* memberikan gaya dorong kepada material untuk masuk ke dalam pemanas (barel). Dengan mekanisme pendorong material, material yang padat pada masukan akan mendorong material yang telah berubah menjadi *semi liquid* untuk keluar melalui ujung *nozzle*. Mekanisme gerak *rolling* ini didukung oleh beberapa komponen seperti *Pulley Driver* dan *driven*, motor DC, Braket motor, Baut *Adjuster*, dan batang *shaft*.

Untuk menggerakkan *pulley driver*, digunakan motor DC yang memiliki *gear box*, sehingga dengan masukan tegangan 24V putaran motor menghasilkan keluaran sebesar 5 rpm. *Pulley driver* dibuat menyerupai *spur gear* yang diberikan *flange*

(kupingan) pada kedua sisinya untuk pendukung pergerakan material masuk kedalam lubang *nozzle*. *Pulley driver* digerakkan secara langsung oleh motor DC dan terbuat dari material kuningan yang lebih kuat dari alumunium, sehingga material dapat tergigit dan terdorong kedalam *nozzle*. Sedangkan *driven pulley* berfungsi untuk mendukung *Pulley driver* dan menerima gaya tekan dari *Pulley driver* agar material terdorong ke dalam *nozzle*. *Driven pulley* didesain menggunakan *bearing* pada porosnya (batang *shaft*) agar dapat berputar secara bebas dan mengikuti arah putar *Pulley driver*. Arah putaran *Pulley Driver* adalah berlawanan arah jarum jam sedangkan *pulley driven* sebaliknya. Pada keliling *pulley driven* dilapisi material karet bertujuan agar material yang terdorong tidak mengalami slip dengan meningkatkan koefisien gesek.



Gambar 3.4. Sistem *Roller Feeder*

Braket motor berguna sebagai dudukan motor DC dalam sistem ini sehingga motor dapat bekerja pada posisi tetap. Mekanisme gerak *rolling* bertumpu pada

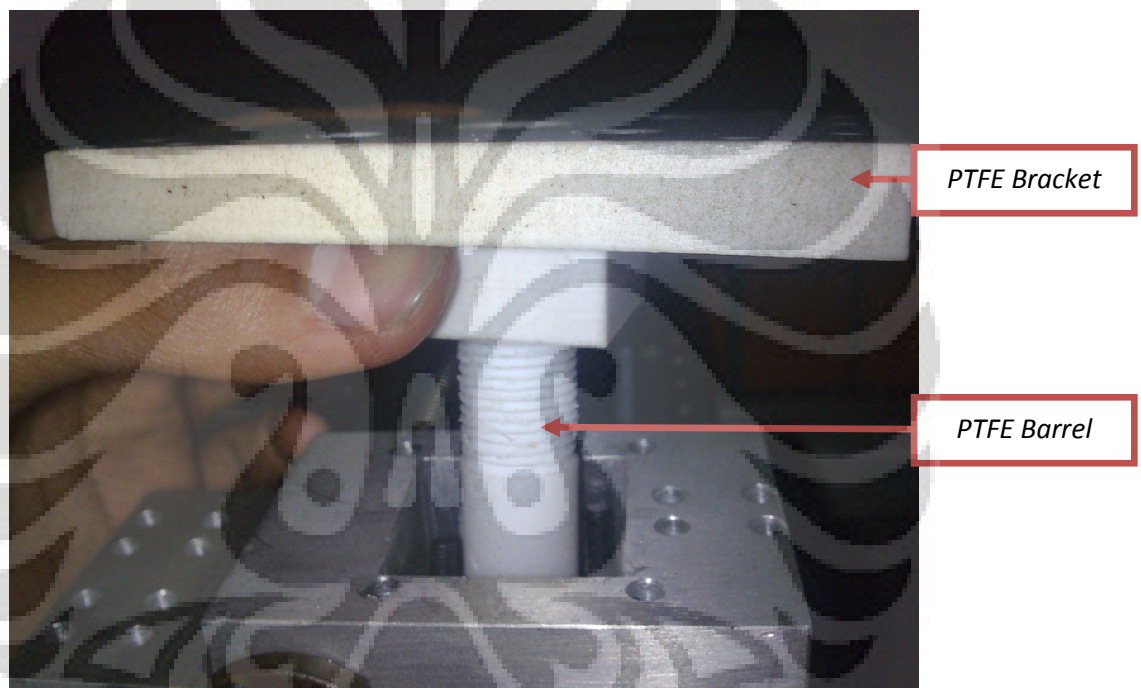
dudukan motor ini karena juga merupakan tumpuan dari poros batang *pulley driven*. Braket ini dibuat khusus menyesuaikan dimensi dari sistem *feeder* yang dibuat dengan mempertimbangkan masukan material dan dimensi motor dan *pulley*. Terbuat dari bahan plastik Akrilik yang cukup tahan terhadap panas. Pada braket ini juga terdapat komponen tambahan yaitu *Adjuster* yang digunakan untuk menyesuaikan posisi *Pulley driven* agar mekanisme gerak pemasukan material berjalan efektif. *Adjuster* menekan batang *shaft pulley driven* pada kedua sisi (pada braket motor) hingga mendorong material kepada *pulley driver* dan memberikan gaya tekan yang sesuai dengan fungsi gerak *rolling*.

3.1.2. *PTFE Barrel dan PTFE Bracket*

Proses terpenting dari sistem *feeder* ini adalah bagaimana mendeformasi material padatan menjadi semi cair. Untuk itu material harus mencapai titik lelehnya yang dibantu oleh kerja dari pemanas. Panas yang dihasilkan dari pemanas tentunya akan merambat secara konduksi dan konveksi. Untuk itu perlu adanya sistem isolasi panas yang cukup dalam sistem *feeder* ini untuk meminimalisir pengaruh panas yang merambat dari *heater*.

Dalam sistem ini, pemilihan bahan menjadi faktor pertimbangan utama dalam pengisolasian panas. *PTFE (Polytetrafluoroethylene)* atau biasa disebut *Teflon* dipilih sebagai bahan yang digunakan untuk mekanisme isolasi ini. *PTFE Barrel* dan *PTFE Bracket* dibuat dengan pertimbangan cukup untuk mencegah merambatnya panas secara konduksi yang berlebihan ke dalam sistem mesin *FDM* secara keseluruhan. *PTFE Barrel* adalah selongsong barel yang menghubungkan Barel pemanas dengan *PTFE bracket*. *PTFE bracket* sendiri berfungsi sebagai dudukan dari braket motor. *PTFE* dipilih karena sifatnya yang tahan terhadap panas yang tinggi dan mempunyai nilai konduktifitas yang rendah. Tidak seperti bahan metal yang konduksi panasnya tinggi sehingga tidak mungkin untuk dibuat sistem isolasi panas. Titik lelehnya mencapai diatas 327°C dan Konduktivitas panas $0.25\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. *PTFE* merupakan salah satu isolator elektrik yang baik.

PTFE Barrel dengan *PTFE Bracket* merupakan bagian yang terpisah dan dapat disambungkan dengan ulir pada keduanya. Komponen ini didesain menyesuaikan konstruksi sistem mesin yang telah dibuat sebelumnya sehingga tidak merubah sistem mesin itu sendiri melainkan hanya memodifikasi sistem *feeder* walaupun terjadi perubahan desain sistem *feeder* beberapa kali. Untuk mendukung posisi tetap sistem *feeder* digunakan pengencang (*fastener*) yang berupa *ring* dan baut pengencang yang menghubungkan barel dengan braket. Sehingga barel dengan braket tidak bergerak dan tidak menimbulkan *error* karena konstruksi yang kendor. Baut pengencang ini terhubung dengan *PTFE Bracket*.

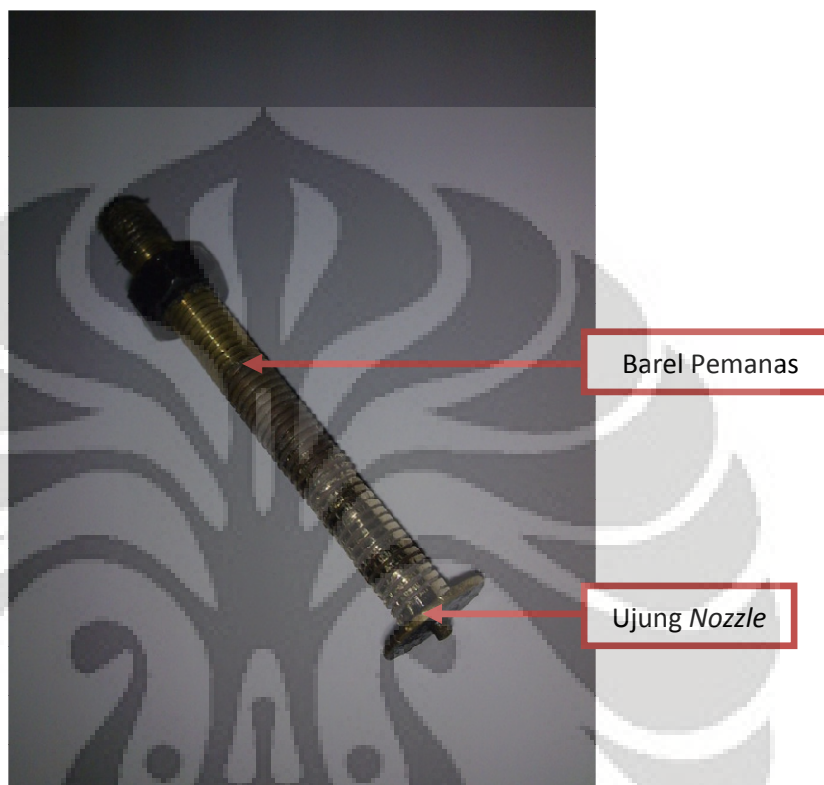


Gambar 3.5. *PTFE Bracket* dan *PTFE Barrel*

3.1.3. *Heater Barrel* dan *Nozzle*

Barel Pemanas adalah komponen *feeder* yang berfungsi sebagai ruangan untuk pemanasan material dimana material akan terdeformasi dari padatan menjadi semi cair. Pada barel pemanas terdapat sumber panas yang berupa kawat *NiChrome* yang dialiri listrik. Kawat *NiChrome* yang dialiri listrik akan memberikan kalor yang akan dikonduksikan kedalam oleh Barel pemanas. Barel pemanas berbentuk silinder dengan

diameter dalam adalah 3,5 mm, mendekati ukuran material yang masuk yaitu 3 mm sehingga material akan mendapatkan panas melalui dinding-dinding barel pemanas dan terdeformasi. Barel pemanas terbuat dari bahan kuningan yang baik dalam menghantarkan panas karena konduktivitas bahan yang baik.

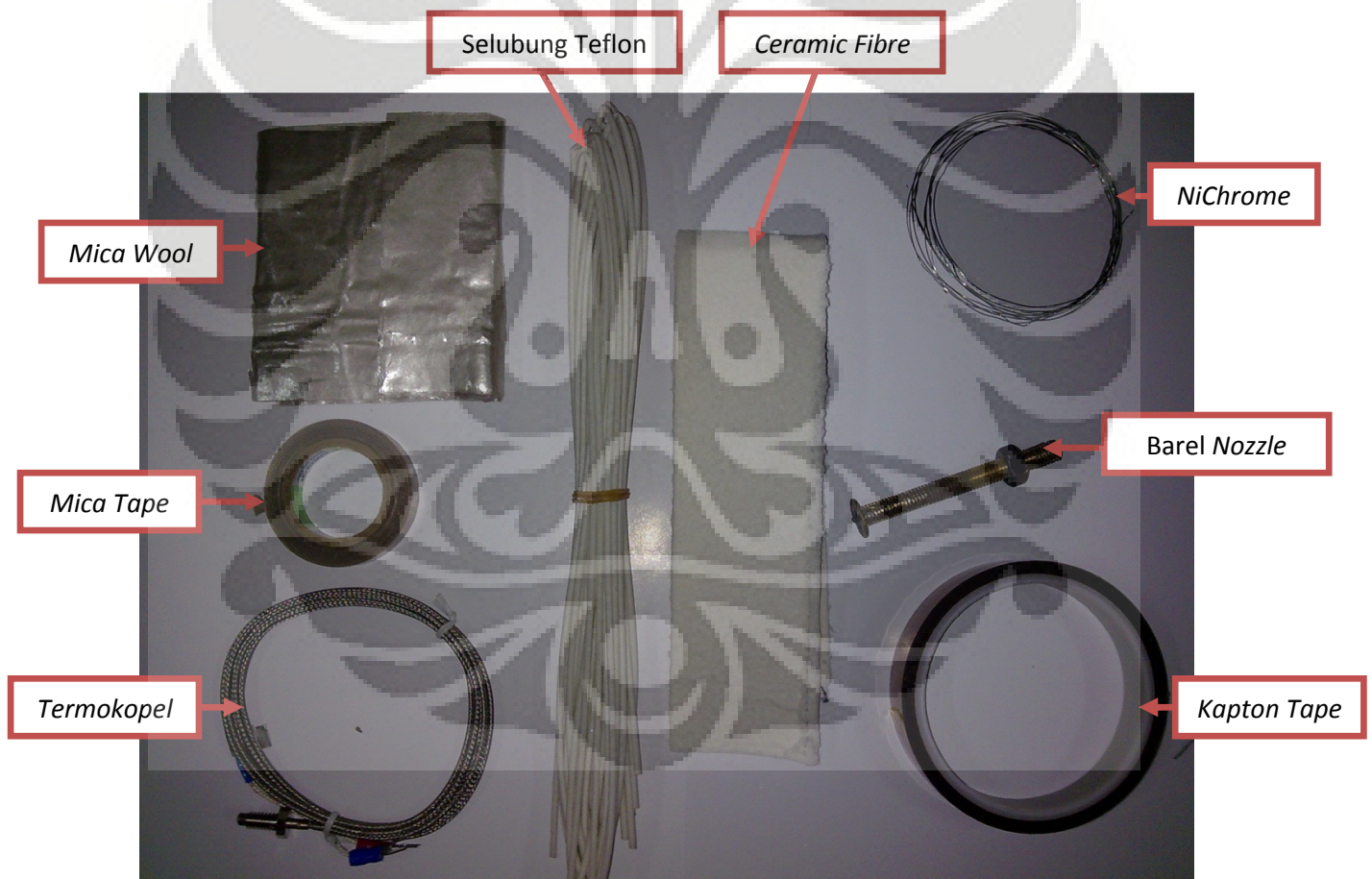


Gambar 3.6. Barel Pemanas dan *Nozzle*

Dimensi panjang dari barel *heater* adalah 75 mm dengan desain ulir pada bagian luarnya sehingga diameter nominal luar adalah 8 mm dengan *Pitch* 1,25 mm. Bentuk ulir didesain untuk mendukung pelekatan isolator-isolator panas dan perakitan dengan Barel PTFE. Barel *Heater* dilengkapi dengan isolator panas dan Termokopel yang merupakan bagian dari sistem kontrol suhu. Isolator panas konveksi terdiri dari lapisan-lapisan mulai dari barel yaitu *Mica wool (double)*, *Mica Tape*, *Kapton Tape*, dan *Ceramic Fiber*. Diantara *Mica wool* terdapat *Heater* yang berupa kawat *NiChrome* yang dililitkan pada barel dan ujung termokopel untuk mendeteksi suhu barel. Termokopel yang digunakan adalah termokopel Tipe-K. Suhu yang dideteksi akan dikontrol oleh

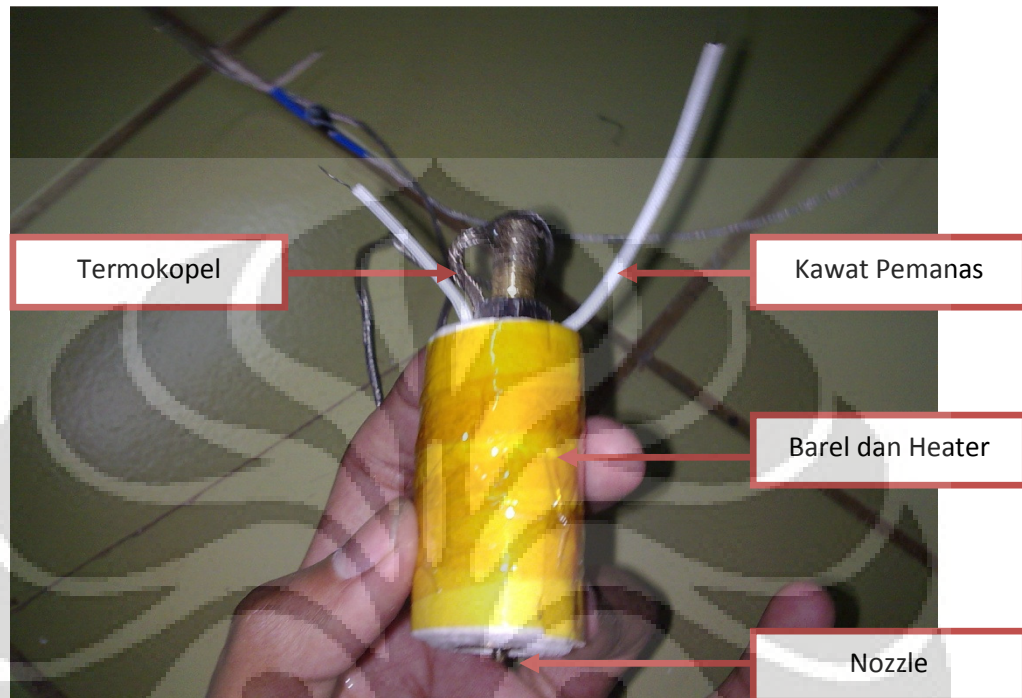
Microcontroller. *Microcontroller* diprogram untuk bekerja otomatis dengan menutup dan membuka aliran arus listrik ke kawat *heater* melalui mekanisme *relay*.

Pada bagian ujung barel *heater* terdapat *nozzle* sebagai tempat keluarnya material yang sudah dideformasi menjadi *semi liquid* dan siap untuk dibuat *layer*. *Nozzle* memiliki diameter keluaran 0.5 mm - 1 mm yang lebih kecil dari diameter masukan material. Pada bagian *nozzle* ini terdapat kupingan dengan diameter hingga 15 mm yang berguna untuk membantu isolator-isolator yang diselamatkan pada bagian barel *heater* agar tidak jatuh atau merosot dan mengganggu kerja *nozzle* pada saat deposisi. Barel *heater* dan *nozzle* didesain menjadi satu kesatuan yang tidak dapat dipisahkan. Artinya lubang *nozzle* 0.5 mm memiliki barel *heater* yang berbeda dengan *nozzle* 1mm meskipun dari segi dimensi sama.



Gambar 3.7. Komponen Pemanas dan isolator

Setelah dirakit, komponen pemanas dihubungkan dengan arus listrik AC dengan kabel. Untuk melindungi kawat pemanas yang dihubungkan dengan kabel, kawat *NiChrome* diselubungi selubung Teflon agar tidak menyentuh bagian-bagian lain.



