



UNIVERSITAS INDONESIA

PENAMBAHAN FITUR *AUTO BED LEVELING* dan *AUTO CONTINUE PRINTING* pada 3D PRINTER REPRAP MENDEL

SKRIPSI

**YOSUA TRESNO SUROJO
1206237416**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI S1 FISIKA
DEPOK
JUNI 2016**



UNIVERSITAS INDONESIA

PENAMBAHAN FITUR *AUTO BED LEVELING* dan *AUTO CONTINUE PRINTING* pada 3D PRINTER REPRAP MENDEL

SKRIPSI

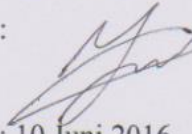
Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains

**YOSUA TRESNO SUROJO
1206237416**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI S1 FISIKA
DEPOK
JUNI 2016**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Yosua Tresno Surojo
NPM : 1206237416
Tanda Tangan : 
Tanggal : 10 Juni 2016


HALAMAN PENGESAHAN

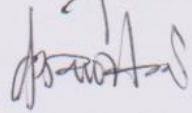
Skripsi ini diajukan oleh :

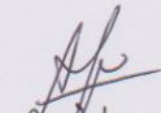
Nama : Yosua Tresno Surojo
NPM : 1206237416
Program Studi : Fisika
Judul Skripsi : Penambahan Fitur *Auto Bed Leveling* dan *Auto Continue Printing* pada 3D Printer Reprap Mendel


Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Fisika Instrumentasi dan Elektronika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Surya Darma S.Si., M.Si ()

Pembimbing 2 : Dr. Prawito ()

Penguji I : Drs. Sastra Kusuma Wijaya Ph.D. ()

Penguji II : Dr. Arief Sudarmaji M.T. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 10 Juni 2016

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini. Tanpa rahmat dan karunia-Nya, penulis tidak akan menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan hasil yang maksimal menghadapi segala kesulitan dan tantangan yang ada.

Penyusunan laporan tugas akhir dan pembuatan sebuah alat yang berjudul “Penambahan Fitur *Auto Bed Leveling* dan *Auto Continue Printing* pada 3D Printer Reprap Mendel” dilakukan dalam rangka memenuhi syarat dalam menyelesaikan pendidikan S-1 Program Studi Fisika, Peminatan Sistem dan Instrumentasi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa tanpa dukungan moril maupun materi dari berbagai pihak, baik selama masa perkuliahan maupun masa penelitian tugas akhir, laporan tugas akhir ini tidak dapat diselesaikan sesuai dengan harapan dan dapat diaplikasikan langsung di dunia nyata pada bidang akademis maupun professional. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

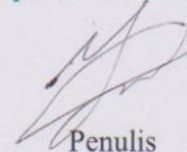
1. Tuhan YME yang telah memberikan rahmat, kemudahan serta berkat yang melimpah selama proses penyusunan laporan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua yang saya cintai.
3. Surya Darma S.Si., M. Si. Sebagai pembimbing 1 tugas akhir ini dimana beliau membimbing saya dengan sabar, memberi masukan, kritik, dan saran selama penyusunan laporan tugas akhir.
4. Dr. Prawito Sebagai pembimbing 1 tugas akhir ini dimana beliau membimbing saya dengan sabar, memberi masukan, kritik, dan saran selama penyusunan laporan tugas akhir.
5. Tim Robotika Universitas Indonesia dan seluruh civitas TRUI sebagai wadah belajar bersama yang telah memperkenalkan penulis teknologi bernama 3D

Printer serta ilmu-ilmu lainnya yang aplikatif dan menunjang perkuliahan serta penyusunan laporan tugas akhir ini.

6. Tim *Autonomous Unmanned Aerial Vehicle* Universitas Indonesia yang telah memberikan dukungan dalam bentuk materi maupun moril selama penyusunan laporan tugas akhir ini.
7. Rekan-rekan sepeminatan Sistem dan Instrumentasi Fisika Universitas Indonesia yang telah membantu penulis dalam bentuk kritik dan saran selama penyusunan laporan tugas akhir.
8. PT. Carita Boat Indonesia yang telah memberikan tempat tinggal sementara serta tempat pengerjaan laporan tugas akhir ini selama penulis berada di BSD City.
9. Dosen-dosen instrumentasi yang telah mengajarkan ilmu-ilmu dasar instrumentasi sehingga dapat berguna saat mengerjakan penelitian.
10. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan namanya satu persatu yang telah membantu dalam proses penelitian dan penulisan laporan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan masukan berupa kritik dan saran yang membangun untuk mencapai hasil yang lebih baik. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat dan menambah pengetahuan bagi para pembaca.

Depok, 10 Juni 2016



Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS

AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai civitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Yosua Tresno Surojo
NPM : 1206237416
Program Studi : S-1 Reguler
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Non-eksklusif (NON-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

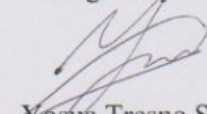
“Penambahan Fitur *Auto Bed Leveling* dan *Auto Continue Printing* pada 3D Printer Reprap Mendel”

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 10 Juni 2016

Yang menyatakan,



Yosua Tresno Surojo

ABSTRAK

Nama : Yosua Tresno Surojo
Program Studi : Fisika
Judul : Penambahan Fitur *Auto Bed Leveling* dan *Auto Continue Printing* pada 3D Printer Reprap Mendel

Pembuatan objek tiga dimensi menggunakan 3D printer membutuhkan suatu mikrokontroler yang dapat bekerja dengan optimal untuk mengatur pergerakan peleleh filamen agar objek yang dibentuk memiliki kualitas terbaik. Proses pembentukan suatu objek sering kali membutuhkan waktu berjam-jam sehingga jika terjadi pemutusan listrik secara mendadak maka 3D printer harus melakukan pengulangan proses pembentukan objek dari awal. Peleleh filamen juga perlu dijaga agar suhu peleleh selalu terjaga di nilai yang sudah ditentukan sesuai karakteristik filamen yang digunakan tetapi seringkali suhu peleleh filamen tidak terjaga dengan baik. Selain itu, pengukuran kedataran *heating bed* 3D sprinter yang masih menggunakan waterpas memiliki akurasi pengukuran yang tidak terlalu bagus. Oleh karena itu, dibutuhkan adanya fitur *auto continue printing* berdasarkan nomor *line command* terakhir yang dijalankan oleh 3D printer, *hot end PID tuning* untuk mencari konstanta PID optimal dan *auto bed leveling*. Ketiga fitur diatas berbasis mikrokontroler Arduino Mega 2560 dipadu dengan *single board computer* Raspberry Pi 3 menggunakan bahasa pemrograman C++.

Kata Kunci : 3D printer, filamen, *hot end*, level, mikrokontroler, *single board computer*, C++.

ABSTRACT

Name : Yosua Tresno Surojo
Study Program : Physics, Undergraduate program
Topic : Features Addition *Auto Bed Leveling* and *Auto Continue Printing* on 3D Printer Reprap Mendel

Creating a three dimensional object using 3D printer basically need a microcontroller which could work optimal to control the movement of hot end to build a 3D object with best quality. Object creation process usually took hours, furthermore if there is sudden electricity supply cut, 3D printer must start the process from zero again. Hot end temperature need to be controlled at setpoint value based on filament characteristic that used although sometimes hot end temperature did not controlled carefully indicate from temperature deviation from set point around 20-30 Celcius degree. Following that, level measurement on 3D printer heating bed which still use waterpass has small measurement accuracy. 3D printer need to be add some features such as auto continue printing based on latest line command that run by 3D printer, hot end PID tuning to get optimum PID constant, and auto bed levelling. All of that features are based on microcontroller Arduino Mega 2560 and Raspberry Pi 3 single board computer using C++ and programming language.

Keywords : 3D printer, filament, hot end, level microcontroller, single board computer, C++.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Metodologi Penelitian	4
1.5 Sistematika Penulisan	7
BAB 2 LANDASAN TEORI.....	8
2.1 3D Printer	8
2.1.1 Proses Pembuatan Objek menggunakan 3D Printer.....	8
2.1.2 3D Printer Robori Mendel.....	12
2.1.3 Material Filamen 3D Printer	21
2.2 3D Printer Acuan.....	30
2.3 Electric Capacitive Type Proximity Sensor	33
2.4 Pengendalian Sistem	35
2.5 Pengendalian PID	36

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM	39
3.1 Perancangan Mekanik	39
3.1.1 Struktur <i>Frame</i> 3D Printer	39
3.1.2 Aktuator 3D Printer.....	40
3.2 Perancangan Elektronik	41
3.2.1 <i>Auto Bed Levelling</i>	41
3.2.2 <i>Hot End PID Tuning</i>	42
3.2.3 <i>Auto Continue Printing</i>	42
3.3 Perancangan Perangkat Lunak	43
3.3.1 <i>Auto Bed Levelling</i>	43
3.3.2 <i>Hot End PID Tuning</i>	46
3.3.3 <i>Auto Continue Printing</i>	49
3.3.4 <i>Virtual Network Computing</i>	51
BAB 4 PEMBAHASAN	52
4.1. <i>Auto Bed Levelling</i>	52
4.2. <i>Hot End PID Tuning</i>	54
4.3. <i>Auto Continue Printing</i>	58
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	65
5.1. Kesimpulan.....	65
5.2. Saran.....	65
DAFTAR ACUAN.....	66
LAMPIRAN	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Alur Penelitian.....	6
Gambar 2.2. Pegas untuk <i>heat bed</i> (a), <i>extruder</i> (b), sumbu Z (c).....	13
Gambar 2.3. Diagram Bowden Extruder.....	13
Gambar 2.4. <i>Timing Belt</i> GT2.....	14
Gambar 2.6. <i>PTFE Tube</i>	15
Gambar 2.7. <i>Hot End</i>	15
Gambar 2.8. <i>Nozzle</i>	16
Gambar 2.9. <i>Power Resistor</i>	16
Gambar 2.10. <i>PCB Heat Bed</i>	17
Gambar 2.11. <i>Microswitch</i>	17
Gambar 2.13. Motor Stepper NEMA 14 (a) dan NEMA 17 (b)	19
Gambar 2.14. LCD Display.....	19
Gambar 2.16. SainSmart RAMPS 1.4.....	20
Gambar 2.18. 3D Printer Robori Mendel.....	21
Gambar 2.20. CubePro 3D Printer	33
Gambar 2.21. Prinsip kerja dari sensor kapasitif A-posisi seimbang; B-posisi tidak seimbang	34
Gambar 2.22. <i>Shield</i> yang membungkus elektroda pada sensor kapasitif	35
Gambar 2.23. Blok diagram sistem kendali	35
Gambar 2.24. Blok diagram proses penentuan penguatan dan periode <i>ultimate</i> .	37
Gambar 2.25. Ilustrasi <i>output</i> dari <i>control loop</i> yang stabil.....	38
Gambar 3.1. Rangka 3D Printer	40
Gambar 3.2. Penempatan Aktuator 3D Printer	41
Gambar 3.4. Blok Diagram <i>Hot End</i> PID <i>Tuning</i>	42
Gambar 3.5. Blok Diagram <i>Auto Continue Printing</i>	43
Gambar 3.6. Komponen Elektrik 3D Printer.....	43
Gambar 3.7. Ketinggian aman <i>Z-Probe</i>	44
Gambar 3.8. Flowchart Proses <i>Auto Bed Levelling</i>	45
Gambar 3.9. Flowchart Proses Akuisi Data Temperatur <i>Hot End</i>	47
Gambar 3.10. Flowchart Proses <i>Fine Tuning</i>	48

Gambar 3.11. Flowchart Proses Auto Continue Printing	50
Gambar 3.12. Tampilan VNC Viewer dari Raspberry Pi 3.....	51
Gambar 4.1. Objek 3D kubus hasil pengujian fitur <i>Auto Bed Leveling</i>	54
Gambar 4.2. Grafik Perbandingan Waktu terhadap Temperatur <i>Hot End</i> variasi 1.....	565
Gambar 4.3. Grafik Perbandingan Waktu terhadap Temperatur <i>Hot End</i> variasi 2.....	565
Gambar 4.4. Grafik Perbandingan Waktu terhadap Temperatur <i>Hot End</i> variasi 3.....	56
Gambar 4.5. Grafik Perbandingan Waktu terhadap Temperatur <i>Hot End</i> untuk K_P , K_I , dan K_D rata-rata	58
Gambar 4.6. Hasil cetak objek 3D kubus dari pengujian fitur <i>auto continue printing</i>	60
Gambar 4.7. Proses pencetakan objek 3D piramida terhenti pada saat progres mencapai 20%	62
Gambar 4.8. Proses pencetakan objek 3D piramida terhenti pada saat progres mencapai 37%	62
Gambar 4.10. Proses pencetakan objek 3D piramida terhenti pada saat progres mencapai 82%	63
Gambar 4.11. Proses pencetakan objek 3D piramida selesai 100%	63
Gambar 4.12. Objek 3D piramida 3.5x3.5x3.5 cm	63
Gambar 4.13. Objek 3D piramida 3.5x3.5x3.5 cm	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Material Filamen 3D Printer	28
Tabel 4.1. Hasil Uji Coba <i>Auto Bed Levelling</i>	53
Tabel 4. 2. Nilai K_U yang Diuji	54
Tabel 4.2. Tabel Hasil Perhitungan K_P , K_I , K_D berdasarkan formula <i>Ultimate Sensitivity Method</i>	57
Tabel 4.3. Tabel Pengukuran Dimensi Objek 3D Kubus Hasil <i>Auto Continue Printing</i>	59
Tabel 4.4. Tabel Pengukuran Dimensi Objek 3D Piramida Hasil <i>Auto Continue Printing</i>	61

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Dalam dunia industri kreatif ataupun pemodelan suatu objek saat ini tengah diramaikan dengan mesin 3D printer. Mesin 3D printer adalah sebuah pencetak benda tiga dimensi dari proses pelelehan filamen berbahan dasar PLA (*Polylactic acid*) atau ABS (*Acrylonitrile butadiene styrene*) yang dipanaskan oleh *extruder* dan digerakkan oleh motor stepper untuk ditata sesuai pola penyusunan yang diatur. Dengan menggunakan empat buah motor stepper, mesin 3D printer dapat memiliki tiga buah sumbu gerak untuk melakukan penataan filamen dalam proses pembuatan pola pembentukan objek yang dicetak. Ketiga sumbu gerak tersebut adalah sumbu gerak X untuk menggeser *extruder* kanan-kiri, sumbu gerak Y untuk memaju-mundurkan *bed* atau plat penampang objek yang dicetak, serta sumbu gerak Z untuk menaik turunkan *extruder* ketika membentuk tinggi objek. Filamen yang digunakan berbentuk gulungan dengan diameter standar filamen yang dapat dimasukkan ke lubang masukan *extruder* sebesar 1.75 mm atau 3 mm. Metode pembuatan objek pada mesin 3D printer dinamakan *fused deposition modelling* yaitu metode dimana *extruder* melelehkan filamen lalu menuangkannya di *bed* dengan alur pergerakan *extruder* membentuk garis tipis yang nanti akan membentuk lapisan-lapisan penyusun objek. Untuk mencetak objek sesuai desain yang diinginkan, pengguna perlu mengunggah file 3D model dengan ekstensi STL atau OBJ ke perangkat lunak 3D printer lalu perangkat lunak tersebut akan mengkonversi file 3D model tersebut menjadi sebuah file GCODE berisi bahasa komputer yang biasa digunakan di mesin CNC. Pada file GCODE tersebut terdapat informasi penting seperti temperatur *extruder* agar filamen dapat dicairkan dengan optimal, temperatur *bed* agar sisi bawah objek masih tetap hangat sehingga tidak terdapat perbedaan temperatur yang mencolok antara sisi bawah yang sudah selesai dicetak dan sisi atas yang masih dalam proses pencetakan, kecepatan geser *extruder*

ketika membentuk pola pembentukan objek, serta koordinat X,Y,Z *extruder* harus mengeluarkan filamen yang sudah dicairkan dan informasi lainnya. File GCODE berisi pengaturan mesin 3D printer tersebut akan dibaca oleh mikrokontroler untuk diterjemahkan menjadi pergerakan *extruder*, *bed* dan pengendalian temperatur *extruder* serta pengendalian-pengendalian lainnya agar objek yang dicetak sesuai dengan desain pada file 3D model.

Dibalik sejumlah kecanggihan mesin 3D printer yang disebutkan di atas, masih ada beberapa masalah yang mengganggu proses pencetakan objek yaitu :

- Ketika suplai listrik ke mesin 3D printer terputus pada saat proses pencetakan berjalan maka ketika mesin 3D printer tersebut mendapat suplai listrik kembali. Proses pencetakan objek harus dimulai dari awal kembali, tidak dari posisi terakhir *extruder* menuangkan filamen yang sudah dipanaskan.
- *Bed* yang tidak benar-benar datar sehingga sisi bawah objek yang dicetak tidak datar atau miring ke salah satu sisi.
- Pengendalian temperatur *extruder* dan *bed* agar filamen dapat dilelehkan dengan optimal serta menempel dengan cukup kuat di *bed* karena temperatur yang dijaga sesuai dengan pengaturan yang diberikan. Namun, pengendalian temperatur tersebut masih memiliki toleransi yang terlalu besar sehingga kadangkala *extruder* tidak melelehkan filamen dengan lancar ataupun objek 3D yang sisi bawahnya mengerut karena terlalu cepat mendingin dibanding sisi atasnya.

Jika posisi terakhir *extruder* yang sedang menuangkan lelehan filamen dapat disimpan ke dalam suatu memori seperti kartu *micro SD* maka proses pencetakan dapat dilanjutkan walau suplai listrik ke mesin 3D printer terputus untuk sementara waktu. Plat penampang objek yang tidak benar-benar datar dapat diukur kedatarannya menggunakan akselerometer yang ditempatkan pada keempat sudut plat penampang objek berbentuk persegi dan terhubung ke mikrokontroler sehingga dapat menunjukkan apakah plat

sudah datar atau belum dari indikator berupa empat buah LED yang menunjukkan tingkat kedataran keempat sudut plat penampang objek. Selain itu, temperatur *extruder* dan *bed* yang dijaga masih perlu dioptimalkan performanya agar toleransi perubahannya tidak terlalu besar untuk mendapatkan hasil cetak 3D printer yang terbaik.

Untuk mengendalikan mesin 3D printer beserta perangkat-perangkat yang diharapkan mampu menyelesaikan masalah-masalah pada 3D printer yang telah disebutkan di atas maka diperlukan suatu mikrokontroler yang diprogram sedemikian rupa untuk mendapatkan pengaturan 3D printer yang diinginkan. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Mega 2560 disertai *driver* motor stepper yaitu RAMPS 1.4 serta Arduino Uno untuk indikator kedataran plat penampang objek. Perangkat lunak yang digunakan adalah Repetier Host.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan fitur-fitur tambahan pada sebuah sistem pengendalian 3D printer otomatis berbasis mikrokontroler sehingga menjadi instrumen penunjang untuk pengembangan kontroler 3D printer yaitu fitur *auto continue printing*, *Hot End PID Tuning*, *Auto Bed Leveling*.

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan yang akan diselesaikan pada penelitian ini adalah pembuatan sistem pengendalian 3D printer otomatis berbasis mikrokontroler dengan detail sebagai berikut :

1. Material filamen yang digunakan adalah PLA (*Polylactic acid*).
2. Diameter filamen yang digunakan sebesar 1.75 mm.
3. *Extruder* yang digunakan berjenis Bowden.
4. Lapisan pelindung aluminium *bed* menggunakan selotip kertas yang dilapisi dengan *double tape*.

5. Gulungan filamen tidak ada yang saling menyilang sehingga memiliki kemungkinan kusut ketika proses penguluran dijalankan.
6. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Mega 2560.
7. Perangkat lunak yang digunakan adalah Repetier Host dan Arduino IDE.
8. 3D Printer yang digunakan adalah Robori Mendel Full Kit
9. 3D Printer kontroler dapat melanjutkan proses pengeprintan yang belum selesai akibat putusnya suplai listrik ditengah proses pengeprintan.
10. 3D Printer kontroler dapat melakukan pengendalian temperatur *extruder* dan *bed* agar tetap berada di *set point* temperatur yang diatur.
11. 3D Printer *bed* dapat diketahui apakah datar atau tidak dilihat dari indikator berupa empat buah LED yang menandai kedataran keempat sudut *bed*.

1.4 Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang akan dilakukan terdiri dari beberapa tahap berikut ini :

1. Studi Literatur

Hal yang pertama kali dilakukan pada tiap penelitian adalah studi literatur. Studi literatur yang dibutuhkan antara lain terkait mekanisme gerak motor stepper, mekanisme pemanasan *extruder*, mekanisme kerja akselerometer, mekanisme pengukuran temperatur pada *extruder* dan *bed* menggunakan termistor serta pemrograman mikrokontroler Arduino.

2. Diskusi

Diskusi yang dilakukan terkait arahan tiap tahap penelitian mulai dari perancangan sistem kontrol 3D printer hingga mendapatkan kesimpulan. Diskusi ini berguna untuk menambahkan teori baru dan memecahkan masalah-masalah yang nantinya muncul saat penelitian. Diskusi ini dilakukan dengan pembimbing dari akademisi Instrumentasi Elektronika Fisika UI dan para profesional 3D printer yang terdapat di Indonesia maupun di luar negeri.

