



TUGAS AKHIR - TE 141599

**RANCANG BANGUN MESIN PEMOTONG *STYROFOAM* 3
AXIS MENGGUNAKAN *HOT CUTTING PEN* DENGAN
KONTROL PID**

Putut Dwi Wijaya
NRP 2213100156

Dosen Pembimbing
Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.
Ir. Tasripan, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

***DEVELOPMENT OF 3 AXIS STYROFOAM CUTTING
MACHINE USING HOT CUTTING PEN WITH PID
CONTROL***

Putut Dwi Wijaya
NRP 2213100156

Supervisor
Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.
Ir. Tasripan, MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “RANCANG BANGUN MESIN PEMOTONG *STYROFOAM* 3 AXIS MENGGUNAKAN *HOT CUTTING PEN* DENGAN KONTROL PID” adalah benar-benar hasil karya intelektual sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya orang lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Surabaya, 23 Juli 2017

Putut Dwi Wijaya
NRP.2213100156

**RANCANG BANGUN MESIN PEMOTONG *STYROFOAM* 3 AXIS
MENGUNAKAN *HOT CUTTING PEN* DENGAN KONTROL
PID**

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Elektronika
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

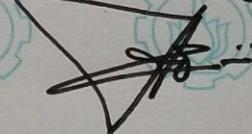
Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.
NIP. 196904261994031003

Dosen Pembimbing II



Ir. Tasripan, MT.
NIP. 196204181990031004



JULI, 2017

RANCANG BANGUN MESIN PEMOTONG STYROFOAM 3 AXIS MENGGUNAKAN HOT CUTTING PEN DENGAN KONTROL PID

Nama : Putut Dwi Wijaya
Pembimbing I : Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.
Pembimbing II : Ir. Tasripan, MT.

ABSTRAK

Perkembangan industri kreatif *styrofoam* semakin pesat. Pemotongan *styrofoam* secara manual sangat sulit dan tidak bisa konsisten. Dibutuhkan mesin pemotong *styrofoam* yang bisa memotong secara otomatis. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini penulis membuat mesin pemotong *styrofoam 3 axis* menggunakan *hot cutting pen* yang dapat memotong dari starting point manapun sesuai dengan kehendak operator, sehingga bisa memotong lebih efektif. Pada aktuator terdapat sistem kontrol suhu dengan metode PID agar selama proses pemotongan suhu tetap stabil sehingga hasil potongan rapi dan konsisten. Untuk mengontrol keseluruhan kerja mesin, digunakan mikrokontroler arduino. Pemotongan dilakukan dengan mengirimkan file *g-code* kepada mikrokontroler melalui *software Universal G-code Sender*, kemudian mikrokontroler mengirimkan sinyal untuk menggerakkan driver motor dan driver motor menggerakkan motor stepper sehingga dihasilkan gerakan aktuator sesuai dengan gambar pada file *g-code*. Setelah dilakukan pengujian, didapatkan hasil bahwa kontrol suhu *hot cutting pen* menggunakan PID masih menghasilkan lebar osilasi sebesar 11° Celcius. Pada pemotongan *styrofoam* 1 cm diperlukan suhu 290° Celcius dan *feed rate* 300 mm/min, *styrofoam* 1,5 cm diperlukan suhu 300° Celcius dan *feed rate* 300 mm/min, *styrofoam* 2 cm diperlukan suhu 310° Celcius dan *feed rate* 300 mm/min, *styrofoam* 3 cm diperlukan suhu 330° Celcius dan *feed rate* 300 mm/min. Diharapkan mesin ini bisa menyokong industri kreatif *styrofoam* di Indonesia.

Kata kunci: *hot cutting pen*, kontrol PID, *styrofoam*

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

DEVELOPMENT OF 3 AXIS STYROFOAM CUTTING MACHINE USING HOT CUTTING PEN WITH PID CONTROL

Name : Putut Dwi Wijaya
1st Advisor : Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.
2nd Advisor : Ir. Tasripan, MT.

ABSTRACT

The development of creative industry styrofoam increase rapidly. Styrofoam cutting manually is very difficult and can not be consistent. It takes a styrofoam cutting machine that can cut automatically. Therefore, in this final project the author makes cutting machine styrofoam 3 axis using hot cutting pen that can cut from any starting point according to the will of operator, so that we can cut more effective. There is a temperature control system with PID method in actuator to stabilize the temperature during the process of cutting so that the cut is neat and consistent. Arduino microcontroller used to control the whole machine work. Cutting prosses starting by sending g-code file to microcontroller through Universal G-code Sender software, then microcontroller sends signal to drive motor driver and motor driver to drive stepper motion so as to produce actuator movement according to picture in g-code file. After the test, it was found that hot temperature control of the pen using PID still yields an oscillation width of 11° Celcius. 1 cm cutting styrofoam required 290° Celsius temperature and feed rate 300 mm/min, Styrofoam 1.5 cm required 300° Celsius temperature and feed rate 300 mm/min, 2 cm Styrofoam required 310° Celsius temperature and feed rate 300 mm/min, Styrofoam 3 Cm required temperature 330° Celcius and feed rate 300 mm/min. It is expected that this machine can support the creative styrofoam industry in Indonesia.

Keywords: hot cutting pen, PID control, styrofoam

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, syukur yang tiada henti penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas kasih dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini yang merupakan persyaratan dalam menyelesaikan pendidikan program Strata-Satu di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak, dan penulis sampaikan rasa terima kasih. Terima kasih sebesar-besarnya juga penulis sampaikan kepada berbagai pihak yang mendukung dan membantu dalam tugas akhir ini, diantaranya :

1. Dr. Muhammad Rivai, ST., MT. selaku dosen pembimbing pertama, atas bimbingan, inspirasi, pengarahan, dan motivasi yang diberikan selama pengerjaan penelitian tugas akhir ini.
2. Ir. Tasripan, MT. selaku dosen pembimbing kedua, atas bimbingan, inspirasi, pengarahan, dan motivasi yang diberikan selama pengerjaan penelitian tugas akhir ini.
3. Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT., Astria Nur Irfansyah, ST., M.Eng, Ir. Siti Halimah Baki, MT., Rahmad Setiawan, ST.,MT. selaku dosen penguji yang memberikan banyak masukan dan pengarahan sehingga penulis dapat menyelesaikan buku tugas akhir ini dengan baik.
4. Kedua orang tua yang senantiasa memberikan doa, nasihat, motivasi, dukungan dan karena keberadaan merekalah penulis tetap semangat untuk menyelesaikan penelitian ini.
5. Rekan-rekan Laboratorium Elektronika 202, Laboratorium Elektronika Industri 402 dan e-53 yang banyak membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis sadar bahwa Tugas Akhir ini masih belum sempurna dan masih banyak hal yang perlu diperbaiki. Saran, kritik dan masukan dari semua pihak sangat membantu penulis untuk pengembangan lebih lanjut. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi banyak pihak terutama dalam pengembangan industri pemotongan *styrofoam*.