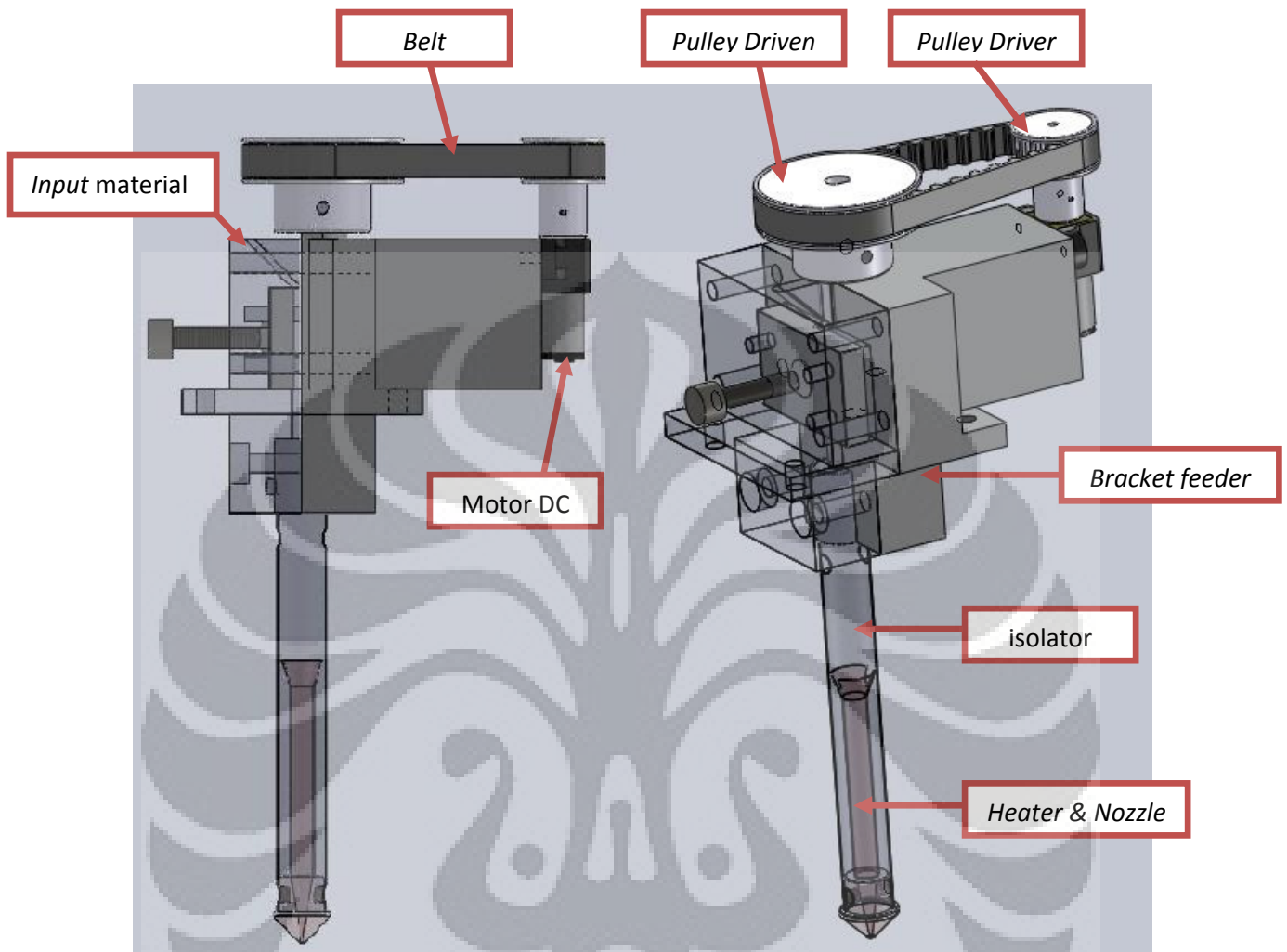
Gambar 3.8. *Nozzle* dan Barel Pemanas setelah Proses *Assembly*

3.2. Sejarah Perkembangan Desain Sistem *Feeder*

Dalam penelitian ini beberapa perubahan sistem *feeder* dilakukan untuk menemukan dan merancang sistem *feeder* yang paling efektif. Perubahan itu dilakukan karena ditemukannya beberapa hambatan dari fungsi sistem *feeder* sebelumnya yang tidak mampu bekerja dengan baik. Selain itu pertimbangan perakitan sistem *feeder* juga menjadi kendala pada desain-desain sebelumnya.

3.2.1. Desain Awal

Pada awal perancangan, sistem *feeder* dibuat menyerupai sistem *injection molding* pada industri. Mekanisme pendorongan material bahan baku ke dalam pemanas dilakukan melalui mekanisme ulir. Ulir yang berputar akan mendorong material masuk kedalam pemanas.

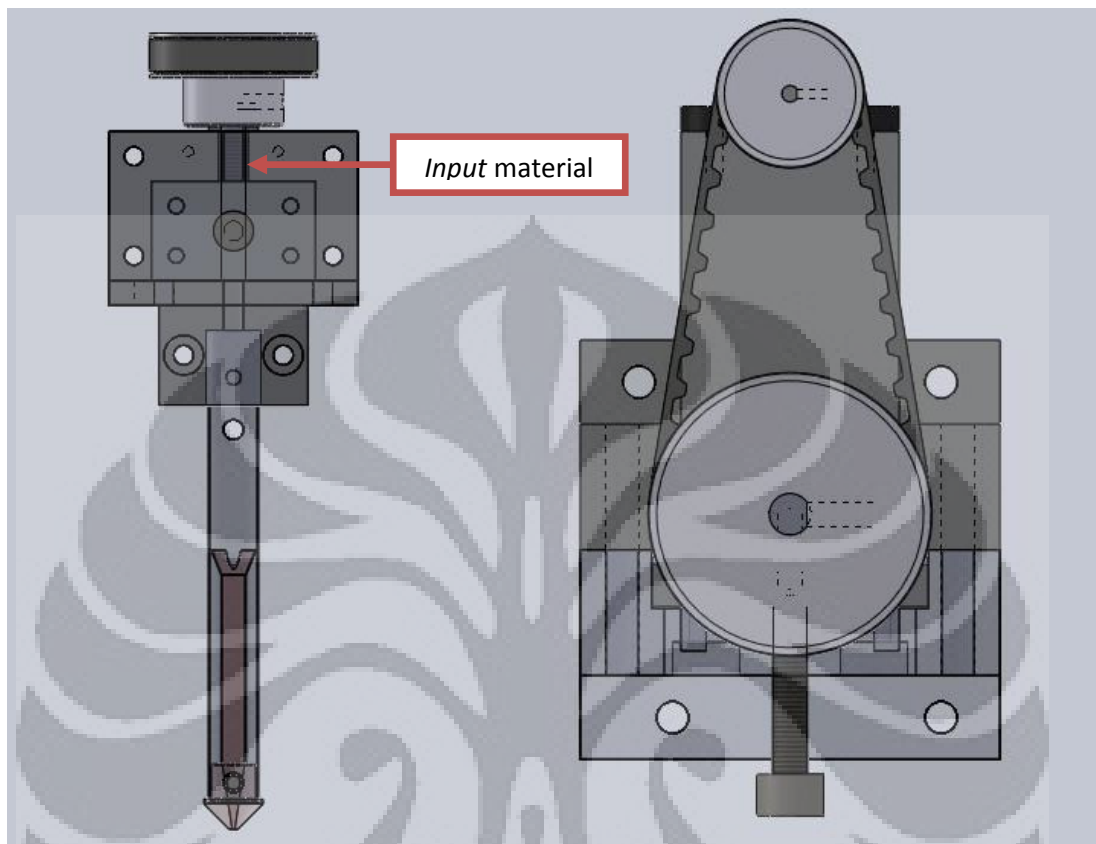


Gambar 3.9. Desain awal (*injection molding base*)

Penggerak ulir adalah motor DC yang mendistribusikan torsi melalui *belt*. Kecepatan putar motor DC sangat cepat untuk ukuran ekstrusi material jika dilakukan secara *direct* pada sistem ini. Untuk itu dilakukan reduksi kecepatan putar dengan mendesain *Pulley driven* yang memiliki diameter yang lebih besar dari *Pulley driver* hingga perbandingan 2:1. Braket *nozzle* dan puli seluruhnya terbuat dari bahan aluminium. Elemen pemanas dan isolator mengambil dasar desain pada alat solder pemanas yang banyak dijual dipasaran.

Pada awal rancangan, lubang *input material* menyudut $\pm 45^\circ$, dengan demikian material masuk menyudut dari samping. Material akan masuk dengan berputarnya ulir menuju barel pemanas dan *nozzle*. Barel pemanas, *nozzle*, dan selubung isolator

dirancang terbuat dari bahan *steel* yang tahan terhadap panas yang tinggi dan memiliki lubang *nozzle* berdiameter 0.5 mm.



Gambar 3.10. Sistem *Feeder* Pertama Tampak Depan dan Atas

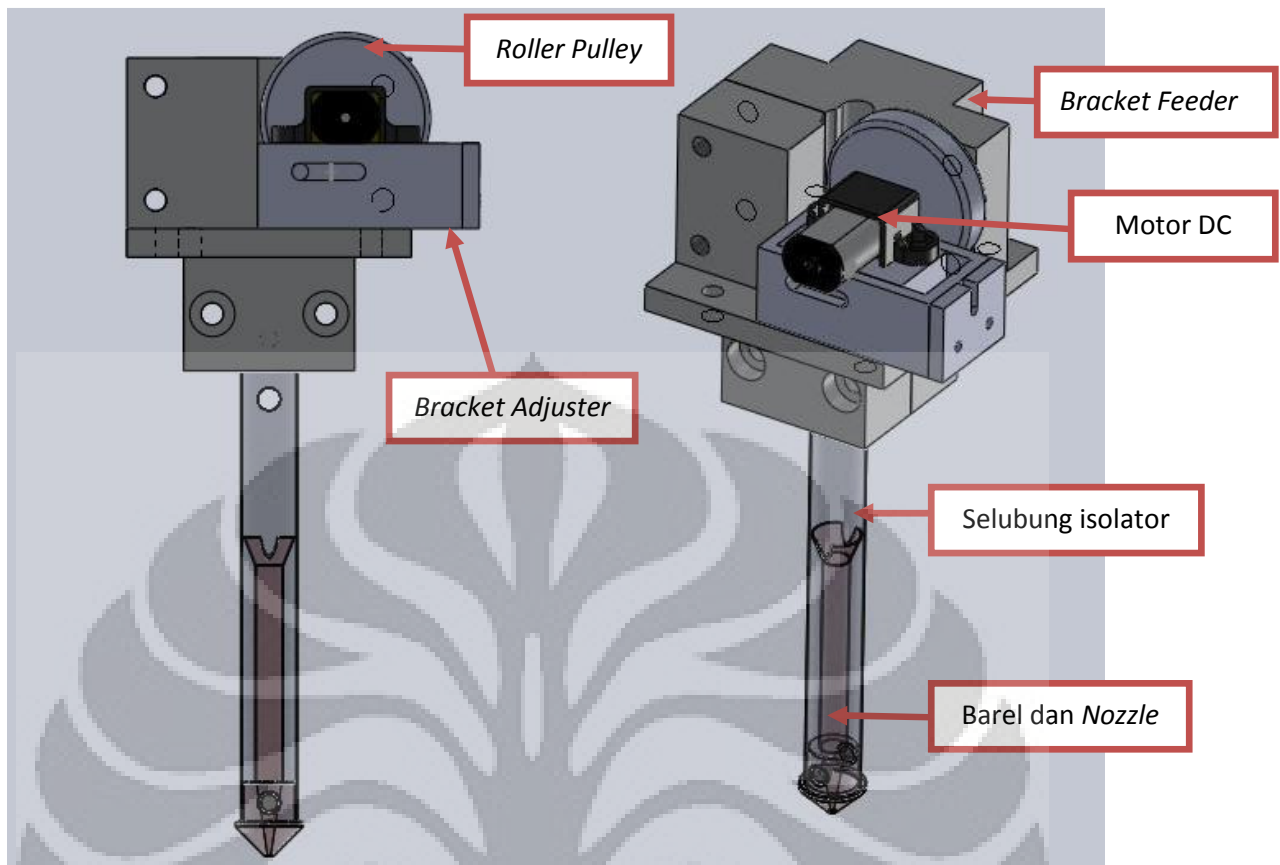
Setelah *part* rancangan awal selesai dibuat, dimulai proses perakitan dan uji coba. Dalam proses perakitan dan uji coba tersebut ditemukan beberapa evaluasi terkait rancangan pertama sistem *feeder* ini.

- Dimensi *part* yang dibuat memerlukan kepresisian yang tinggi sementara pada kenyataannya, ada sedikit *error* pada dimensi yang dibuat yang menyebabkan konstruksi tidak dapat diinstalasi pada tempatnya. *Error* pada dimensi Braket *feeder* menyebabkan kesulitan dalam perakitan dan penempatan *feeder* pada konstruksi utama mesin *FDM*. Beberapa langkah perbaikan telah dilakukan namun gagal dan harus memproduksi komponen yang baru.

- Ketidakpresisian menyebabkan posisi jalur masuknya material terganggu sehingga masuknya material tidak dapat diarahkan tepat pada barel pemanas yang menyebabkan masuknya material ke barel pemanas tidak akurat.
- Kegagalan sistem ulir untuk menarik material masuk ke dalam barel pemanas. Hal ini disebabkan karena dimensi masukan material yang tidak sesuai karena kepresisiannya dan juga torsi dari motor DC yang tidak mencukupi dalam hal ini untuk mendorong material masuk ke dalam. Asumsinya karena terjadi macet disebabkan sistem ulir tersebut yang tidak berjalan dengan baik.
- Belum ditemukan teori pembuatan dan perancangan pemanas (*heater*) yang paling sesuai sehingga *heater* dibuat dengan asumsi daya saja. Daya yang diasumsikan pada saat itu adalah 40 Watt dan mampu mencapai temperatur 250°C.

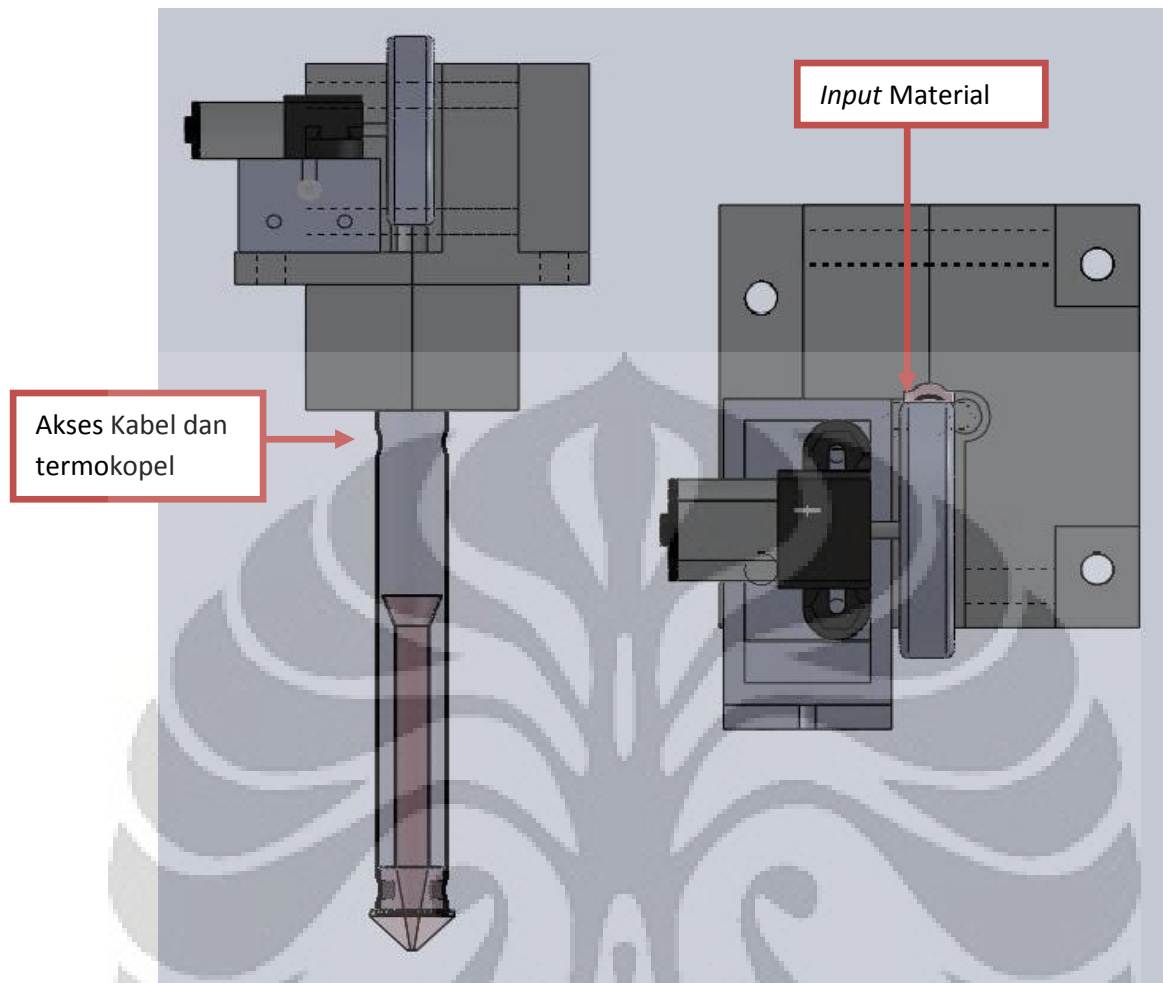
3.2.2. Desain Modifikasi Pertama

Setelah menemukan beberapa evaluasi yang menyangkut sistem *feeder* rancangan awal maka dilakukan modifikasi yang berdasar pada evaluasi-evaluasi tersebut. Dirasa sistem ulir pendorong kurang efektif dalam fungsi pemasukan material maka sistem diubah menjadi pendorongan material dengan *Roller Pulley* secara *direct*. Pada rancangan ini, *Pulley* yang digerakkan secara langsung oleh motor DC mendorong material masuk dengan bantuan dinding pada braket aluminium. Modifikasi ini merupakan modifikasi minim pada braket motor dan ditambahkan *adjuster* pada braket motor sehingga posisi *roller pulley* dapat disesuaikan terhadap besarnya diameter material.



Gambar 3.11. Desain Modifikasi Pertama dari Rancangan Awal

Posisi masukan material berubah dari yang sebelumnya menyudut menjadi tegak lurus terhadap lubang masukan. Adanya sistem *adjuster* pada braket memungkinkan penyesuaian posisi motor dan *roller* terhadap diameter material yang berbeda. Pada tahap modifikasi ini digunakan karet pada lapisan luar *pulley* untuk meningkatkan koefisien gesek sehingga material dapat masuk dengan mulus. Motor DC diasumsikan masih mampu untuk mendorong material masuk karena pada evaluasi rancangan sebelumnya adalah sistem ulir yang tidak dapat bekerja dengan baik. Daya *heater* dianggap kurang memenuhi spesifikasi karena setelah diuji, performa barel pemanas dan *nozzle* kurang baik. Waktu tunggu yang dibutuhkan sampai material mencair dan siklus selanjutnya relatif cukup lama dan keluaran material dari lubang *nozzle* tidak kontinyu. Asumsikan awal adalah daya listrik yang dimasukkan kurang maka daya ditambah menjadi 50 Watt mampu mencapai temperatur 300°C dengan rangkaian kawat *heater* yang berbeda.



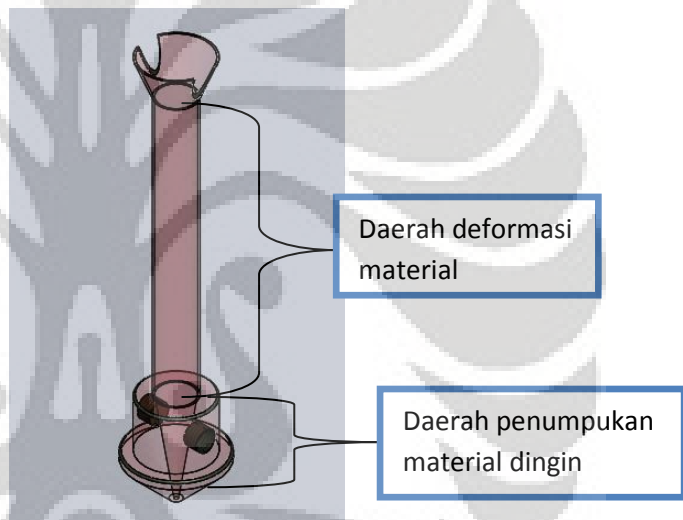
Gambar 3.12. Modifikasi Pertama Rancangan Tampak Depan dan Atas

Uji coba dilakukan terhadap desain modifikasi pertama ini dan ternyata masih ada beberapa hal yang harus dievaluasi terkait sistem *feeder* ini.

- Tidak adanya sistem isolasi yang baik yang menyebabkan kalor merambat dengan sangat cepat kesistem. Material dasar sistem *feeder* secara keseluruhan terdiri dari aluminium dan *steel* yang memiliki ketahanan terhadap panas yang tinggi namun memiliki konduktivitas panas yang tinggi pula sehingga panas cepat merambat secara konduksi dan banyak kalor yang terbuang.
- Material utama konstruksi adalah aluminium dan *steel* yang memiliki massa yang besar sehingga bobot secara keseluruhan *feeder* cukup berat. Ditambah lagi dimensi komponen-komponen penyusun sistem ini yang kurang efektif sehingga

menjadikan bobot berlebihan yang mengganggu sistem pergerakan mesin *FDM* karena faktor defleksi pada *Screw Shaft*.