3. Pemrograman Kontroler 3D Printer

Pemrograman kontroler 3D printer dilakukan untuk mengendalikan temperatur *extruder* dan *bed* dan juga pengukuran kedataran *bed*. Pemrograman kontroler 3D printer tersebut menggunakan perangkat lunak Repetier Host, Arduino IDE, dengan bahasa C/C++ dan Python.

4. Sinkronisasi program dengan *hardware* dan uji kalibrasi

Perakitan mekanik dan elektrik 3D printer mulai dari pemasangan rangka 3D printer, pemasangan komponen elektrik, pengukuran kedataran *bed* lalu dilanjutkan dengan uji kalibrasi 3D Printer. Uji kalibrasi 3D printer didahului dengan penginputan file GCODE yang berisi bahasa komputer dari desain sebuah kubus berukuran 3x3x3 cm. Setelah file tersebut disimpan di memori kontroler 3D Printer, langkah selanjutnya adalah menekan tombol pengaktifan uji kalibrasi 3D Printer untuk melakukan pengeprintan objek tersebut. Kualitas objek berbentuk kubus tersebut menentukan apakah 3D printer sudah terkalibrasi secara mekanik dengan cukup baik atau masih harus dikalibrasi kembali.

5. Pengujian alat dan pengambilan data

Pengujian dan pengambilan data pada penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu :

- Pengeprintan objek berbentuk kubus, piramida, dan bola. Seluruh objek dibuat dalam keadaan berongga untuk mengetahui kualitas pengeprintan baik di sisi luar maupun dalam objek. Dari ketiga objek tersebut, masing-masing di print sebanyak 7 kali lalu pada setiap pengeprintan seluruh dimensi objek seperti panjang, lebar, dan tinggi diukur untuk dibandingkan dengan dimensi objek yang tertera di file CAD.
- Pengukuran suhu *extruder* dan *bed* selama proses pengeprintan berjalan dalam rangka pengecekan apakah temperatur *extruder* dan *bed* terjaga atau tidak pada *set point* yang sudah diatur.

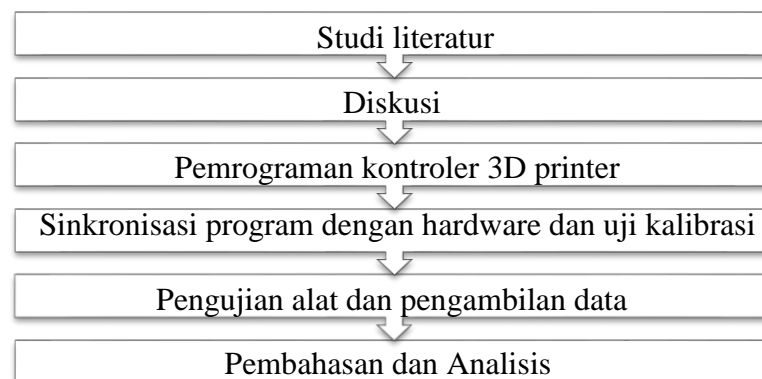
- Pengukuran kedataran *bed* menggunakan akselerometer dengan indikator apakah *bed* sudah rata atau belum menggunakan LED. Jika LED menyala maka *bed* sudah datar tetapi jika LED tidak menyala maka *bed* belum datar. Jumlah LED yang digunakan sebanyak empat buah yang dipasang di keempat sudut *bed* maka jumlah LED yang menyala harus berjumlah empat buah untuk menunjukkan bahwa *bed* sudah benar-benar datar.

6. Analisis

Analisa pada penelitian ini dibedakan per proses pengambilan data yang sudah dijelaskan di bagian sebelumnya, yaitu :

- Untuk data pengukuran dimensi objek yang diprint dengan objek yang didesain dan disimpan dalam bentuk CAD maka perlu dilakukan komparasi dalam bentuk tabel
- Untuk data temperatur, dengan menggunakan perangkat lunak Repetier-Host maka dapat langsung diplot grafik perubahan temperatur *extruder* dan *bed* terhadap waktu selama pengeprintan berlangsung.

Berikut ini adalah langkah-langkah penelitian yang dilakukan:



Gambar 1.1 Alur Penelitian

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini berpedoman pada Pedoman Teknis Penulisan Tugas Akhir Mahasiswa Universitas Indonesia tahun 2008 dan disesuaikan dengan kebutuhan di peminatan Sistem dan Instrumentasi Fisika Departemen Fisika FMIPA UI. Berikut ini adalah uraian singkat sistematika penulisan tugas akhir penulis.

- Bab I yang terdiri dari beberapa sub bab ini menguraikan pendahuluan dilakukannya penelitian ini. Pendahuluan pada bab ini terdiri dari latar belakang, batasan masalah, tujuan penelitian, metode penelitian, dan sistematika penulisan tugas akhir.
- Bab II yang berisi tinjauan pustaka yang menguraikan teori-teori dasar untuk menunjang kegiatan penelitian ini. Bab II ini terdiri dari beberapa sub bab yang menguraikan teori- teori seperti mekanisme gerak motor stepper, mekanisme pemanasan extruder, mekanisme kerja akselerometer, mekanisme pengukuran temperatur pada extruder dan bed menggunakan termistor serta pemrograman mikrokontroler Arduino.
- Bab III berisi uraian perancangan sistem yang akan dibuat. Pada bab ini akan diuraikan mengenai sistem dan proses kerja program mikrokontroler yang digunakan.
- Bab IV berisi hasil yang didapat dan pembahasannya yaitu hasil uji kalibrasi 3D printer, objek hasil cetakan 3D printer beserta data temperatur *extruder* dan *bed* selama proses pengeprintan berjalan termasuk pembahasan dari setiap data yang didapat.
- Bab V berisi kesimpulan dan saran untuk penelitian berikutnya.

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 3D Printer

2.1.1 Proses Pembuatan Objek menggunakan 3D Printer

3D *printing* atau *additive manufacturing* adalah sebuah proses pembentukan sebuah objek tiga dimensi dari sebuah *file* digital. Pembuatan objek pada 3D Printer menggunakan proses *additive* dimana sebuah objek terbentuk dari penempatan material filamen lapisan per lapisan dari sampai seluruh bangun objek terbentuk. Setiap lapisan terbentuk dari susunan benang-benang filamen tipis yang disusun dengan formasi saling menyilang satu sama lain.

Proses pembuatan objek bermula dari pembuatan desain virtual dari objek yang akan dicetak. Desain virtual ini dapat dibuat dalam bentuk file CAD (*Computer Aided Design*) yang dibuat menggunakan 3D *modelling* program seperti Autodesk Inventor atau menggunakan 3D *scanner*, yaitu sebuah pemindai yang dapat menghasilkan kopian digital 3D dari objek yang akan dibentuk. File CAD tersebut perlu dikonversi menjadi sebuah file STL (*STereoLithography*) yang dapat diolah oleh *Integrated Slicer and Print Program* seperti yang digunakan oleh penulis yaitu Repetier Host.^[1]

Repetier Host akan menerima file STL tersebut untuk diolah menjadi sebuah file gcode dengan acuan berupa pengaturan yang dapat diatur oleh penulis menggunakan perangkat lunak tersebut. Pengaturan yang dapat dilakukan oleh penulis berupa pengaturan terhadap *Speed and Quality* yang berkaitan dengan waktu pembentukan objek beserta kualitas pembentukan, *Structures* berkaitan dengan struktur pembentuk objek, *Extrusion* berkaitan dengan pemuluran filamen dari gulungan filamen ke *extruder*, G-Codes berkaitan dengan pengaturan bahasa mesin yang digunakan untuk membentuk suatu objek 3D, dsb. Setelah pengaturan telah selesai dilakukan barulah penulis mendapatkan informasi mengenai estimasi waktu pembentukan, jumlah lapisan pembentuk objek, jumlah garis-garis filamen pembentuk objek, serta panjang filamen yang

dibutuhkan dan akhirnya penulis siap untuk melakukan pembentukan objek menggunakan 3D printer.

Sejak tahun 2010, Grup ASTM (*American Society for Testing and Materials*) F42 – *Additive Manufacturing* menyusun beberapa standar sebagai parameter klasifikasi beberapa jenis proses *Additive Manufacturing*^[1], yaitu :

1. *Vat Photopolymerisation*

Proses pembentukan objek 3D menggunakan sebuah kontainer berisi resin *photopolymer* yang dikeraskan menggunakan sinar UV. Teknologi yang umumnya digunakan pada proses ini adalah Stereolithography (SLA).

2. *Material Jetting*

Proses yang meneteskan material filamen yang meleleh melalui sebuah nozzle dengan diameter lubang cukup kecil, proses ini serupa dengan proses pencetakan pada printer kertas inkjet. Akan tetapi, pengeprintan dilakukan lapisan demi lapisan untuk membentuk objek 3D dan selanjutnya perlu dikeraskan menggunakan sinar UV.

3. *Binder Jetting*

Proses ini membutuhkan dua jenis material yaitu bubuk dan cairan pengikat. Pada ruangan pembentukan objek, bubuk disebar merata disetiap lapisan pembentukan sembari direkat menggunakan cairan pengikat yang diberikan menggunakan sebuah *jet nozzles*. Cairan pengikat tersebut merekat material bubuk yang digunakan sesuai dengan bentuk dari desain objek 3D. Setelah proses pembentukan selesai, bubuk yang tersisa dapat digunakan pada proses pembentukan objek selanjutnya.

4. *Material Extrusion*

Teknologi yang umumnya digunakan pada proses ini adalah FDM (*Fused Deposition Modelling*). FDM menggunakan filamen plastik atau benang metal yang tergulung pada suatu gulungan yang diulur

dan dihubungkan ke *extrusion nozzle*. *Extrusion nozzle* melelehkan material pembentukan objek 3D dan bergerak pada sumbu horizontal maupun vertikal berdasarkan mekanisme kontrol numerik yang secara langsung dikontrol oleh CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) seperti Repetier Host. Objek 3D dibentuk dari lelehan material dari *extrusion* yang disusun membentuk lapisan demi lapisan pembentuk objek 3D dan mengeras setelah mendingin akibat temperatur ruangan yang lebih rendah dibanding temperatur lingkungan sekitar.

5. *Powder Bed Fusion*

Teknologi pada proses ini adalah SLS (*Selective Laser Sintering*) yang menggunakan laser berkekuatan tinggi untuk melebur partikel-partikel kecil seperti bubuk plastik, metal, keramik, atau kaca menjadi sebuah objek tiga dimensi. Laser meleburkan material bubuk secara selektif dengan melakukan pemindaian setiap lapisan datar atau horizontal pada *bed* sesuai dengan desain dari program 3D *modelling*. Setelah setiap lapisan selesai dipindai, *bed* diturunkan setiap sebuah lapisan terbentuk sehingga material bubuk yang dilebur dapat mengisi lapisan diatas lapisan yang sudah terbentuk sampai seluruh objek 3D selesai terbentuk.

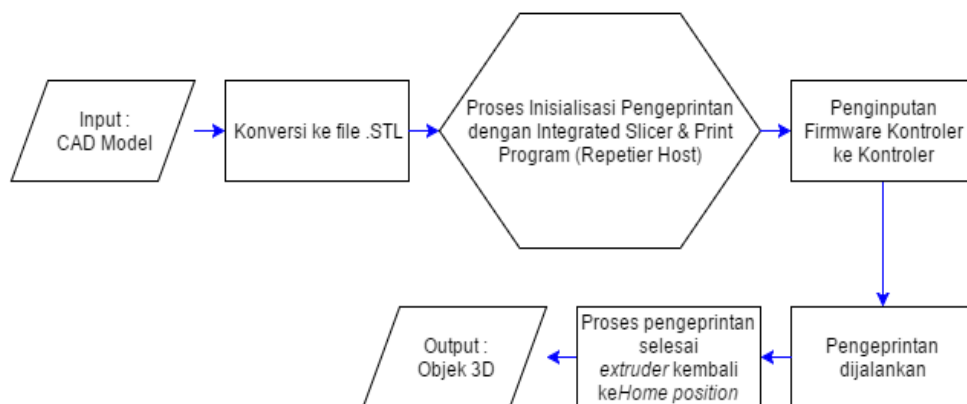
6. *Sheet Lamination*

Sheet Lamination menggunakan material berbentuk lembaran yang direkat menggunakan perekat. Lembaran tersebut dapat berupa lembaran metal, kertas ataupun polimer. Lembaran metal dapat direkat dengan dilas menggunakan pengelasan ultrasonik untuk membentuk sebuah lapisan pembentuk dan selanjutnya dibentuk sesuai desain CAD menggunakan mesin CNC. Lembaran kertas ataupun polimer dapat juga digunakan lalu direkat menggunakan lem perekat dan dipotong menggunakan pemotong yang memiliki presisi cukup tinggi.

7. *Directed Energy Deposition*

Proses ini umumnya digunakan pada *high-tecnology metal industry* dan pada manufaktur masal. Peralatan 3D printer seperti *nozzle* yang mengeluarkan bubuk metal atau benang pada *bed* yang dilelehkan oleh sebuah sumber energi (laser, berkas elektron, atau plasma) umumnya dipasang pada lengan robot *multi-axis* sehingga dapat bergerak secara leluasa membentuk sebuah objek 3D sesuai dengan desain CAD.

Berdasarkan klasifikasi dari Grup ATSM F42-*Additive Manufacturing* maka 3D Printer Robori Mendel termasuk dalam kategori 3D printer yang menggunakan proses *material extrusion* FDM (*Fused Deposition Modelling*). Pertimbangan penulis menggunakan 3D printer dengan proses *material extrusion* adalah dari sisi kemudahan penggunaan, daya listrik yang digunakan lebih rendah, penyimpanan material pembentukan objek 3D yang digunakan lebih mudah dibanding proses lainnya dan mudah dicari di Indonesia.



Gambar 2.1. *Flowchart* pembentukan objek pada 3D printer

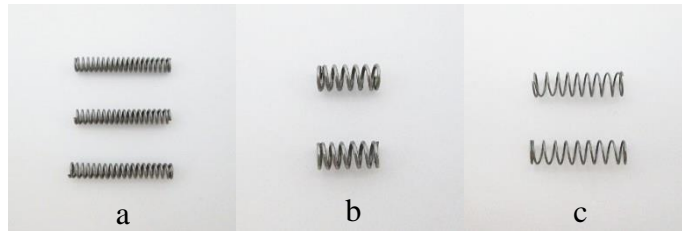
2.1.2 3D Printer Robori Mendel

Dari sekian banya versi 3D printer yang ada di pasaran, penulis memilih menggunakan 3D printer versi Robori Mendel dengan basis desain RepRap Mendel. Rangka 3D printer didesain berbentuk segitiga untuk mendapatkan rangka yang kokoh pada ketiga sumbunya. Robori Mendel juga sudah dilengkapi heat bed untuk mengantisipasi printing yang gagal akibat *warping* atau objek terlepas dari permukaan *bed*. Dengan menggunakan *bowden extruder* maka pergerakan *hot end* 3D printer menjadi lebih leluasa dan lebih ringan karena *hot end* terpisah dengan motor stepper pengulur filamen yang umumnya digabung pada beberapa versi 3D printer dengan *direct extruder* sehingga mengurangi beban pada motor stepper penggerak *hot end*. Adanya LCD *Controller* dengan slot SD *card* mendukung penulis untuk melakukan *standalone printing* (pembentukan objek tanpa komputer). Untuk spesifikasi lengkap dari 3D Printer Robori Mendel terdapat di bagian lampiran. Pada bagian ini, penulis akan menjelaskan 3D Printer Robori Mendel yang terdiri dari beberapa bagian penyusun 3D printer tersebut yang dapat dibagi menjadi tiga kelompok yaitu mekanik, elektrik, dan *programming*. Berikut adalah penjelasan mengenai bagian-bagian mekanik 3D printer :

- Struktur penyangga
Struktur penyangga 3D printer terbuat dari batang alumunium berbentuk silinder yang dirangkai satu sama lain dengan sambungan yang terbuat dari bahan PLA. Bentuk dari struktur penyangga 3D Printer Robori Mendel berbentuk seperti segitiga jika dilihat dari sisi samping. Tujuan dari bentuk struktur penyangga seperti itu adalah untuk mendapatkan rangka yang kokoh pada ketiga sumbunya.
- Struktur sumbu gerak
Struktur sumbu gerak 3D printer merupakan sumbu tempat PCB *Heat Bed* dan *Hot End* bergerak. Berbentuk silinder dengan ulir dan terbuat dari alumunium membuat pergerakan kedua bagian 3D printer tersebut menjadi lebih halus dan stabil.

- Pegas

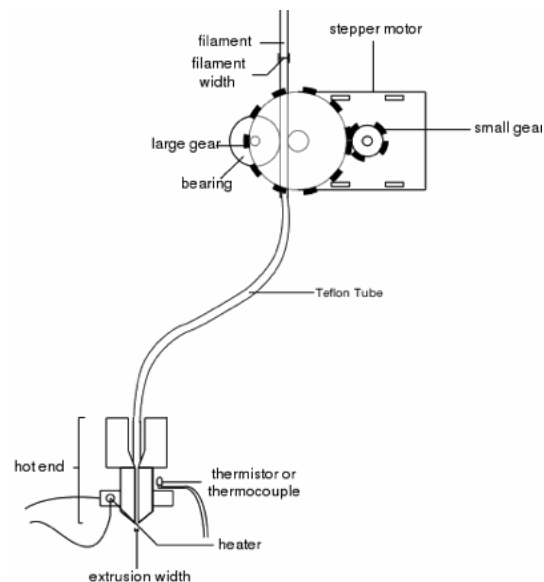
Pegas pada 3D printer ditempatkan pada *heat bed* sebagai peredam terhadap tekanan nozzle yang mengeluarkan lelehan filamen. Selain dipasang di *heat bed*, *extruder* dan sumbu Z juga memiliki pegas dengan fungsi untuk *filament adjuster* pada *extruder* dan sambungan sumbu Z pada 3D printer.



Gambar 2.2. Pegas untuk *heat bed* (a), *extruder* (b), sumbu Z (c)

- *Extruder*

Dengan desain Bowden *Extruder* dimana *hot end* dan *extruder* terpisah sehingga pergerakan *hot end* menjadi lebih ringan dan cepat serta mendukung peningkatan kualitas cetak objek 3D maka 3D Printer Robori Mendel menggunakan *extruder drive gear MK7* sebagai penggerak filamen.



Gambar 2.3. Diagram Bowden Extruder^[2]

- *Timing Belt*

Timing Belt berfungsi sebagai penggerak sumbu X dan sumbu Y 3D printer. *Timing Belt* adalah GT2 dengan desain khusus untuk gerakan linear dengan profil gigi bulat sehingga gigi-gigi pada *belt* dan *pulley* menyatu pas di kedua sisi pada saat beroperasi. Desain tersebut untuk mencegah terjadinya *backlash* saat *belt* bergerak berbalik arah yang pada akhirnya menghasilkan hasil cetak yang lebih presisi.



Gambar 2.4. *Timing Belt* GT2

- *Pulley*

Pulley berfungsi sebagai media pergerakan *timing belt* dalam rangka memberikan pergerakan sumbu yang presisi untuk arah maju maupun mundur. *Pulley* yang digunakan memiliki diameter lubang as sebesar 5 mm dan sesuai untuk dipasang pada motor stepper NEMA 14 dan NEMA 17 yang umum digunakan pada 3D printer dengan basis desain RepRap.



Gambar 2.5. *Pulley* GT2

- *PTFE Tube*

PTFE atau Polytetrafluoroethylene merupakan bahan plastik sintetik yang tahan terhadap temperatur tinggi, non-reaktif, dan tidak melekat dengan bahan cair. PTFE *tube* dengan diameter luar sebesar 3 mm digunakan pada dua lokasi di 3D printer, yaitu :

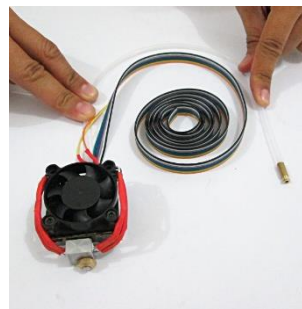
1. Penyambung lintasan filamen dari *extruder* ke *hot end* untuk 3D printer yang menggunakan *extruder* dan *hot end* terpisah.
2. Tabung pelapis di dalam *nozzle hot end* yang berfungsi mencegah filamen melebur sebelum mencapai ujung *nozzle*.



Gambar 2.6. PTFE Tube

- *Hot End*

Hot End merupakan media pemanas filamen pada 3D printer sehingga pada pemasangannya disertai dengan *power resistor* sebagai media pembangkit panas *hot end*.



Gambar 2.7. Hot End

- *Nozzle*

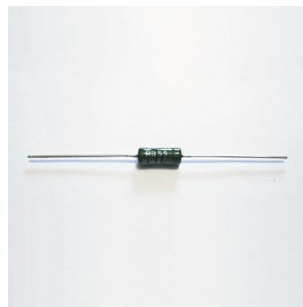
Nozzle sebagai media keluaran lelehan filamen memiliki lubang keluaran sebesar 0.3 mm dan terbuat dari bahan *stainless steel* sehingga cocok untuk filamen berdiameter 1.75 mm.