Surabaya, 23 Juli 2017
Putut Dwi Wijaya

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Metodologi Penelitian.....	3
1.6. Sistematika Penulisan.....	4
1.7. Relevansi.....	5
BAB II	
TEORI PENUNJANG.....	7
2.1. <i>Styrofoam</i>	7
2.2. Alat pemotong <i>styrofoam</i>	8
2.3. Sensor Suhu Termokopel.....	9
2.4. Arduino.....	12
2.5. Motor Stepper.....	14
2.6. Driver Motor Stepper.....	21
2.7. Kontrol PID.....	22
BAB III	
PERANCANGAN SISTEM.....	25
3.1. Perancangan Mekanik.....	26
3.2. <i>Universal G-code Sender</i>	27
3.3. Perancangan Sistem Aktuator.....	28
3.4. Perancangan Sistem Motor Stepper.....	31
3.5. Driver Motor.....	32
3.6. PWM.....	33
3.7. Pembuatan Kontrol PID.....	34
BAB IV	
PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN SISTEM.....	387
4.1. Perakitan Mesin.....	37

4.2. Pengujian Arah Putaran Motor Stepper	39
4.3. Pengujian Kalibrasi Aksis.....	44
4.4. <i>Tuning</i> PID dan Uji Kontrol Suhu Aktuator	49
4.5. Uji Pemotongan <i>Styrofoam</i>	54
4.5.1. Pemotongan <i>Styrofoam</i> 1 cm	54
4.5.2. Pemotongan <i>Styrofoam</i> 1,5 cm	61
4.5.3. Pemotongan <i>Styrofoam</i> 2 cm	63
4.5.4. Pemotongan <i>Styrofoam</i> 3 cm	64
4.6. Uji Pemotongan <i>Styrofoam</i> dengan G-code.....	54
BAB V	
PENUTUP	69
5.1. Kesimpulan	69
5.2. Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN A	7673
LAMPIRAN B	7674
LAMPIRAN C	7675
LAMPIRAN D	7676
BIODATA PENULIS	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Styrofoam</i>	7
Gambar 2.2 Pemotong <i>styrofoam</i> model <i>hot wire</i>	9
Gambar 2.3 Hasil potongan <i>styrofoam</i> model <i>hot wire</i>	10
Gambar 2.4 Mesin CNC <i>hot wire</i>	10
Gambar 2.5 Sensor suhu termokopel	11
Gambar 2.6 <i>Motor stepper</i> unipolar.....	15
Gambar 2.7 <i>Motor stepper</i> bipolar	16
Gambar 2.8 Mode <i>Full Step</i> fase tunggal.....	17
Gambar 2.9 Mode <i>Full Step</i> fase ganda	18
Gambar 2.10 Mode <i>Half Step</i>	19
Gambar 2.11 Mode Microstepping	21
Gambar 3.1. Diagram Blok Sistem	25
Gambar 3.2. Desain mekanik mesin.....	26
Gambar 3.3. GUI <i>Universal G-code Sender</i>	27
Gambar 3.4. GUI visualisasi <i>g-code</i>	28
Gambar 3.5. <i>Hot cutting pen</i>	29
Gambar 3.6. <i>Thermocouple Type-K</i>	29
Gambar 3.7. MAX6675	30
Gambar 3.8. Motor Stepper PHB57S45-425AD.....	31
Gambar 3.9. <i>Driver stepper motor</i> TB6600.....	32
Gambar 3.10. Bentuk sinyal output PWM	34
Gambar 4.1. Kerangka mesin.....	37
Gambar 4.2. Mesin jadi tanpa kotak panel	38
Gambar 4.3. Mesin jadi dengan kotak panel	38
Gambar 4.4. Aksis Z mesin pemotong <i>styrofoam</i>	39
Gambar 4.5. Motor stepper pada aksis Z	40
Gambar 4.6. Aksis Y mesin	41
Gambar 4.7. Motor stepper pada aksis Y	41
Gambar 4.8. Aksis X mesin	42
Gambar 4.9. Motor stepper pada aksis X	43
Gambar 4.10. Pengukuran lintasan tempuh sumbu Y	45
Gambar 4.11. Pengukuran lintasan tempuh sumbu X	46
Gambar 4.12. Pengukuran lintasan tempuh sumbu Z	47
Gambar 4.13. Grafik suhu dengan $K_{cr}=0.5$	49

Gambar 4.14. Grafik suhu dengan $K_{cr}=1$	50
Gambar 4.15. Grafik suhu dengan $K_{cr}=2$	50
Gambar 4.16. Grafik suhu dengan $K_{cr}=4$	51
Gambar 4.17. Grafik suhu dengan $K_{cr}=5$	51
Gambar 4.18. Grafik suhu dengan $K_{cr}=6$	52
Gambar 4.19. Grafik suhu dengan metode Ziegler-Nicholes	53
Gambar 4.20. Grafik suhu dengan tuning PID.....	53
Gambar 4.21. Uji 1 pemotongan <i>styrofoam</i> 1 cm	54
Gambar 4.22. Uji 2 pemotongan <i>styrofoam</i> 1 cm	55
Gambar 4.23. Uji 3 pemotongan <i>styrofoam</i> 1 cm	56
Gambar 4.24. Uji 4 pemotongan <i>styrofoam</i> 1 cm	56
Gambar 4.25. Uji 5 pemotongan <i>styrofoam</i> 1 cm	57
Gambar 4.26. Uji 6 pemotongan <i>styrofoam</i> 1 cm	58
Gambar 4.27. Uji 7 pemotongan <i>styrofoam</i> 1 cm	59
Gambar 4.28. Uji 8 pemotongan <i>styrofoam</i> 1 cm	59
Gambar 4.29. Uji 9 pemotongan <i>styrofoam</i> 1 cm	60
Gambar 4.30. Uji 10 pemotongan <i>styrofoam</i> 1 cm	61
Gambar 4.31. Uji 1 pemotongan <i>styrofoam</i> 1,5 cm	62
Gambar 4.32. Uji 2 pemotongan <i>styrofoam</i> 1,5 cm	62
Gambar 4.33. Uji 1 pemotongan <i>styrofoam</i> 2 cm	63
Gambar 4.34. Uji 2 pemotongan <i>styrofoam</i> 2 cm	64
Gambar 4.35. Uji 1 pemotongan <i>styrofoam</i> 3 cm	65
Gambar 4.36. Uji 2 pemotongan <i>styrofoam</i> 3 cm	65
Gambar 4.37. Visualisasi file <i>g-code</i>	66
Gambar 4.38. Proses pemotongan <i>styrofoam</i> 1,5 cm	67
Gambar 4.39. Hasil pemotongan <i>styrofoam</i> 1,5 cm	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Mode <i>Full Step</i> fase tunggal.....	17
Tabel 2.2. Mode <i>Full Step</i> fase ganda	18
Tabel 2.3. Mode <i>Half Step</i>	20
Tabel 4.1. Uji arah putar motor stepper aksis Z	40
Tabel 4.2. Uji arah putar motor stepper aksis Y	41
Tabel 4.3. Uji arah putar motor stepper aksis X	44
Tabel 4.4. Uji kalibrasi aksis Y	45
Tabel 4.5. Uji kalibrasi aksis X	47
Tabel 4.6. Uji kalibrasi aksis Z.....	48
Tabel 4.7. Rumus variable PID dengan metode Ziegler-Nicholes.	52

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan industri kreatif semakin pesat akhir-akhir ini. Salah satu contohnya adalah industri kreatif dalam pembuatan dekorasi dari *styrofoam*. Dekorasi dari *styrofoam* bisa digunakan dalam banyak hal, seperti: ucapan selamat pada pernikahan, wisuda, promosi jabatan; ucapan bela sungkawa, tugas senirupa siswa, pembuatan bantalan pengaman barang, dekorasi pada acara karnaval, festival budaya, dan lain-lain.