- Setelah daya pada kawat pemanas yang dililit ke Barel pemanas ditambah menjadi 50 Watt ternyata kondisi tidak jauh berbeda dengan keadaan sebelumnya. Kemungkinan faktor material yang terbuat dari *steel* yang menjadi penyebab utama. *Steel* kurang efektif dalam menghantarkan panas. Pembuatannya relatif sulit untuk dibentuk. Selain itu juga desain barel dan *nozzle* yang kurang sesuai menyebabkan penumpukan material dingin pada saat proses pemanasan berhenti. Jika proses pemanasan akan dimulai lagi maka terjadi kemampatan material karena penumpukan tersebut dan material yang menumpuk tersebut memiliki kualitas yang buruk.



Gambar 3.13. Barel Pemanas dan *Nozzle (steel)*

- Terjadi *slip* pada *roller* dan dinding braket pada saat proses pemasukan material. Ini disebabkan karena dinding yang licin dan tidak dapat mengimbangi gerak dari *roller* dalam memasukkan material. Akibatnya material tidak dapat masuk dengan sempurna ditambah lagi fungsi pendorong sama sekali tidak berfungsi.
- Kecepatan motor DC yang terlalu cepat dan tidak berimbang dengan kecepatan *linear motor stepper* karena *roller* digerakkan secara *direct* oleh motor DC tanpa adanya reduksi kecepatan.

- Akses kabel dan termokopel yang kurang memadai pada desain selubung isolator sehingga menyulitkan perangkaian pemanas dan pengontrol. Isolator yang dapat ditambahkan juga terbatas.

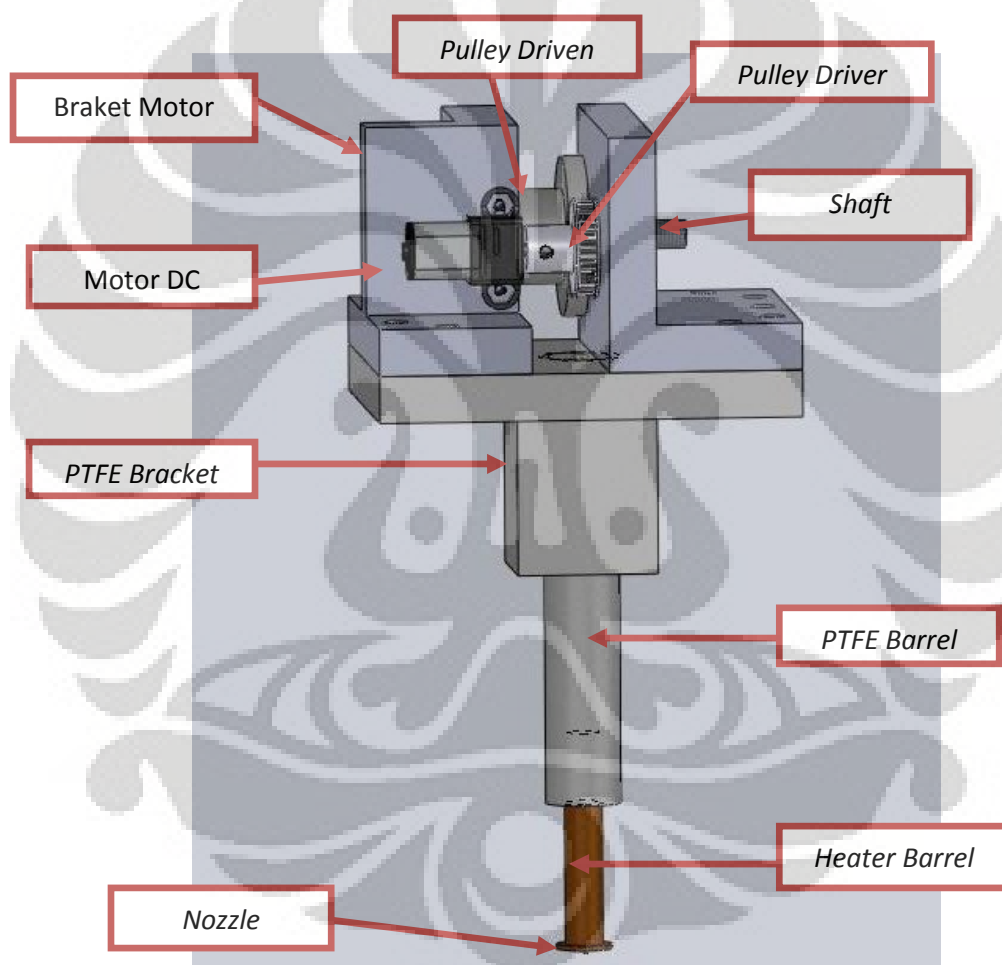
3.2.2. Desain Modifikasi Kedua

Pada desain modifikasi pertama, perubahan yang dilakukan terhadap sistem *feeder* adalah perubahan minim. Perubahan hanya dilakukan pada sistem pemasukan material dari sistem ulir menjadi sistem *rolling* dengan satu *pulley*. Ditambah mekanisme *adjustable* untuk menyesuaikan posisi *roller pulley* dan motor DC. Masih banyaknya evaluasi yang ditemukan setelah pengujian pada desain modifikasi pertama mengharuskan untuk memodifikasi ulang sistem *feeder*. Pada desain modifikasi kedua, perubahan dilakukan menyeluruh. Mengamati hasil evaluasi pada desain awal dan desain modifikasi pertama, perlu dilakukan perubahan sistem secara menyeluruh dari mulai pemilihan material dan pembuatan desain konstruksi yang efektif dan efisien. Desain modifikasi kedua ini mulai mendekati harapan sistem *feeder* yang memadai.

Beberapa perubahan desain yang dilakukan pada modifikasi ini adalah:

- Dengan pertimbangan bobot *steel* yang besar dan perambatan kalor konduksi yang besar ke sistem, konstruksi braket didesain ulang dengan menggunakan material plastik. Braket bagian atas yaitu braket motor menggunakan bahan polimer mika dengan pertimbangan efisiensi harga dan sedikit nilai estetika. Selain itu juga mika mempunyai konduktifitas yang rendah.
- Braket bagian bawah mempunyai fungsi utama selain daripada sebagai tempat dudukan juga berfungsi sebagai isolator panas. Oleh karena itu PTFE (Teflon) dipilih sebagai materialnya karena memiliki konduktifitas yang rendah dan tahan terhadap panas yang tinggi. *Bracket* ini disebut sebagai *PTFE Bracket*.
- Sistem *roller* disempurnakan dengan adanya *Pulley driven* yang dapat diubah-ubah kedudukannya (*adjustable*) yang membantu gerakan *rolling* pemasukan material ke dalam barel pemanas. *Pulley* didesain ulang dengan dimensi berbeda dibandingkan sebelumnya.

- Konsep selubung isolator diubah menjadi barel isolator dengan bahan PTFE yang disebut sebagai *PTFE Barrel*. Fungsinya sebagai isolator dan juga penghubung antara barel pemanas dengan *PTFE Bracket*.
- Barel pemanas dan *nozzle* terbuat dari kuningan yang memiliki konduktifitas panas yang tinggi sehingga pemanasan material akan berjalan lebih cepat. Desain barel dan *nozzle* diubah, lilitan kawat pemanas menjangkau bagian bawah barel sehingga menjadi solusi penumpukan material dingin pada *problem* sebelumnya.



Gambar 3.14. Sistem *Feeder* Modifikasi Kedua

Pada desain modifikasi ini, sistem telah dapat berfungsi cukup baik. Material yang masuk dapat dideformasi dengan cukup baik oleh pemanas dan juga mampu dikeluarkan dengan baik melalui ujung *nozzle* diameter 1mm secara kontinyu. Namun

demikian masih ada beberapa evaluasi terkait dengan perubahan desain pada konstruksi mesin secara keseluruhan dan beberapa hal lainnya yaitu:

- Adanya penambahan part pada desain modifikasi konstruksi robot secara vertikal dan adanya *limit switch* menyebabkan kebutuhan dimensi sistem *feeder* secara vertikal bertambah. Dimensi vertikal sistem *feeder* yang ada harus disesuaikan.
- Motor DC sebagai penggerak *pulley driver* dirasa kurang memadai, untuk itu perlu diganti motor DC dengan torsi yang cukup besar dan kecepatan putar yang rendah untuk mengimbangi kecepatan linear aksis mesin.
- Efisiensi sistem *roller* dalam pemasukan material masih dapat ditingkatkan dengan memberikan daya cengkeram yang lebih besar pada material yang dimasukkan. Dengan begitu sistem dapat memperkecil slip.
- Konstruksi sambungan antara barel pemanas, *PTFE Barrel* dan *PTFE Bracket* mudah kendur. Untuk itu perlu adanya sistem pengencang (*fastener*) untuk menstabilkan posisi.

3.2.4. Desain Modifikasi Ketiga

Peningkatan performa pada sistem *feeder* dan penyesuaian perlu dilakukan untuk mendapatkan sistem *feeder* yang baik. Untuk itu berdasarkan evaluasi-evaluasi pada desain modifikasi kedua dilakukan modifikasi minim. Desain modifikasi ketiga ini adalah konstruksi akhir yang saat ini digunakan seperti yang dijelaskan pada subbab sebelumnya. Beberapa modifikasi yang dilakukan pada desain ini adalah:

- Untuk mendapatkan solusi untuk konstruksi vertikal yang berubah dilakukan perubahan pada barel pemanas yang dimodifikasi menjadi lebih panjang dari yang sebelumnya 45mm menjadi 75mm. Selain itu juga diameter kupingan pada bagian *nozzle* diperbesar agar dapat membantu kedudukan isolator-isolator konveksi pada barel pemanas.
- Penggantian motor DC dengan spesifikasi yang jauh berbeda terutama dalam hal ini dimensi sehingga merubah desain braket motor

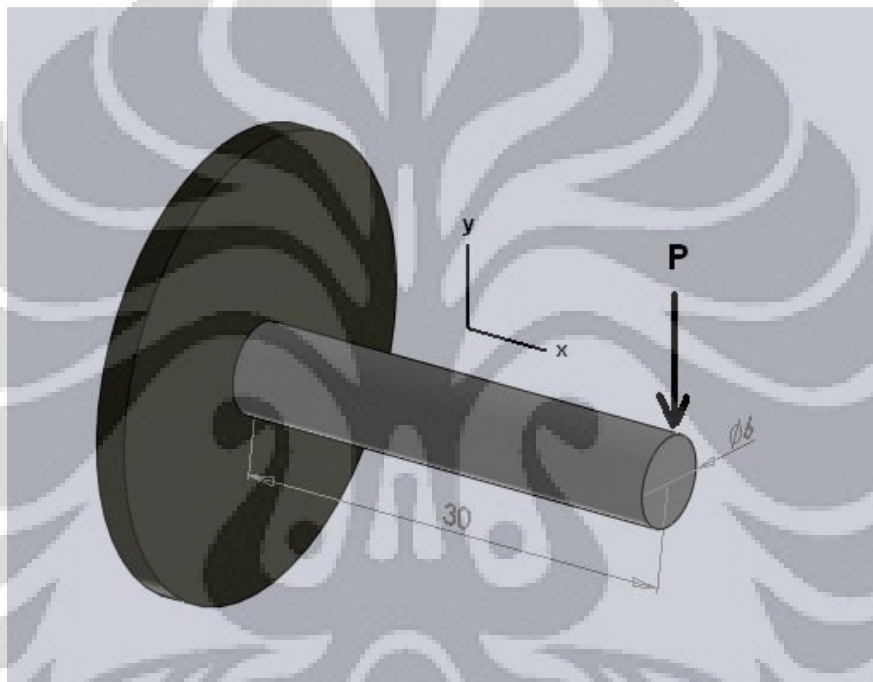
- *Pulley driver* didesain menyerupai *spur gear* dan dengan material kuningan untuk meningkatkan daya cengkeram terhadap material yang dimasukkan kedalam barel pemanas.
- Untuk kestabilan konstruksi *feeder* ini diberikan *ring* dan baut *fastener* yang terhubung dari barel pemanas ke *PTFE Bracket*.

Desain seperti tampak pada Gambar 3.3. Sampai saat ini desain yang paling baik adalah desain ini. Pada desain ini sistem dapat berjalan dengan baik. Penyesuaian kecepatan linear aksis mesin dengan kecepatan putar motor DC pada *feeder* dapat dilakukan dengan metode *Pulse Width Modulator (PWM)*. Suhu dapat terkontrol dengan termokopel dengan penguat sinyal AD595 dan *mikrokontroller*. Namun demikian sistem *feeder* saat ini belum mencukupi untuk pengeluaran material secara diskontinyu. Masih ada sisa material yang keluar ketika sistem berhenti. Dibutuhkan *improve* sistem ke depan untuk memenuhinya.

3.3. Analisis Pembebanan Pada Poros Motor dan *Driver pulley*

Performa *Driver pulley* sebagai salah satu komponen pendukung dalam proses rolling dipengaruhi oleh beberapa hal. Salah satunya adalah faktor tensi atau tekanan yang diberikan oleh *driven pulley* yang diatur dengan menggunakan adjuster. *Driver pulley* digerakkan oleh motor DC yang memiliki poros yang juga terpengaruh oleh tekanan tersebut. Kegagalan dapat terjadi ketika tekanan atau tensi yang diberikan melebihi tensi maksimal atau melampaui daerah deformasi elastis material dari *driver pulley* dan poros motor tersebut. *Driver pulley* yang terbuat dari bahan kuningan (Brass) memiliki gigi-gigi yang halus seperti *spur gear* dan memiliki potensi untuk mengalami deformasi jika pemberian beban melampaui *safety factor* dari komponen atau terutama gigi-gigi tersebut. Poros motor yang terbuat dari Alloy steel juga berpotensi mengalami kegagalan yang serupa jika diberikan tensi yang berlebihan. Untuk itu kita melakukan analisis pembebanan pada *driver pulley* dan poros motor DC untuk mengetahui berapa tensi maksimal aman yang dapat diberikan untuk memaksimalkan kerja *feeder* tanpa menimbulkan potensi kegagalan dari komponen-komponen tersebut.

Analisis pembebanan pada poros motor dc dilakukan dengan mengasumsikan poros tersebut adalah cantilever dimana salah satu ujungnya adalah tetap (*fixed*). Pembebanan diberikan pada ujung poros karena pada posisi itu merupakan titik maksimal pembebanan dan merupakan posisi beban aktual pada sistem rolling dimana pemasukan material adalah pada ujung *driver pulley*. Dikarenakan beban sesungguhnya tidak jatuh tepat pada ujung poros, maka poros motor dan *driver pulley* dianggap sebagai satu kesatuan homogen menjadi poros motor dengan bentuk silinder panjang. Dapat dilihat pada diagram benda bebas dibawah ini :



Gambar 3.15. Diagram Benda Bebas Pembebanan Poros Motor

Dengan mengasumsikan :

- Poros motor terbuat dari ductile material *alloy steel* 4340 yang memiliki *Yield Stress* $S_y = 1640$ MPa [7].
- Pembebanan statis biaksial *Pure Bending*.
- Diameter poros adalah 6 mm dan panjang poros adalah 30 mm.
- Tidak ada torsi yang diberikan.

Maka untuk mengetahui pembebanan maksimum yang dapat diberikan pada poros motor tersebut, diambil *safety factor* $n_s = 1,73$ [7].

Dengan pertimbangan nilai yang paling akurat dalam perhitungan pembebanan pada material *ductile* digunakan *Distortion-Energy Theory* (DET) atau biasa disebut Von Mises. Von mises memprediksi kegagalan jika :

$$\sigma_e \geq \frac{S_y}{n_s}$$

Dimana :

$$\sigma_e = [\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2]^{1/2}$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \quad \Rightarrow \quad \text{torsi } T = 0, \text{ jadi } \textit{shear stress} \text{ dianggap } 0.$$

Untuk silinder pejal, *Normal stress* adalah :

$$\sigma_x = \frac{Mc}{I} = \frac{Pl(d/2)}{\pi d^4 / 64} = \frac{32Pl}{\pi d^3}$$

Jadi,

$$\sigma_x = \frac{32Pl}{\pi d^3} = \frac{32 \cdot P \cdot 0,03}{3,14 \cdot (0,006)^3}$$

$$\sigma_x = \frac{0,96P}{6,78 \times 10^{-7}} = 14,16 \times 10^5 P$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2}$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_x}{2} = \sigma_x = 14,16 \times 10^5 P,$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} - \frac{\sigma_x}{2} = 0$$

Sehingga didapatkan stress ekuivalen yaitu:

$$\sigma_e = [\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_e = [\sigma_1^2 - 0 + 0]^{\frac{1}{2}} = \sigma_1 = 14,16 \times 10^5 P$$

Berdasarkan teori Von Mises, kegagalan dapat dihindarkan jika :

$$14,16 \times 10^5 P \leq \frac{S_y}{n_s}$$

Jadi, tekanan maksimum yang dapat diberikan kepada poros motor adalah,

$$14,16 \times 10^5 P \leq \frac{1640 \times 10^6}{1,73}$$

$$P \leq \frac{1640 \times 10^6}{14,16 \times 10^5 \cdot 1,73}$$

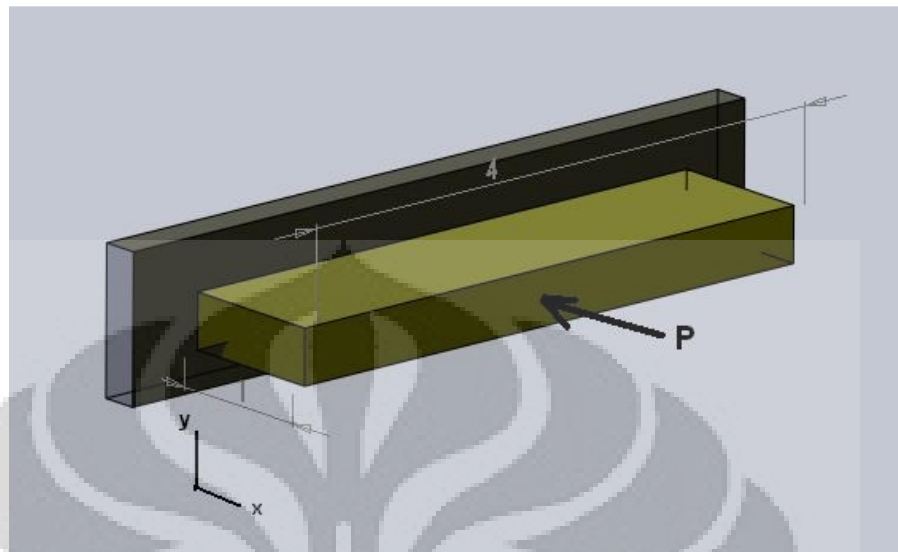
$$P \leq 669,48 Pa \rightarrow 0,67 KPa$$

Tekanan maksimum (P) yang dapat diberikan kepada poros motor untuk menghindari kegagalan adalah maksimum sebesar **0,67 KPa**.

Analisis pembebanan pada *driver pulley* adalah dengan tujuan menghindari terjadinya deformasi pada gigi-gigi pulley tersebut. Analisis pembebanan yang sama seperti pada pembebanan poros motor dapat dilakukan dengan asumsi :

- Tipe support adalah cantilever karena *driver pulley* terhubung dengan poros motor yang tetap (*fixed*) dan pembebanan aktual searah aksial pada ujung gigi pulley.
- *Driver pulley* terbuat dari ductile material yellow Brass yang memiliki Yield Stress $S_y = 170 \text{ MPa}$ [2].
- Pembebanan statis biaksial *Axial Loading*.
- Gigi pulley dianggap berbentuk balok
- Tidak ada torsi yang diberikan.