Gambar 2.8. *Nozzle*

Selanjutnya akan dijelaskan bagian-bagian elektrik dari 3D printer :

- *Power Resistor*

Power resistor berfungsi sebagai pembangkit panas pada *hot end* untuk melelehkan filamen. Dengan menggunakan *power* resistor tipe wirewound maka proses pembangkitan panas dapat berlangsung cepat didukung dengan lapisan enamel di permukaan bodi resistor yang memberikan ketahanan material untuk beroperasi pada temperatur tinggi.

Gambar 2.9. *Power Resistor*

- *PCB Heat Bed*

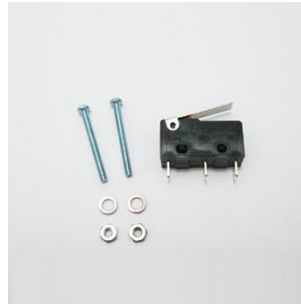
Permukaan cetak objek 3D yang dilengkapi *heat bed* mengurangi kemungkinan hasil cetak yang gagal, baik karena *warping* (bagian dasar objek yang paling pinggir melengkung) maupun *curling* (bagian objek yang lapisan pembentuknya terlihat bergelombang) di lapisan pertama objek 3D. Dilengkapi dengan thermistor maka *heat bed* dapat diatur temperaturnya sesuai dengan spesifikasi material filamen yang digunakan untuk mencegah *warping* dan *curling*.



Gambar 2.10. PCB Heat Bed

- *Microswitch*

Microswitch berfungsi sebagai *mechanical end stop* sumbu, X, Y, dan Z pada 3D printer sehingga motor stepper pada ketiga sumbu tersebut mendapatkan informasi bahwa posisi mereka telah mencapai titik nol pada sumbu masing-masing.



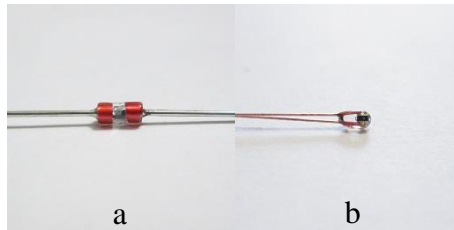
Gambar 2.11. Microswitch

- Thermistor

Thermistor pada 3D Printer Robori Mendel digunakan pada dua lokasi yaitu :

1. Pada *hot end*, thermistor berfungsi sebagai sensor temperatur *hot end* dimana data pengukuran tersebut dijadikan sebagai masukan bagi kontroler 3D printer dalam menjaga *hot end* pada temperatur yang telah ditentukan. Thermistor yang digunakan pada *hot end* adalah tipe NTC *axial lead* 100 kilo ohm untuk menyesuaikan dengan pemasangan pada *heater block* yang merupakan bagian dari *hot end*.

2. Pada *heat bed*, thermistor yang digunakan adalah tipe NTC *glass bead* 10 kilo ohm dengan sensitivitas tinggi sehingga dapat menjadi solusi yang tepat untuk sensor temperatur *heat bed* 3D printer. Bentuk fisik yang kecil dan kaki yang fleksibel menjadikan thermistor ini cocok dipasang pada bagian bawah *heat bed* dengan mudah.



Gambar 2.12. Thermistor NTC untuk *Hot End* (a) dan *Heat Bed* (b)

- Motor Stepper

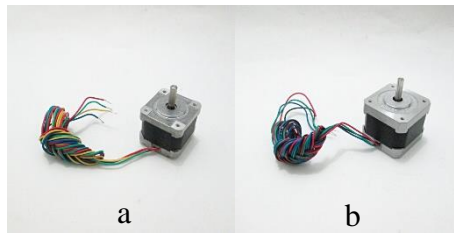
Stepper motor sebagai aktuator pada 3D printer terbagi menjadi dua jenis yang digunakan pada 3D Printer Robori Mendel, yaitu :

1. NEMA 14

Motor Stepper NEMA 14 digunakan pada *extruder* untuk mendorong filamen ke *hot end*. Putaran motor stepper yang dapat diprogram dengan ketelitian tinggi mengakomodasi konfigurasi cetak pada berbagai kecepatan sesuai kompleksitas objek. *Holding Torque* pada motor stepper ini adalah sebesar 1.6 kg cm.

2. NEMA 17

Motor Stepper NEMA 17 digunakan sebagai penggerak sumbu X, Y, dan Z untuk dapat memberikan torsi tinggi tanpa membebani kerja motor secara berlebihan. Putaran motor stepper yang dapat diprogram dengan ketelitian tinggi mengakomodasi pengguna untuk membuat konfigurasi cetak pada berbagai kecepatan sesuai kompleksitas objek. *Holding Torque* pada motor stepper ini adalah sebesar 4 kg cm.



Gambar 2.13. Motor Stepper NEMA 14 (a) dan NEMA 17 (b)

- LCD Display

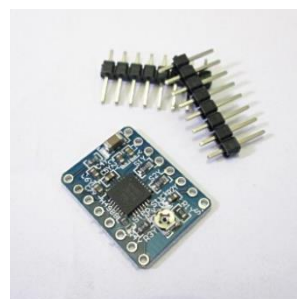
LCD Display berfungsi sebagai *interface* bagi pengguna 3D printer untuk menyeleksi file gcode mana yang ingin digunakan dalam rangka mencetak objek 3D sehingga proses pencetakan dapat dilakukan secara *standalone* tanpa menggunakan laptop dengan syarat sudah ada file gcode objek 3D yang akan dicetak pada SD Card yang terpasang di 3D printer.



Gambar 2.14. LCD Display

- Driver Motor Stepper

Driver Motor Stepper yang digunakan adalah A4988 atau Stepstick yang merupakan clone dari *stepper driver* Pololu dengan rancangan desain untuk mengontrol motor stepper bipolar dengan kebutuhan arus maksimum 1A per koil.



Gambar 2.15. Driver Motor Stepper

- RAMPS

RAMPS merupakan singkatan dari RepRap Arduino Mega Pololu Shield didesain sebagai kontroler 3D printer modular. RAMPS dipasang pada kontroler utama yaitu Arduino Mega 2560 untuk mengontrol X, Y, Z dan *extruder* 3D printer. Desain yang modular menjamin perawatan dan penggantian komponen yang mudah serta kemampuan upgrade yang luas. *Board* ekspansi Arduino lainnya dapat ditambahkan ke sistem sepanjang *board* RAMPS ditempatkan pada posisi paling atas. *Board* RAMPS 1.4 yang digunakan merupakan produksi dari SainSmart.



Gambar 2.16. SainSmart RAMPS 1.4

Terakhir adalah bagian *programming* dari 3D printer :

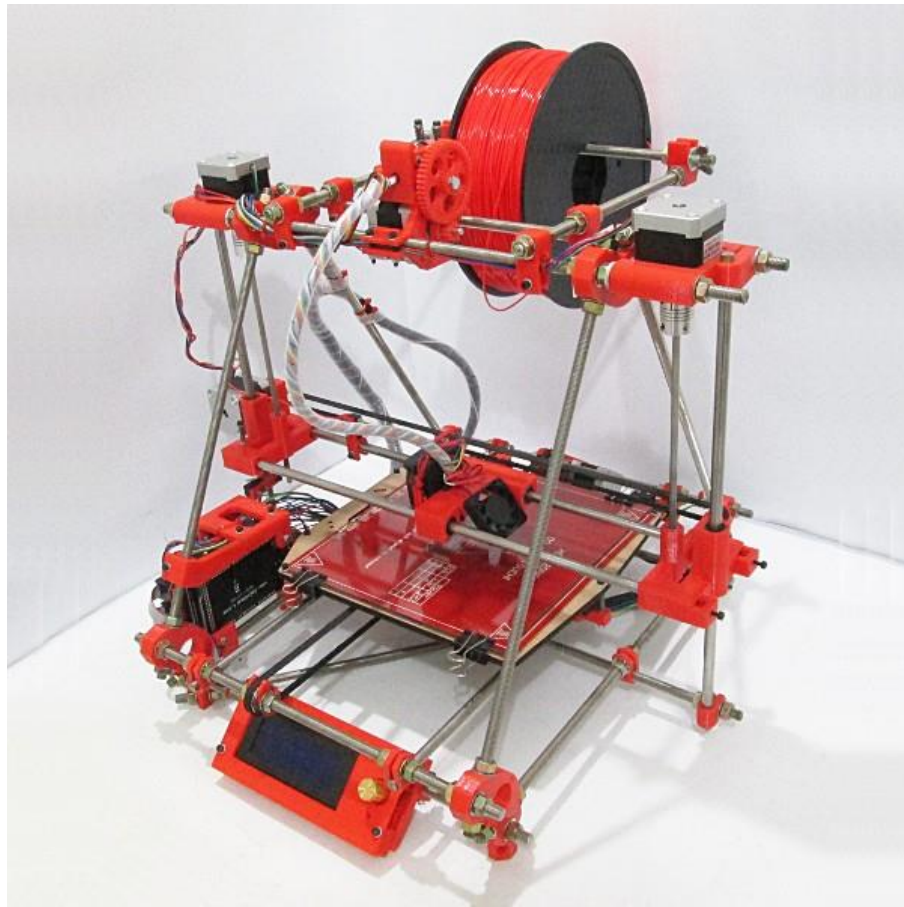
- Kontroler 3D Printer

Kontroler utama 3D Printer Robori Mendel adalah *board* Arduino Mega 2560 yang merupakan sebuah *board* mikrokontroler dengan prosesor ATmega2560 yang berjalan pada kecepatan 16 Mhz. Memori flash sebesar 256 KB menjamin ruang yang cukup untuk menampung semua firmware yang umum digunakan di 3D printer.



Gambar 2.17. SainSmart Mega 2560 R3

Jika seluruh komponen di atas dirakiti menjadi satu kesatuan maka akan terbentuk sebuah 3D Printer seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.18. 3D Printer Robori Mendel

2.1.3 Material Filamen 3D Printer

Material filamen 3D printer terbagi menjadi beberapa jenis berdasarkan material pembuatannya dan karakteristik filamennya^[2], yaitu :

- Filamen Standar

1. PLA (Polylactic Acid)

PLA (Polylactic Acid) adalah salah satu dari dua jenis filamen yang umum digunakan pada 3D printer karena keuntungannya yaitu bau yang kurang menyengat, kecil kemungkinan untuk terjadinya pelengkungan pada sisi pinggir objek 3D, dan tidak terlalu signifikan membutuhkan heat bed. Plastik PLA adalah salah satu dari sekian banyak

material filamen yang ramah lingkungan karena terbuat dari sumber energi terbarukan (tepung pati jagung) dan memerlukan energi lebih kecil dibanding energi yang dibutuhkan untuk memproduksi plastik tradisional (petroleum-based plastics). Plastik PLA umumnya digunakan pada tempat penyimpanan makanan seperti bungkus permen dan biodegradable medical implants.

2. ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) adalah salah satu dari dua jenis filamen yang umum digunakan pada 3D printer selain PLA. Material ini sangat cocok digunakan untuk membuat sebuah objek yang dapat bertahan terhadap temperatur tinggi. Dibanding PLA, plastik ABS tidak segetas PLA. Material ini juga dapat dilapisi aseton untuk mendapatkan hasil yang mengkilat. Namun, material ini menuntut adanya heat bed pada 3D printer karena plastik ABS akan berkontraksi ketika mengalami penurunan temperatur.

3. PRO Series PLA

PRO Series PLA adalah filamen PLA yang dibuat untuk produksi objek 3D dengan level produksi profesional dan berkualitas tinggi. Material ini dapat dibedakan dengan mudah warnanya, warna lebih cerah, pewarnaan yang tembus cahaya dibanding PLA biasa.

4. PRO Series ABS

PRO Series ABS dibuat untuk menghasilkan objek 3D dengan hasil lebih cantik, memiliki warna yang tembus cahaya. Material ini sangat cocok digunakan untuk pencetakan objek yang menuntut kualitas kepresisian yang tinggi. Sama seperti filamen ABS biasa, objek 3D PRO

Series ABS dapat bertahan terhadap temperatur tinggi dibanding PLA.

5. Nylon (Polyamide)

Nylon adalah material yang sangat kuat, berdaya tahan tinggi, dan dapat beradaptasi terhadap lingkungan. Fleksibel walau tipis tetapi dengan perekat yang sangat kuat untuk daerah antar lapisan. Hasil cetak filamen nylon memiliki warna secerah cahaya natural pada warna putih dengan permukaan yang dapat melewatkan cahaya. Filamen nylon sangat sensitif terhadap kelembaban maka dibutuhkan tempat penyimpanan kering selama penyimpanan dan juga pada saat setelah selesai melakukan pencetakan.

6. PET (*Polyethylene Terephthalate*)

PET (*Polyethylene Terephthalate*) adalah filamen dengan kekuatan skala industri dengan beberapa kelebihan. Kekuatannya lebih tinggi dibanding PLA, dan sudah disetujui oleh FDA (Food and Drug Administration) Amerika Serikat sebagai bahan untuk pembuatan tempat makan dan peralatan makan. Material ini tidak melengkung dan tidak memproduksi bau menyengat ketika proses pencetakan sedang berlangsung. Filamen PET memang tidak dapat terbiodegradasi tetapi 100% dapat didaur ulang. Filamen PET terkenal sebagai filamen yang bersih warnanya dan sangat bagus untuk *bridging* pada objek cetak 3D printer.

- Filamen Fleksibel

1. TPE

Filamen TPE adalah salah satu material cetak 3D printer yang memiliki karakteristik fleksibel seperti karet. TPE dapat digunakan untuk membuat objek 3D yang dapat

melengkung atau menuntut adanya fleksibilitas untuk ditempatkan di lingkungannya seperti sabuk, pegas, *phone case*, dll. Objek 3D yang terbuat dari material TPE akan memiliki karakteristik seperti karet yang lebih fleksibel dan elastis dibanding menggunakan material filamen *Soft PLA*.

2. *Soft PLA (Polylactic Acid)*

Filamen *Soft PLA* dikenal juga sebagai PLA fleksibel sangat berguna untuk mencetak suatu objek 3D yang dapat melengkung atau fleksibel.

3. TPU (*Thermoplastic Polyurethane*)

Filamen TPU memiliki karakteristik elastis, tahan terhadap minyak, dan *abrasion resistance* jika dibuat dengan metode Shore Hardness 95A. Aplikasi filamen TPU adalah panel instrumen di otomotif, roda *caster*, peralatan olahraga, peralatan medis, sabuk mengemudi, *phone case*, dll.

- Filamen Komposit

1. LAYBRICK

Filamen LAYBRICK dapat memberikan objek 3D warna dan tampilan seperti batu berwarna abu-abu tetapi memiliki sifat seperti plastik sehingga cocok digunakan untuk mendesain suatu model arsitektur. Pada area bawah dari *range* temperatur di 165°C – 190°C maka hasil cetakan akan lunak, sedangkan pada area atas dari *range* tersebut maka objek 3D akan memiliki permukaan kasar seperti tekstur berpasir.

2. LAYWOO-D3

LAYWOO-D3 adalah filamen yang memiliki tampilan seperti kayu sehingga memiliki karakteristik dapat dipotong dan dicat. LAYWOO-D3 terbuat dari kombinasi kayu dengan perekat polimer yang membuat material ini dapat dilelehkan oleh 3D printer. Selain itu, dimungkinkan juga agar objek 3D dengan filamen LAYWOO-D3 memiliki

warna kayu yang terang ataupun gelap dengan memvariasikan temperatur *hot end* selama proses pencetakan berlangsung.

3. Conductive ABS

Conductive ABS adalah modifikasi dari filamen ABS sehingga memiliki tahanan 1200 ohm/cm.

4. LayCeramic

LayCeramic dapat digunakan untuk membuat objek keramik. Karakteristik filamen ini adalah dapat dibakar untuk memberikan efek *glossy* dan meningkatkan kekuatan. Akan tetapi, 3D printer perlu dilengkapi *full metal hot end* untuk menggunakan filamen ini.

5. Carbon Fiber Reinforced PLA

Carbon Fiber Reinforced PLA memberikan kekuatan struktur yang mengagumkan dan kerekatan antar lapisan yang sangat baik. Dengan adanya carbon fiber yang terkandung didalam filamen maka objek 3D yang dibuat memiliki sifat kaku yang lebih dibanding menggunakan filamen PLA. Filamen ini biasa di aplikasikan pada objek 3D yang tidak membutuhkan fleksibilitas seperti rangka, baling-baling, dan beberapa bagian *drone*. Carbon fiber di filamen didesain sekecil mungkin agar muat melewati *nozzle* tetapi cukup panjang untuk menyediakan sifat kaku pada objek 3D.

6. Steel PLA

Steel PLA merupakan filamen yang memiliki campuran steel fiber dengan plastik sehingga proses pencetakan menjadi lebih berat namun autentik. Objek 3D yang dibuat dapat di polish untuk menciptakan objek 3D yang unik. Jika tidak di polish maka objek 3D akan terlihat seperti terbuat dari metal yang dibentuk menggunakan cetakan. Steel PLA digunakan

untuk membuat perhiasan, kostum, *action figures*, dan bagian dari robot.

7. Magnetic Iron PLA

Magnetic Iron PLA dapat digunakan untuk membuat objek 3D yang memiliki sifat magnet. Untuk mencetak menggunakan filamen ini maka temperatur *hot end* perlu diatur agar 10-20 derajat lebih rendah dibanding temperatur pada saat mencetak menggunakan filamen PLA. Untuk mendapatkan tampilan karat maka objek 3D dapat dipolish lalu digosok dengan sikat untuk melepaskan partikel besi sebelum direndam di larutan garam selama 2-3 hari.

8. Fill Series

Fill Series (BronzeFill, BrassFill, CopperFill, WoodFill, BambooFill, dll) adalah material organik atau material mentah yang dijadikan filamen dengan komposisi 80% PLA dan 20% material. *Metal based fill* seperti BrassFill dapat dipolish agar terlihat seperti metal pada umumnya.

9. Lay-Felt

Lay-Felt adalah filamen dengan sejumlah pori-pori. Material ini terbuat dari *rubber-elastomeric polymer* dan PVA. Filamen ini dapat larut di air sehingga ketika dicelupkan ke air maka PVA akan menghilang dan *rubber polymer* akan terbentuk sebagai objek mikro pori. Lay-Felt sangat tepat digunakan untuk membuat saringan, membran 3D, membran semipermeable, dll.

10. Gel-Lay

Gel-Lay adalah material yang berbentuk seperti jelly tetapi memiliki pori-pori. Material ini terbuat dari *rubber-elastomeric polymer* dan PVA sehingga dapat larut di air. Jika filamen ini dicelupkan di air maka material PVA akan hilang sehingga menyisakan sisa *rubber polymer* sebagai

objek mikro pori. Gel-Lay sangat cocok digunakan untuk membuat bagian tubuh manusia artifisial atau buatan, binatang laut buatan seperti gurita, dll.

11. LAY-FOMM 60

LAY-FOMM 60 terbuat dari *rubber-elastomeric polymer* dan PVA sehingga dapat larut di dalam air. Filamen ini sangat lunak dan memiliki *shore hardness* A60. LAY-FOMM 60 memiliki karakter seperti busa yang berpori-pori. Aplikasi dari filamen ini adalah objek berbentuk busa, tempat penyimpanan tinta, bio sel, *micro-foam*, dll.

12. LAY-FOMM 40

LAY-FOMM 40 memiliki karakteristik dan aplikasi yang sama dengan LAY-FOMM 60. Perbedaannya hanya terletak di *shore hardness* yang digunakan yaitu A40.

- Filamen Spesial

1. Polycarbonate

Polycarbonate (PC) adalah material yang kuat dan tahan terhadap benturan sehingga digunakan untuk membuat kaca anti peluru. Polycarbonate memiliki kekuatan sangat tinggi merupakan thermoplastic material yang tahan terhadap pengaruh temperatur lingkungan. Material ini dapat dibengkokkan atau di *press* tanpa menimbulkan retakan.

2. Bendlay

Bendlay adalah filamen dengan tingkat melewatkan cahaya sebesar 91% dan juga fleksibel. Bendlay adalah hasil modifikasi dari Butadiene sehingga aman digunakan untuk pembuatan peralatan rumah tangga dan alat makan. BendLay menyerap lebih sedikit uap air dibanding ABS sehingga secara signifikan mengurangi kemungkinan *warping*.

3. Moldlay

MoldLay adalah material khusus untuk membuat suatu cetakan. MoldLay dapat meleleh dengan mudah dengan sedikit residu. Secara struktur, MoldLay tidak akan memiliki kemungkinan untuk *warping* sehingga penggunaanya akan mendapatkan cetakan sesuai dengan desain yang diinginkan.

- Filamen *Support*

1. PVA (*Polyvinyl Acetate*)

Filamen PVA memiliki sifat dapat melewati cahaya dan sedikit berwarna kuning serta biasanya digunakan sebagai material *support* karena dapat larut dalam air. PVA digunakan pada 3D printer yang memiliki 2 *extruder* dimana satu *extruder* mengeluarkan filamen yang berperan sebagai material cetak utama seperti PLA atau ABS dan *extruder* kedua berperan mengeluarkan PVA sebagai *support structure* dari objek 3D yang akan dibentuk.