Alat pemotongan *styrofoam* ada yang bersifat manual dan otomatis. Contoh alat pemotong *styrofoam* manual yaitu *cutter* dan *hot wire* [1]. Saat ini banyak pengrajin *styrofoam* di Indonesia yang menggunakan alat pemotong *styrofoam* manual, seperti yang terjadi di pasar bunga dan *styrofoam* di Jalan Koyan, Gubeng, Surabaya. Pemotongan *styrofoam* secara manual yang baik dan terencana melibatkan serangkaian aktivitas lain sebagai penunjang yang mendukung misalnya pengukuran, sketsa, dan lain-lain. Selain itu, apabila dituntut bentuk pemotongan yang seragam dalam jumlah yang cukup banyak, akan menjadi masalah karena perlu konsistensi dalam pengukuran, sketsa, dan pemotongan

Untuk mengatasi masalah tersebut, terdapat alat pemotong otomatis seperti *CNC hot wire* [2] [3] yang saat ini telah dipasarkan di Indonesia. Mesin *CNC hot wire* bekerja secara otomatis dengan menginputkan file *g-code* dari komputer kemudian mesin *CNC hot wire* dapat bergerak otomatis sesuai dengan input *g-code*. Akan tetapi, *CNC hot wire* yang ada saat ini tidak dilengkapi dengan sistem kontrol suhu otomatis sehingga saat proses pemotongan semakin lama suhu pada *hot wire* turun karena kalor merambat pada *styrofoam* [4]. Suhu yang tidak konsisten dapat mengakibatkan hasil pemotongan yang kurang rapi dan *kerf width* [5] tidak konsisten. Selain itu, *hot wire* kurang efektif untuk memotong *styrofoam* karena hanya bisa melakukan pemotongan dua dimensi, sehingga pemotongan harus dimulai dari tepi dan keluar lagi melalui jalur awal. Hal ini menjadi masalah apabila desain *styrofoam* yang dibentuk memiliki tepi bersambung seperti huruf O dan P.

Oleh karena itu, pada tugas akhir ini penulis membuat mesin pemotong *styrofoam 3 axis* menggunakan *hot cutting pen* yang dapat

memotong dari starting point manapun sesuai dengan kehendak operator, sehingga bisa memotong lebih efektif dan *styrofoam* sisa tetap bisa digunakan. Pada *hot cutting pen* terdapat sensor suhu dan sistem kontrol suhu menggunakan metode PID agar selama proses pemotongan suhu tetap stabil. Suhu yang stabil akan menghasilkan potongan yang rapi dan konsisten. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Nano untuk menghemat biaya dan daya. Diharapkan mesin ini bisa menyokong industri kreatif *styrofoam* di Indonesia.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat dirumuskan beberapa masalah, antara lain :

1. Bagaimana membuat mesin pemotong *styrofoam* otomatis.
2. Apa metode yang digunakan untuk mengontrol suhu pemotong.
3. Berapa kecepatan pemotongan yang efektif untuk memotong *Styrofoam* dengan ketebalan tertentu.
4. Berapa suhu aktuator yang efektif untuk memotong *Styrofoam* dengan ketebalan tertentu.

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut:

1. Membuat alat pemotong *styrofoam* otomatis 3 aksis dengan aktuator *hot cutting pen*.
2. Menggunakan metode PID untuk mengontrol suhu *hot cutting pen*.
3. Mendapatkan nilai kecepatan pemotongan yang efektif untuk memotong *Styrofoam* dengan ketebalan tertentu.
4. Mendapatkan nilai suhu aktuator yang efektif untuk memotong *Styrofoam* dengan ketebalan tertentu.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Alat hanya diaplikasikan untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalan hingga 3 cm.
2. Dimensi kerja maksimal alat ini adalah 1 x 1 meter.
3. Sistem ini bekerja pada suhu maksimal 340° Celcius.

1.5. Metodologi Penelitian

Dalam penyelesaian tugas akhir ini digunakan metodologi sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan dasar teori yang menunjang dalam penulisan Tugas Akhir. Dasar teori ini dapat diambil dari buku-buku, jurnal, dan artikel-artikel di internet.

2. Perancangan Hardware

Perancangan hardware dibagi menjadi hardware mekanik dan hardware elektronik. Pada hardware mekanik, dilakukan perancangan mekanik alat pada tiap bagian sehingga alat memiliki dimensi kerja sebesar 1 x 1 meter. Sedangkan perancangan hardware elektronik yaitu berupa rangkaian elektronik dari alat yang meliputi mikrokontroler, driver motor, motor stepper, aktuator *hot cutting pen*, dan sensor suhu.

3. Perancangan Software

Software dirancang dengan pembuatan program untuk pergerakan motor stepper dan program untuk mengontrol suhu aktuator. Pergerakan motor stepper harus sesuai dengan input g-code dari computer kepada mikrokontroler. Apabila pergerakan motor stepper tidak sesuai dengan input, maka dilakukan perubahan variable *target* agar dihasilkan panjang lintasan dari aktuator yang sama dengan panjang lintasan yang di inputkan. Sedangkan untuk mengontrol suhu, digunakan metode PID. Diperlukan variabel PID yang tepat agar dihasilkan kontrol suhu yang stabil. Pembacaan suhu aktuator dan kontrol suhu dengan metode PID ditulis dalam bentuk program dalam mikrokontroler Arduino.

4. Pengujian Sistem

Pengujian alat dilakukan untuk menentukan berapa nilai variable PID yaitu K_p , T_i , K_d sehingga dihasilkan suhu aktuator yang memiliki osilasi minimal dan risetime tidak terlalu lama. Pengujian juga dilakukan untuk menentukan besar *feed rate* dan suhu yang diperlukan untuk memotong

Styrofoam dengan ketebalan 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, dan 3 cm. apabila pada hasil pengujian masih terdapat kesalahan seperti aktuator bengkok karena suhu terlalu rendah atau *feed rate* terlalu tinggi, masih terdapat sisa jarring-jaring *Styrofoam*, maka akan dilakukan pengujian ulang dengan mengubah variabel suhu set poin dan *feed rate* alat sehingga didapatkan hasil pemotongan *styrofoam* yang bagus.

5. Analisa

Analisa dilakukan terhadap hasil dari pengujian sehingga dapat ditentukan suhu aktuator yang memiliki osilasi minimal dan risetime tidak terlalu lama. Analisa juga dilakukan untuk mencari nilai set poin suhu dan *feed rate* untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm, 1,5 cm, 2cm, dan 3 cm.

6. Penyusunan Laporan Tugas Akhir

Tahap penulisan laporan tugas akhir adalah tahapan terakhir dari proses pengerjaan tugas akhir ini. Laporan tugas akhir berisi seluruh hal yang berkaitan dengan tugas akhir yang telah dikerjakan yaitu meliputi pendahuluan, tinjauan pustaka dan teori penunjang, perancangan sistem, pengujian, dan penutup.