Untuk mengetahui pembebanan maksimum yang dapat diberikan pada poros motor tersebut, diambil *safety factor* $n_s = 1,73$ [7]



Gambar 3.16. Diagram Benda Bebas Pada *Driver pulley*

Untuk silinder pejal, *Normal stress* pada bentuk plat persegi adalah :

$$\sigma_x = \frac{P}{A} = \frac{P}{p.l}$$

Jadi,

$$\sigma_x = \frac{P}{p.l}$$

$$\sigma_x = \frac{P}{0,004.0,001} = 0,25 \times 10^6 P$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2}$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_x}{2} = \sigma_x = 0,25 \times 10^6 P,$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} - \frac{\sigma_x}{2} = 0$$

Sehingga didapatkan *stress* ekuivalen yaitu:

$$\sigma_e = [\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2]^{1/2}$$

$$\sigma_e = [\sigma_1^2 - 0 + 0]^{1/2} = \sigma_1 = 0,25 \times 10^6 P$$

Berdasarkan teori Von Mises, kegagalan dapat dihindarkan jika :

$$0,25 \times 10^6 P \leq \frac{S_y}{n_s}$$

Jadi, tekanan maksimum yang dapat diberikan kepada *driver pulley* agar tidak terjadi deformasi pada gigi-gigi pulley adalah,

$$0,25 \times 10^6 P \leq \frac{170 \times 10^6}{1,73}$$

$$P \leq \frac{170 \times 10^6}{0,25 \times 10^6 \cdot 1,73}$$

$$P \leq 393,06 Pa \rightarrow 0,39 KPa$$

Dikarenakan P_{\max} pada poros motor $<$ P_{\max} pada *driver pulley*, sedangkan poros motor dengan *driver pulley* pada kerjanya adalah satu kesatuan, maka dapat dikatakan untuk menghindarinya kegagalan pada komponen, P_{\max} yang dapat diberikan diambil dari nilai terkecil yaitu **0,39 KPa**.

BAB 4

PERPINDAHAN PANAS DAN KALKULASI ENERGI PADA *FEEDER*

Salah satu komponen utama dalam sistem ini adalah barel pemanas yang diberikan *heater* berupa kawat *NiChrome* berhambatan yang dililitkan dan kemudian dialiri arus listrik. Perkembangan penelitian memungkinkan penerapan teori dalam penggunaan kawat *NiChrome* sesuai kebutuhan sistem setelah sebelumnya mengasumsikan berdasarkan daya listrik masukan untuk memanaskan material. Pemilihan material *Brass* yang memiliki konduktifitas tinggi namun tahan terhadap temperatur yang tinggi juga dilakukan setelah sebelumnya digunakan *steel* sebagai material barel pemanas. Sistem *heater* pada mekanisme ekstruder ini menggunakan kawat *NiChrome* dengan spesifikasi hambatan $10 \Omega/\text{m}$. *NiChrome* merupakan material *alloy* campuran 80% *nickel* dan 20% *chromium*. Kawat *NiChrome* menggunakan prinsip hambatan untuk menghasilkan panas. Temperatur *melting NiChrome wire* ini sebesar 1400°C . Kawat ini dililit langsung pada *nozzle*, setelah dilapisi oleh *mica wool* sebagai media isolator supaya tidak terjadi arus pendek (*short*).



Gambar 4.1. *NiChrome wire*

4.1. Perhitungan Panjang Kawat *NiChrome*

Untuk memenuhi kebutuhan pemanasan material perlu diperhitungkan panjang kawat pemanas yang dibutuhkan. Perhitungan panjang kawat pemanas ini dilakukan untuk menemukan efektifitas pemakaian energi dan juga parameter-parameter yang ingin dicapai dalam proses pemanasan material. Semakin panjang kawat *NiChrome*

maka hambatan kawat semakin besar dan begitu sebaliknya jika semakin pendek. Namun sebaliknya dengan temperatur maksimum yang dapat dicapai, temperatur maksimum yang dapat dicapai kawat semakin rendah jika panjang kawat semakin panjang karena berarti hambatan kawat semakin besar. Pada perhitungan ini teori Hukum Ohm yaitu $V=IxR$ dapat digunakan. Temperatur yang diinginkan adalah mencapai maksimum pada temperatur 400°C . Pada maksimum temperatur ini diperkirakan mencukupi untuk pendeformasian material termoplastik dan *heat loss* yang terjadi. Dengan bantuan tabel dari *American Wire Gauge (AWG)*, kita dapat melakukan perhitungan berdasarkan diameter dan panjang kawat yang kemudian dapat diketahui panjang kawat yang dibutuhkan. Berdasarkan standar AWG menggunakan satuan *gauge*, dimana AWG terkecil setara dengan diameter kawat yang paling besar, diameter kawat terbesar 10 *gauge* = 0,102 *in* diameter, sedangkan diameter kawat terkecil 40 *gauge* = 0,0031 *in* diameter.

Dengan diketahui spesifikasi kawat *NiChrome* (Ω/m), kemudian dikonversi kedalam satuan amerika (Ω/ft):

$$- 1 \text{ m} = 3,281 \text{ ft} \rightarrow \text{maka } 10 \Omega/\text{m} = 3,048 \Omega/\text{ft}$$

Setelah itu, maka dilakukan pendekatan dengan tabel 4.1, maka kawat termasuk tipe AWG 27. Antara kawat tipe A dan C, tidak terlalu terlihat perbedaannya. Perbedaannya adalah jika *heat* pada kawat *NiChrome* semakin dibangkitkan, maka semakin besar hambatan pada kawat *NiChrome* tersebut. Tipe A merupakan komposisi kawat *NiChrome* pada umumnya, yaitu 80% *Ni* dan 20% *Cr*. Maka, peneliti menggunakan tipe A sebagai tipe kawat yang digunakan dalam penelitian ini.

Table 4.1 AWG vs ohm/ft [18]

| Ohms/ft - Ni Cr A and C @ 20 degrees C | | | |
|--|-------|---------|---------|
| AWG | Dia. | Ni Cr A | Ni Cr C |
| 10 | .102 | .06248 | .06488 |
| 11 | .091 | .07849 | .08151 |
| 12 | .081 | .09907 | .1029 |
| 13 | .072 | .1254 | .1302 |
| 14 | .064 | .1587 | .1648 |
| 15 | .057 | .2001 | .2078 |
| 16 | .051 | .2499 | .2595 |
| 17 | .045 | .3210 | .3333 |
| 18 | .040 | .4063 | .4219 |
| 19 | .036 | .5015 | .5208 |
| 20 | .032 | .6348 | .6592 |
| 21 | .0285 | .8002 | .8310 |
| 22 | .025 | 1.015 | 1.055 |
| 23 | .0226 | 1.273 | 1.322 |
| 24 | .020 | 1.609 | 1.671 |
| 25 | .0179 | 2.029 | 2.107 |
| 26 | .0159 | 2.571 | 2.670 |
| 27 | .0142 | 3.224 | 3.348 |
| 28 | .0126 | 4.094 | 4.252 |
| 29 | .0113 | 5.090 | 5.286 |
| 30 | .010 | 6.500 | 6.750 |
| 31 | .0089 | 8.206 | 8.522 |
| 32 | .008 | 10.16 | 10.55 |
| 33 | .0071 | 12.89 | 13.39 |
| 34 | .0063 | 16.38 | 17.01 |
| 35 | .0056 | 20.73 | 21.52 |
| 36 | .005 | 26.00 | 27.00 |
| 37 | .0045 | 32.10 | 33.33 |
| 38 | .0040 | 40.63 | 42.19 |
| 39 | .0035 | 53.06 | 55.10 |
| 40 | .0031 | 67.64 | 70.24 |

Table 4.2 Sifat dari berbagai macam material heater [18]

| Material | Chemical Composition (%) | Resistivity @ 20°C | | Tensile Strength (KPSI @ 20°C) | | Density - Lbs/Cubic Inch | Magnetic Attraction | Approx. Melting Point (°C) |
|---------------------|---------------------------------------|--------------------|-------------|--------------------------------|------|--------------------------|---------------------|----------------------------|
| | | Ohms/CMF | TCR 0-100°C | Min. | Max. | | | |
| Alloy 875 | 22.5 Cr, 5.5 Al, .5 Si, .1 C, bal. Fe | 875 | .00002 | 105 | 175 | .256 | Strong | 1520 |
| Alloy 800 | 75 Ni, 20 Cr, 2.5 Al, 2.5 Cu | 800 | .00002 | 100 | 200 | .293 | None | 1350 |
| NiCr C | 61 Ni, 15 Cr, bal. Fe | 675 | .00013 | 95 | 175 | .2979 | Faint | 1350 |
| NiCr A | 80 Ni, 20 Cr | 650 | .00010 | 100 | 200 | .3039 | None | 1400 |
| Stainless Steel 304 | 18 Cr, 8 Ni, bal. Fe | 438 | .00017 | 100 | 300 | .286 | None (Annealed) | 1399 |
| Alloy 294 | 55 Cu, 45 Ni | 294 | .00004* | 60 | 135 | .321 | None | 1210 |
| Ni Co Fe 294 | 29 Ni, 17 Co, Bal. Fe | 294 | .0033 | 65 | 150 | .302 | Strong | 1450 |
| Manganin | 13 Mn, 4 Ni, bal. Cu | 290 | .000015† | 40 | 90 | .286 | None | 1020 |
| Monel** 400 | 70 Ni, 30 Cu | 290 | .0001 | 70 | 150 | .321 | Faint | 1350 |
| Alloy 52 | 50 Ni, bal. Fe | 260 | .0029 | 70 | 150 | .301 | Strong | 1425 |
| Alloy 180 | 22 Ni, bal. Cu | 180 | .00018 | 50 | 100 | .321 | None | 1100 |
| Alloy 120 | 70 Ni, bal. Fe | 120 | .0045 | 70 | 150 | .305 | Strong | 1425 |
| Alloy 90 | 12 Ni, bal. Cu | 90 | .0004 | 35 | 75 | .321 | None | 1100 |
| Alloy 60 | 6 Ni, bal. Cu | 60 | .0005 | 35 | 70 | .321 | None | 1100 |
| Alloy 30 | 2 Ni, bal. Cu | 30 | .0013 | 30 | 60 | .321 | None | 1100 |
| Nickel 205 | 99.5 Ni | 57 | .0048 | 60 | 135 | .321 | Strong | 1450 |
| Nickel 270 | 99.98 Ni | 45 | .0067 | 48 | 95 | .321 | Strong | 1452 |

*TCR @ 25 - 105°C **Registered Trademark of Inco family of companies †TCR @ 15 - 35°

Table 4.3 Arus pada temperatur dan tipe kawat [18]

| Approx Amperes to heat a Straight Oxidized wire to given temperature | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | Degrees F | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 |
| | | Degrees C | 205 | 315 | 427 | 538 | 649 | 760 | 871 | 982 | 1093 |
| AWG / INCH DIA. | | Amperes | | | | | | | | | |
| 8 | .128 | 22.4 | 32 | 41 | 52 | 65 | 79 | 95 | 111 | 128 | |
| 9 | .114 | 18.8 | 26.8 | 34.5 | 44 | 55 | 67 | 80 | 94 | 108 | |
| 10 | .102 | 16.2 | 23.3 | 29.7 | 37.5 | 46 | 56 | 68 | 80 | 92 | |
| 11 | .091 | 13.8 | 19.2 | 24.8 | 31.5 | 39 | 48 | 57 | 67 | 78 | |
| 12 | .081 | 11.6 | 16.1 | 20.8 | 26.5 | 33.5 | 40.8 | 48 | 56 | 65 | |
| 13 | .072 | 9.8 | 13.6 | 17.6 | 22.5 | 28.2 | 34.2 | 41 | 48 | 55 | |
| 14 | .064 | 8.4 | 11.6 | 15 | 18.8 | 23.5 | 29 | 34.6 | 40.5 | 46 | |
| 15 | .057 | 7.2 | 10 | 12.8 | 16.1 | 20 | 24.5 | 29.4 | 34.3 | 39.2 | |
| 16 | .051 | 6.4 | 8.7 | 10.9 | 13.7 | 17 | 20.9 | 25.1 | 29.4 | 33.6 | |
| 17 | .045 | 5.5 | 7.5 | 9.5 | 11.7 | 14.5 | 17.6 | 21.1 | 24.6 | 28.1 | |
| 18 | .040 | 4.8 | 6.5 | 8.2 | 10.1 | 12.2 | 14.8 | 17.7 | 20.7 | 23.7 | |
| 19 | .036 | 4.3 | 5.8 | 7.2 | 8.7 | 10.6 | 12.7 | 15.2 | 17.8 | 20.5 | |
| 20 | .032 | 3.8 | 5.1 | 6.3 | 7.6 | 9.1 | 11 | 13 | 15.2 | 17.5 | |
| 21 | .0285 | 3.3 | 4.3 | 5.3 | 6.5 | 7.8 | 9.4 | 11 | 12.9 | 14.8 | |
| 22 | .0253 | 2.9 | 3.7 | 4.5 | 5.6 | 6.8 | 8.2 | 9.6 | 11 | 12.5 | |
| 23 | .0226 | 2.58 | 3.3 | 4.0 | 4.9 | 5.9 | 7 | 8.3 | 9.6 | 11 | |
| 24 | .0201 | 2.21 | 2.9 | 3.4 | 4.2 | 5.1 | 6 | 7.1 | 8.2 | 9.4 | |
| 25 | .0179 | 1.92 | 2.52 | 3 | 3.6 | 4.3 | 5.2 | 6.1 | 7.1 | 8 | |
| 26 | .0159 | 1.67 | 2.14 | 2.6 | 3.2 | 3.8 | 4.5 | 5.3 | 6.1 | 6.9 | |
| 27 | .0142 | 1.44 | 1.84 | 2.25 | 2.73 | 3.3 | 3.9 | 4.6 | 5.3 | 6 | |
| 28 | .0126 | 1.24 | 1.61 | 1.95 | 2.38 | 2.85 | 3.4 | 3.9 | 4.5 | 5.1 | |
| 29 | .0113 | 1.08 | 1.41 | 1.73 | 2.10 | 2.51 | 2.95 | 3.4 | 3.9 | 4.4 | |
| 30 | .0100 | .92 | 1.19 | 1.47 | 1.78 | 2.14 | 2.52 | 2.9 | 3.3 | 3.7 | |
| AWG / INCH DIA. | | Amperes | | | | | | | | | |
| 31 | .0089 | .77 | 1.03 | 1.28 | 1.54 | 1.84 | 2.17 | 2.52 | 2.85 | 3.2 | |
| 32 | .0080 | .68 | .90 | 1.13 | 1.36 | 1.62 | 1.89 | 2.18 | 2.46 | 2.76 | |
| 33 | .0071 | .59 | .79 | .97 | 1.17 | 1.40 | 1.62 | 1.86 | 2.12 | 2.35 | |
| 34 | .0063 | .50 | .68 | .83 | 1.00 | 1.20 | 1.41 | 1.60 | 1.80 | 1.99 | |
| 35 | .0056 | .43 | .57 | .72 | .87 | 1.03 | 1.21 | 1.38 | 1.54 | 1.71 | |
| 36 | .0050 | .38 | .52 | .63 | .77 | .89 | 1.04 | 1.19 | 1.33 | 1.48 | |
| 37 | .0045 | .35 | .46 | .57 | .68 | .78 | .90 | 1.03 | 1.16 | 1.29 | |
| 38 | .0040 | .30 | .41 | .50 | .59 | .68 | .78 | .88 | .98 | 1.09 | |
| 39 | .0035 | .27 | .36 | .42 | .49 | .58 | .66 | .75 | .84 | .92 | |
| 40 | .0031 | .24 | .31 | .36 | .43 | .50 | .57 | .64 | .72 | .79 | |

Setelah mengetahui tipe dari kawat *NiChrome* (AWG 27), maka langkah selanjutnya adalah menentukan desain *temperatur maksimum* yang akan dicapai kawat *NiChrome*, yaitu pada temperatur $800^{\circ}F = 427^{\circ}C$. Sehingga didapatkan arus-nya yaitu, $I = 2,25A$. Dengan menggunakan hukum ohm, $V=IxR$:

- Dik : $V = 24 V$ (tegangan yang digunakan untuk memanaskan kawat *NiChrome*)

$$R = \frac{24V}{2,25} = 10,667\Omega$$

- Sehingga, panjang kawat *NiChrome*:
$$L = \frac{10,667\Omega}{3,224\frac{\Omega}{ft}} = 3,309 ft = 1,009 m$$

$L = 1 m$

4.2. Pehitungan kalor yang dibutuhkan

Untuk perhitungan panas yang dibutuhkan, ada beberapa asumsi yang akan dijadikan referensi perhitungan adalah sebagai berikut :

1. *One dimensional*.
2. *Steady state*.
3. *Operating temperature* yang akan dicapai $250^{\circ}\text{C} = 523 \text{ K}$.
4. *Specific heat capacity* dari Nylon PA-6 $C_p = 1601 \text{ J/kg.K}$.
5. Konveksi bebas di lingkungan, dengan koefisien konveksi h_o dan $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$.
6. Permukaan isolator *ceramic fiber* ber-temperatur 128.5°C .
7. Panas yang diterima *tube*, sepanjang $L = 75\text{mm} - 15\text{mm} = 60 \text{ mm}$.
8. Sistem yang ditinjau hanya sebatas *nozzle* dengan panjang 60 mm dan barel isolator sepanjang 100 mm, sehingga diasumsikan sistem yang terkena panas berupa silinder dengan arah kalor secara radial dan panas yang merambat pada isolator konduksi.

Secara Analisis, total energi panas dari koil *NiChrome* yang dibutuhkan adalah jumlah kalor untuk memanaskan material Nylon PA-6 ditambah dengan jumlah kalor yang hilang ke lingkungan. Sehingga :

$$\dot{Q}_{required} = \dot{Q}_{heatingPA6} + \dot{Q}_{lost}$$

Energi yang dibutuhkan untuk memanaskan termoplastik

Energi yang dibutuhkan untuk memanaskan termoplastik adalah energi yang dibutuhkan untuk memanaskan PA-6, *tube* dan *mica wool*, untuk menaikkan temperatur dari 27°C menjadi 250°C .

$$Q_{heatingPA6} = Q_{PA6} + Q_{tube} + Q_{mica}$$

$$Q_{PA6} = m_{PA6} \times C_p \times \Delta T \text{ (Kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan PA-6)}$$

$$\rho = 0,00112 \frac{gr}{mm^3} \text{ (Solidwork 2009)}$$

$$k = 0,233 \frac{W}{m.K} \text{ (Solidwork 2009)}$$

$$C_p = 1601 \frac{J}{kg.K} \text{ (Solidwork 2009)}$$

$$V_{PA6} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D_{PA6}^2 \times L = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (3 \text{ mm})^2 \times 60 \text{ mm} = 424,115 \text{ mm}^3$$

$$m_{PA6} = \rho \cdot V_{PA6} = 0,00112 \frac{gr}{mm^3} \times 424,115 \text{ mm}^3 = 0,475 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$\Delta T = (250 - 27)^\circ C = 223 \text{ K}$$

$$Q_{PA6} = m_{PA6} \cdot C_p \cdot \Delta T = 0,475 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 1601 \frac{J}{kg.K} \cdot 223 \text{ K} = 0,169 \text{ kJ}$$

$$Q_{tube} = m_{brass} \cdot C_p \cdot \Delta T \text{ (Kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan tube)}$$

$$\rho = 8530 \frac{kg}{m^3} \text{ (Cartridge brass 70% Cu, 30% Zn) (Incropera, Appendix-Table A.1)}$$

$$C_p = 380 \frac{J}{kg.K} \text{ (Incropera, Appendix-Table A.1)}$$

$$m_{L=75} = 27,46 \text{ gr (total)} \rightarrow \text{Solidwork 2009, massa total dengan panjang 75 mm.}$$

$$V_{L=15} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (D_{out} - D_{in})^2 \times L = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (8 - 3)^2 \times 15 = 294,524 \text{ mm}^3$$

$$m_{L=15} = \rho \cdot V_{L=15} = 8530 \cdot 10^{-6} \frac{gr}{mm^3} \cdot 294,524 \text{ mm}^3 = 2,512 \text{ gr}$$

$$m_{brass} = m_{L=75} - m_{L=15} = 27,460 - 2,512 = 24,948 \text{ gr} = 24,948 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$\Delta T = (250 - 27)^{\circ} C = 223 K$$

$$Q_{tube} = m_{brass} \cdot C_p \cdot \Delta T = 24,948 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 380 \text{ J/kg.K} \cdot 223 K = 2,114 \text{ kJ}$$

$$Q_{mica} = m_{mica} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{Kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan mica wool})$$

$$\rho = 520 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{www.simetric.co.uk/si-material.htm}) - 22/9/2010$$

$$C_p = 880 \text{ J/kg.K} \quad (\text{http://physics.info/heat-sensible}) - 22/9/2010$$

$$V = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (D_2 - D_1)^2 \times L = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (9 - 8)^2 \times 60 = 47,124 \text{ mm}^3$$

$$m_{mica} = 520 \cdot 10^{-6} \text{ gr/mm}^3 \cdot 47,124 \text{ mm}^3 = 0,0245 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$\Delta T = (250 - 27)^{\circ} C = 223 K$$