2. High Impact Polystyrene

High Impact Polystyrene (HIPS) memiliki kemiripan dengan ABS. Perbedaannya terletak pada HIPS menggunakan Limonene sebagai pelarut. HIPS merupakan salah satu pilihan pengguna 3D printer yang memiliki dua *extruder* dan ingin membuat objek 3D dengan dukungan *support structure*.

Tabel 2.1. Material Filamen 3D Printer

Kategori	Material Filamen	Printer Settings		
		Extruder Temperature (°C)	Bed Temperature (°C)	Bed Adhesion
Standar	PLA	180-220	20-55	Blue Painters Tape

	ABS	220-235	80-110	Kapton Tape
	PRO Series PLA	185-210	20-55	Blue Painters Tape
	PRO Series ABS	230-240	60-80	Kapton Tape
	Nylon	235-270	60-80	PVA Based Glue
	PET	210-255	55	Blue Painters Tape
Fleksibel	TPE	210-225	20-55	Blue Painters Tape
	Soft PLA	220-235	20-55	Blue Painters Tape
	TPU	240-260	40-60	Blue Painters Tape
Komposit	LAYBRICK	180-200	20-55	Blue Painters Tape
	LAYWOO-D3	175-250	30	Blue Painters Tape
	Conductive ABS	225-260	90-110	Kapton Tape
	LayCeramic	260-275	20-55	Blue Painters Tape
	Carbon Fiber Reinforced PLA	195-220	50	Blue Painters Tape
	Steel PLA	195-220	50	Blue Painters Tape
	Magnetic Iron PLA	185	20-55	Blue Painters Tape
	Fill Series	190-210	20-55	Blue Painters Tape

	Lay-Felt	225-235	20-55	Blue Painters Tape
	Gel-Lay	225-235	20-55	Blue Painters Tape
	LAY-FOMM 60	220-230	40-60	Blue Painters Tape
	LAY-FOMM 40	220-230	40-60	Blue Painters Tape
Spesial	Polycarbonate	270-310	90-105	Glue Stick
	BendLay	210-240	20-55	Blue Painters Tape
	MoldLay	170-180	20-55	Blue Painters Tape
Support	PVA	170-190	45	Blue Painters Tape
	High Impact Polystyrene	220-230	50-60	Kapton Tape

2.2 3D Printer Acuan

Dalam pengerjaan penelitian ini, penulis meneliti beberapa 3D printer baik yang merupakan produk pabrikan atau perseorangan sebagai bahan acuan dalam pembuatan 3D printer untuk penelitian. Berikut adalah beberapa 3D printer yang dijadikan sebagai acuan oleh penulis, yaitu :

1. MakerBot Z18

MakerBot Z18 adalah 3D printer untuk kelas profesional dengan dimensi bangun objek 3D mencapai 30x40x45.7 cm dengan resolusi lapisan 100-200 mikron. MakerBot Z18 menggunakan teknologi pencetakan objek *Fused Deposition Modelling*. Dengan adanya Smart Extruder+, MakerBot Z18 dapat lebih mudah mengganti *extruder* dengan mudah. Fitur lainnya adalah *extruder* mampu mendeteksi ketiadaan filamen pada PTFE *tube* sehingga secara otomatis

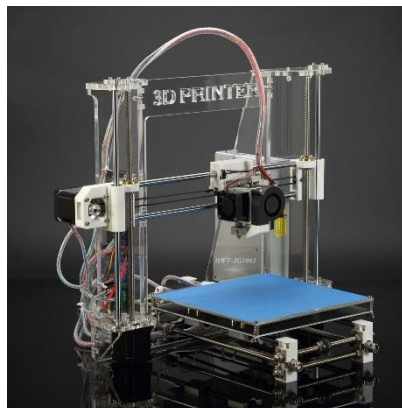
menghentikan sementara proses pencetakan dan mengirim peringatan ke *software* MakerBot Desktop dan MakerBot Mobile. Pada MakerBot Z18, yang bergerak adalah *heat bed* yang naik turun menyesuaikan tinggi objek yang dibentuk sedangkan *extruder* hanya bergerak pada sumbu X dan Y. Fitur “Set Pause Height” memungkinkan pengguna untuk menghentikan sementara proses pencetakan pada ketinggian objek tertentu yang telah ditentukan. Fitur tersebut sangat berguna terutama ketika pengguna ingin mencetak objek 3D dengan warna yang berbeda pada ketinggian tertentu. Ditambah dengan keberadaan On-Board Camera dengan resolusi 320x240 maka pengguna 3D printer ini dapat memantau secara langsung jalannya proses pengepintan via jaringan internet dalam bentuk foto melalui *software* MakerBot Desktop atau aplikasi MakerBot Mobile selama 3D printer MakerBot Z18 terhubung dengan jaringan internet. Proses kalibrasi kedataran *heat bed* juga masih dilakukan secara manual dengan memutar keempat kenop *heat bed* ketika *extruder* tepat berada di atas kenop tersebut selama proses “Leveling the Build Plate” sedang dijalankan. Walaupun dilakukan secara manual tetapi pemutaran kenop untuk mendatarkan *heat bed* dibantu dengan adanya indikator LED yang akan menyala kelap-kelip menunjukkan bahwa kenop tersebut tidak perlu lagi diputar karena *heat bed* sudah datar pada titik tersebut. 3D Printer ini mampu melakukan pencetakan secara *standalone* menggunakan SD Card ataupun dengan terhubung komputer pengguna.



Gambar 2.19. MakerBot Z18^[3]

2. Aurora Z605

Aurora Z605 adalah 3D printer untuk pemula, produksi Shenzhen Aurora Technology. 3D Printer ini menggerakkan *heat bed* pada sumbu Y dan *extruder* pada sumbu X dan Z. Dimensi objek 3D yang dapat dicetak adalah 20x20x18 cm. 3D printer ini mampu mencetak objek dengan ketebalan lapisan berkisar antara 0.1-0.4 mm. Dengan adanya slot SD Card maka 3D printer ini mampu melakukan pencetakan objek secara *standalone* tetapi masih perlu menggunakan komputer untuk memilih file gcode objek apa yang akan dicetak mengingat bahwa 3D printer ini tidak memiliki layar LCD. Tidak adanya fitur “pause” menyebabkan 3D Printer ini tidak dapat menghentikan sementara proses pencetakan objek 3D nya jika sudah dijalankan.



Gambar 2.20. Aurora Z605 3D Printer^[4]

3. CubePro

CubePro adalah 3D printer dari 3DSystems yang dibuat untuk kelas profesional. Ukuran objek 3D yang dapat dicetak mencapai 28.5x23x27 cm. Dengan desain *heat bed* yang bergerak pada sumbu Z dan *extruder* bergerak pada sumbu X dan Y saja maka proses pencetakan -dapat dilakukan dengan resolusi lapisan 70-300 mikron dalam waktu yang tidak terlalu lama. Jumlah *extruder* yang digunakan dapat dikonfigurasi sesuai kebutuhan mulai dari satu sampai tiga buah *extruder* dapat digunakan sesuai dengan kebutuhan pengguna. Dengan adanya *built in wifi*, pengguna dapat langsung memperbaharui *firmware* 3D printer ketika 3D printer terhubung dengan jaringan wifi secara langsung tanpa menggunakan komputer. Selain itu, dengan adanya wifi pada 3D printer maka komputer dapat terhubung secara nirkabel dengan 3D printer menggunakan koneksi jaringan ad hoc.

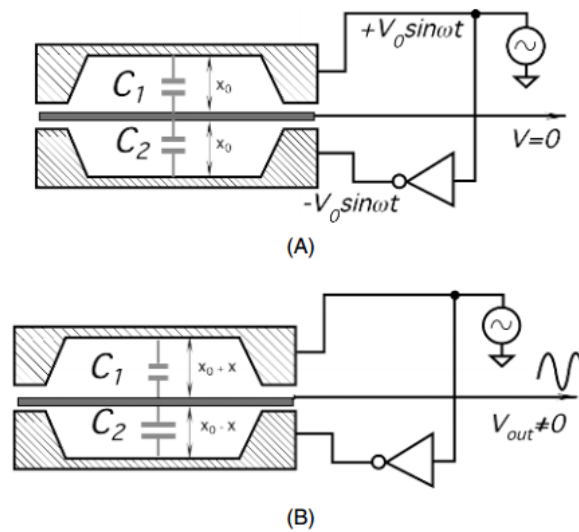


Gambar 2.20. CubePro 3D Printer^[4]

2.3 Electric Capacitive Type Proximity Sensor

Electric Capacitive Type Proximity Sensor adalah salah satu aplikasi dari sensor kapasitif yang dipergunakan untuk mengukur jarak. Prinsip kerja dari sensor ini adalah mengukur kapasitansi yang terdapat di antara dua buah lempengan kapasitor dimana kapasitansi tersebut berbanding terbalik dengan jarak antara lempengan^[6]. Dengan memanfaatkan perubahan jarak antar lempengan ataupun adanya material konduktif atau dielektrik yang

menyebabkan adanya perubahan kapasitansi antar lempengan maka perubahan tersebut dapat dikonversi menjadi variabel sinyal listrik.



Gambar 2.21. Prinsip kerja dari sensor kapasitif A-posisi seimbang; B-posisi tidak seimbang^[7]

Pada gambar 2.21. terdapat tiga plat dengan plat tengah yang diapit oleh dua buah kapasitor. Plat bawah dan tengah diberikan sinyal sinus dengan fase 180° . Dalam posisi seimbang, arus listrik yang melewati C_1 dan C_2 meniadakan tegangan satu sama lain. Jika di asumsikan plat tengah bergerak turun ke bawah sejauh x maka :

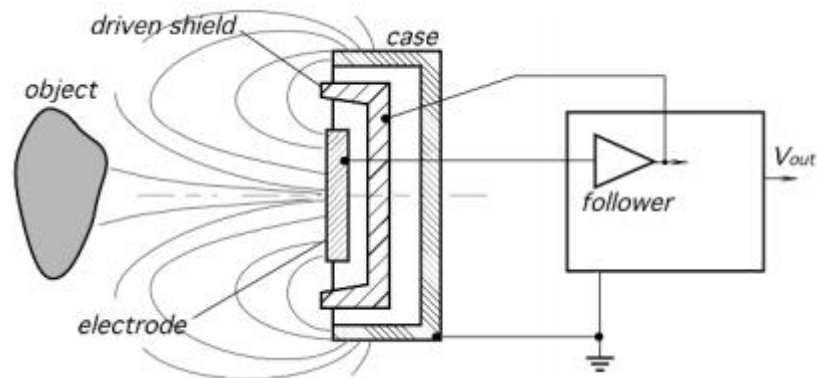
$$C_1 = \frac{\epsilon A}{x_0 + x} \quad \text{dan} \quad C_2 = \frac{\epsilon A}{x_0 - x} \quad (2.1)$$

dan sinyal dari plat tengah meningkat berbanding lurus dengan pergeserannya dan fase dari sinyalnya menunjukkan arah pergeseran plat tengah, ke bawah atau ke atas. Amplitudo dari sinyal keluaran plat tengah adalah :

$$V_{out} = V_0 \left(-\frac{x}{x_0 + x} + \frac{\Delta C}{C} \right) \quad (2.2)$$

Untuk meningkatkan sensitivitas dan mengurangi *fringing effect*, sensor kapasitif dapat dipasangkan *shield*. *Shield* tersebut membungkus sisi yang

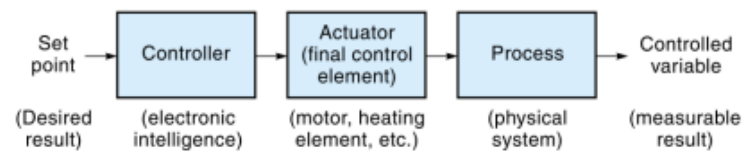
tidak bekerja dari elektroda. *Shield* diberikan tegangan sebesar tegangan yang terdapat di elektroda. Karena *shield* dan elektroda memiliki tegangan yang sefase dan memiliki besaran yang sama maka tidak akan ada medan listrik diantara *shield* dan elektroda dan seluruh komponen yang terbungkus oleh *shield*.



Gambar 2.22. *Shield* yang membungkus elektroda pada sensor kapasitif^[7]

2.4 Pengendalian Sistem

Pengendalian sistem terdiri atas beberapa bagian seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.23. Blok diagram sistem kendali^[8]

Berdasarkan blok diagram tersebut, diketahui bahwa dibutuhkan adanya suatu masukan berupa *Set point* yang merupakan target yang diinginkan untuk tercapai. Untuk mencapai *set point* maka dibutuhkan *controller* yang berisi kecerdasan elektronik buatan dimana *controller* akan mengendalikan aktuator atau dapat disebut sebagai *final control element* yang mengubah sinyal dari *controller* menjadi suatu aksi fisik. Bagian *process* akan bertugas untuk menjaga agar *set point* yang telah tercapai terjaga dari gangguan luar sehingga sistem tetap stabil. Pada bagian

controlled variable, terukurlah hasil yang tercapai oleh sistem dan dapat dibandingkan dengan *set point* untuk mengetahui seberapa besar error pada sistem pengendali tersebut.

Sistem kendali dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu *open loop* dan *closed loop*. Perbedaan dari kedua jenis sistem kendali tersebut terletak pada bagian *output*. Pada sistem kendali *closed loop*, *output* yang dihasilkan oleh sistem kendali terbaca oleh sensor. Hasil pembacaan tersebut dijadikan semacam *feedback* untuk *controller*. Dengan mengetahui *output* yang dihasilkan oleh sistem, *controller* dapat mengatur sistem agar dapat menjaga *output* sama ataupun mendekati *set point*. Selain itu, selisih antara *output* dengan *set point* dapat dijadikan acuan untuk menentukan seberapa besar nilai kesalahan dari suatu sistem kendali. Nilai kesalahan tersebut dapat dijadikan acuan untuk melakukan pengaturan ulang pada bagian *controller* agar sistem kendali hanya memiliki nilai kesalahan paling kecil yang dapat dihasilkan.^[7]

2.5 Pengendalian PID

Sistem kendali pada umumnya menggunakan kombinasi dari tiga jenis *feedback* yaitu *Proportional*, *Integral*, dan *Derivative Control*. Fondasi dari sistem tersebut adalah *proportional control*. *Integral control* berfungsi untuk menghilangkan *steady-state error* tetapi dapat meningkatkan tingkat *overshoot*. *Derivative control* dapat membuat sistem yang lamban bekerja lebih cepat dan mengurangi kecenderungan untuk *overshoot*. Sistem PID terbagi menjadi tiga jenis berdasarkan persamaan responnya yaitu Seri, Paralel, dan *Mixed*. Respon dari sistem PID paralel^[8] dapat ditulis dalam bentuk persamaan seperti dibawah ini :

$$D(s) = K \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] \quad (2.3)$$

$$K_I = \frac{1}{T_I} \quad (2.4)$$

$$K_D = T_D \quad (2.5)$$

dimana,

$D(s)$ = Output dari PID Controller

K = Proportional control gain

K_I = Integral control gain (seringkali ditulis $1/T_I$)

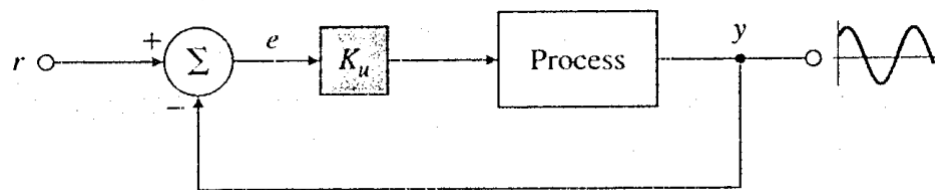
K_D = Derivative control gain (seringkali ditulis T_D)

T_I = Integral time constant

T_D = Derivative time constant

S = Time domain

Salah satu proses penting pada sistem kendali yang menggunakan PID Control adalah proses *tuning*. *Tuning* adalah proses iteratif dalam rangka mengatur ketiga konstanta yaitu *proportional*, *integral*, *derivative constant* berdasarkan aturan tertentu hingga tercapainya sistem kontrol dengan karakteristik yang diinginkan. Salah satu metode *PID Tuning* yang dikembangkan oleh Zieler dan Nichols adalah *ultimate sensitivity method*.^[8]



Gambar 2.24. Blok diagram proses penentuan penguatan dan periode *ultimate*^[9]

Ultimate Sensitivity Method adalah salah satu metode untuk menentukan pengaturan awal dari parameter PID suatu sistem kendali. Kriteria untuk menentukan besaran dari masing-masing parameter PID pada metode ini didasarkan pada hasil evaluasi sistem pada batas stabilitas. Penguatan proporsional ditingkatkan hingga osilasi pada sistem mencapai kondisi stabil. P_U atau periode *ultimate* harus diukur pada saat amplitudo osilasi memiliki besaran yang cukup kecil.^[10]

Langkah-langkah untuk menentukan parameter PID menggunakan metode *Ultimate Sensitivity*^[8] adalah sebagai berikut :

1. Nilai parameter I (*integral*) dan D (*derivative*) gain diubah besarnya menjadi nol.

2. P (*proportional*) gain ditingkatkan nilainya (dari nol) hingga mencapai *ultimate gain* atau K_U dimana *output* dari *control loop* stabil dan memiliki osilasi yang konsisten.
3. *Ultimate period* atau P_U diukur ketika amplitudo osilasi cukup kecil.
4. Mengkalkulasi besaran P (*proportional*), I (*integral*), dan D (*derivative*) gain yaitu K_P , K_I , K_D dengan formula sebagai berikut :

$$K = 0.6K_U \quad (2.6)$$

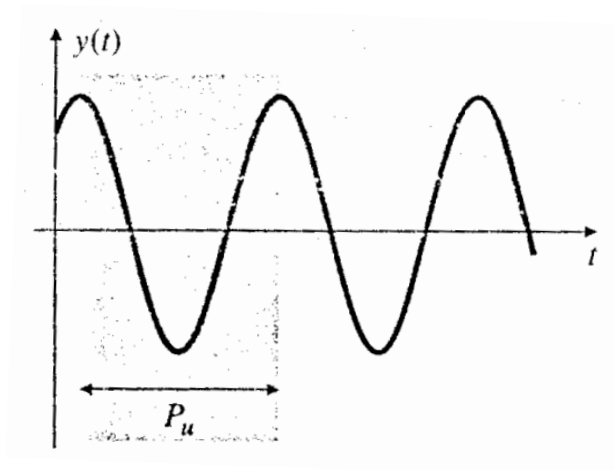
$$T_I = \frac{1}{2} P_U \quad (2.7)$$

$$T_D = \frac{1}{8} P_U \quad (2.8)$$

$$K_P = K \quad (2.9)$$

$$K_I = \frac{1}{T_I} \quad (2.10)$$

$$K_D = T_D \quad (2.11)$$



Gambar 2.25. Ilustrasi *output* dari *control loop* yang stabil^[11]

BAB 3

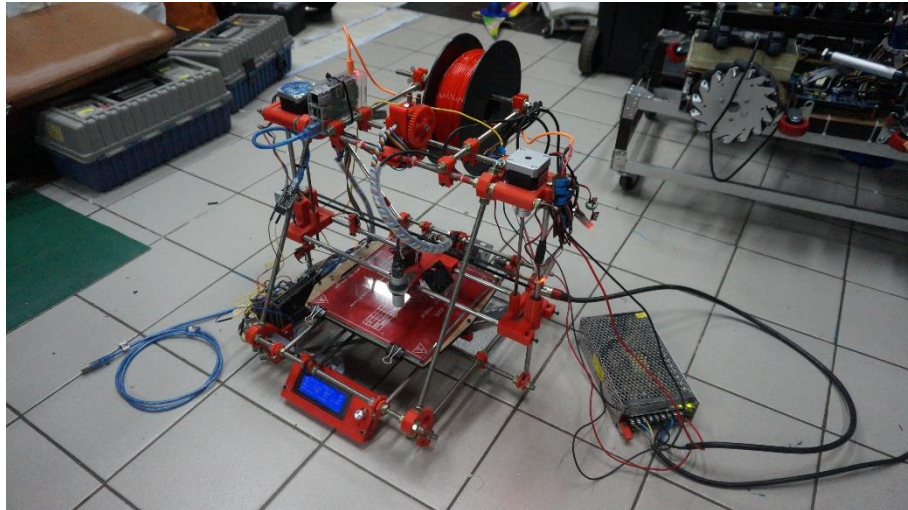
PERANCANGAN SISTEM

3.1 Perancangan Mekanik

3.1.1 Struktur *Frame* 3D Printer

Frame 3D printer yang digunakan adalah *frame* berbasis desain dari 3D Printer Prusa Mendel. Ciri khas dari model *frame* 3D printer ini adalah adanya dua rangka berbentuk segitiga yang saling menopang sisi kanan dan kiri dari 3D printer agar mampu menahan beban di ujung segitiga tersebut dimana terdapat rangka horizontal yang melintang untuk menahan motor stepper sumbu Z, *filament extruder* dan gulungan filamen. Posisi gulungan filamen yang berada cukup sejajar dengan lubang menuju *filament extruder* mengurangi resiko filamen putus ditengah proses pencetakan suatu objek 3D akibat dari kondisi melengkung dari filamen yang terlalu ekstrem. Selain itu, di dasar dari rangka segitiga tersebut ditempatkan kontroler 3D printer beserta *LCD Screen* dengan bantuan rangka penjepit ke batang rangka utama dari 3D printer sehingga dapat diatur kemiringan dari penempatan komponen elektronik tersebut.