1.6. Sistematika Penulisan

Laporan tugas akhir ini terdiri dari lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

- Bab 1: Pendahuluan
Bab ini meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.
- Bab 2: Dasar Teori
Bab ini menjelaskan tentang dasar-dasar teori yang dibutuhkan dalam pengerjaan tugas akhir ini, yang meliputi teori dasar tentang *styrofoam*, *hot cutting pen*, sensor suhu *thermocouple*, modul *thermocouple*, mikrokontroler arduino, motor stepper, driver motor, dan kontrol PID.
- Bab 3: Perancangan Alat
Bab ini menjelaskan tentang perencanaan sistem baik

perangkat keras (*hardware*) maupun perangkat lunak (*software*) dari mesin pemotong *styrofoam 3 axis*.

- Bab 4: Pengujian Alat
Bab ini menjelaskan tentang hasil yang didapat dari tiap blok sistem dan subsistem serta hasil evaluasi sistem tersebut.
- Bab 5: Penutup
Bab ini menjelaskan tentang kesimpulan meliputi kekurangan-kekurangan pada kerja alat dari hasil analisa serta saran untuk pengembangan ke depan.

1.7. Relevansi

Hasil dari tugas akhir ini diharapkan mampu menjadi salah satu alternatif alat pemotong *styrofoam* otomatis yang efektif dan mempunyai tingkat konsistensi potongan yang baik. Diharapkan kedepannya alat ini bisa membantu perkembangan industry kreatif *styrofoam* terutama di Indonesia.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

BAB II

TEORI PENUNJANG

Teori penunjang dalam bab ini menjelaskan tentang teori penunjang yang berhubungan dengan keseluruhan sistem yang akan dibuat pada tugas akhir ini. Sedangkan tinjauan pustaka dalam bab ini menjelaskan tentang sistem-sistem yang berhubungan dengan tugas akhir ini dan pernah diimplementasikan oleh penulis-penulis sebelumnya.

2.1. Styrofoam

Styrofoam yang memiliki nama lain polystyrene, merupakan salah satu polimer yang ditemukan pada sekitar tahun 1930, dibuat melalui proses polimerisasi adisi dengan cara suspense [6]. Stirena dapat diperoleh dari sumber alam yaitu petroleum. Stirena merupakan cairan yang tidak berwarna menyerupai minyak dengan bau seperti benzena dan memiliki rumus kimia $C_6H_5CH=CH_2$ atau ditulis sebagai C_8H_8 . *Styrofoam* memiliki titik leleh sebesar 82^0-103^0 Celcius [6].



Gambar 2.1 *Styrofoam*

Salah satu jenis polistirena yang cukup populer di kalangan masyarakat produsen maupun konsumen adalah polistirena foam. Polistirena foam dihasilkan dari campuran 90-95% polistirena dan 5-10% gas seperti n-butana atau n-pentana [7]. Polistirena foam dibuat dari monomer stirena melalui polimerisasi suspensi pada tekanan dan suhu tertentu, selanjutnya dilakukan pemanasan untuk melunakkan resin dan menguapkan sisa *blowing agent*. Polistirena foam merupakan bahan plastik yang memiliki sifat khusus dengan struktur yang tersusun dari butiran dengan kerapatan rendah, mempunyai bobot ringan, dan terdapat ruang antar butiran yang berisi udara yang tidak dapat menghantar panas sehingga hal ini membuatnya menjadi insulator panas yang sangat baik.

2.2. Alat Pemotong *Styrofoam*

Untuk memotong *Styrofoam* menjadi bentuk yang sesuai dengan keinginan, diperlukan alat pemotong *Styrofoam*. Alat pemotong *Styrofoam* dibagi menjadi pemotong manual dan pemotong otomatis. Alat pemotong manual menggunakan peralatan seperti gunting, penggaris, spidol, *cutter*, jarum, dan tang. Terdapat juga jenis *cutter* panas untuk memudahkan pekerjaan dalam memotong *Styrofoam*.

Proses pemotongan *Styrofoam* dengan cara manual membutuhkan keahlian khusus dan waktu yang cukup lama. Oleh karena itu, dibuatlah alat pemanas *hot wire*. Pemotong model *hot wire* yaitu sebuah kawat yang disambungkan oleh dua kabel pada kedua ujung kawat, dan dialiri arus listrik sehingga dihasilkan panas yang dapat memotong *Styrofoam*. Biasanya *hot wire* dipasang vertikal pada sebuah meja secara permanen, sehingga pemotongan dilakukan hanya dengan menggerakkan *Styrofoam*.

Untuk mempelajari jenis-jenis pemotong *Styrofoam*, penulis melakukan studi lapangan di pasar kembang jalan Kayon, Gubeng, Surabaya. Setelah dilakukan survei, hampir semua pengrajin menggunakan teknik pemotongan manual dengan *hot wire*. Salah satu pengrajin yang menggunakan *hot wire* yaitu toko Gravila. *Hot wire* dipasang di tengah meja berukuran 1 x 2 meter seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Pemotong *Styrofoam* model *hot wire*

Proses pemotongan *Styrofoam* pada toko Gravila tersebut dilakukan oleh professional secara langsung untuk bentuk-bentuk yang tidak berpola dan tidak harus memiliki ukuran sama. Biasanya *styrofoam* seperti hiasan di bagian pinggir karangan bunga tidak memiliki pola khusus sehingga proses pemotongan dilakukan secara langsung. Sedangkan untuk pemotongan huruf, *Styrofoam* diberi garis-garis ukuran pemotongan terlebih dahulu, baru kemudian diporong agar ukuran tinggi dan lebarnya proporsional dengan huruf-huruf yang lain. Setelah dilakukan pemotongan, sisa garis ukuran pada *Styrofoam* masih terlihat seperti pada gambar 2.3.

Dengan menggunakan pemotong model *hot wire*, proses pemotongan dapat dilakukan lebih cepat dan lebih rapi daripada menggunakan cutter. Hasil potongan juga rapi dan memiliki celah bekas potongan sekitar 1,5 mm. Akan tetapi, banyak kekurangan dari alat pemotong model ini, yaitu proses pengukuran masih dilakukan secara manual menggunakan penggaris dan pensil. Hasil potongan memiliki celah potongan untuk pola berlanjut seperti huruf O, P, dan sebagainya. Proses pemotongan juga harus dilakukan oleh tenaga professional agar menghasilkan bentuk potongan *Styrofoam* yang bagus dan rapi. Kekurangan lainnya yaitu untuk melakukan pemotongan beberapa pola *Styrofoam* dengan bentuk yang sama, tidak bisa dihasilkan bentuk potongan yang benar-benar sama.



Gambar 2.3 Hasil potongan *styrofoam* dengan *hot wire*

Setelah dilakukan survey lebih lanjut, ditemukan satu toko pada jalan Koyan, Gubeng, Surabaya bernama Sekar Sari Florist yang menggunakan alat pemotong otomatis, yaitu *CNC hot wire*. *CNC hot wire* yang digunakan memiliki panjang 2 meter dan tinggi 1 meter seperti pada gambar 2.4. Kelebihan dari alat ini yaitu proses pemotongan dilakukan secara otomatis dengan memasukkan *g-code* dari komputer kemudian mesin dapat bergerak otomatis sesuai dengan *g-code* yang di inputkan. Hasil potongan rapi dan celah sisa potongan cukup tipis yaitu sekitar 1,5 cm. Akan tetapi, kekurangan dari alat ini yaitu harganya sangat mahal, harus memotong salah satu sisi apabila bentuk pola berlanjut seperti huruf O dan P, dan pemotongan dilakukan secara vertical sehingga apabila *Styrofoam* tipis, hasil potongan miring.