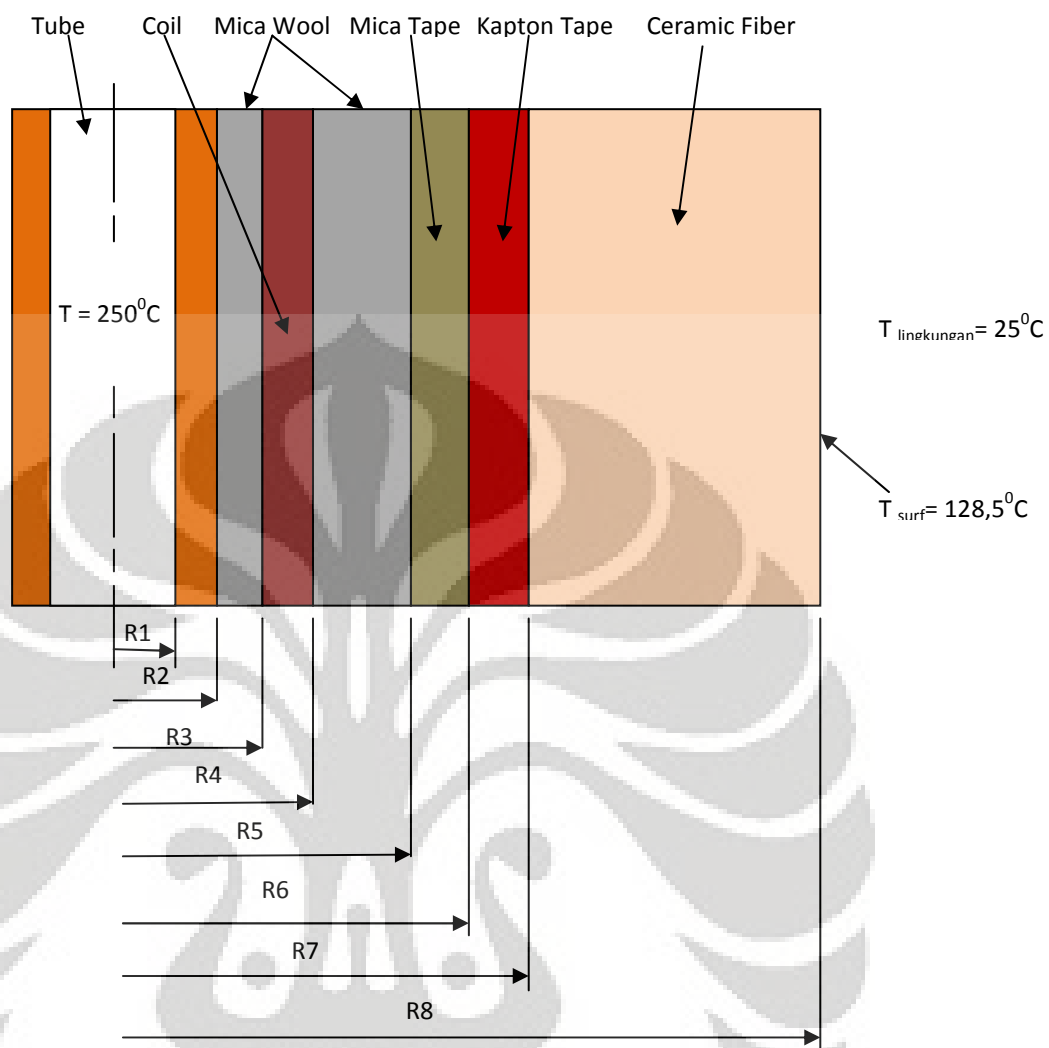
$$Q_{mica} = m_{mica} \cdot C_p \cdot \Delta T = 0,0245 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot 880 \text{ J/kg.K} \cdot 223 K = 0,005 \text{ kJ}$$

$$\text{Maka, } Q_{heatingPA6} = Q_{PA6} + Q_{tube} + Q_{mica} = 0,169 + 2,114 + 0,005 = 2,288 \text{ kJ}$$

Dengan asumsi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai $250^{\circ}C$ adalah 45 detik

$$\text{Maka energi yang dibutuhkan, } \dot{Q}_{heatingPA6} = \frac{2,288 \cdot 10^3 J}{45} = 50,844 \text{ Watt}$$

Setelah mengetahui kalor untuk memanaskan *tube*, PA-6, dan *mica* mencapai $250^{\circ}C$. Maka, dengan energi kalor 50,844 Watt, kita dapat menghitung temperatur dari *coil heater*.



Gambar 4.2. Skema isolator *heater barrel*

Diketahui :

$R1 = 1,5 \text{ mm}$; $R2 = 4 \text{ mm}$; $R3 = 4,5 \text{ mm}$; $R4 = 4,86 \text{ mm}$; $R5 = 5,86 \text{ mm}$; $R6 = 5,98 \text{ mm}$; $R7 = 6,03 \text{ mm}$; $R8 = 15,03 \text{ mm}$.

$k_{\text{brass}} = 110 \text{ W/m.K}$; $k_{\text{mica wool}} = 0,26 \text{ W/m.K}$; $k_{\text{mica tape}} = 0,25 \text{ W/m.K}$; $k_{\text{kapton tape}} = 0,162 \text{ W/m.K}$; $k_{\text{ceramic fiber}} = 0,11 \text{ W/m.K}$.

$L = 60 \text{ mm}$.

Temperatur Coil NiChrome

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

$$\dot{Q}_{\text{heating}} = 50,844 \text{ Watt}$$

$$\Delta T = (T_{\text{coil}} - 250)^{\circ} \text{C} = (T_{\text{coil}} - 523 \text{ K})$$

$$\sum R = \frac{1}{U \cdot A} = \frac{\ln(R2/R1)}{2\pi k_{\text{brass}} L} + \frac{\ln(R3/R2)}{2\pi k_{\text{micawool}} L} \quad (\text{overall thermal resistance})$$

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{\ln(4/1,5)}{2\pi 110 \times 60 \cdot 10^{-3}} + \frac{\ln(4,5/4)}{2\pi 0,26 \times 60 \cdot 10^{-3}} = 1,224 \text{ K/Watt}$$

$$\Delta T = (T_{\text{coil}} - 523 \text{ K}) = \frac{\dot{Q}}{U \cdot A}$$

$$T_{\text{coil}} = \frac{\dot{Q}}{U \cdot A} + 523 \text{ K} = (50,844 \text{ Watt} \times 1,224 \text{ K/Watt}) + 523 \text{ K} = 585,233 \text{ K}$$

$$T_{\text{coil}} = 585,233 \text{ K} \approx 312,233^{\circ} \text{C}$$

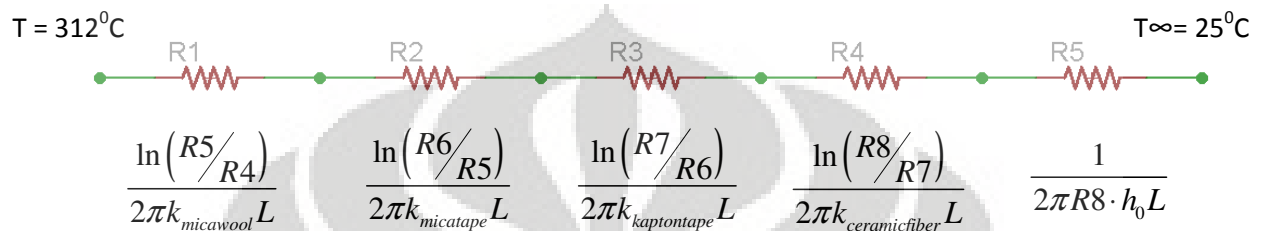
$$T_{\text{coil}} = \underline{312^{\circ} \text{C}}$$

Energi kalor yang hilang ke lingkungan

Setelah mengetahui $T_{\text{coil}}=312^{\circ}\text{C}$ kemudian diasumsikan $T_{\infty}=25^{\circ}\text{C}$ dan dilakukan pengukuran menghasilkan $T_{\text{surface}} = 128.5^{\circ}\text{C}$ pada permukaan luar isolator *ceramic fibre* dan $T_{\text{surface}} = 27.2^{\circ}\text{C}$ pada ujung barel PTFE, maka kita dapat memperkirakan jumlah energi kalor yang hilang ke lingkungan. Pada perhitungan *Heat loss* ini, digunakan perhitungan dua arah yaitu perambatan horizontal yaitu perambatan panas dari kawat pemanas ke arah radial hingga lapisan terluar isolator dan perambatan vertikal yaitu perambatan konduksi dan konveksi dari barel pemanas ke barel PTFE.

Horizontal

Pada perambatan horizontal panas merambat secara konduksi melalui isolator-isolator secara radial menuju lapisan terakhir yaitu serat keramik dimana akan terjadi konveksi dengan udara pada permukaannya.



Overall thermal resistance :

$$\sum R = \frac{1}{U \cdot A} = \frac{\ln(R5/R4)}{2\pi k_{micawool} L} + \frac{\ln(R6/R5)}{2\pi k_{micatape} L} + \frac{\ln(R7/R6)}{2\pi k_{kaptontape} L} + \frac{\ln(R8/R7)}{2\pi k_{ceramicfiber} L} + \frac{1}{2\pi R8 \cdot h_0 L}$$

Untuk mencari nilai h_0 , dengan menggunakan asumsi *free convection* pada *vertical plate* sehingga menggunakan persamaan :

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}L}{k} = CRa_L^n \quad (\text{pers 9.24, Incropera, Ed.5, halaman 545})$$

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (\text{pers 9.25, Incropera, Ed.5, halaman 545})$$

Dengan asumsi *free convection boundary layer* adalah laminar, sehingga nilai $C=0,59$ dan $n=1/4$. Sedangkan untuk turbulen nilai $C=0,1$ dan $n=1/3$.

Temperatur film pada *boundary layer* , T_m :

$$T_m = \frac{(T_s + T_\infty)}{2} = \frac{(128,5 + 25)}{2} = 76,75^\circ C = 349,75 K \Rightarrow 350 K$$

Dengan menggunakan tabel A.4 *Appendix A*, Incropera. Ed.5, didapatkan *Sifat* udara pada temperatur 350K :

$$\rho = 0.9950 \text{ kg/m}^3 ; C_p = 1,009 \text{ kJ/kg.K} ; \mu = 208,2 \cdot 10^{-7} \text{ N.s/m}^2 ; \nu = 20,92 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 30 \cdot 10^{-3} \text{ W/m.K} ; \alpha = 29,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} ; Pr = 0,700 ; \beta = 0,0033 \text{ K}^{-1}$$

Maka, *Rayleigh Number* :

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} = \frac{9,81 \cdot 0,0033 \cdot (128,5 - 25) \cdot (60 \cdot 10^{-3})^3}{20,92 \cdot 10^{-6} \times 29,9 \cdot 10^{-6}} = 114.584,98$$

Maka, hubungan *Nusselt number* dengan *Rayleigh number*, sehingga dapat dicari koefisien konveksi, dengan asumsi *boundary layer* laminar :

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} = CRa_L^n$$

$$\bar{h} = \frac{k}{L} \times 0,59 \cdot Ra_L^{\frac{1}{4}} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 10^{-3}} \times 0,59 \cdot (114584,98)^{\frac{1}{4}} = 5,428 \text{ Watt/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$h_0 = \bar{h} = 5,428 \text{ Watt/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Convection Coefficient})$$

Overall thermal resistance :

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{\ln(5,86/4,86)}{2\pi \cdot 0,26 \times 60 \cdot 10^{-3}} + \frac{\ln(5,98/5,86)}{2\pi \cdot 0,25 \times 60 \cdot 10^{-3}} + \frac{\ln(6,03/5,98)}{2\pi \cdot 0,162 \times 60 \cdot 10^{-3}} + \frac{\ln(15,03/6,03)}{2\pi \cdot 0,11 \times 60 \cdot 10^{-3}}$$

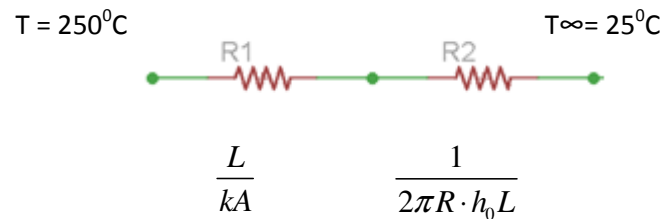
$$+ \frac{1}{2\pi \cdot 9,03 \cdot 5,428 \cdot 60 \cdot 10^{-3}}$$

$$\frac{1}{U \cdot A} = 1,909 + 0,215 + 0,136 + 22,024 + 0,054 = 24,338 \text{ K/Watt}$$

$$\dot{Q}_{lost} = U \cdot A \cdot \Delta T = \frac{1}{24,334 \text{ K/Watt}} \times (585 - 298) \text{ K} = 11,794 \text{ Watt}$$

Vertikal

Pada aliran vertikal ini panas merambat secara konduksi melalui barrel (*tube*) menuju barrel PTFE. Asumsi *tube* yang masuk ke dalam barrel PTFE diabaikan dan temperatur ujung barrel PTFE paling atas terukur adalah 27.2° C dan diujung yang melekat dengan barrel pemanas adalah 75.6° C.



$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}L}{k} = C Ra_L^n \quad (\text{pers 9.24, Incropera, Ed.5, halaman 545})$$

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (\text{pers 9.25, Incropera, Ed.5, halaman 545})$$

Dengan asumsi *free convection boundary layer* adalah laminar, sehingga nilai $C=0,59$ dan $n=1/4$.

Temperatur film pada *boundary layer*, dalam hal ini diambil nilai rata-rata temperatur antara dua ujung barel PTFE,

$$T_s = \frac{(T_1 + T_2)}{2} = \frac{(75,8 + 27,2)}{2} = 51,5^\circ C$$

Dengan begitu didapatkan temperatur film T_m :

$$T_m = \frac{(T_s + T_\infty)}{2} = \frac{(51,5 + 25)}{2} = 38,2^\circ C = 311,2 K \Rightarrow 311 K$$

Dengan menggunakan tabel A.4 *Appendix A*, Incropera. Ed.5, didapatkan *Sifat udara* dengan iterasi pada temperature 311 K :

$$\rho = 1,1248 \text{ kg/m}^3 ; C_p = 1,007 \text{ kJ/kg.K} ; \mu = 189,79 \cdot 10^{-7} \text{ N.s/m}^2 ; \nu = 16,99 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 27,11 \cdot 10^{-3} \text{ W/m.K} ; \alpha = 24,13 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} ; Pr = 0,705 ; \beta = 0,0033 \text{ K}^{-1}$$

Maka, *Rayleigh Number* :

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} = \frac{9,81 \cdot 0,0033 \cdot (51,5 - 25) \cdot (100 \cdot 10^{-3})^3}{16,99 \cdot 10^{-6} \times 24,13 \cdot 10^{-6}} = 2.092.560,97$$

Maka, hubungan *Nusselt number* dengan *Rayleigh number*, sehingga dapat dicari koefisien konveksi, dengan asumsi *boundary layer* laminar :

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}L}{k} = CRa_L^n$$

$$\overline{h} = \frac{k}{L} \times 0,59 \cdot Ra_L^{\frac{1}{4}} = \frac{27,11 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-3}} \times 0,59 \cdot (2092560,98)^{\frac{1}{4}} = 6,083 \text{ Watt/m}^2 \cdot K$$

$$h_0 = \overline{h} = 6,083 \text{ Watt/m}^2 \cdot K \quad (\text{Convection Coefficient})$$

Overall thermal resistance :

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{L}{k(\pi \frac{D^2 - d^2}{4})} + \frac{1}{2\pi R \cdot h_0 L}$$

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{100 \times 10^{-3}}{0,25(\pi \frac{(16 \times 10^{-3})^2 - (3,5 \times 10^{-3})^2}{4})} + \frac{1}{2\pi(8 \cdot 10^{-3})6,083 \cdot (100 \cdot 10^{-3})}$$

$$\frac{1}{U \cdot A} = 2122,72 \text{ K/Watt}$$

$$\dot{Q}_{lostv} = U \cdot A \cdot \Delta T = \frac{1}{2122,72 \text{ K/Watt}} \times (523 - 298) K = 0,106 \text{ Watt}$$

Heat loss keseluruhan:

$$\dot{Q}_{lost} = \dot{Q}_{losth} + \dot{Q}_{lostv}$$

$$\dot{Q}_{lost} = 11,794 + 0,106 = 11,89 \text{ Watt}$$

Total energi kalor yang dibutuhkan

Dengan kalor yang hilang ke lingkungan sebesar 11,89 Watt, maka jumlah kalor total yang harus dikeluarkan oleh *coil* adalah :

$$\dot{Q}_{required} = \dot{Q}_{heatingPA6} + \dot{Q}_{lost}$$

$$\dot{Q}_{required} = 50,844 + 11,899 = 62,744 \text{ Watt}$$

Jumlah energi kalor yang dibutuhkan 62,744 Watt \approx **63 Watt**.

Temperatur Kawat Heater Setting

Setelah diketahui daya yang harus diberikan pada *heater* maka dapat diketahui temperatur kawat *heater* yang akan diatur:

$$T_{coil} = \frac{\dot{Q}}{U \cdot A} + 523K = (63 \text{ Watt} \times 1,224 \text{ K/Watt}) + 523 \text{ K} = 600,112 \text{ K}$$

$$T_{coil} = 600,112 \text{ K} = 327,112^\circ \text{C} \Rightarrow 330^\circ \text{C}$$

Jadi temperatur *setting* pada kawat *heater* adalah 330°C

Energi listrik yang dibutuhkan

Dengan rumus kesetimbangan energi :

$$Q_{listrik} \approx Q_{kalor} \approx 63 \text{ Watt}$$

$$E_{listrik} = V \times I$$

Dari perhitungan panjang kawat *NiChrome*, dari table 4.3 arus listrik pada temperatur 427°C adalah 2,25 Ampere. Dengan menggunakan tegangan 24 V, maka energi listrik :

$$E_{listrik} = 24 \text{ Volt} \times 2,25 \text{ A} = 54 \text{ Watt}$$

$$\text{Maka error : } \%error = \frac{63 - 54}{63} \times 100\% = 14,286\%$$

BAB 5

KARAKTERISASI DAN ANALISIS PROSES PADA *FEEDER*

Keluaran material bahan baku dari sebuah sistem *feeder* mempengaruhi kinerja sistem mesin FDM secara keseluruhan. Keluaran material dari sebuah *nozzle* harus dapat saling menyesuaikan dengan gerak dari aksis pada robot artikulasi. Dibutuhkan perpaduan yang tepat dalam kontrol *feeder* dengan pergerakan robot artikulasi dalam pembentukan *layer per layer* pada produksi prototipe. Masukan material yang didukung proses *rolling* oleh motor DC yang dikontrol dengan sistem PWM memungkinkan penyesuaian kecepatan keluaran material dengan kecepatan linear dari motor penggerak aksis.

Perlu diketahui beberapa fenomena-fenomena dalam keluaran material pada proses produksi mesin FDM ini dan Analisis penyebab dan pengaruhnya terhadap sistem FDM secara keseluruhan. Performa pemanas sebagai salah satu bagian sistem ini juga perlu diketahui untuk mendapatkan desain yang sesuai bagi performa sistem mesin. Hasil Analisis dapat digunakan untuk pengembangan dan perbaikan-perbaikan terhadap sistem *feeder* ke depan.

5.1. Analisis Keluaran Material *Feeder*

Pada Analisis ini digunakan *nozzle* dengan diameter keluaran 1 mm. Beberapa hasil keluaran *feeder* diukur menggunakan alat ukur secara langsung. Secara umum, dapat dilihat bahwa keluaran dari *nozzle* berdiameter 1 mm homogen dari sisi dimensi keluaran dan juga tekstur material keluaran. Material keluaran homogen memiliki dimensi diameter yang sama yaitu 1 mm dan kontinyu dari awal hingga seterusnya selama proses berlangsung. Tekstur homogen keluaran berwarna putih dengan tekstur kasar pada permukaannya. Keheterogenan terlihat pada awal gerak pengumpanan yang disebabkan karena material lama yang masih memenuhi *tube* dan mengalami proses pendinginan. Material heterogen ini dapat dikatakan tidak memiliki nilai dimensi pasti karena perubahan dimensi hingga tahap stabil atau homogen. Tampak heterogenan

pula pada tekstur, ada yang cenderung halus hingga kasar. Material keluaran pertama yang heterogen dianjurkan dibuang atau tidak diperhitungkan karena dapat mempengaruhi produk prototipe yang dibuat. Keluaran *feeder* diukur tanpa diikuti dengan pergerakan aksis mesin. Dimensi dan tekstur dari material keluaran bergantung kepada beberapa parameter seperti: temperatur pemanas dan kecepatan masukan material atau dalam hal ini kecepatan linear motor DC.