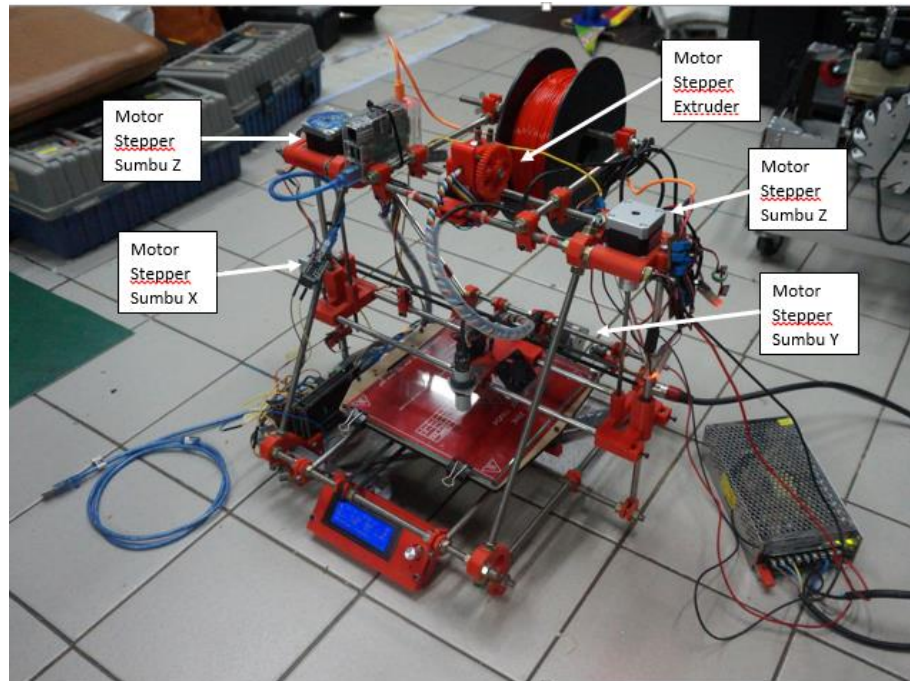
Terpisahnya *extruder* dan *hot end* meningkatkan keleluasaan *hot end* dalam bergerak menuangkan lelehan filamen, desain ekstruder ini disebut *bowden extruder*. Ditempatkan pada batang penyangga yang berfungsi sebagai rel tempat bergerak motor stepper penggerak *hot end* membantu *hot end* untuk bergerak lebih cepat dan ringan serta dapat ditempatkan bersebelahan dengan komponen elektronik *Z-probe* untuk fitur *auto bed levelling*. Penempatan *Z-probe* yang bersebelahan dengan *hot end* bertujuan untuk meningkatkan akurasi perhitungan kemiringan *bed* karena mengurangi *offset* jarak untuk sumbu X,Y, dan Z antara *hot end* dengan *Z-probe*. Desain penempatan *hot end* seperti itu juga dibantu dengan *filament tube* yang menjaga kelenturan filamen pada saat *hot end* bergerak di sepanjang permukaan *bed* 3D printer sehingga tidak mudah patah akibat pergerakan *hot end* yang sangat bebas pada ketiga sumbu gerak yang ada.



Gambar 3.1. Rangka 3D Printer

3.1.2 Aktuator 3D Printer

Aktuator 3D printer yang digunakan mencakup motor stepper NEMA 14 dan NEMA 17. NEMA 14 digunakan untuk menggerakkan filamen yang melewati *extruder* dan NEMA 17 digunakan untuk menggerakkan *hot end* pada sumbu Z dan *bed* pada sumbu X dan Y. Pada sumbu Z, kedua motor stepper NEMA 17 akan bergerak lebih aktif dibanding motor stepper NEMA 17 pada kedua sumbu gerak lainnya karena bertugas menjalankan fitur *auto bed levelling* sehingga kedua motor stepper akan menggerakkan *hot end* naik dan turun menyesuaikan kemiringan *bed* 3D printer. Motor NEMA 14 yang digunakan untuk menggerakkan filamen yang melewati *extruder* memiliki dua fungsi yaitu untuk mendorong filamen agar masuk ke *filament tube* dimana diujung selang tersebut terdapat *hot end* yang siap melelehkan filamen atau menarik keluar potongan filamen yang terputus dari gulungan agar tidak menjadi penghalang pada *filament tube*. Koordinasi aktif dan apik antara keempat motor stepper NEMA 17 dan satu buah motor stepper NEMA 14 sangat menentukan kualitas akhir dari suatu objek cetak 3D dari 3D printer tersebut.

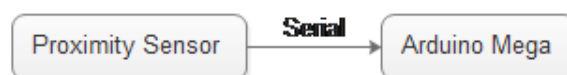


Gambar 3.2. Penempatan Aktuator 3D Printer

3.2 Perancangan Elektronik

3.2.1 Auto Bed Levelling

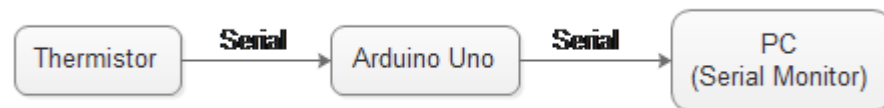
Perangkat elektronik yang menjadi ujung tombak untuk fitur *Auto Bed Levelling* adalah *Z-probe*. Pada 3D printer yang digunakan, *Z-probe* yang terpasang adalah *Z-probe* yang menggunakan prinsip kerja *proximity sensor*. Prinsip kerja dari *Z-probe* memanfaatkan kapasitansi yang dapat dikonversi menjadi jarak antara *Z-probe* dengan *bed* sehingga dapat diasumsikan menjadi jarak antara *hot end* dengan *bed*. Oleh karena itu, sebelum melakukan pencetakan suatu objek *Z-probe* akan melaksanakan pengukuran jarak dengan *bed* 3D printer pada 3 titik yang berbeda dalam rangka pemetaan kemiringan *bed* 3D printer. Setelah pengukuran jarak antara *Z-probe* dengan *bed* dilakukan barulah proses pencetakan dijalankan pada *bed* 3D printer.



Gambar 3.3. Blok Diagram Auto Bed Levelling

3.2.2 Hot End PID Tuning

Untuk fitur *PID Tuning* pada komponen *Hot End* 3D Printer maka komponen elektronik yang digunakan adalah resistor *wirewound* yang berfungsi sebagai pemanas *hot end*. Resistor tersebut diatur hambatannya secara tidak langsung dengan menentukan kombinasi nilai dari konstanta P, I, dan D yang dimasukkan pada memori kontroler 3D printer yaitu Arduino Mega 2560. Konstanta P, I, dan D tersebut dijadikan acuan oleh kontroler 3D printer untuk mengalirkan sinyal PWM menuju resistor *wirewound* agar hambatan yang dihasilkan sesuai untuk mencapai target temperatur yang diinginkan.



Gambar 3.4. Blok Diagram *Hot End* PID Tuning

3.2.3 Auto Continue Printing

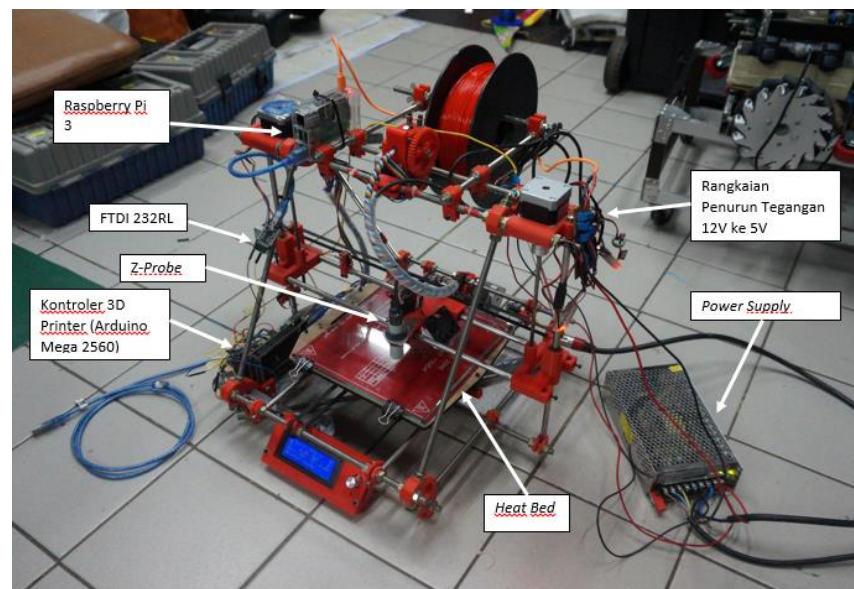
Fitur *Auto Continue Printing* dirancang agar 3D printer dapat melanjutkan pencetakan objek 3D setelah mengalami pemutusan suplai listrik yang terjadi secara mendadak. Pada saat proses pencetakan objek 3D berlangsung, *single board computer* yang terhubung dengan kontroler 3D printer mencatat secara terus-menerus nomor *command line* terakhir yang dijalankan oleh 3D printer. Jika terjadi pemutusan listrik dan akhirnya 3D printer baru mendapatkan suplai listrik kembali setelah menunggu sekian waktu maka kontroler 3D printer sudah menerima file gcode terbaru yang dibuat oleh *single board computer* dengan acuan nomor *command line* terakhir yang dijalankan 3D printer. Oleh karena itu, walau terjadi pemutusan listrik, 3D printer masih dapat melanjutkan proses pencetakan objek 3D di waktu yang akan datang.

Kontroler 3D printer dan *Single Board Computer* dialiri arus listrik dari power supply yang sama agar kedua komponen tersebut dapat berkomunikasi dengan *ground* yang sama. Untuk komunikasi antara

Kontroler 3D printer yang menggunakan Arduino Mega 2560 dengan *Single Board Computer* yang menggunakan Raspberry Pi 3 dibutuhkan suatu komponen tambahan yaitu FTDI FT232RL agar Arduino Mega 2560 dapat mengirimkan informasi yaitu nomor *command line* terakhir yang dijalankan oleh Arduino Mega 2560 sehingga dapat dijadikan acuan dalam membuat *gcode* terbaru agar 3D printer dapat melanjutkan pencetakan objek 3D setelah mendapat suplai listrik kembali.



Gambar 3.5. Blok Diagram *Auto Continue Printing*



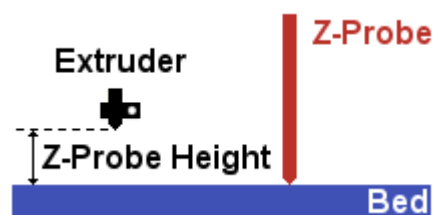
Gambar 3.6. Komponen Elektrik 3D Printer

3.3 Perancangan Perangkat Lunak

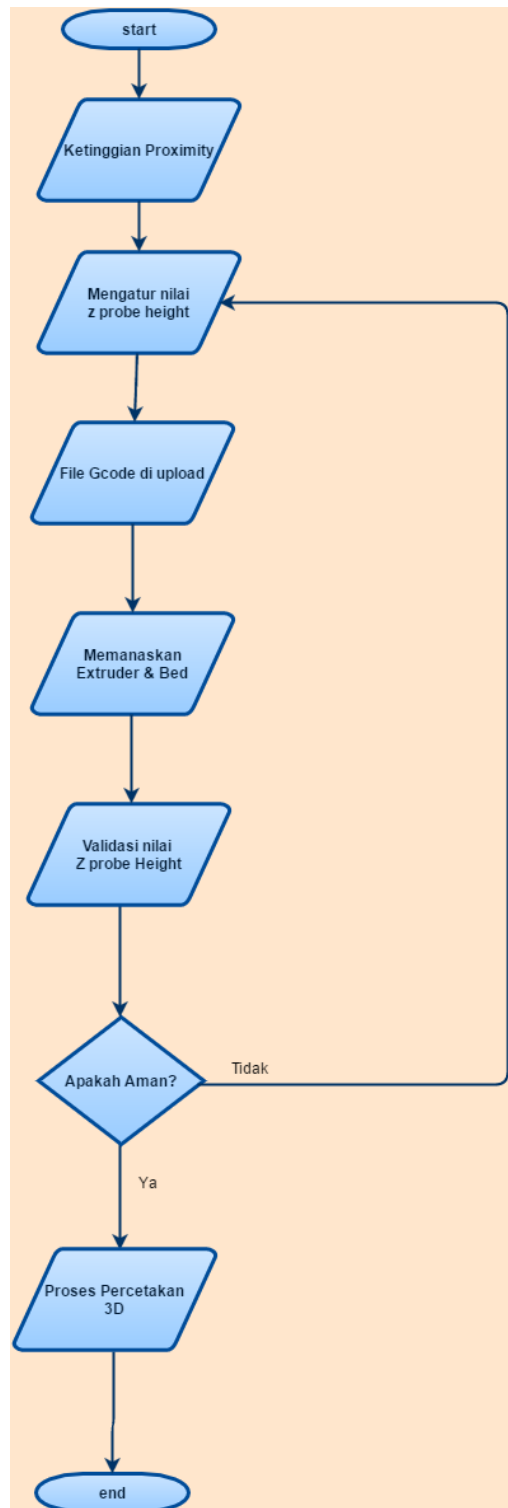
3.3.1 *Auto Bed Levelling*

Auto Bed Levelling merupakan salah satu fitur yang ditambahkan pada 3D printer agar dapat melakukan pencetakan objek 3D pada kondisi bed yang miring sekalipun. Kondisi bed yang miring dapat menyebabkan objek yang dicetak memiliki dasar yang tidak datar ataupun mengalami gagal cetak karena *hot end* yang tidak benar-benar cukup dekat dengan *bed*.

Dengan adanya fitur *Auto Bed Levelling*, *hot end* akan bergerak menyusuri *bed* dengan ketinggian serendah mungkin sehingga sedikit menyentuh *bed*. Untuk menjamin fitur tersebut dapat berjalan dengan lancar sehingga tidak merusak *bed* karena kesalahan pembacaan ketinggian, perlu dilakukan kalibrasi ketinggian aman *Z-probe*. Diawali dengan kalibrasi secara manual dengan menentukan ketinggian aman yang diinginkan oleh pengguna 3D printer dengan cara mendekatkan *hot end* sampai ke ketinggian yang diinginkan oleh pengguna 3D printer lalu memutar knob pada *Z-probe* sampai lampu penanda ketinggian terendah maksimal menyala. Setelah itu, dilakukan kalibrasi secara otomatis yaitu kalibrasi kemiringan *bed* dengan mengambil sampel ketinggian aman *Z-probe* di tiga titik yang berbeda di *bed*. Jika kedua kalibrasi tersebut sudah dilakukan dan pada saat proses pencetakan dijalankan oleh pengguna 3D printer tetapi hasil pengaturan ketinggian aman *Z-probe* terlalu tinggi maka dapat dilakukan perubahan parameter *Z-Probe Height* melalui *EEPROM Settings Configuration* di perangkat lunak Repetier-Host. Dengan adanya fitur ini, pengguna 3D printer tidak perlu melakukan pengaturan kedataran *bed* secara manual dengan merenggang atau mengencangkan pegas penahan *bed*. *Z-Probe* telah melakukan kompensasi ketinggian atau sumbu-Z setiap kali suatu lapisan objek 3D dicetak.



Gambar 3.7. Ketinggian aman *Z-Probe*

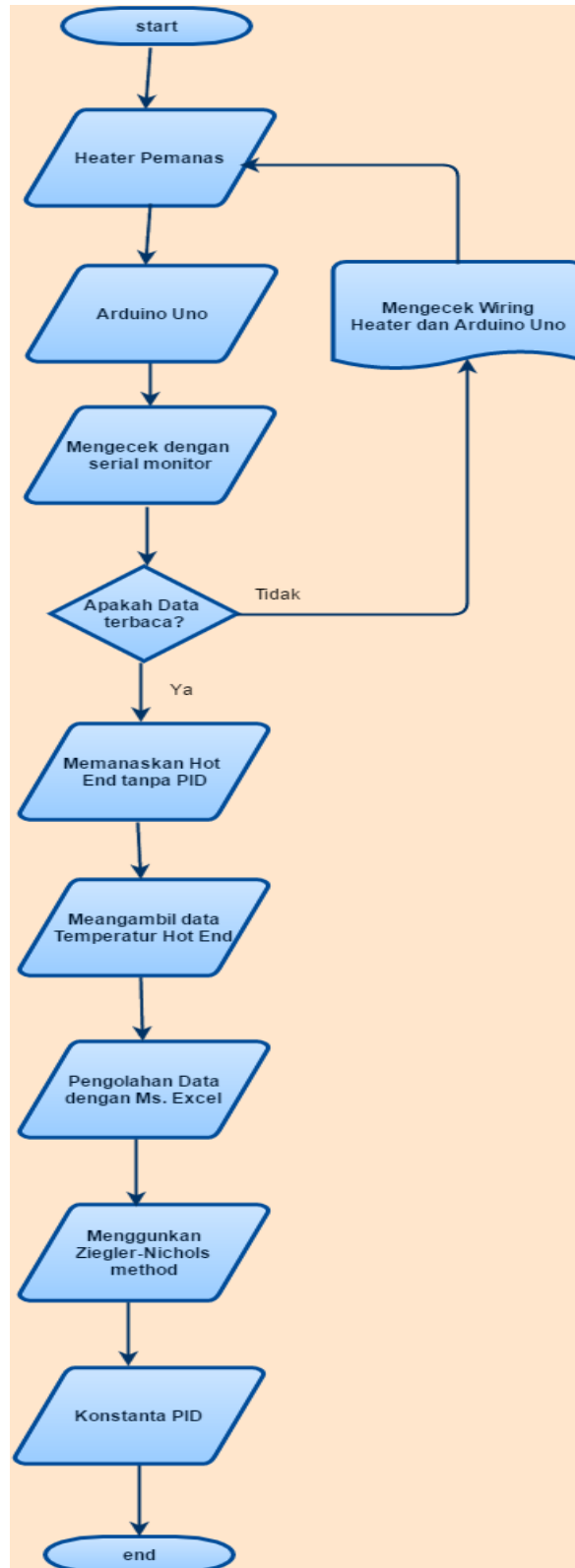


Gambar 3.8. Flowchart Proses *Auto Bed Levelling*

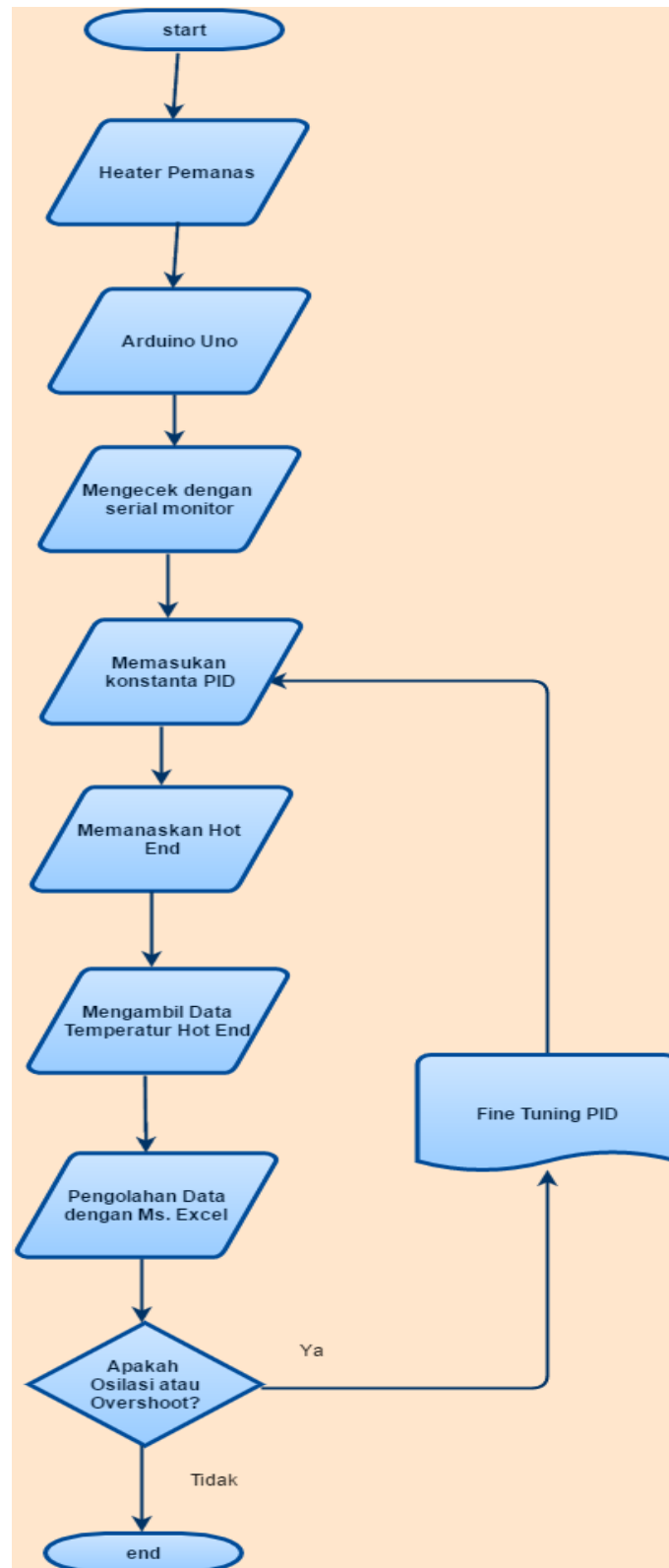
3.3.2 Hot End PID Tuning

Tuning PID perlu dilakukan untuk mencapai suatu kondisi sistem kendali yang mendekati ideal pada resistor *wirewound* yang bertugas memanaskan *hot end*. Untuk melakukan *tuning* PID maka sistem kendali PID pada 3D printer perlu diatur agar konstanta P memiliki nilai yang dapat menghasilkan grafik respon yang berosilasi dengan stabil dan konstan sedangkan konstanta I dan D dibuat bernilai nol. Proses pengaturan tersebut dilakukan dengan mengubah konstanta PID via EEPROM Configuration di perangkat lunak Repetier-Host ataupun via LCD 3D Printer.