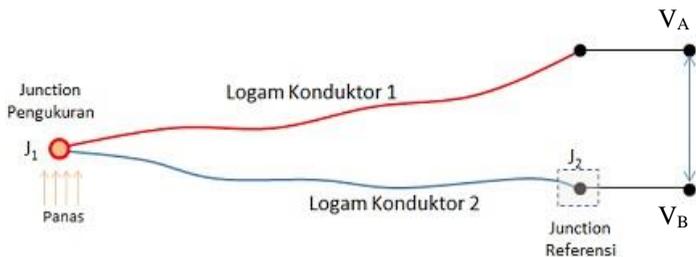
Gambar 2.4 Mesin *CNC hot wire*

2.3. Sensor Suhu Termokopel

Termokopel (*Thermocouple*) adalah jenis sensor suhu yang digunakan untuk mendeteksi atau mengukur suhu melalui dua jenis logam konduktor berbeda yang digabung pada ujungnya sehingga menimbulkan efek “*Thermo-electric*” [8]. Efek *Thermo-electric* pada Termokopel ini ditemukan oleh seorang fisikawan Estonia bernama *Thomas Johann Seebeck* pada Tahun 1821, dimana sebuah logam konduktor yang diberi perbedaan panas secara gradient akan menghasilkan tegangan listrik. Perbedaan Tegangan listrik diantara dua persimpangan (*junction*) ini dinamakan dengan Efek “*Seebeck*”.

Termokopel merupakan salah satu jenis sensor suhu yang banyak digunakan karena memiliki beberapa kelebihan, misalnya responnya yang cepat terhadap perubahan suhu dan juga rentang suhu operasionalnya yang luas yaitu berkisar diantara -200°C hingga 2000°C . Selain respon yang cepat dan rentang suhu yang luas, Termokopel juga tahan terhadap guncangan/getaran dan mudah digunakan.

Pada dasarnya, termokopel hanya terdiri dari dua kawat logam konduktor yang berbeda jenis dan digabungkan ujungnya. Ujung penggabungan logam konduktor yang berbeda jenis disebut dengan persimpangan logam atau *junction*. Satu jenis logam konduktor yang terdapat pada termokopel akan berfungsi sebagai referensi dengan suhu konstan (tetap) sedangkan yang satunya lagi sebagai logam konduktor yang mendeteksi suhu panas. Prinsip kerja termokopel dapat dilihat seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2.5 Sensor suhu termokopel

Berdasarkan gambar 2.3, ketika kedua persimpangan atau *junction* memiliki suhu yang sama, maka beda potensial atau tegangan listrik yang melalui dua persimpangan tersebut adalah “NOL” atau $V_1 = V_2$. Akan tetapi, ketika persimpangan yang terhubung dalam rangkaian diberikan suhu panas atau dihubungkan ke obyek pengukuran, maka akan terjadi perbedaan suhu diantara dua persimpangan tersebut yang kemudian menghasilkan tegangan listrik yang nilainya sebanding dengan suhu panas yang diterimanya atau $V_1 - V_2$. Tegangan Listrik yang ditimbulkan ini pada umumnya sekitar $1 \mu\text{V} - 70\mu\text{V}$ pada tiap derajat Celcius. Tegangan tersebut kemudian dikonversikan sesuai dengan Tabel referensi yang telah ditetapkan sehingga menghasilkan pengukuran yang mudah dimengerti.

2.4. Arduino

Arduino adalah salah satu papan pengembangan mikrokontroler yang mendukung penggunaan *breadboard*. Arduino juga merupakan *platform* hardware terbuka yang ditujukan kepada siapa saja yang ingin membuat purwarupa peralatan elektronik interaktif berdasarkan hardware dan software yang fleksibel dan mudah digunakan. Mikrokontroler diprogram menggunakan bahasa pemrograman arduino yang memiliki kemiripan *syntax* dengan bahasa pemrograman C. Karena sifatnya yang terbuka maka siapa saja dapat mengunduh skema hardware arduino dan membangunnya. Arduino menggunakan keluarga mikrokontroler ATmega yang dirilis oleh Atmel sebagai basis, namun ada individu/perusahaan yang membuat *clone* arduino dengan menggunakan mikrokontroler lain dan tetap kompatibel dengan arduino pada level hardware. Untuk fleksibilitas, program dimasukkan melalui bootloader meskipun ada opsi untuk membypass *bootloader* dan menggunakan *downloader* untuk memprogram mikrokontroler secara langsung melalui port ISP. Ada beberapa jenis Arduino yang masing-masing memiliki spesifikasi yang berbeda, misalnya Arduino yaitu Arduino Mega dan Arduino Nano.

Arduino Mega2560 adalah papan mikrokontroler berbasis ATmega2560. Arduino Mega2560 memiliki 54 pin digital input/output, dimana 15 pin dapat digunakan sebagai output PWM, 16 pin sebagai input analog, dan 4 pin sebagai UART (port serial hardware), 16 MHz kristal osilator, koneksi USB, jack power, header ICSP, dan tombol reset. Ini semua yang diperlukan untuk mendukung mikrokontroler. Untuk mengaktifkan Arduino Mega, diperlukan kabel USB tipe *A to B* dan menghubungkannya ke komputer atau dengan menggunakan sumber eksternal. Daya eksternal (non-USB) bisa berupa adaptor AC ke DC atau baterai. Adaptor dapat dihubungkan dengan memasang konektor *center-positive* 2.1mm ke soket daya board. Sedangkan sumber dari baterai dapat dimasukkan ke dalam header pin Gnd dan Vin pada konektor *POWER*. Arduino Mega dapat beroperasi pada suplai eksternal 6 hingga 20Volt. Akan tetapi, jika sumber tegangan kurang dari 7V, bisa menyebabkan output dari pin 5V kurang dari lima volt sehingga dapat menyebabkan kinerja Arduino tidak stabil. Sedangkan jika menggunakan sumber tegangan lebih dari 12Volt, bisa menyebabkan regulator tegangan terlalu panas dan merusak papan arduino. Sumber tegangan yang disarankan adalah 7 sampai 12 volt.

Sedangkan Arduino Nano diciptakan dengan basis mikrokontroler ATmega328 (untuk Arduino Nano versi 3.x) atau ATmega 168 (untuk Arduino versi 2.x). Arduino Nano kurang lebih memiliki fungsi yang sama dengan Arduino Duemilanove, tetapi dalam paket yang berbeda. Arduino Nano tidak menyertakan konektor DC berjenis *Barrel Jack*, dan dihubungkan ke komputer menggunakan port USB Mini-B. Arduino Nano dirancang dan diproduksi oleh perusahaan Gravitech.