Gambar 5.1. Keluaran Material PA-6

Temperatur dipertahankan sesuai kebutuhan pemanasan material dan perhitungan *heat loss*. Dengan mekanisme pensuplai arus listrik kepada pemanas untuk menaikkan temperatur dan memutusnya dengan mekanisme *relay* untuk menurunkannya, temperatur dapat dijaga pada nilai tertentu. Ketepatan parameter temperatur mempengaruhi hasil keluaran material. Warna material yang keluar semakin menguning jika temperatur dinaikkan. Tingkat viskositas yang berbeda menyebabkan kebutuhan gaya dorong yang berbeda. Semakin tinggi temperatur maka viskositas semakin rendah dan gaya dorong yang dibutuhkan untuk mendorong material keluar semakin kecil. Namun demikian kualitas dari keluaran semakin buruk ditandai dengan wujud keluaran yang berwarna semakin menguning dan kebutuhan pendinginan yang

lebih lama. Akibatnya ada celah untuk material melakukan pemuaian dan hasil produk tidak presisi.

Kecepatan motor DC juga mempengaruhi keluaran material pada nozzle. Kecepatan putar Motor DC 5 Volt dapat dikendalikan dengan PWM (*Pulse Width Modulation*) sehingga kita dapat menyesuaikan dengan pergerakan aksis yang digerakkan *motor stepper*. Ketidaksesuaian kecepatan terhadap gerak aksis akan menyebabkan *layer* yang terbentuk memiliki kualitas yang buruk dan tidak presisi. Jika kecepatan motor DC yang tinggi dalam hal ini untuk pemasukan material, maka material yang sudah berubah menjadi *liquid* akan dipaksa keluar dengan cepat. Akibatnya dimensi dari keluaran tidak sesuai misalnya *nozzle* dengan ukuran lubang 1mm dapat mengeluarkan material keluaran hasil mencapai 2 mm pada keadaan akhir. Sebaliknya semakin tidak sesuainya kecepatan motor yang terlalu lambat menyebabkan keluaran material dengan dimensi diameter kurang dari 1 mm dan terjadi keheterogenan pada keluaran. Sampai saat ini setting paling ideal untuk sistem ini adalah pada temperatur 330° - 350°C dan PWM 0,6 - 0,7. Pada praktiknya, sistem keluaran *feeder* berkolaborasi dengan gerakan aksis mesin. Kecepatan motor dalam pemasukan material, temperatur setting, dan kecepatan linear motor stepper harus serasi untuk mendapatkan produk yang baik. Sistem *feeder* ini sendiri diinstalasi pada pergerakan aksis-x robot artikulasi.

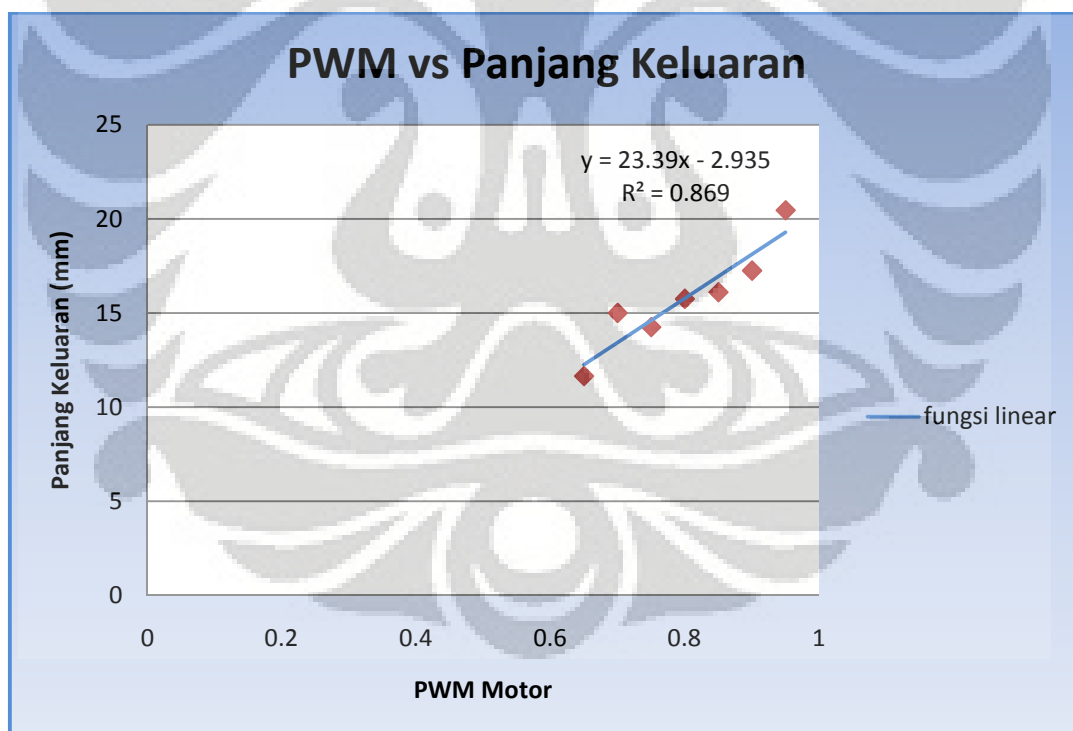
Pada tahap ini dalam performa sistem pengeluaran material, kemampuan sistem ini sebatas pembentukan *layer* yang kontinyu. Sistem berjalan baik untuk pembentukan benda-benda yang memiliki *layer* yang kontinyu. Sedangkan untuk pembuatan *layer* yang diskontinyu, sistem ini belum dapat memenuhinya. Masih ada beberapa perbaikan sistem ke depan dikarenakan masih adanya material sisa yang keluar ketika sistem di hentikan dengan menghentikan gerakan motor DC. Kecepatan motor DC kemungkinan mempengaruhi besarnya keluaran material sisa. Dalam hal ini untuk mengetahui pengaruh kecepatan motor terhadap keluaran material sisa pada saat sistem dihentikan (diskontinyu) dilakukan percobaan dengan menetapkan temperatur pada 330°C dan variasi kecepatan motor berbasis pengendalian PWM. Dilakukan dua kali pengukuran data panjang keluaran sisa dan waktu yang dibutuhkan dari ketika sistem dihentikan hingga keluaran material benar-benar berhenti. Dari kedua data tersebut diambil nilai

rata-rata dari setiap panjang material sisa yang akan berpengaruh terhadap volume material sisa keluar dan waktu yang dibutuhkan sampai sistem benar-benar berhenti.

Tabel 5.1. Data Keluaran Material Sisa

| PWM | L (mm) | Time (s) | Kec (mm/s) |
|------|--------|----------|------------|
| 0.65 | 11.65 | 17.53 | 0.66 |
| 0.7 | 15 | 21.82 | 0.69 |
| 0.75 | 14.25 | 16.09 | 0.89 |
| 0.8 | 15.75 | 15.98 | 0.99 |
| 0.85 | 16.1 | 15.64 | 1.03 |
| 0.9 | 17.25 | 20.94 | 0.82 |
| 0.95 | 20.45 | 21.2 | 0.96 |

Dari data tersebut dapat diplot grafik pertambahan panjang yang dibandingkan dengan PWM motor DC yang diberikan.



Gambar 5.2. Gambar Grafik Hubungan PWM Motor dengan Panjang Keluaran Material Sisa

Dapat terlihat pada grafik pada Gambar 5.2. bahwa hubungan PWM motor adalah kemungkinan berbanding lurus terhadap panjang atau volume keluaran dari material sisa ketika sistem berhenti bergerak. Namun demikian belum diketahui hubungan pasti dari grafik diatas karena besarnya persebaran variasi data. Besarnya PWM motor akan mempengaruhi performa dari sistem *feeder* untuk mengeluarkan material secara terus menerus (kontinyu). Semakin besar PWM motor yang berarti kecepatan putar motor dan *pulley driven* semakin besar, maka dengan begitu semakin cepat pemasukan material ke dalam barel pemanas. Akibatnya ketika sistem dihentikan atau dengan kata lain proses *rolling* pada *pulley* dihentikan, maka semakin besar pula keluaran material sisa diukur sampai material benar-benar berhenti keluar dari lubang *nozzle*. Dalam hal ini dapat di plot fungsi linear Keluaran Sisa (mm) terhadap PWM motor mengikuti fungsi:

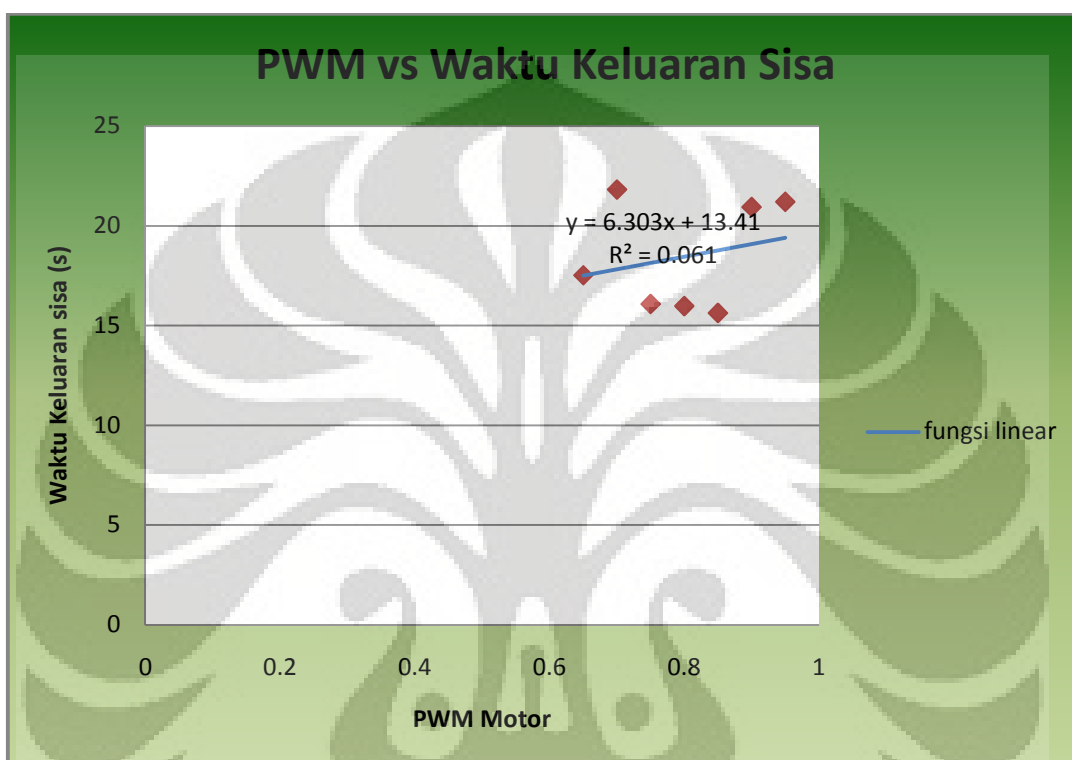
$$y = 23,39x - 2,935$$

Tabel 5.2. *Error* fungsi linear Panjang Keluaran Sisa

| PWM | L aktual (mm) | L fungsi (mm) | Error (mm) | %error |
|-----------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| 0.65 | 11.65 | 12.27 | 0.61 | 5.31 |
| 0.7 | 15 | 13.44 | 1.56 | 10.41 |
| 0.75 | 14.25 | 14.61 | 0.36 | 2.51 |
| 0.8 | 15.75 | 15.78 | 0.03 | 0.17 |
| 0.85 | 16.1 | 16.95 | 0.85 | 5.26 |
| 0.9 | 17.25 | 18.12 | 0.87 | 5.02 |
| 0.95 | 20.45 | 19.29 | 1.16 | 5.69 |
| Total | | | 5.44 | 34.37 |
| Rata-rata | | | 0.78 | 4.91 |

Berdasarkan persamaan tersebut dapat terlihat persebaran data menyimpang. Dapat dilihat pada tabel 5.2. Persen *Error* rata-rata dari fungsi tersebut adalah 4,91% dengan *error* panjang 0.78 mm. Hal tersebut dikarenakan ketidakstabilan gerak dari sistem *rolling* pada *pulley* karena faktor slip. Slip ini juga disebabkan oleh *pulley driven* yang tidak dapat berputar secara mulus atau keadaan licin pada karet karena faktor luar seperti minyak pelumas yang menempel dan sebagainya.

Selain dari panjang keluaran, Analisis dapat dilakukan pada waktu keluaran material sisa. Waktu keluaran dihitung mulai saat sistem *rolling* berhenti hingga material sisa tidak lagi keluar dari lubang *nozzle*. Dapat dilihat pada Gambar 5.3. gambar grafik hubungan antara PWM motor dengan waktu keluaran material sisa dari sistem berhenti hingga material berhenti keluar.



Gambar 5.3. Gambar Grafik Hubungan PWM Motor dengan Waktu Keluaran Material Sisa

Tidak dapat dilihat hubungan yang pasti dari grafik diatas karena sebaran data yang cukup variasi. Dalam hal ini penyebabnya kemungkinan sama dengan hubungan panjang keluaran material sisa yang telah dijelaskan sebelumnya yaitu terjadinya slip pada sistem *rolling*. Fungsi linear hubungan grafik tersebut adalah mengikuti fungsi,

$$y = 6.303x + 13.41$$

Berdasarkan fungsi tersebut dapat diAnalisis *error* fungsi dari hubungan tersebut dengan membandingkan nilai aktual dengan nilai perhitungan dari fungsi,

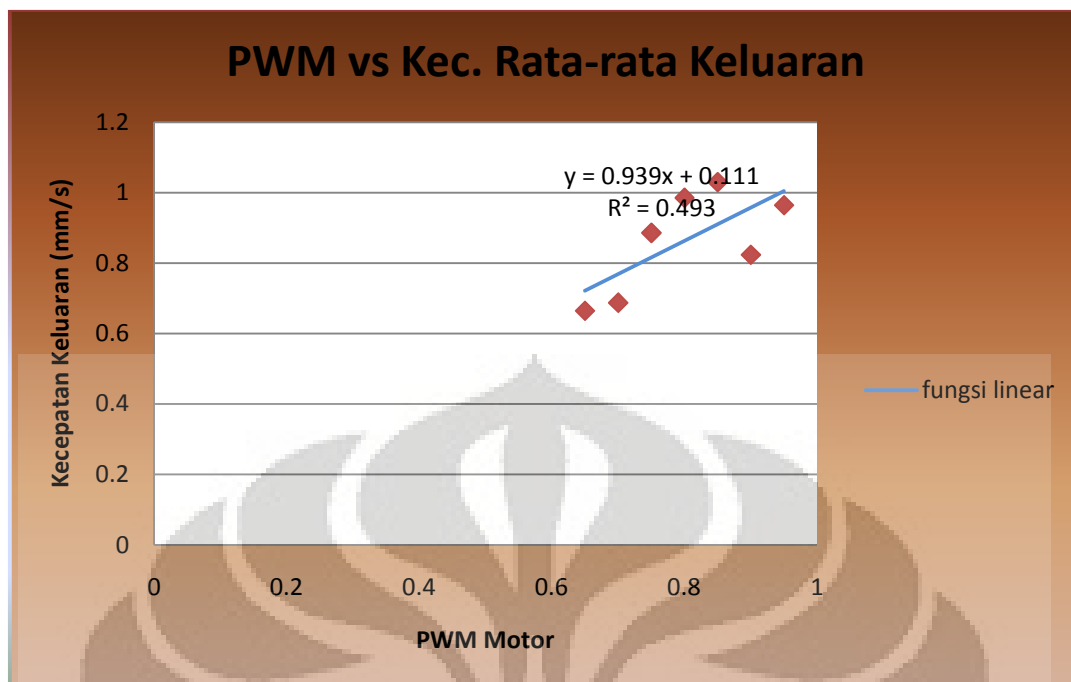
Tabel 5.3. *Error* fungsi linear Waktu Keluaran Sisa

| PWM | Time aktual (s) | Time fungsi (s) | Error (s) | %error |
|-----------|-----------------|-----------------|-------------|--------------|
| 0.65 | 17.53 | 17.51 | 0.02 | 0.11 |
| 0.7 | 21.82 | 17.82 | 3.99 | 18.3 |
| 0.75 | 16.09 | 18.14 | 2.05 | 12.76 |
| 0.8 | 15.98 | 18.45 | 2.47 | 15.47 |
| 0.85 | 15.64 | 18.77 | 3.13 | 20.04 |
| 0.9 | 20.94 | 19.08 | 1.86 | 8.87 |
| 0.95 | 21.2 | 19.39 | 1.8 | 8.50 |
| Total | | | 15.33 | 84.04 |
| Rata-rata | | | 2.19 | 12.01 |

Error fungsi linear dari hubungan ini adalah rata-rata 12% dengan waktu rata-rata 2,19 s. Selain dari slip yang terjadi pada sistem *rolling*, kemungkinan juga terjadi *error* pada *input* voltase yang berubah-ubah sehingga mempengaruhi torsi motor untuk mendorong material masuk. Selain itu faktor viskositas dari material *semi liquid* juga mempengaruhi hal ini.

Berdasarkan data panjang keluaran dan waktu keluaran material sisa maka dapat dihasilkan rata-rata kecepatan keluaran material yang disajikan dalam grafik dibawah ini. Jika kita plot fungsi linear pada grafik maka akan dihasilkan suatu hubungan fungsi PWM dengan Kecepatan Keluaran yaitu:

$$y = 0.939x + 0.111$$



Gambar 5.4. Gambar Grafik Hubungan PWM Motor dengan Kecepatan Rata-rata keluaran material sisa

Semakin besar nilai PWM motor maka semakin meningkat kecepatan keluaran material sisa. Hal ini tentu saja karena kecepatan pemasukan oleh motor DC juga besar seiring bertambahnya nilai PWM. Material yang masuk tentu akan memaksa keluar dari barel pemanas karena adanya energi kinetik yang masih tersimpan pada material dalam barel pemanas. Pada tabel dibawah ini error dari fungsi dapat diketahui:

Tabel 5.4. *Error* fungsi linear Kecepatan Rata-rata Keluaran Sisa

| PWM | Kec aktual (mm/s) | Kec fungsi (mm/s) | Error (mm/s) | %error |
|-----------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|
| 0.65 | 0.65 | 0.72 | 0.06 | 8.51 |
| 0.7 | 0.69 | 0.76 | 0.08 | 11.74 |
| 0.75 | 0.89 | 0.82 | 0.07 | 7.98 |
| 0.8 | 0.99 | 0.86 | 0.12 | 12.52 |
| 0.85 | 1.03 | 0.91 | 0.12 | 11.71 |
| 0.9 | 0.82 | 0.96 | 0.13 | 16.06 |
| 0.95 | 0.96 | 1 | 0.04 | 3.98 |
| Total | | | 0.62 | 72.50 |
| Rata-rata | | | 0.09 | 10.36 |

Berdasarkan tabel terlihat bahwa *error* fungsi adalah 0.089 mm/s dengan persentase *error* sebesar 10,36%. Kecepatan rata-rata ini merupakan hubungan dari panjang keluaran dengan waktu keluaran sisa. Faktor yang mempengaruhi tentu saja dapat dikatakan sama dengan hubungan tersebut. Selain daripada hal-hal diatas kemungkinan pembacaan data pada alat ukur juga mempengaruhi hubungan-hubungan diatas.

5.2. Analisis Pengaruh Panjang Kawat Pemanas

Kawat *NiChrome* merupakan kawat pemanas dengan prinsip hambatan kawat dalam melakukan fungsinya. Kawat *NiChrome* yang digunakan pada sistem *feeder* FDM ini adalah tipe A dengan nilai Hambatan 10 Ω /m dan maksimum temperatur 1400°C. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya maka dapat diketahui bahwa panjang kawat yang dibutuhkan untuk pemanas adalah kurang lebih 1 meter dengan kemampuan pencapaian temperatur maksimum kawat *heater* adalah 427°C. Pada jenis kawat yang sama semakin panjang kawat berarti semakin besar pula hambatan kawat yang kemudian mempengaruhi pencapaian temperatur maksimum kawat yang semakin kecil. Semakin pendek kawat maka pencapaian temperatur maksimum semakin besar. Namun apakah panjang kawat yang mempengaruhi temperatur maksimum itu juga mempengaruhi kecepatan kenaikan temperatur pemanasan kawat menuju temperatur tertentu perlu diteliti lebih jauh. Untuk itu dilakukan percobaan dengan jenis kawat *heater* yang sama yaitu AWG 27 namun dengan variasi panjang kawat yang berbeda. Pengukuran dilakukan berdasarkan interval waktu per 5 detik dari mulai saat *heater* diaktifkan hingga mencapai temperatur tertentu yaitu 330°C. Berdasarkan Tabel 4.3. peneliti mengambil sampel 3 panjang kawat yang berbeda yang tentunya mempunyai nilai temperatur maksimum bervariasi.