Setelah proses analisa grafik respon dan kalkulasi dilakukan maka proses selanjutnya adalah proses uji coba nilai konstanta PID yang didapat dari perhitungan. Jika konstanta PID yang didapat dari hasil perhitungan dirasa kurang optimal oleh pengguna 3D printer maka pengguna dapat menjalankan proses *fine tuning* PID. Proses *fine tuning* PID adalah proses *trial* dan *error* dengan mengubah-ubah konstanta PID yang didapat dari hasil perhitungan sampai grafik respon yang didapat dirasa cukup optimal oleh pengguna 3D printer. Proses *fine tuning* PID dapat membuat 3D printer akan melelehkan filamen dengan waktu pemanasan awal yang lebih cepat dan lebih stabil sehingga tidak merusak pemanas *hot end*. Waktu pemanasan yang lebih cepat dapat mengurangi jumlah endapan material filamen yang meleleh akibat pemanasan *hot end* sebelum proses pencetakan objek 3D dijalankan. Endapan filamen tersebut dapat berdampak dari tidak lancarnya pengeluaran lelehan filamen pada lapisan objek 3D sehingga akan tercipta lapisan yang tidak rata ataupun berlubang. Temperatur *hot end* yang stabil juga dapat menjaga agar kualitas lelehan filamen yang keluar dari *hot end* tetap optimal sehingga kualitas objek 3D yang dicetak pun juga optimal.



Gambar 3.9. Flowchart Proses Akuisi Data Temperatur *Hot End*

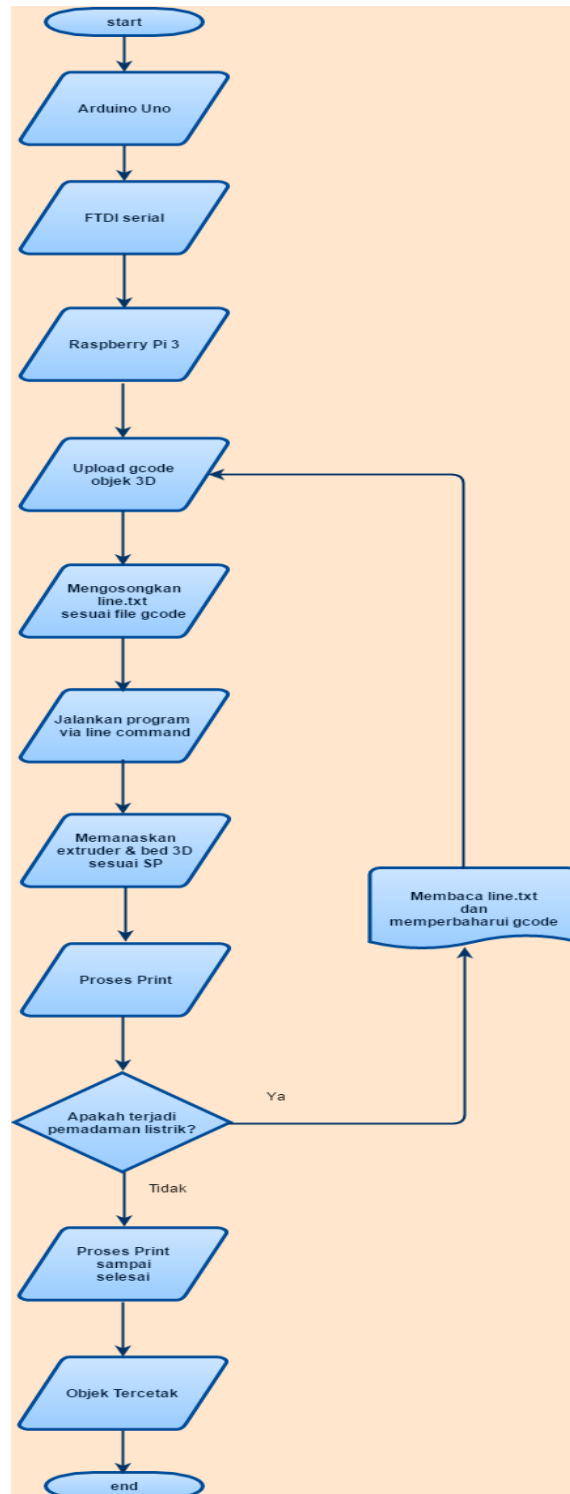


Gambar 3.10. Flowchart Proses *Fine Tuning*

3.3.3 Auto Continue Printing

Fitur *Auto Continue Printing* dapat membuat 3D printer melanjutkan proses pencetakan objek 3D sekalipun sempat mengalami penutupan suplai listrik. Dengan menggunakan *single board computer* yang mengakuisisi data dari kontroler 3D printer berupa data nomor urut *command line* terakhir yang dijalankan oleh kontroler 3D printer maka dapat dihasilkan suatu file *gcode* terbaru yang dapat dijalankan oleh 3D printer tersebut untuk melanjutkan proses pencetakan objek. Protokol komunikasi yang digunakan agar *single board computer* dan kontroler 3D printer adalah komunikasi serial. Setelah 3D printer mendapatkan suplai listrik kembali maka pengguna 3D printer dapat memilih untuk melanjutkan pencetakan objek 3D yang belum tuntas atau mulai melakukan pencetakan objek 3D sedari awal kembali.

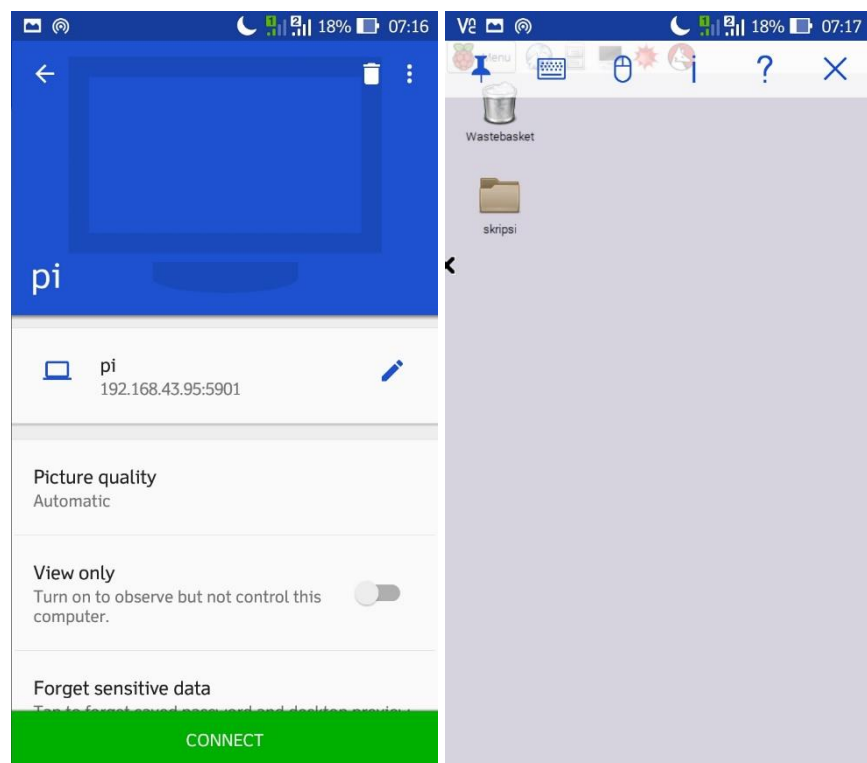
Kunci utama dari fitur ini adalah serial read dan serial write pada Raspberry Pi 3. Kemampuan membaca serial dari board Raspberry Pi 3 sangat berperan dalam membuat suatu catatan yaitu *line.txt* yang berisi informasi nomor urut dari *line command* terakhir yang dijalankan oleh 3D printer. Proses tersebut dijalankan oleh *command line* yang terdapat pada void *serialRead* dan void *serialWrite* yang bertugas untuk membaca nomor *line gcode* yang sedang dijalankan pada *buffer* atau RAM mikrokontroler 3D printer. Nomor urut tersebut dijadikan acuan untuk menghapus *line command* di file *gcode* objek 3D yang sedang dicetak yang sudah dijalankan oleh 3D printer menggunakan program *gcode generator*. Dengan memperbaharui file *gcode* objek 3D yang sedang dicetak maka proses pencetakan suatu objek 3D tidak akan terganggu karena dapat dilanjutkan walau mengalami pemutusan suplai listrik sekalipun yang menyebabkan seluruh sistem 3D printer mati. *Gcode* yang sudah dibuat dapat dipindahkan dari memori Raspberry Pi 3 ke SD Card yang terhubung ke kontroler 3D printer yaitu Arduino Mega 2560 untuk diproses agar proses pencetakan dapat dilanjutkan.



Gambar 3.11. Flowchart Proses Auto Continue Printing

3.3.4 Virtual Network Computing

Virtual Network Computing atau VNC adalah sistem *Graphical Desktop Sharing* yang memungkinkan penggunanya untuk menggunakan sebuah komputer yang dapat mengendalikan *desktop interface* komputer yang lain. Sistem ini mentransmisikan ketikan keyboard, klik mouse dari komputer kontroler dan perubahan yang dilakukan terhadap komputer yang dikontrol via jaringan internet. Dengan menggunakan VNC maka pengguna 3D printer dapat mengakses *interface* dari Raspberry Pi 3 sehingga dapat mengosongkan isi dari *line.txt* sewaktu ingin melakukan pencetakan suatu objek dari awal. Tujuan dari pengosongan isi file *line.txt* adalah untuk memastikan agar pencatatan nomor urut *line command* terakhir yang dikerjakan oleh 3D printer dimulai dari angka 0 sehingga dapat dicocokkan dengan file *gcode* yang digunakan oleh 3D printer untuk mencetak objek 3D.



Gambar 3.12. Tampilan VNC Viewer dari Raspberry Pi 3

BAB 4

PEMBAHASAN

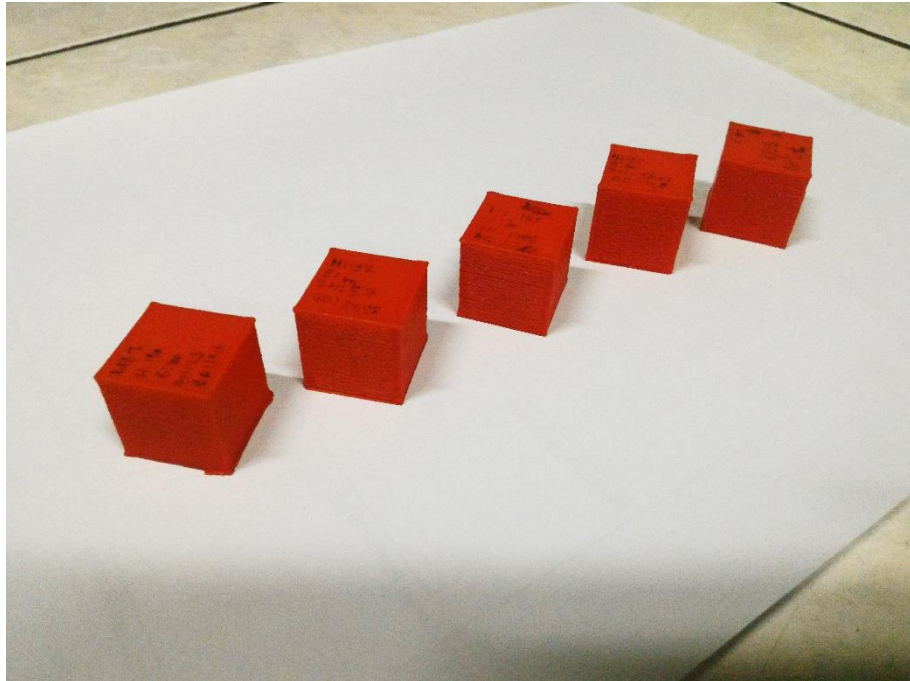
4.1. *Auto Bed Levelling*

Fitur *Auto Bed Levelling* diuji cobakan pada lima variasi kemiringan *bed* dengan mengatur ketinggian pegas atau *spring clearance* penyangga *bed* 3D printer. Uji coba pencetakan objek pada *bed* yang miring dilakukan dengan mencetak sebuah kubus berukuran 20x20x20 mm. Setelah dilakukan pencetakan suatu objek maka dilanjutkan dengan proses pengukuran dimensi objek menggunakan jangka sorong digital CHIC014. Setiap sumbu geometri objek 3D diukur sebanyak tujuh kali. Jika meninjau data pada tabel dapat dilihat bahwa semakin besar ataupun semakin kecil sudut kemiringan *bed* tidak terlalu mempengaruhi hasil cetak objek 3D. Dapat dilihat bahwa deviasi dimensi terbesar pada objek 3D yang dicetak hanya sebesar 1,25 %.

Data dibawah membuktikan bahwa fitur *Auto Bed Levelling* berjalan dengan baik. Adanya deviasi dimensi pada sumbu-Z dapat disebabkan dari pengaturan ketinggian *Z-Probe* yang terlalu rendah sehingga terlalu menekan *bed* 3D printer. Untuk sumbu X dan Y, deviasi dimensi terjadi akibat pembuatan lapisan objek 3D dengan metode menumpuk yang tidak sejajar antara lapisan atas dan lapisan dibawahnya. Akan tetapi, jika dilihat dari kualitas cetak, kelima objek 3D tersebut dihasilkan dengan kualitas pencetakan yang cukup optimal ditandai dengan tidak adanya sisi yang tidak rata ataupun bergelombang akibat *hot end* bergesekan atau bertabrakan dengan sisi atas objek 3D selama proses pencetakan berlangsung.

Tabel 4.1. Hasil Uji Coba *Auto Bed Levelling*

Degree of Elevation	Spring Clearance Deviation (mm)	Spring Clearance (mm)	Z-Probe Height (mm)	Cube Dimension								
				Measurement			Average			Deviation		
				X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (%)	Y (%)	Z (%)
-0,020	-4,84	17,47	1,35	19,90	19,97	19,97	19,90	19,98	19,97	0,51	0,10	0,16
				19,88	19,98	19,98						
				19,91	19,98	19,97						
				19,94	19,99	19,96						
				19,90	19,98	20,00						
				19,90	20,01	19,95						
				19,86	19,95	19,95						
-0,012	-2,81	19,50	2,60	19,82	20,05	20,05	19,80	20,06	20,02	1,01	0,29	0,12
				19,79	20,05	20,03						
				19,80	20,05	20,03						
				19,79	20,10	20,00						
				19,81	20,05	20,01						
				19,80	20,06	20,02						
				19,78	20,05	20,03						
0,000	0	22,31	4,50	20,02	19,99	20,02	20,05	20,00	20,00	0,23	0,02	0,01
				20,04	20,00	20,00						
				20,05	19,98	20,00						
				20,05	20,01	19,99						
				20,06	20,00	20,00						
				20,05	19,97	20,01						
				20,05	20,02	20,00						
0,009	2,19	24,50	6,10	19,92	19,78	19,72	19,96	19,81	19,75	0,21	0,94	1,25
				19,90	19,76	19,71						
				19,95	19,77	19,76						
				20,00	19,79	19,77						
				19,98	19,89	19,75						
				20,02	19,79	19,74						
				19,94	19,90	19,80						
0,021	5,16	27,47	8,00	20,00	19,94	19,86	19,98	19,92	19,87	0,09	0,39	0,66
				19,99	19,92	19,85						
				19,97	19,95	19,87						
				19,96	19,86	19,83						
				19,97	19,92	19,97						
				20,02	19,99	19,86						
				19,95	19,94	19,86						
				19,99	19,86	19,84						



Gambar 4.1. Objek 3D kubus hasil pengujian fitur *Auto Bed Leveling*

Pada gambar di atas dapat diamati bahwa objek 3D yang dihasilkan memiliki bentuk kubus yang cukup sempurna walau terlihat adanya lengkungan pada hampir setiap sudut tajam dari objek 3D kubus yang dicetak. Lengkungan tersebut tercipta akibat adanya lelehan filamen yang lebih lama mengalami proses pendinginan dibanding lelehan filamen yang berada di lapisan dibawahnya.

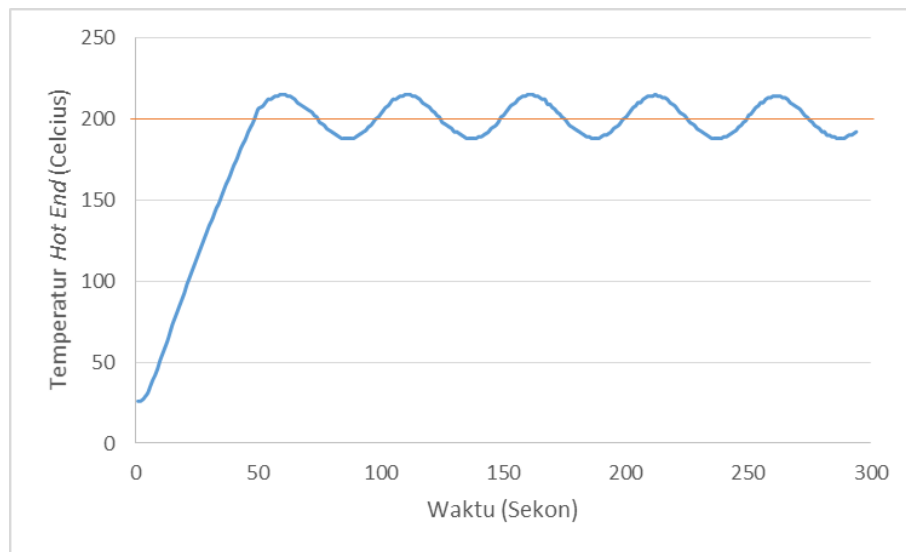
4.2. *Hot End PID Tuning*

Pengambilan data untuk fitur *Hot End PID Tuning* dilakukan dengan mencari nilai konstanta P yang dapat membuat grafik *output* berosilasi dengan stabil dan konstan dengan konstanta I dan D dibuat bernilai nol. Terdapat tiga variasi K_P sebagai *Ultimate Gain* atau K_U yang diuji, yaitu :

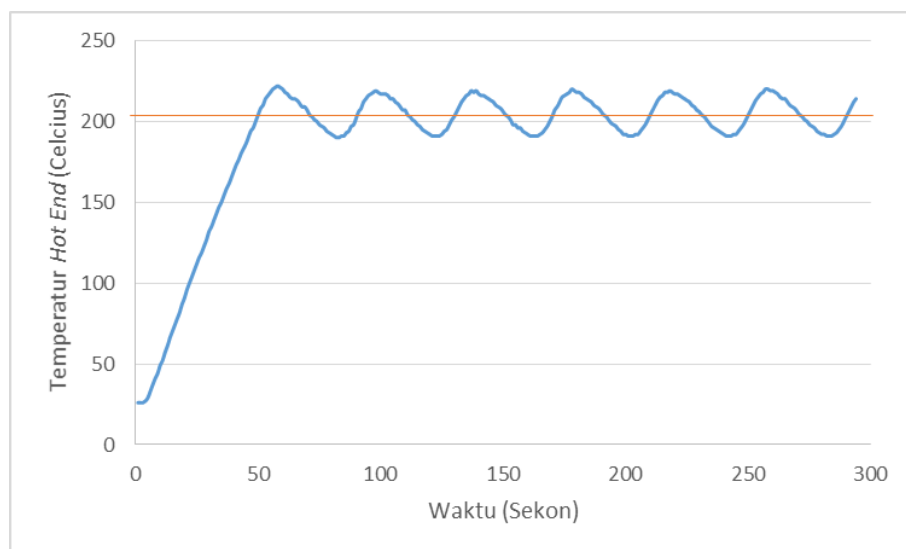
Tabel 4. 2. Nilai K_U yang Diuji

Variasi	K_U	P_U
1	11	36
2	11.6	26
3	12	35

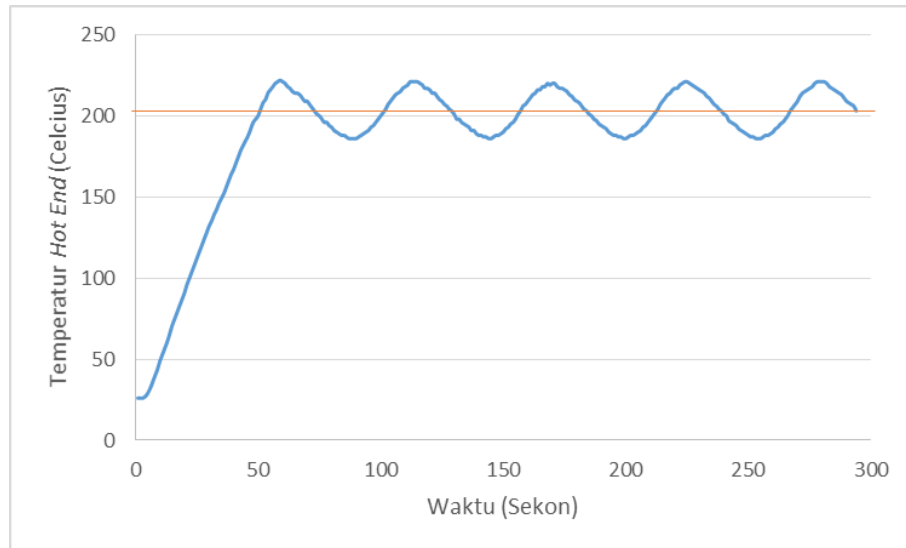
Masing-masing nilai K_U menghasilkan grafik respon sebagai berikut:



Gambar 4.2. Grafik Perbandingan Waktu terhadap Temperatur Hot End variasi 1



Gambar 4.3. Grafik Perbandingan Waktu terhadap Temperatur Hot End variasi 2



Gambar 4.4. Grafik Perbandingan Waktu terhadap Temperatur *Hot End* variasi 3

Ketiga variasi tersebut memiliki *Ultimate Period* atau P_U sebesar 36, 26, 35 sekon. *Ultimate Period* dihitung dari waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk menghasilkan sebuah periode yaitu selisih waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk menghasilkan sebuah puncak dan sebuah lembah pada grafik respon. Dari ketiga variasi K_U tersebut dilakukan perhitungan nilai K_P , K_I , dan K_D berdasarkan formula *Ultimate Sensitivity Method*, yaitu :

1. Kalkulasi Variasi 1

$$K = 0.6K_U = 0.6 \times 11 = 6.6$$

$$T_I = \frac{1}{2} P_U = \frac{1}{2} \times 36 = 18$$

$$T_D = \frac{1}{8} P_U = \frac{1}{8} \times 36 = 4.5$$

$$K_P = K = 6.6$$

$$K_I = \frac{1}{T_I} = \frac{1}{18} = 0.05$$

$$K_D = T_D = 4.5$$

2. Kalkulasi Variasi 2

$$K = 0.6K_U = 0.6 \times 11.6 = 6.96$$

$$T_I = \frac{1}{2} P_U = \frac{1}{2} \times 26 = 13$$

$$T_D = \frac{1}{8} P_U = \frac{1}{8} \times 26 = 3.25$$

$$K_P = K = 6.96$$

$$K_I = \frac{1}{T_I} = \frac{1}{13} = 0.08$$

$$K_D = T_D = 3.25$$

3. Kalkulasi Variasi 3

$$K = 0.6K_U = 0.6 \times 12 = 7.2$$

$$T_I = \frac{1}{2} P_U = \frac{1}{2} \times 35 = 17.5$$

$$T_D = \frac{1}{8} P_U = \frac{1}{8} \times 35 = 4.37$$

$$K_P = K = 7.2$$

$$K_I = \frac{1}{T_I} = \frac{1}{17.5} = 0.06$$

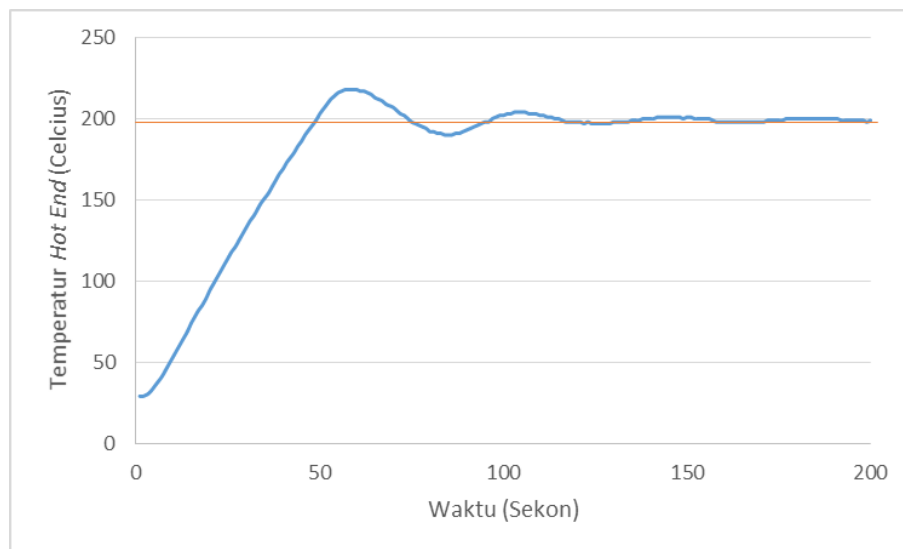
$$K_D = T_D = 4.37$$

Tabel 4.2. Tabel Hasil Perhitungan K_P , K_I , K_D berdasarkan formula

Ultimate Sensitivity Method

Konstanta	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Rata- rata
K_P	6.6	6.96	7.2	6.92
K_I	0.05	0.08	0.06	0.06
K_D	4.5	3.25	4.37	4.04

Nilai K_P , K_I , dan K_D yang telah dirata-rata diuji coba pada sistem kendali 3D printer dengan *setpoint* pada 197 derajat celcius dan didapatkan grafik respon sebagai berikut :



Gambar 4.5. Grafik Perbandingan Waktu terhadap Temperatur *Hot End* untuk K_P , K_I , dan K_D rata-rata

Dari grafik respon yang dihasilkan oleh sistem kendali *Hot End* 3D printer dapat dilihat bahwa grafik tersebut menunjukkan karakteristik dari Ziegler-Nichols *Tuning* yaitu adanya osilasi yang teredam diawal pengaktifan sistem kendali. Setelah terjadi osilasi teredam, grafik respon menunjukkan respon yang stabil dan sesuai dengan *set point* sehingga *steady state error* bernilai 0 %. Nilai *steady state error* yang terlihat sempuran dikarenakan ketelitian pembacaan suhu yang tidak terlalu besar yaitu sebesar 1 derajat celcius. Hasil yang cukup baik dari proses *Hot End* PID *Tuning* ini dapat mendukung proses pelelehan filamen berjalan lebih optimal sehingga mendukung dua fitur pada 3D printer Reprap Mendel yaitu *Auto Bed Leveling* dan *Auto Continue Printing*.

4.3. *Auto Continue Printing*

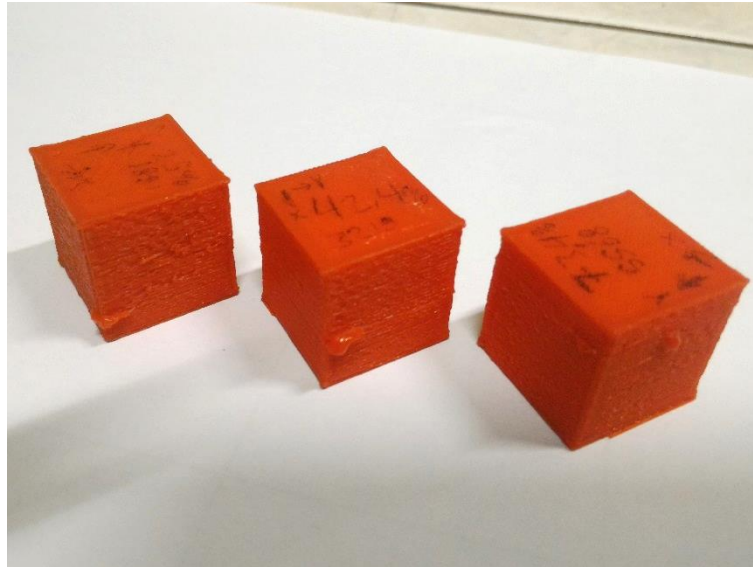
Fitur *Auto Continue Printing* diuji cobakan pada objek 3D berbentuk kubus dengan dimensi 20x20x20 mm. Uji coba yang dilakukan berbentuk pemutusan suplai listrik ke 3D printer secara acak lalu disambungkan kembali untuk melanjutkan pencetakan objek 3D yang sama namun dengan gcode yang telah diperbaharui. Lalu, kubus yang tercetak diukur dimensinya menggunakan jangka sorong digital CHIC014 Hasilnya sebagai berikut :

Tabel 4.3. Tabel Pengukuran Dimensi Objek 3D Kubus Hasil
Auto Continue Printing

Print stopped at (%)	Line Number	Cube Dimension								
		Measurement			Average			Deviation		
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (%)	Y (%)	Z (%)
25.0	1891	19.72	19.90	20.19	19.81	19.91	20.20	0.94	0.45	0.99
		19.86	19.88	20.18						
		19.77	19.92	20.19						
		19.84	19.92	20.20						
		19.85	19.91	20.17						
		19.85	19.93	20.26						
		19.80	19.91	20.19						
42.4	3219	19.88	19.81	19.95	19.87	19.79	19.97	0.66	1.04	0.15
		19.86	19.82	19.97						
		19.89	19.81	19.97						
		19.91	19.73	19.98						
		19.87	19.72	19.97						
		19.84	19.79	19.99						
		19.82	19.86	19.96						
73.4	5568	19.89	19.98	20.14	19.94	19.97	20.12	0.30	0.14	0.59
		19.90	19.95	20.13						
		19.91	19.97	20.12						
		19.91	20.01	20.10						
		20.04	19.97	20.11						
		20.00	19.97	20.10						
		19.93	19.96	20.12						

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa deviasi terbesar yang tercatat hanya sebesar 1.04 % sehingga dari sisi dimensi objek 3D yang dihasilkan dari proses *Auto Continue Printing* tersebut cukup bagus karena mendekati dimensi objek yang didesain. Jika dilihat dari kualitas cetakan, terdapat sisi yang tidak rata akibat lelehan filamen yang sempat mendingin ketika *hot end* sedang meletakkan lelehan filamen dan suplai listrik terputus. *Hot end* yang posisinya sangat dekat dengan sisi atas objek 3D juga mengalami pemanasan sebelum melanjutkan proses pencetakan. Akibatnya lelehan filamen yang mendingin dan menggumpal tersebut sempat mencair sebentar

lalu terlepas dari *hot end* dan menumpuk di sisi atas objek 3D. Ketika *hot end* sedang meletakkan lelehan filamen di atas gumpalan filamen tersebut dan juga menekannya maka gumpalan lelehan filamen tersebut tergeser ke arah sisi luar objek 3D. Kondisi tersebut yang menyebabkan terdapatnya tumpukan filamen di salah satu sisi kubus sehingga permukaan kubus yang dicetak tidak benar-benar rata.



Gambar 4.6. Hasil cetak objek 3D kubus dari pengujian fitur *auto continue printing*

Uji coba kedua terhadap fitur *Auto Continue Printing* dilakukan dengan mencetak objek berbentuk piramida berukuran 3.5x3.5x3.5 cm dengan kondisi pencetakan mengalami mati listrik sebanyak empat kali. Bentuk piramida dipilih untuk menunjukkan fitur *auto continue printing* dapat berjalan dengan baik pada objek dengan bentuk yang lebih kompleks dibanding kubus. Terjadinya pemutusan suplai listrik ke 3D printer sebanyak empat kali menyebabkan *single board computer* membuat *gcode* terbaru sebanyak empat kali dan pengguna 3D printer perlu mengunggah ulang *gcode* terbaru tersebut ke mikrokontroler sebanyak empat kali untuk melanjutkan proses pencetakan. Setelah dilakukan pencetakan objek 3D piramida maka dilanjutkan dengan proses pengukuran dimensi objek menggunakan jangka sorong digital CHIC014. Setiap sumbu geometri

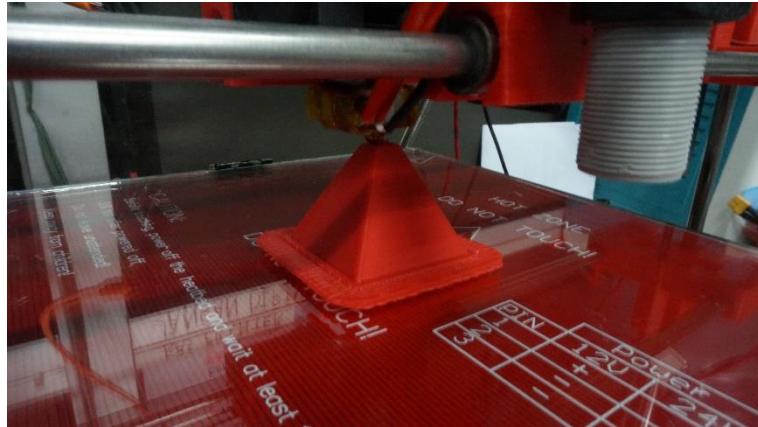
objek 3D diukur sebanyak tujuh kali. Hasil pencetakan dan pengukuran adalah sebagai berikut :

Tabel 4.4. Tabel Pengukuran Dimensi Objek 3D Piramida Hasil

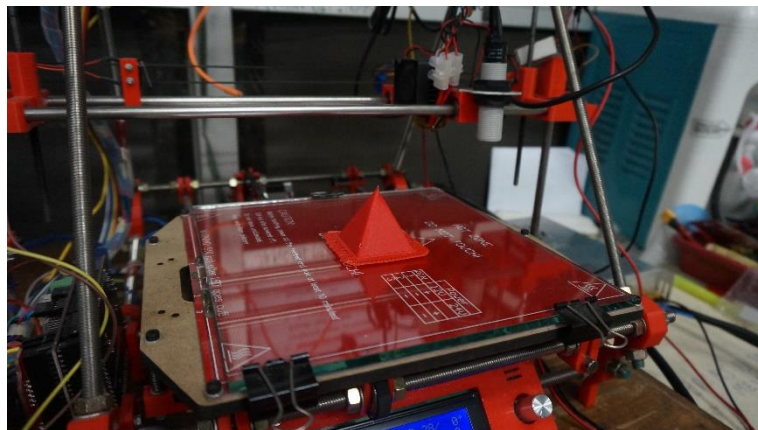
Auto Continue Printing

Pyramid Dimension								
Measurement			Average			Deviation		
X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (%)	Y (%)	Z (%)
34.96	34.95	35.00	34.96	34.96	35.00	0.22	0.20	0.01
34.97	34.96	35.00						
34.94	34.97	35.00						
34.95	34.96	35.01						
34.96	34.95	35.01						
34.96	34.97	34.98						
34.95	34.96	34.99						

Proses pencetakan piramida mengalami pemutusan sumber listrik pada saat persentase progres pencetakan mencapai 20%, 37%, 63%, 82%. Berdasarkan hasil pengukuran, objek piramida yang dicetak hanya memiliki deviasi dimensi objek terbesar pada nilai 0.22%. Berdasarkan pengamatan secara visual, masih terdapat beberapa cacat pada objek piramida ditandai dengan puncak piramida yang tidak tegak lurus ke atas karena pondasi filamen dibawahnya yang tidak padat akibat terpengaruh oleh *hot end* yang terlalu panas dan sistem kipas pendingin yang kurang kuat. Selain itu, pada beberapa bagian piramida tempat *hot end* sempat terhenti pergerakannya akibat pemutusan sumber listrik terdapat bekas lelehan filamen karena temperatur *hot end* yang tidak dapat mendingin dengan cepat sehingga masih terdapat filamen yang keluar dari *hot end* walau sumber listrik telah diputus. *Gcode* terbaru yang dihasilkan oleh *single board computer* dapat langsung digunakan oleh pengguna untuk diunggah ke mikrokontroler. Kualitas dari *gcode* terbaru yang dihasilkan oleh *single board computer* terbukti cukup baik ditandai dengan dimensi dan penampilan fisik objek 3D yang dicetak masih cukup baik dan tidak terlihat ada sejumlah *command line gcode* yang tidak dijalankan ataupun terhapus karena malfungsi program *gcode generator* di *single board computer*.



Gambar 4.10. Proses pencetakan objek 3D piramida terhenti pada saat progres mencapai 82%



Gambar 4.11. Proses pencetakan objek 3D piramida selesai 100%



Gambar 4.12. Objek 3D piramida 3.5x3.5x3.5 cm



Gambar 4.13. Objek 3D piramida 3.5x3.5x3.5 cm

Berdasarkan hasil pengukuran dimensi dan pengamatan secara visual, dapat dinyatakan bahwa fitur *auto continue printing* dapat berjalan dengan baik sehingga objek 3D dapat dicetak hingga selesai 100% dengan deviasi dimensi paling besar hanya 0.22% dan kecacatan secara visual yang sangat minim.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah :

1. 3D Printer dapat menjalankan fitur *Auto Bed Levelling* dengan deviasi dimensi terbesar hanya 1,25 %.
2. Konstanta PID yang dihasilkan dari kalkulasi menggunakan Ziegler-Nichols *Ultimate Sensitivity Method* terhadap data temperatur *hot end* cukup optimal tanpa adanya proses *fine tuning*.
3. *Auto Continue 3D Printing* dapat dijalankan dengan baik secara random pada persentase progres manapun saat proses pencetakan objek 3D bentuk kubus maupun piramida terhenti akibat putusnya suplai listrik ke 3D printer.

5.2. Saran

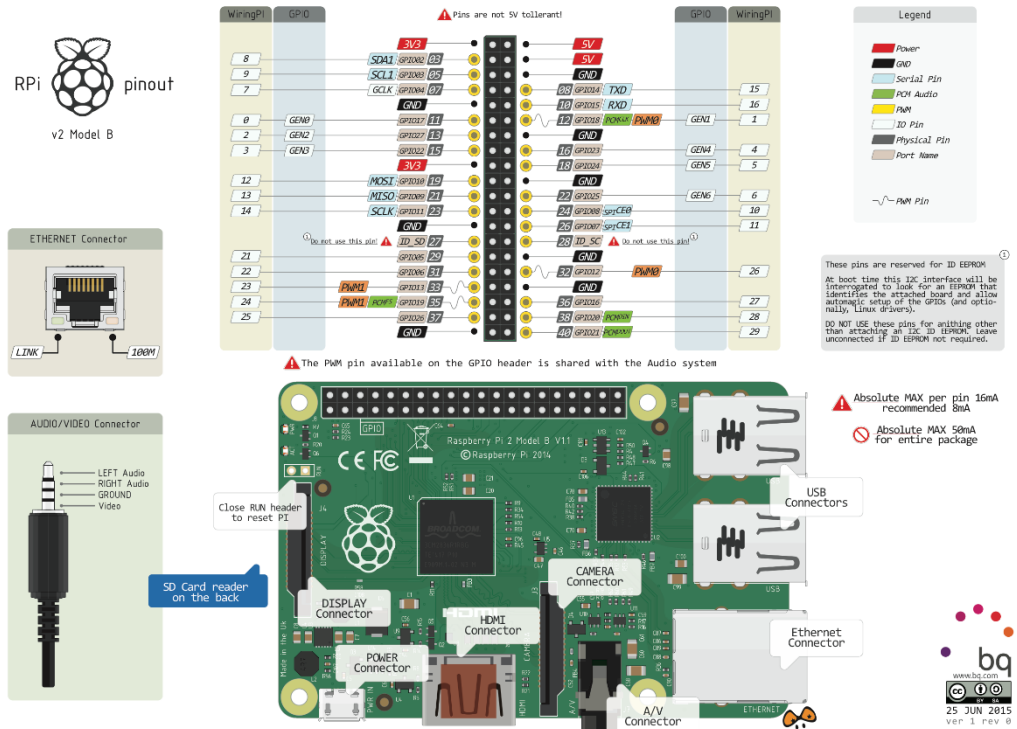
Saran untuk penelitian selanjutnya dilakukan penelitian di parameter-parameter lainnya yang masih dalam lingkup teknologi 3D printer.