Arduino Nano dapat diaktifkan melalui koneksi USB Mini-B, atau melalui catu daya eksternal dengan tegangan belum teregulasi antara 6-20 Volt yang dihubungkan melalui pin 30 atau pin VIN, atau melalui catu daya eksternal dengan tegangan teregulasi 5V melalui pin 27 atau pin 5V. Akan tetapi, sumber tegangan yang disarankan adalah 7 sampai 12 volt. Sumber daya akan secara otomatis dipilih dari sumber tegangan yang lebih tinggi. Chip FTDI FT232L pada Arduino Nano akan aktif apabila memperoleh daya melalui USB. Ketika Arduino Nano diberikan daya dari luar (Non-USB) maka Chip FTDI tidak aktif dan pin

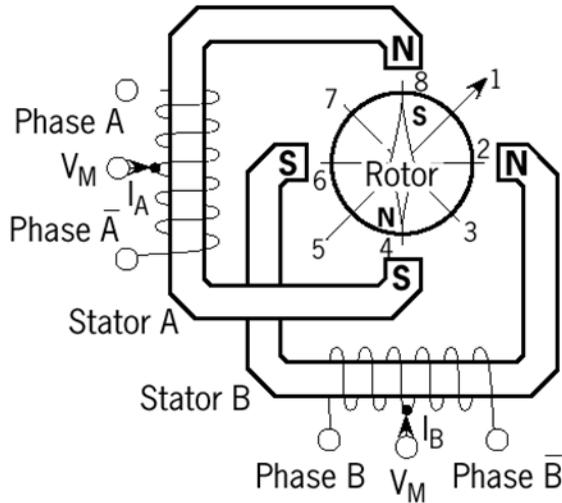
3.3V pun tidak tersedia (tidak mengeluarkan tegangan), sedangkan LED TX dan RX pun berkedip apabila pin digital 0 dan 1 berada pada posisi *HIGH*.

2.5. Motor Stepper

Motor *stepper* adalah perangkat elektromekanis yang bekerja dengan mengubah pulsa elektronis menjadi gerakan mekanis diskrit. Prinsip kerja motor stepper mirip dengan motor DC, sama-sama dicatu dengan tegangan DC untuk memperoleh medan magnet. Bila motor DC memiliki magnet tetap pada stator, motor stepper mempunyai magnet tetap pada rotor. Motor stepper dinyatakan dengan spesifikasi : “berapa fasa “, “berapa derajat perstep”, “berapa volt tegangan catu untuk tiap lilitan” dan ”berapa ampere/miliampere arus yang dibutuhkan untuk tiap lilitan”. Motor stepper tidak dapat bergerak sendirinya, tetapi bergerak secara per-step sesuai dengan spesifikasinya, dan bergerak dari satu step ke step berikutnya memerlukan waktu, serta menghasilkan torsi yang besar pada kecepatan rendah. Motor stepper juga memiliki karakteristik yang lain yaitu torsi penahan, yang memungkinkan menahan posisinya. Hal ini sangat berguna untuk aplikasi dimana suatu sistem memerlukan keadaan start dan stop. Motor stepper tidak merespon sinyal clock dan mempunyai beberapa lilitan dimana lilitan-lilitan tersebut harus dicatu (tegangan) dahulu dengan suatu urutan tertentu agar dapat berotasi. Membalik urutan pemberian tegangan tersebut akan menyebabkan putaran motor stepper yang berbalik arah. Jika sinyal kontrol tidak terkirim sesuai dengan perintah maka motor stepper tidak akan berputar secara tepat, mungkin hanya akan bergetar dan tidak bergerak. Untuk mengontrol motor stepper digunakan suatu rangkaian driver yang menangani kebutuhan arus dan tegangan.

Penggunaan motor *stepper* memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan penggunaan motor DC biasa. Keunggulannya yaitu, sudut rotasi motor proporsional dengan pulsa masukan sehingga lebih mudah diatur; motor dapat secara langsung memberikan torsi penuh pada saat mulai bergerak; posisi dan pergerakan repetisinya dapat ditentukan secara presisi, memiliki respon yang sangat baik terhadap mulai, stop dan berbalik (perputaran); sangat realibel karena tidak adanya sikat yang bersentuhan dengan rotor seperti pada motor DC, dapat

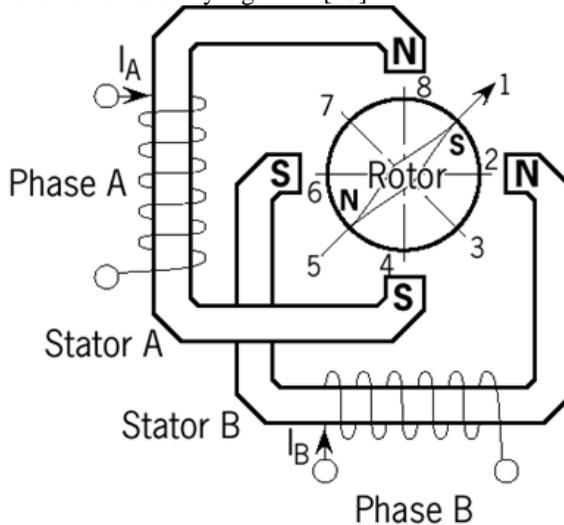
menghasilkan perputaran yang lambat sehingga beban dapat dikopel langsung ke porosnya; serta frekuensi perputaran dapat ditentukan secara bebas dan mudah pada *range* yang luas.



Gambar 2.6 Motor stepper unipolar

Berdasarkan metode perancangan rangkaian pengendalinya, motor *stepper* dapat dibagi menjadi jenis *unipolar* dan *bipolar*. Rangkaian pengendali motor *stepper unipolar* lebih mudah dirancang karena hanya memerlukan satu *switch / transistor* setiap lilitannya. Untuk menjalankan dan menghentikan motor ini cukup dengan menerapkan pulsa digital yang hanya terdiri atas tegangan positif dan nol (*ground*) pada salah satu terminal lilitan (*wound*) motor sementara terminal lainnya dicatu dengan tegangan positif konstan (V) pada bagian tengah dari lilitan. Gambar skema motor *stepper unipolar* dapat dilihat pada gambar 2.4. Untuk motor *stepper* dengan lilitan *bipolar*, diperlukan sinyal pulsa yang berubah-ubah dari positif ke negatif dan sebaliknya. Jadi pada setiap terminal lilitan (A & B) harus dihubungkan dengan sinyal yang mengayun dari positif ke negatif dan sebaliknya seperti pada gambar 2.4. Karena itu dibutuhkan rangkaian pengendali yang agak lebih kompleks daripada rangkaian pengendali untuk motor

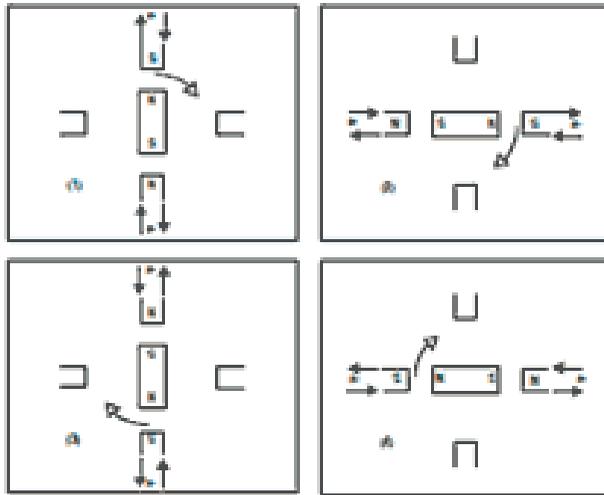
unipolar [9]. Motor *stepper bipolar* memiliki keunggulan dibandingkan dengan motor *stepper unipolar* dalam hal torsi yang lebih besar untuk ukuran yang sama [10].



Gambar 2.7 Motor stepper bipolar

Besarnya derajat putaran per step adalah parameter terpenting dalam pemilihan motor stepper karena akan menentukan ukuran langkah gerakan yang paling kecil (resolusi). Tiap-tiap motor stepper mempunyai spesifikasi masing-masing, antara lain 0.72° per step, 1.8° per step, 3.6° per step, 7.5° per step, 15° per step, dan bahkan ada yang 90° per step.