Tabel 5.5. Sifat kawat *NiChrome*

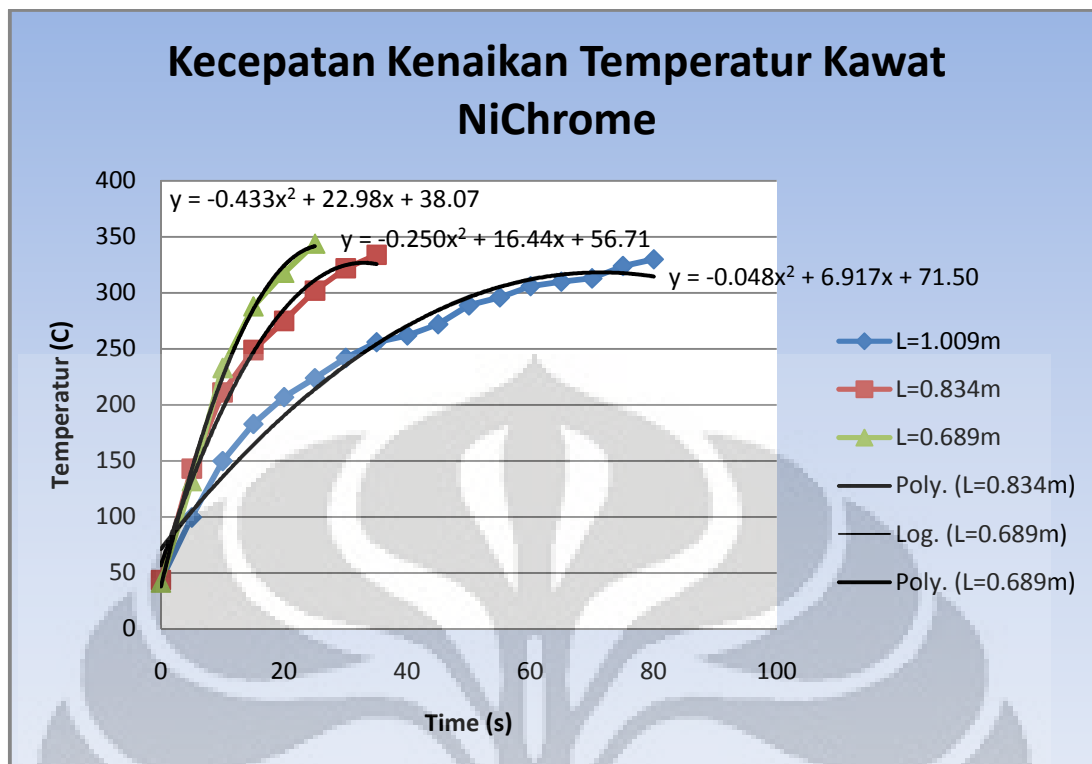
| L (m) | Arus (A) | R (Ω) | Max Temp. (°C) |
|-------|----------|----------------|----------------|
| 1.009 | 2.25 | 10.667 | 427 |
| 0.834 | 2.73 | 8.791 | 538 |
| 0.689 | 3.3 | 7.27 | 649 |

Nilai R (Ω) didapat dari sumber tegangan dibandingkan dengan arus (A), sedangkan panjang kawat didapat dari nilai hambatan R dibandingkan dengan hambatan kawat (Ω/ft). Dari pengujian didapatkan data kenaikan suhu per 5 detik pada kawat,

Tabel 5.6. Kenaikan Temperatur Kawat *NiChrome*

| Time (s) | T ($^{\circ}\text{C}$) | | |
|----------|--------------------------|----------|----------|
| | L=1.009m | L=0.834m | L=0.689m |
| 0 | 43 | 43.6 | 41.4 |
| 5 | 99.7 | 143 | 132 |
| 10 | 150 | 211 | 233 |
| 15 | 183 | 249 | 288 |
| 20 | 207 | 275 | 318 |
| 25 | 224 | 302 | 344 |
| 30 | 242 | 322 | |
| 35 | 256 | 334 | |
| 40 | 262 | | |
| 45 | 272 | | |
| 50 | 289 | | |
| 55 | 296 | | |
| 60 | 306 | | |
| 65 | 310 | | |
| 70 | 313 | | |
| 75 | 324 | | |
| 80 | 330 | | |
| | | | |

Dapat terlihat pada tabel bahwa kecepatan pencapaian suhu 330°C dapat dilakukan oleh ketiga panjang kawat yang berbeda. Namun demikian kecepatan pencapaian suhu target berbeda. Semakin pendek kawat yang berarti hambatan semakin kecil dan suhu maksimum semakin besar maka kecepatan pencapaian suhu tertentu semakin meningkat. Dibawah ini disajikan grafik perbandingan kecepatan kenaikan temperatur ketiga panjang kawat tersebut.



Gambar 5.5. Perbandingan kenaikan Temperatur Kawat *NiChrome*

Terlihat pada grafik bahwa semakin pendek ukuran panjang kawat *NiChrome*, maka kecepatan kenaikan temperatur kawat semakin besar. Tiap panjang kawat mempunyai karakteristik yang berbeda pada interval kenaikan mencapai temperatur tertentu. Kawat terpanjang membutuhkan waktu kurang lebih 80 detik untuk mencapai temperatur 330°C. Sedangkan kawat terpendek hanya membutuhkan waktu 25 detik. Interval kenaikan per 5 detik pada kawat terpendek cukup besar sedangkan pada kawat terpanjang cenderung kecil.

Disatu sisi, kecepatan kenaikan temperatur yang tinggi baik bagi pencapaian temperatur barel pemanas karena tentu saja membutuhkan waktu yang lebih singkat. Namun demikian interval kenaikan suhu yang tinggi menyebabkan simpangan yang cukup tinggi dari temperatur *setting* sehingga sulit untuk dipertahankan pada temperatur tertentu. Pengaruhnya adalah pada kualitas keluaran material *feeder*. Lompatan suhu akan menyebabkan degradasi kualitas pada keluaran *feeder* karena sulit untuk dikendalikan. Untuk itu tepat rasanya memilih panjang kawat 1 meter dalam sistem *feeder* ini karena memenuhi dari sisi temperatur maksimum dan juga paling baik dari sisi interval kenaikan temperatur sehingga temperatur mudah dikendalikan. Selain itu,

kawat yang terlalu pendek tidak memungkinkan penggulangan kawat heater yang menyeluruh pada barel pemanas sehingga pemanasan tidak merata.



BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT

Dari penelitian yang telah dilakukan maka kami dapat memberikan kesimpulan mengenai sistem *feeder* pada mesin RP berbasis FDM ini. Selain itu kami dapat memberikan saran penelitian lebih lanjut untuk perbaikan sistem *feeder* ke depan.

6.1. Kesimpulan

1. *Feeder* sebagai bagian dari mesin *rapid prototyping* FDM didesain dengan mekanisme *rolling* oleh *pulley* dan motor DC sebagai pendorong dan lilitan kawat *NiChrome* tipe A dengan spesifikasi $10 \Omega/m$ sepanjang ± 1 m sebagai elemen pemanas. Dimensi material bahan baku maksimum adalah diameter 3 mm dengan diameter masukan pada barel pemanas adalah sebesar 3,5 mm. Isolasi panas konduksi digunakan barel yang terbuat dari PTFE dan isolasi panas konveksi dengan balutan *mica wool*, *mica tape*, *kapton tape*, dan *ceramic fibre*.
2. Temperatur optimum pada kawat *Nichrome* untuk pemanasan material PA-6 yang memiliki titik leleh 250°C dan perhitungan panas yang hilang ke lingkungan adalah 330°C . Berdasarkan kalkulasi maka dibutuhkan 63 Watt untuk suplai energi listrik kekawat pemanas.
3. Sistem *feeder* dapat berjalan dengan baik pada kondisi keluaran material kontinyu namun belum dapat memenuhi pada keluaran diskontinyu karena masih adanya material sisa yang keluar pada saat sistem berhenti. Keluarnya material sisa tersebut karena adanya energi kinetik hasil dorongan material dari proses *rolling* sehingga memaksa keluar material didalam barel pemanas. Tekanan maksimum yang dapat diberikan kepada *driver pulley* adalah 0,39 KPa untuk menghindari kegagalan komponen.

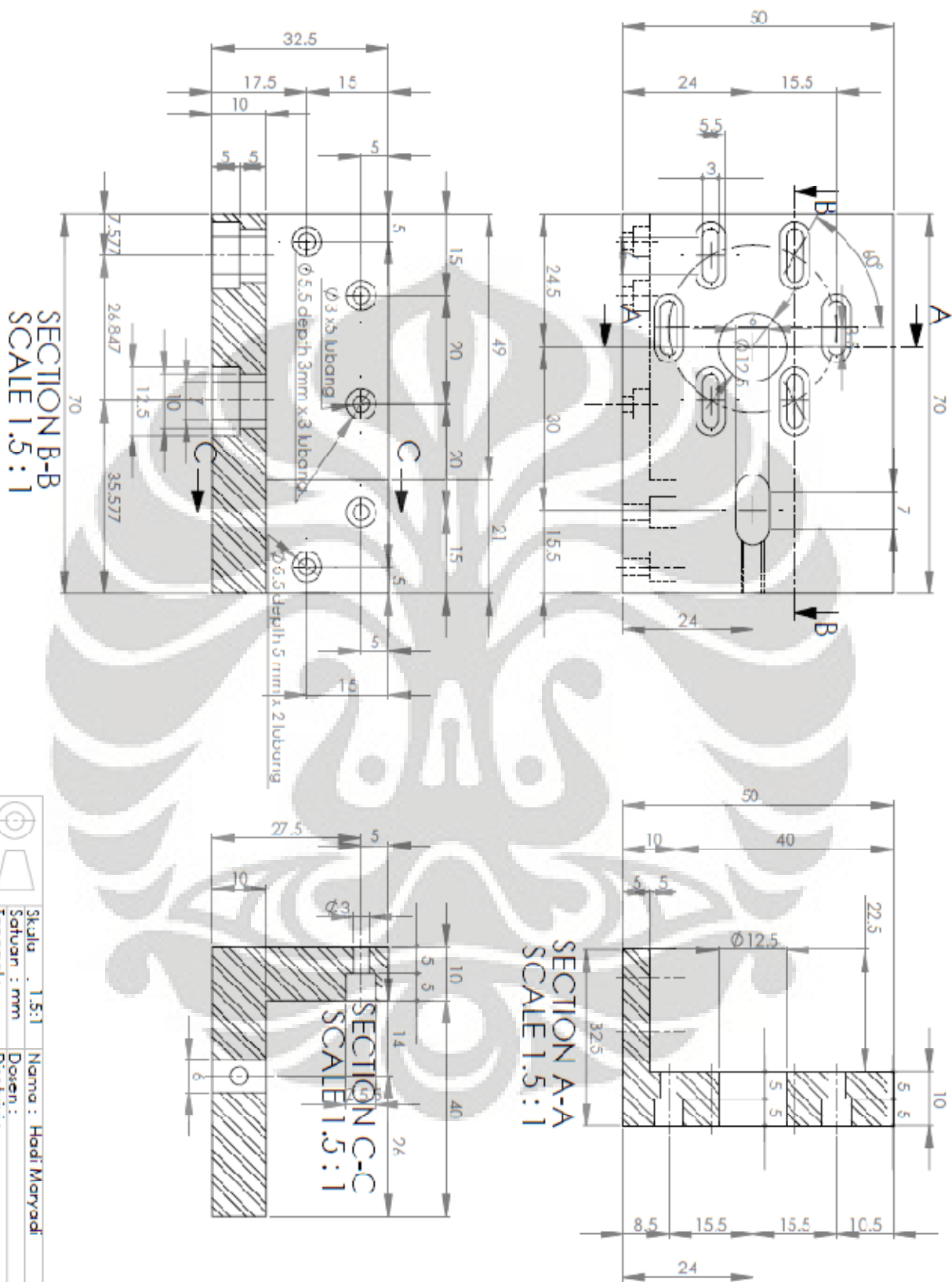
6.2. Saran Penelitian Lebih Lanjut

Untuk pengembangan mesin *Rapid Prototyping* FDM ke depan dalam Hal ini sistem *feeder*, dapat dilakukan penelitian-penelitian untuk meningkatkan kinerja sistem yang menitikberatkan kepada:

1. Keluaran nozzle dengan diameter lebih kecil dari 1mm misalnya 0.3 mm - 0.5 mm yang akan meningkatkan kepresisian produk.
2. Spesifikasi motor DC yang lebih mumpuni untuk mendukung pemasukan material yang dapat dipadukan oleh gerakan motor pada aksis yang lebih cepat.
3. Penelitian untuk pengendalian keluaran material sehingga dapat memenuhi keluaran yang diskontinyu dan tidak mengeluarkan material sisa pada saat sistem berhenti.
4. Penelitian dengan bahan baku lain yang dapat digunakan untuk produksi prototipe mesin FDM.
5. Sistem isolasi dan pengendalian panas yang lebih baik agar panas yang hilang ke lingkungan dapat diperkecil.
6. Penelitian dengan elemen pemanas yang lebih baik untuk mengoptimalkan pengkondisian temperatur yang lebih baik.

DAFTAR REFERENSI

- [1] <http://www.boedeker.com/mguide.htm>
- [2] http://www.efunda.com/materials/common_matl/Common_Matl.cfm?MatlPhase=solid&MatlProp=Mechanical#MechanicalStrength
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluoroethylene>
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Brass>
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/NYLON>
- [6] <http://www.fibersource.com/f-tutor/nylon.htm>
- [7] Hamrock, Bernard.J. 1999. Fundamentals of Machine Elements. Singapore: McGraw Hill.
- [8] Holman, J.P. 1986. Perpindahan Panas 6th Edition. Singapore: McGraw Hill.
- [9] Incropera, Frank P. 2000. Fundamentals of Heat and Mass Transfer 5th Edition. John Wiley & Sons.
- [10] Lienhard, John H. 2003. Perpindahan Panas Text Book 3rd Edition. Cambridge: Phlogiston Press.
- [11] <http://www.additive3d.com/fdm.gif>
- [12] <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>
- [13] <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [14] <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
- [15] <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
- [16] <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- [17] <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1523981&show=html>
- [18] <http://www.wiretron.com/nicrdat.html>