DAFTAR ACUAN

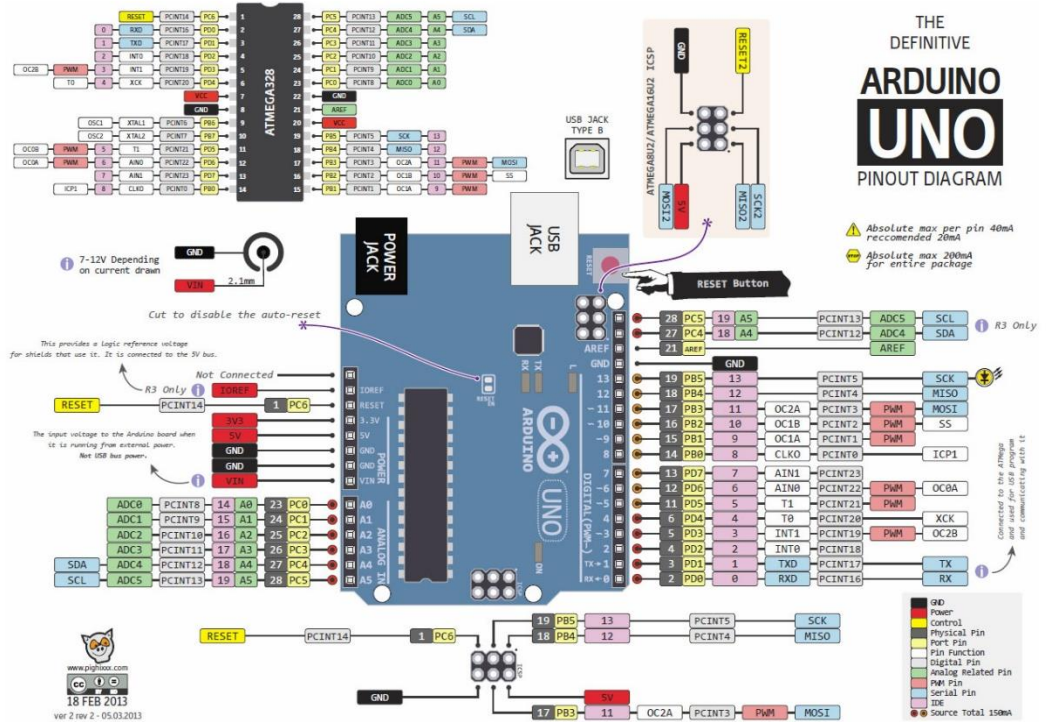
- [1] Evans, B. (2012). *Practical 3D printers*. New York: Apress.
- [2] Hood-Daniel, P., & Kelly, J. F. (2011). *Printing in plastic: Build your own 3D printer*. New York, NY: Apress.
- [3] Makerbot. Makerbot Replicator 2X Experimental 3D Printer user manual.
- [4] <http://www.3d-printing-technologies.com/background.html> diakses pada hari Sabtu tanggal 13 Februari 2016.
- [5] <http://reprap.org/wiki/Mendel> diakses pada hari Jumat tanggal 12 Februari 2016.
- [6] <http://forums.reprap.org/read.php?52,106827,page=2> diakses pada hari Jumat tanggal 12 Februari 2016.
- [7] Fraden, J. (1993). *AIP handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications*. New York: American Institute of Physics.
- [8] Franklin, G. F., Emami-Naeini, A., & Powell, J. D. (2002). *Feedback control of dynamic systems*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [9] Killian. *Modern Control Technology : Components and Systems*. Delmar
- [10] Seborg, D. E. (n.d.). *Process dynamics and controls: From the text by Seborg, Mellichamp, Edgar & Doyle*.
- [11] Lipták, B. G. (2006). *Process control and optimization* (Vol. II). Boca Raton, Fla.: CRC, Taylor & Francis.

LAMPIRAN

Raspberry Pi 3 Pinout



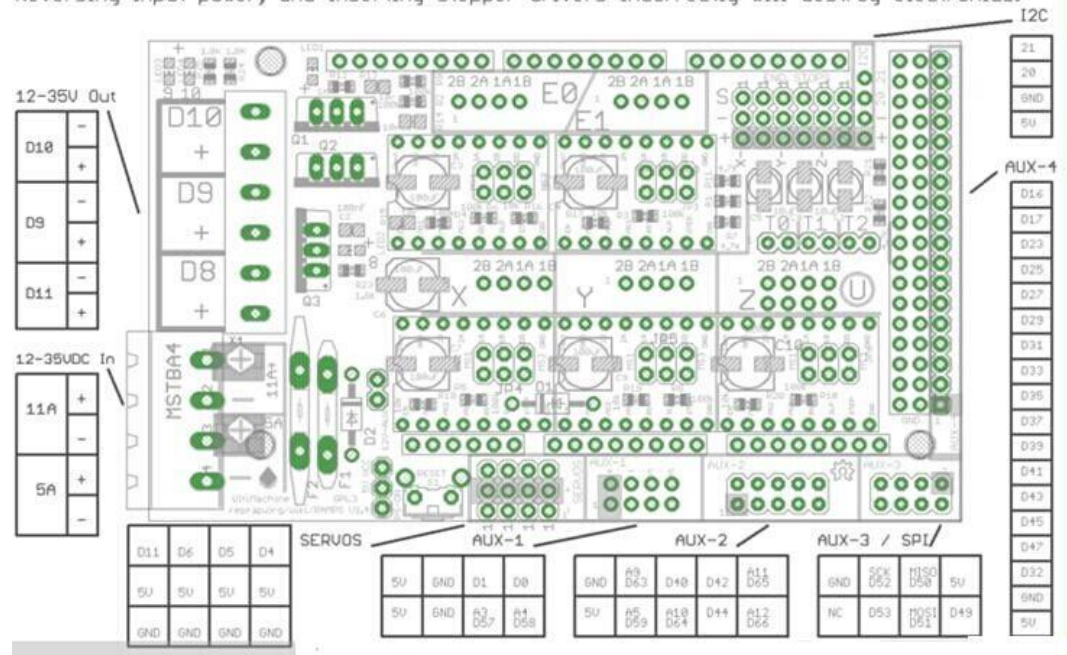
Arduino Uno Pinout



Digital Caliper CHIC014

RAMPS 1.4 Shield

Reversing input power, and inserting stepper drivers incorrectly will destroy electronics.



Gcode_generator.c

```

#include <stdio.h>
#include <string.h>

int main() {
FILE *oldTodoFile;
oldTodoFile = fopen("cube20.gco", "r");

FILE *todoFile;
todoFile = fopen("todo2.txt", "w");
int lineNumber = 0;
int awal=10;
int akhir=readFile("line.txt");
if (akhir == 0){
return 0;
}
int len;
char line[4096];

if (oldTodoFile != NULL) {
    while (fgets(line, sizeof line, oldTodoFile))
    {
        len = strlen(line);
        if (len && (line[len - 1] != '\n')) {}
    else {
        lineNumber++;
        if (lineNumber >= awal && lineNumber
<= akhir) {
            // Do nothing
        } else {
            fputs(line, todoFile);
        }
    }
}
} else {
    printf("ERROR");
}
remove("cube20.gco");
rename("todo2.txt", "cube20.gco");
fclose(oldTodoFile);
fclose(todoFile);

return 0;
}

int readFile(const char * line){

```

```
FILE *fp;
char buff[16];

fp = fopen(line, "r");
fscanf(fp, "%s", buff);

fclose(fp);
return atoi(buff);
}
```

Serial_monitor.cpp

```

#include <unistd.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <sys/ioctl.h>
#include <fcntl.h>
#include <termios.h>
#include <sys/time.h>
#include <string.h>
#define BUFFER_SIZE 1024
#define READ_SIZE 1024
using namespace std;

const char*      portACM      = "/dev/ttyUSB0";
char             bufferRead[BUFFER_SIZE];
char             bufferWrite[BUFFER_SIZE];
int              fd;           // File descriptor for
serial port

void clearIOQueue(){
    tcflush(fd, TCIOFLUSH);
    usleep(10000);
}
int serialStart(const char* portname, speed_t
baud){
    // Open the serial port as read/write, not as
    controlling terminal, and
    // don't block the CPU if it takes too long to
    open the port.
    fd = open(portname, O_RDWR | O_NOCTTY);

    if (fd == -1) {
        return 0;
    }

    struct termios toptions; // struct to hold the
    port settings

    // Fetch the current port settings
    tcgetattr(fd, &toptions);

    // Set Input and Output BaudRate
    cfsetispeed(&toptions, baud);
    cfsetospeed(&toptions, baud);

    // Set up the frame information.

```



```

toptions.c_cflag &= ~PARENB; // no parity
toptions.c_cflag &= ~CSTOPB; // one stop bit
toptions.c_cflag &= ~CSIZE; // clear frame
size info
toptions.c_cflag |= CS8; // 8 bit frames

// c_cflag contains a few important things- CLOCAL
and CREAD, to prevent
// this program from "owning" the port and to
enable receipt of data.
// Also, it holds the settings for number of data
bits, parity, stop bits,
// and hardware flow control.
toptions.c_cflag |= CREAD ;
toptions.c_cflag |= CLOCAL;

/* no hardware flow control */
toptions.c_cflag &= ~CRTSCTS;

/* disable input/output flow control, disable
restart chars */
toptions.c_iflag &= ~(IXON | IXOFF | IXANY);

/*
ICRNL
: map CR to NL (otherwise a CR input on the other
computer
will not terminate input)
otherwise make device raw (no other input
processing)
*/
toptions.c_iflag = ICRNL;

/* disable canonical input, disable echo,
disable visually erase chars,
disable terminal-generated signals */
toptions.c_lflag = ICANON;
/* disable output processing, output set to raw*/
toptions.c_oflag = ~OPOST;

// Now that we've populated our options structure,
let's push it back to the
// system.
tcsetattr(fd, TCSANOW, &toptions);

usleep(1000000);

```

```

// Flush the input and output buffer one more
time.
tcflush(fd, TCIOFLUSH);
return 1;
}

void serialRead(int dataRead){
// Now, let's wait for an input from the serial
port.
tcflush(fd, TCIOFLUSH);
fcntl(fd, F_SETFL, 0); // block until data comes
in
read(fd, bufferRead, dataRead);
}

void serialWrite(const char* data_out, int
data_size){
tcflush(fd, TCIOFLUSH);
sprintf(bufferWrite, "%s\r\n", data_out);
int n = write(fd, bufferWrite, data_size+3);
if (n < 0)
    fputs("write() of 4 bytes failed!\n",
stderr);
}

int main(){
serialStart(portACM, B115200);
while(1){
    serialRead(8);
    FILE *fp;
    fp =
fopen("/home/pi/Desktop/skripsi/build/line.txt",
"w+");
    fprintf(fp, bufferRead);
    fclose(fp);
}
close(fd);
}

```

Gcode List

G-commands

G0 & G1: Move
 G2 & G3: Controlled Arc Move
 G4: Dwell
 G10: Tool Offset
 G10: Retract
 G11: Unretract
 G17..19: Plane Selection (CNC specific)
 G20: Set Units to Inches
 G21: Set Units to Millimeters
 G22 & G23: Firmware controlled Retract/Precharge
 G28: Move to Origin (Home)
 G29: Detailed Z-Probe
 G29.1: Set Z probe head offset
 G29.2: Set Z probe head offset calculated from toolhead position
 G30: Single Z-Probe
 G31: Set or Report Current Probe status
 G31: Dock Z Probe sled
 G32: Probe Z and calculate Z plane
 G32: Undock Z Probe sled
 G33: Measure/List/Adjust Distortion Matrix
 G38.x Straight Probe (CNC specific)
 G38.2 probe toward workpiece, stop on contact, signal error if failure
 G38.3 probe toward workpiece, stop on contact
 G38.4 probe away from workpiece, stop on loss of contact, signal error if failure
 G38.5 probe away from workpiece, stop on loss of contact
 G40: Compensation Off (CNC specific)
 G54..59: Coordinate System Select (CNC specific)
 G80: Cancel Canned Cycle (CNC specific)
 G90: Set to Absolute Positioning
 G91: Set to Relative Positioning
 G92: Set Position
 G92.x: Reset Coordinate System Offsets (CNC specific)
 G93: Feed Rate Mode (Inverse Time Mode) (CNC specific)
 G94: Feed Rate Mode (Units per Minute) (CNC specific)
 G100: Calibrate floor or rod radius
 G130: Set digital potentiometer value
 G131: Remove offset
 G132: Calibrate endstop offsets
 G133: Measure steps to top
 G161: Home axes to minimum
 G162: Home axes to maximum
 M-commands
 M0: Stop or Unconditional stop
 M1: Sleep or Conditional stop
 M2: Program End
 M3: Spindle On, Clockwise (CNC specific)
 M4: Spindle On, Counter-Clockwise (CNC specific)
 M5: Spindle Off (CNC specific)
 M6: Tool change
 M7: Mist Coolant On (CNC specific)

M8: Flood Coolant On (CNC specific)
 M9: Coolant Off (CNC specific)
 M10: Vacuum On (CNC specific)
 M11: Vacuum Off (CNC specific)
 M17: Enable/Power all stepper motors
 M18: Disable all stepper motors
 M20: List SD card
 M21: Initialize SD card
 M22: Release SD card
 M23: Select SD file
 M24: Start/resume SD print
 M25: Pause SD print
 M26: Set SD position
 M27: Report SD print status
 M28: Begin write to SD card
 M29: Stop writing to SD card
 M30: Delete a file on the SD card
 M30 in grbl
 M31: Output time since last M109 or SD card start to serial
 M32: Select file and start SD print
 M33: Get the long name for an SD card file or folder
 M34: Set SD file sorting options
 M36: Return file information
 M37: Simulation mode
 M38 Compute SHA1 hash of target file
 M40: Eject
 M41: Loop
 M42: Switch I/O pin
 M43: Stand by on material exhausted
 M48: Measure Z-Probe repeatability
 M70: Display message
 M72: Play a tone or song
 M73: Set build percentage
 M80: ATX Power On
 M81: ATX Power Off
 M82: Set extruder to absolute mode
 M83: Set extruder to relative mode
 M84: Stop idle hold
 M85: Set inactivity shutdown timer
 M92: Set axis_steps_per_unit
 M93: Send axis_steps_per_unit
 M98: Call Macro/Subprogram
 M99: Return from Macro/Subprogram
 M98: Get axis_hysteresis_mm
 M99: Set axis_hysteresis_mm
 M101: Turn extruder 1 on (Forward), Undo Retraction
 M102: Turn extruder 1 on (Reverse)
 M103: Turn all extruders off, Extruder Retraction
 M104: Set Extruder Temperature
 M104 in Teacup Firmware
 M105: Get Extruder Temperature
 M106: Fan On
 M106 in RepRapFirmware

M106 in Teacup Firmware
M107: Fan Off
M108: Set Extruder Speed
M109: Set Extruder Temperature and Wait
M109 in Teacup
M109 in Marlin, Sprinter (ATmega port), RepRapFirmware
M109 in Sprinter (4pi port)
M109 in MakerBot
M110: Set Current Line Number
M111: Set Debug Level
M111 in RepRapFirmware
M111 in Repetier
M112: Emergency Stop
M113: Set Extruder PWM
M114: Get Current Position
M115: Get Firmware Version and Capabilities
M116: Wait
M117: Get Zero Position
M117: Display Message
M118: Negotiate Features
M119: Get Endstop Status
M120: Push
M121: Pop
M120: Enable endstop detection
M121: Disable endstop detection
M122: Diagnose
M123: Tachometer value
M124: Immediate motor stop
M126: Open Valve
M126 in MakerBot
M127: Close Valve
M127 in MakerBot
M128: Extruder Pressure PWM
M129: Extruder pressure off
M130: Set PID P value
M131: Set PID I value
M132: Set PID D value
M132 in MakerBot
M133: Set PID I limit value
M133 in MakerBot
M134: Write PID values to EEPROM
M134 in MakerBot
M135: Set PID sample interval
M135 in MakerBot
M136: Print PID settings to host
M140: Set Bed Temperature (Fast)
M141: Set Chamber Temperature (Fast)
M142: Holding Pressure
M143: Maximum hot-end temperature
M144: Stand By Your Bed
M146: Set Chamber Humidity
M149: Set temperature units
M150: Set display color

M160: Number of mixed materials
 M163: Set weight of mixed material
 M164: Store weights
 M190: Wait for bed temperature to reach target temp
 M191: Wait for chamber temperature to reach target temp
 M200: Set filament diameter
 M201: Set max printing acceleration
 M202: Set max travel acceleration
 M203: Set maximum feedrate
 M203 Repetier
 M204: Set default acceleration
 M204 Repetier
 M205: Advanced settings
 M205 Repetier
 M206:
 M206 Marlin, Sprinter, Smoothie, RepRapFirmware - Set home offset
 M206 Repetier - Set eeprom value
 M207: Calibrate z axis by detecting z max length
 M207: Set retract length
 M208: Set axis max travel
 M208: Set unretract length
 M209: Enable automatic retract
 M210: Set homing feedrates
 M211: Disable/Enable software endstops
 M212: Set Bed Level Sensor Offset
 M218: Set Hotend Offset
 M220: Set speed factor override percentage
 M221: Set extrude factor override percentage
 M220: Turn off AUX V1.0.5
 M221: Turn on AUX V1.0.5
 M222: Set speed of fast XY moves
 M223: Set speed of fast Z moves
 M224: Enable extruder during fast moves
 M225: Disable on extruder during fast moves
 M226: Gcode Initiated Pause
 M226: Wait for pin state
 M227: Enable Automatic Reverse and Prime
 M228: Disable Automatic Reverse and Prime
 M229: Enable Automatic Reverse and Prime
 M230: Disable / Enable Wait for Temperature Change
 M231: Set OPS parameter
 M232: Read and reset max. advance values
 M240: Trigger camera
 M240: Start conveyor belt motor / Echo off
 M241: Stop conveyor belt motor / echo on
 M245: Start cooler
 M246: Stop cooler
 M250: Set LCD contrast
 M251: Measure Z steps from homing stop (Delta printers)
 M280: Set servo position
 M300: Play beep sound
 M301: Set PID parameters
 Marlin

RepRapFirmware (v1.09 onwards)
 Smoothie
 Other implementations
 Teacup
 M302: Allow cold extrudes
 M303: Run PID tuning
 M304: Set PID parameters - Bed
 M304 in RepRapPro version of Marlin: Set thermistor values
 M305: Set thermistor and ADC parameters
 M306: set home offset calculated from toolhead position
 M320: Activate autolevel (Repetier)
 M321: Deactivate autolevel (Repetier)
 M322: Reset autolevel matrix (Repetier)
 M323: Distortion correction on/off (Repetier)
 M340: Control the servos
 M350: Set microstepping mode
 M351: Toggle MS1 MS2 pins directly
 M355: Turn case lights on/off
 M360: Report firmware configuration
 SCARA calibration codes (Morgan)
 M360: Move to Theta 0 degree position
 M361: Move to Theta 90 degree position
 M362: Move to Psi 0 degree position
 M363: Move to Psi 90 degree position
 M364: Move to Psi + Theta 90 degree position
 M365: SCARA scaling factor
 M366: SCARA convert trim
 M370: Morgan manual bed level - clear map
 M371: Move to next calibration position
 M372: Record calibration value, and move to next position
 M373: End bed level calibration mode
 M374: Save calibration grid
 M375: Display matrix / Load Matrix
 M380: Activate solenoid
 M381: Disable all solenoids
 M400: Wait for current moves to finish
 M401: Lower z-probe
 M402: Raise z-probe
 M404: Filament width and nozzle diameter
 M405: Filament Sensor on
 M406: Filament Sensor off
 M407: Display filament diameter
 M408: Report JSON-style response
 M420: Set RGB Colors as PWM and is also Enable/Disable Mesh Bed Leveling
 M421: Set a Mesh Bed Leveling Z coordinate
 M450: Report Printer Mode
 M451: Select FFF Printer Mode
 M452: Select Laser Printer Mode
 M453: Select CNC Printer Mode
 M460: Define temperature range for thermistor controlled fan
 M500: Store parameters in EEPROM
 M501: Read parameters from EEPROM
 M502: Revert to the default "factory settings."

M503: Print settings
M540: Enable/Disable "Stop SD Print on Endstop Hit"
M540: Set MAC address
M550: Set Name
M551: Set Password
M552: Set IP address
M553: Set Netmask
M554: Set Gateway
M555: Set compatibility
M556: Axis compensation
M557: Set Z probe point
M558: Set Z probe type
M559: Upload configuration file
M560: Upload web page file
M561: Set Identity Transform
M562: Reset temperature fault
M563: Define or remove a tool
M564: Limit axes
M565: Set Z probe offset
M566: Set allowable instantaneous speed change
M567: Set tool mix ratios
M568: Turn off/on tool mix ratios
M569: Set axis direction and enable values
M570: Set heater timeout
M571: Set output on extrude
M572: Set or report extruder pressure advance
M573: Report heater PWM
M574: Set endstop configuration
M575: Set serial comms parameters
M577: Wait until endstop is triggered
M578: Fire inkjet bits
M579: Scale Cartesian axes
M580: Select Roland
M581: Configure external trigger
M582: Check external trigger
M583: Wait for pin
M600: Set line cross section
M600: Filament change pause
M605: Set dual x-carriage movement mode
M665: Set delta configuration
M666: Set delta endstop adjustment
M667: Select CoreXY mode
M668: Set Z-offset compensations polynomial
M700: Level plate
M701: Load filament
M702: Unload filament
M851: Set Z-Probe Offset
M906: Set motor currents
M907: Set digital trimpot motor
M908: Control digital trimpot directly
M909: Set microstepping
M910: Set decay mode
M911: Set power monitor threshold voltage

M928: Start SD logging
M997: Perform in-application firmware update
M998: Request resend of line
M999: Restart after being stopped by error