Ada tiga mode eksitasi yang biasa digunakan untuk motor stepper, yaitu fullstep, halfstep, dan *Microstepping*. Dalam operasi fullstep, motor bergerak sesuai dengan spesifikasi derajat per stepnya, yaitu motor 1.8° untuk motorstepper bipolar yang digunakan dalam tugas akhir ini dan memerlukan 200 langkah per satu putaran motor. Ada dua jenis mode eksitasi fullstep, yaitu eksitasi fasa tunggal dan fasa ganda. Dalam fullstep fasa tunggal, motor dioperasikan hanya dengan satu fase (kelompok gulungan) yang diberi energi sekaligus seperti pada gambar 2.7. Mode ini membutuhkan daya paling sedikit dari pengemudi mode eksitasi manapun.



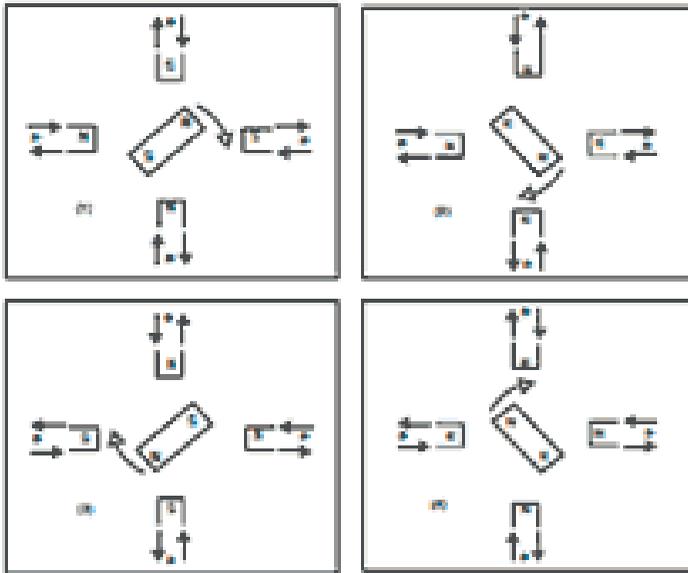
Gambar 2.8 Mode *Full Step* fase tunggal

Tabel 2.1 Mode *Full Step* fase tunggal

Fase	Tegangan yang diberikan pada lilitan							
	Arah putar searah jarum jam				Arah putar melawan jarum jam			
	A	B	A'	B'	A	B	A'	B'
1	1	0	0	0	0	0	0	1
2	0	1	0	0	0	0	1	0
3	0	0	1	0	0	1	0	0
4	0	0	0	1	1	0	0	0

Pada *Full Step* fase tunggal, suatu titik pada sebuah kutub magnet di rotor akan kembali mendapat tarikan medan magnet stator pada lilitan yang sama setelah step ke 4., dan berikutnya dapat diberikan lagi mulai dari step 1 seperti pada tabel 2.1. Setiap step, rotor bergerak searah atau berlawanan dengan jarum jam sebesar spesifikasi derajat per step dan motor stepper. Setiap step hanya menarik sebuah kutub saja. Tegangan '1' adalah menunjukkan logika dalam level Transistor Transistor Logic (TTL). Besar tegangan sesungguhnya diatur dengan spesifikasi motor stepper yang dipakai, misalnya dengan menggunakan buffer.

Dalam mode dual phase,2 juga dikenal sebagai "*two-phase on, Full Step*", motorstepper dioperasikan dengan kedua fase berenergi pada saat bersamaan seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.8.. Mode ini memberikan torsi dan kecepatan yang lebih baik. Eksitasi fase ganda menghasilkan torsi 30% sampai 40% lebih banyak daripada eksitasi fase tunggal, namun membutuhkan daya dua kali lebih banyak dari pengemudi.

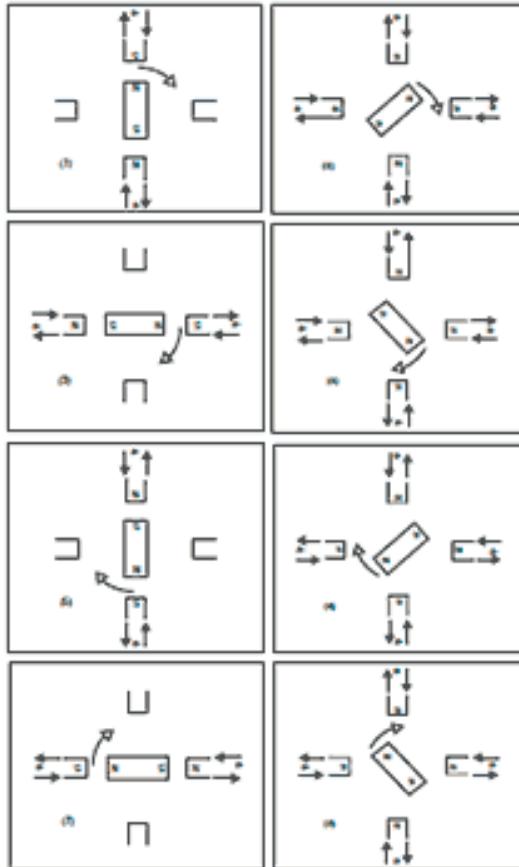


Gambar 2.9 Mode *Full Step* fase ganda

Tabel 2.2 Mode *Full Step* fase ganda

Fase	Tegangan yang diberikan pada lilitan							
	Arah putar searah jarum jam				Arah putar melawan jarum jam			
	A	B	A'	B'	A	B	A'	B'
1	1	1	0	0	0	0	1	1
2	0	1	1	0	0	1	1	0
3	0	0	1	1	1	1	0	0
4	1	0	0	1	1	0	0	1

Eksitasi *Half Step* adalah operasi fasa tunggal dan ganda bergantian yang menghasilkan langkah-langkah setengah sudut langkah dasar seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.10 dan tabel 2.3. Karena sudut langkah yang lebih kecil, mode ini memberikan dua kali resolusi dan operasi yang lebih halus. *Half Stepping* menghasilkan torsi kira-kira 15% lebih sedikit daripada dual phase *Full Stepping*. Modifikasi *Half Stepping* menghilangkan torsi ini dengan meningkatkan arus yang diaplikasikan ke motor saat fase tunggal diberi energi.