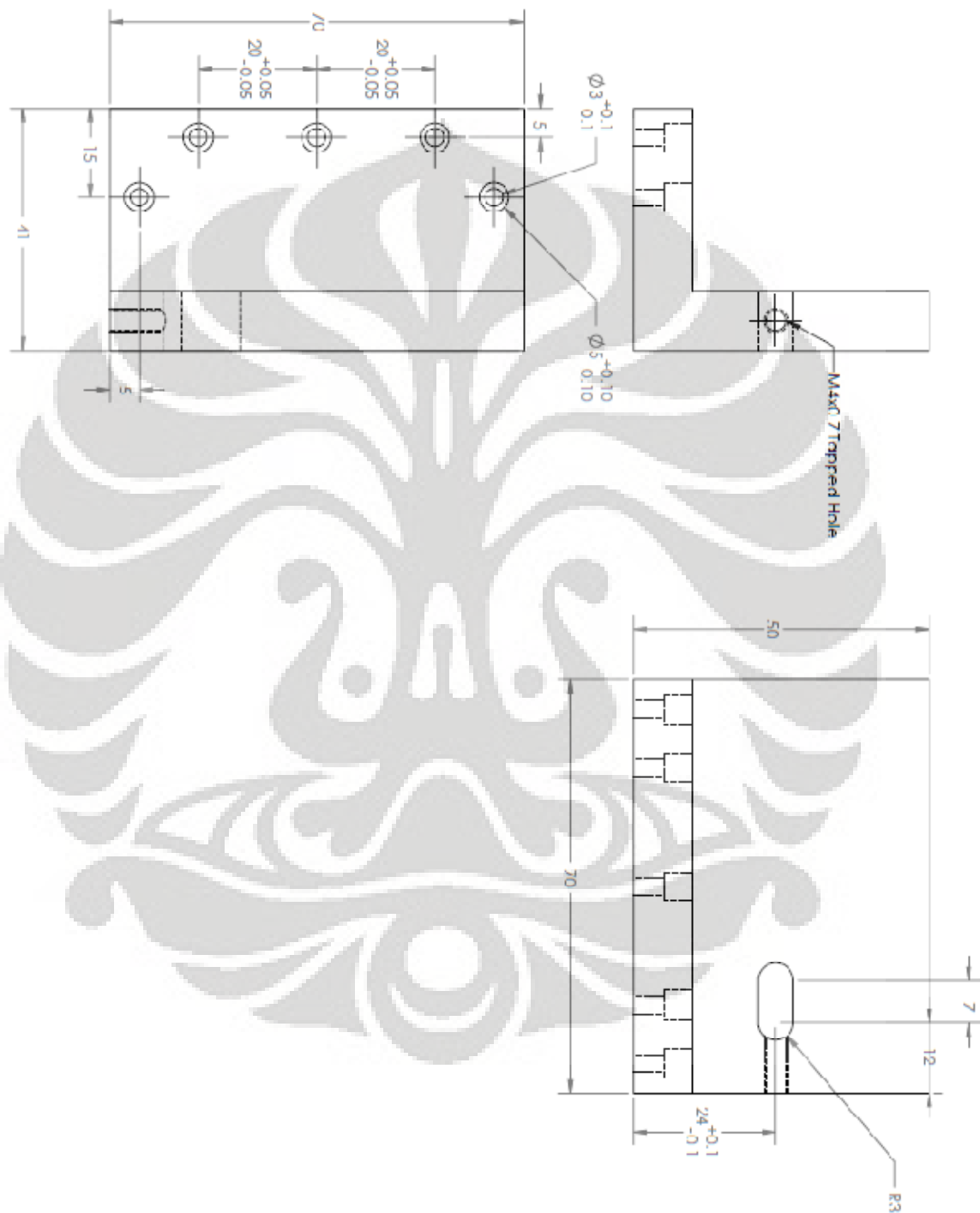


SECTION B-B
SCALE 1.5 : 1

SECTION A-A
SCALE 1.5 : 1

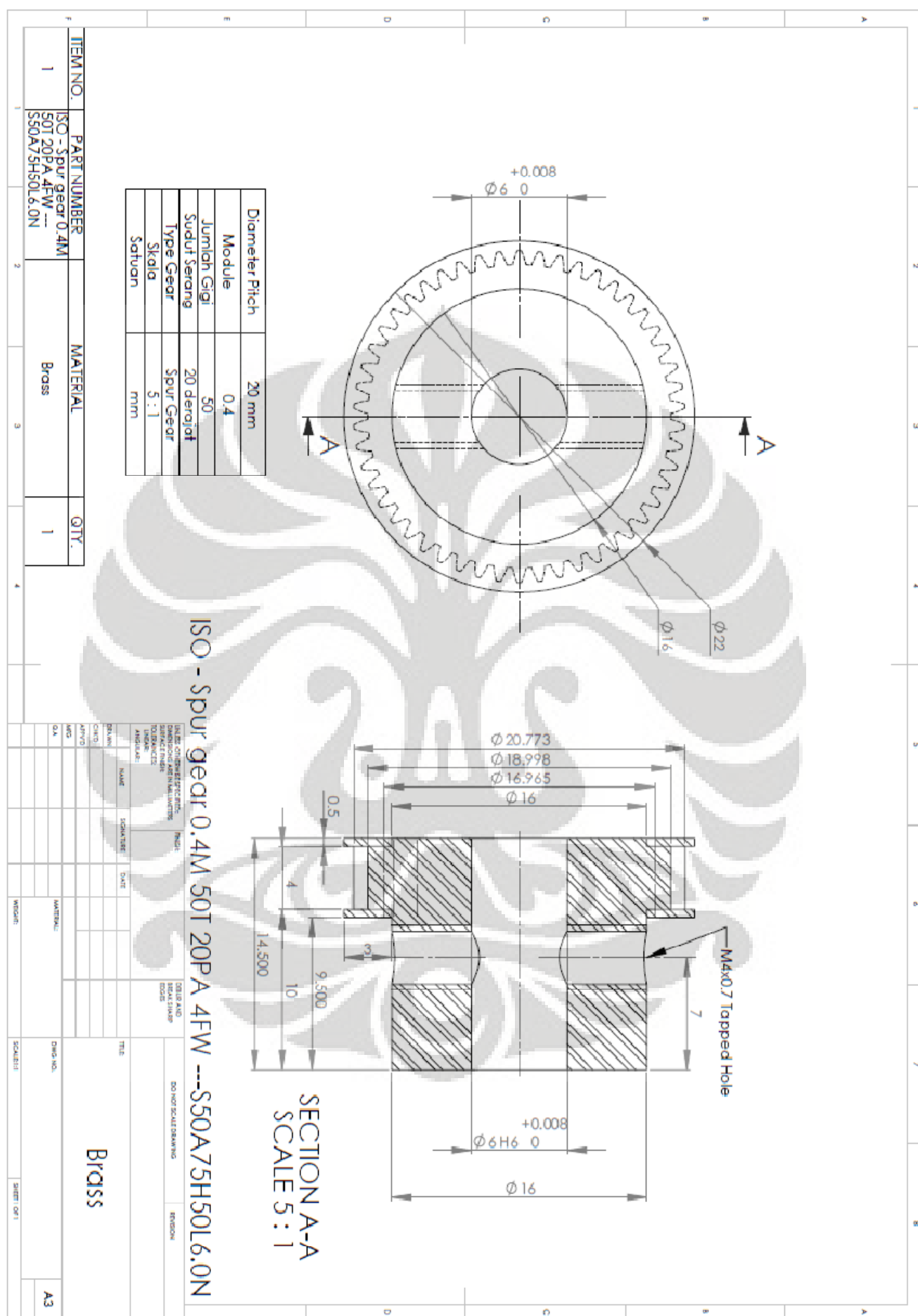
SECTION C-C
SCALE 1.5 : 1

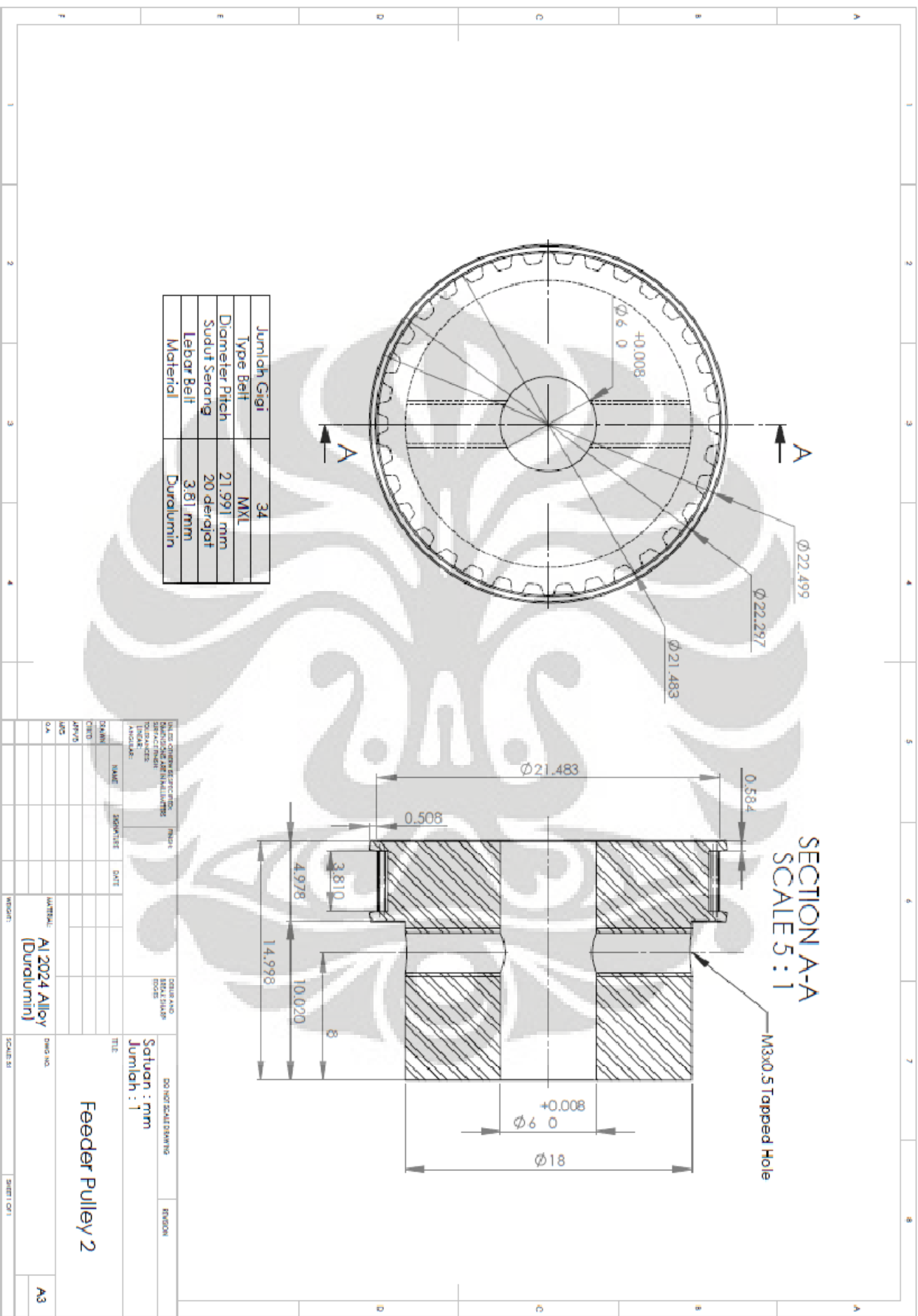
| | | | |
|----------|---------------|---------------------|-------------------|
| | Skala : 1.5:1 | Nama : Hadi Maryadi | Peringatan |
| | Satuan : mm | Dosen : | |
| DTM FTUI | Tanggal : | Disetujui : | Braket Motor DC 1 |
| | | | A.3 |



| No. | Nama Komponen | Material | Kuantitas |
|-----|-------------------|----------|-----------|
| 1 | Braket Motor DC 2 | PTFE | |

| | | | |
|-----------------|---------------|---------------------|------------|
| | Skala : 1:5:1 | Nama : Hadi Maryadi | Peringatan |
| | Satuan : mm | Dosen : | |
| | Tanggal : | Dicetuski : | |
| DTM FTUI | | Braket Motor DC 2 | A3 |

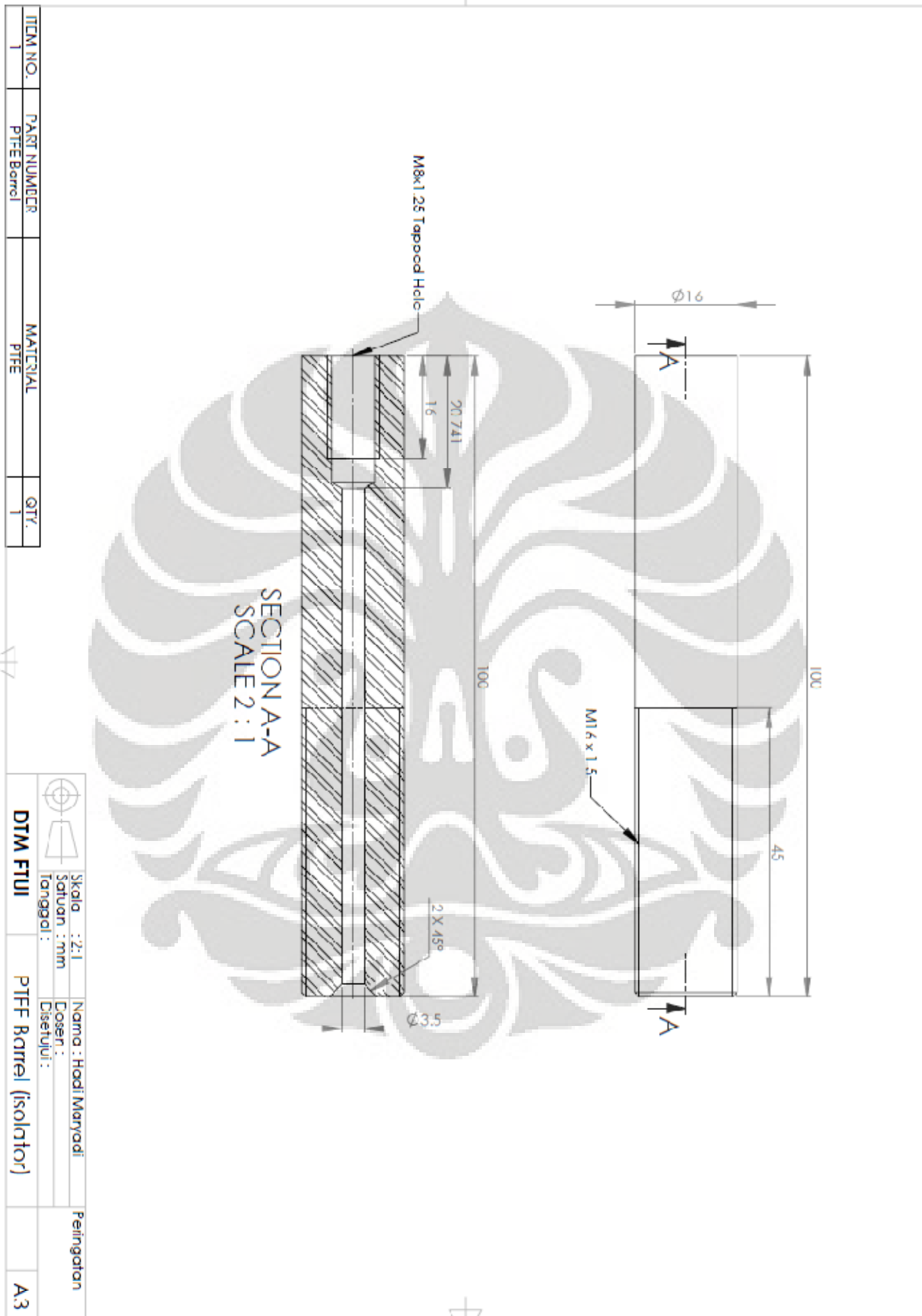




| | |
|----------------|------------|
| Jumlah Gigi | 34 |
| Type Belt | MXL |
| Diameter Pitch | 21.991 mm |
| Sudut Serang | 20 derajat |
| Lebar Belt | 3.81 mm |
| Material | Duralumin |

SECTION A-A
SCALE 5 : 1
M3x0.5 Tapped Hole

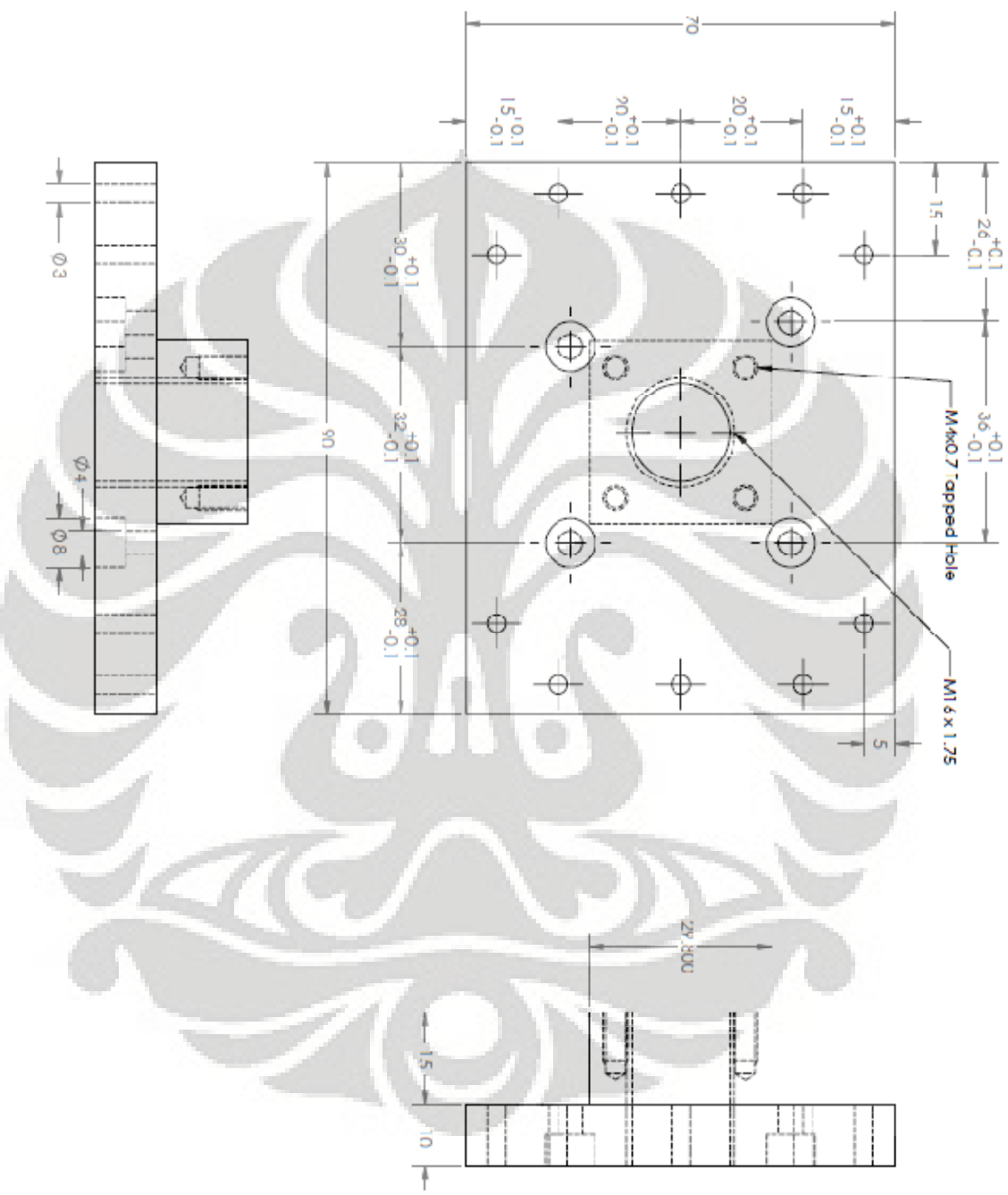
| | | | | | |
|---|--|---|--|---------------------------------|--|
| DOKUMEN NO. DOKUMEN: 2024-01-01 REVISI: 01 TANGGAL: 2024-01-01 | | DESAIN DAN KONSTRUKSI M. ARIYANTO 2024-01-01 | | DO NOT SCALE DRAWING REGION: | |
| MANUFACTURING AND INSTALLATION TOLERANCE UNLESS SPECIFIED OTHERWISE: | | TITLE: | | SHEET NO.: | |
| NAME: | | SIGNATURE: | | DATE: | |
| DESAIN: | | MATERIAL: | | SHEET OF: | |
| CHECK: | | ALLOY: | | A3 | |
| APPROV: | | (Duralumin) | | Feeder Pulley 2 | |
| AMO: | | WEIGHT: | | SCALE: | |
| O.A. | | WIDTH: | | SHEET OF: | |



| ITEM NO. | PART NUMBER | MATERIAL | QTY. |
|----------|-------------|----------|------|
| 1 | PTFE Barrel | PTFE | 1 |



| | | | |
|-----------------|---|---|------------|
| DTM FTUI | Skala : 2:1 Satuan : mm Tanggal : | Nama : Hadi Maryadi Dosen : Disetujui : | Peringatan |
| | | | A.3 |



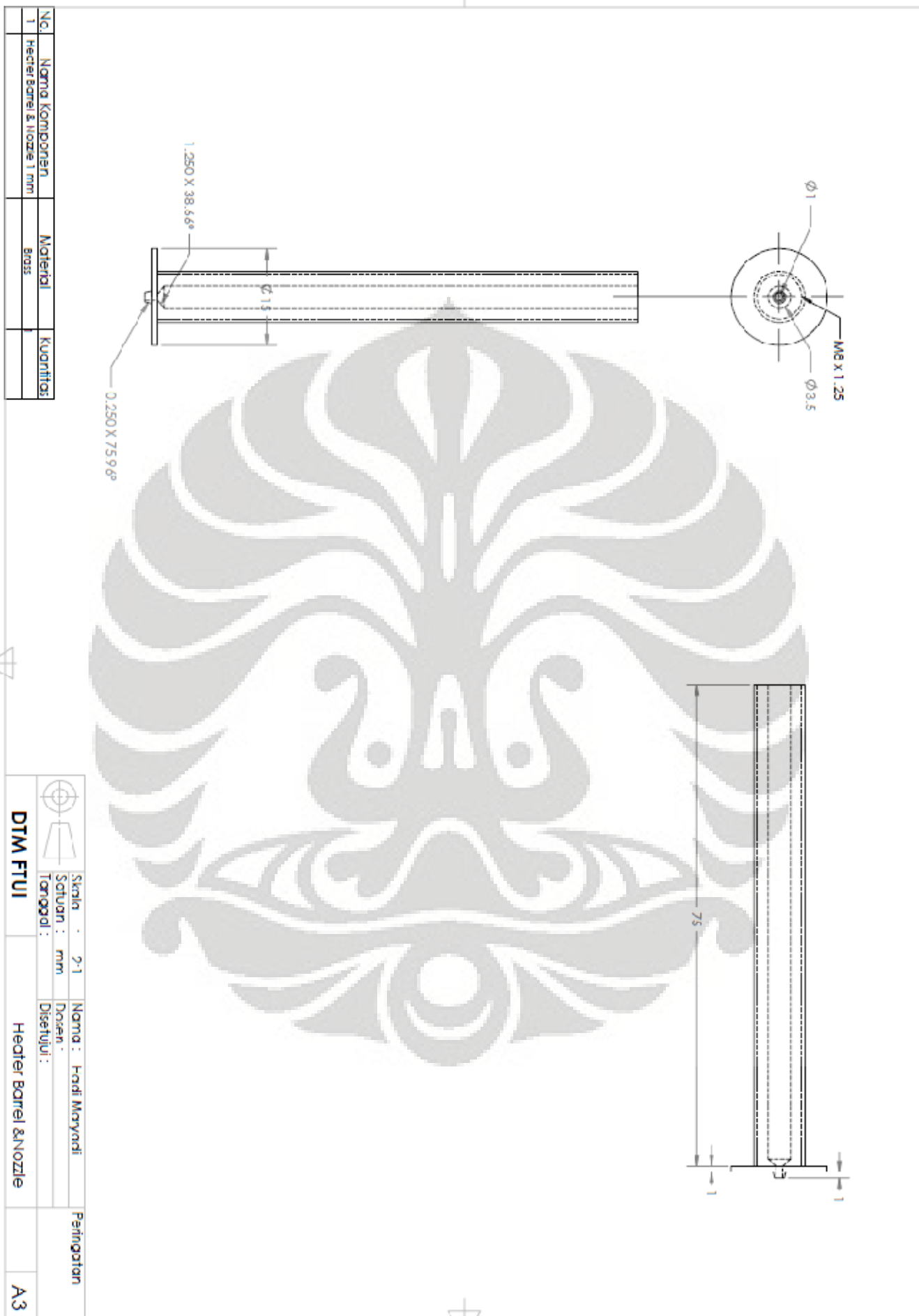
| No. | Nama Komponen | Materi | Kuantitas |
|-----|---------------|--------|-----------|
| 1 | PTFE Bracket | PTFE | 1 |

Skala : 1.5.1
 Satuan : mm
 Disetujui :
 Nama : Hadi Maryadi
 Dosen :
 Disetujui :

DTM FTUI

PTFE Bracket

A3



| | | | |
|-----|-----------------------------|----------|-----------|
| No. | Nama Komponen | Material | Kuantitas |
| 1 | Heater Barrel & Nozzle 1 mm | Brass | |



| | | | |
|-----------|-----|-------------|--------------|
| Skala : | 2-1 | Nama : | Hadi Maryadi |
| Satuan : | mm | Disenai : | |
| Tanggal : | | Ditetujui : | |

DTM FTUI

Heater Barrel & Nozzle

Peringatan

A3