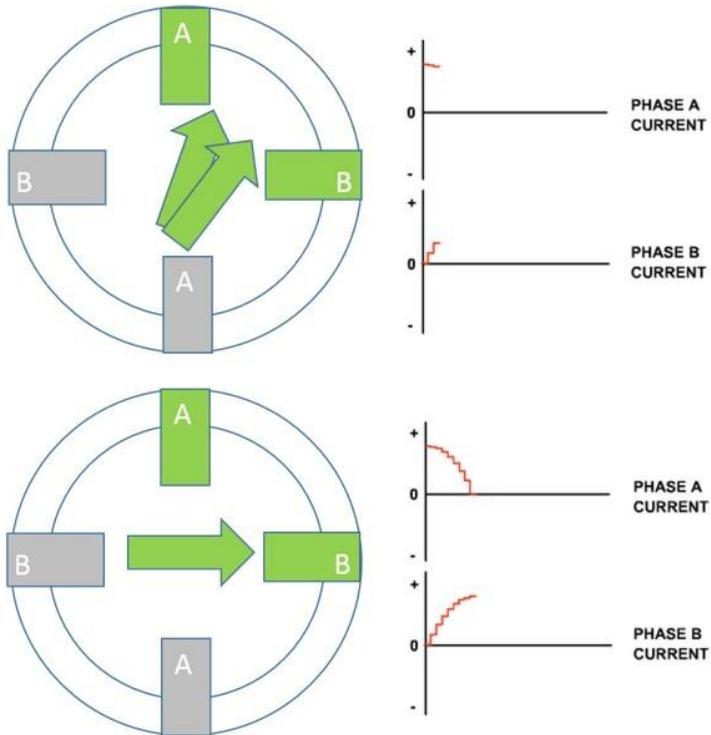
Gambar 2.10 Mode *Half Step*

Tabel 2.3 Mode *Half Step*

Fase	Arah putar searah jarum jam			
	A	B	A'	B'
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	1
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

Microstepping adalah teknik yang meningkatkan resolusi motorik dengan mengendalikan baik arah dan amplitudo aliran arus pada masing-masing lilitan [11]. Arus proporsional dalam gulungan sesuai dengan fungsi sinus dan kosinus. *Microstepping* bisa membagi langkah dasar motor hingga 256 kali. Pada tugas akhir ini, tipe motor stepper yang digunakan adalah bipolar yang memiliki jumlah step dalam satu kali putaran yaitu 200 step. Dengan menggunakan mode *Microstepping*, maka step dapat dibagi lagi sehingga jumlah step dalam satu kali putaran rotor pada motor stepper menjadi 1600 step. Hal ini karena satu step dari dasar gerakan motor stepper dibagi delapan dengan metode *Microstepping*.

Microstepping meningkatkan kelancaran kecepatan rendah dan meminimalkan efek resonansi kecepatan rendah. *Microstepping* menghasilkan torsi kira-kira 30% lebih sedikit daripada dual phase *Full Stepping*. Langkah gerak *Microstepping* diilustrasikan seperti pada gambar 2.10. Dengan energi maksimum pada fase A, fase B berada pada keadaan tidak ada energi sehingga rotor akan berada sejajar dengan fase A karena kutub utara rotor Tarik menarik dengan kutub selatan stator fase A. Seiring dengan arus pada fase A turun, arus pada fase B akan naik secara perlahan. Rotor akan bergerak dari fase A menuju fase B secara perlahan step demi step sampai fase B memiliki energi maksimal dan fase A memiliki energi minimal.



Gambar 2.11 Mode *Microstepping*

Jadi, dalam pengoperasian motor stepper dapat digunakan prinsip *Full Step*, *Half Step* dan *Microstep*. *Full Step* berarti motor stepper berputar sesuai dengan spesifikasi derajat per stepnya, *Half Step* berarti motor stepper berputar setengah derajat per step dari spesifikasi motor stepper tersebut, dan *Microstep* menggunakan pembagian step yang lebih banyak dengan mengontrol arus listrik.

2.6. Driver Motor Stepper

Cara untuk mengontrol motor stepper sedikit lebih rumit daripada mengontrol motor DC *brushed*. Motor stepper memerlukan pengontrol stepper untuk memberi energi pada fase dalam urutan yang tepat waktu untuk membuat motor berputar.

Untuk menggerakkan sebuah motor stepper, diperlukan tegangan dan arus tertentu bergantung pada jenis motor stepper yang digunakan. Motor stepper tidak bisa digerakkan langsung menggunakan pinout dari mikrokontroler Arduino, karena arus keluaran dari Arduino terlalu kecil, yaitu 20 mA. Oleh karena itu, diperlukan sebuah driver motor untuk menggerakkan motor stepper yang membutuhkan tegangan dan arus listrik tertentu dengan dikontrol oleh mikrokontroler Arduino yang hanya memiliki output arus berskala mikro ampere.

Tipe driver yang paling sederhana bisa dibuat dengan beberapa transistor. Prinsip kerjanya yaitu menggunakan transistor sebagai switch untuk menyalakan dan mematikan sumber listrik secara berurutan untuk memberi energi pada fase dan langkah motor stepper. Driver dengan menggunakan beberapa transistor ini relatif murah untuk dibuat, namun hanya bisa digunakan untuk mengontrol motor stepper jenis *unipolar*. Sedangkan untuk mengontrol motor stepper jenis *bipolar*, rangkaian pengontrol lebih kompleks yaitu dibutuhkan dua rangkaian *full H-bridge* sehingga bisa membalikkan arus ke fase.

2.7. Kontrol PID

Sistem Kontrol PID (*Proportional-Derivative-Integratif*) merupakan kontroler untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut (*Feed back*) [12]. Sistem kontrol PID terdiri dari tiga buah cara pengaturan yaitu kontrol P (*Proportional*), D (*Derivative*) dan I (*Integral*), dengan masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Dalam implementasinya masing-masing cara dapat bekerja sendiri maupun gabungan diantaranya kontrol P, PI, dan PID. Dalam perancangan sistem kontrol PID yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter P, I atau D agar tanggapan sinyal keluaran sistem terhadap masukan tertentu sebagaimana yang diinginkan.

Kontrol PID menghasilkan sinyal kontrol yang sebanding dengan sinyal *error* (aksi proporsional), sebanding dengan total sinyal *error* (aksi integral), dan sebanding dengan turunan dari kesalahan yang sekarang dengan kesalahan yang sebelumnya (aksi *derivative*). Sinyal *error* merupakan selisih antara *set point* dengan

nilai keluaran aktual. Kontrol PID dapat ditulis menjadi bentuk matematis seperti pada persamaan (2.1).

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + Kd \cdot \frac{d}{dt} e(t) + Ki \cdot \int e(t) dt \dots \dots \dots (2.1)$$

Pada persamaan 2.1, $u(t)$ merupakan sinyal kontrol PID dan $e(t)$ merupakan sinyal *error*. Sedangkan Kp , Ki , dan Kd masing-masing merupakan koefisien. Untuk sistem diskrit, persamaan 2.1 dimodifikasi menjadi persamaan 2.2.

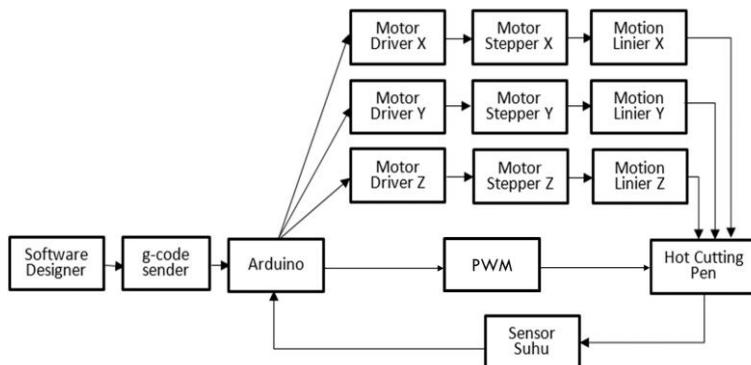
$$u[n] = Kp \cdot e[n] + Kd \cdot (e[n] - e[n - 1]) + Ki \cdot \sum e[n] \dots \dots \dots (2.2)$$

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

BAB III PERANCANGAN SISTEM

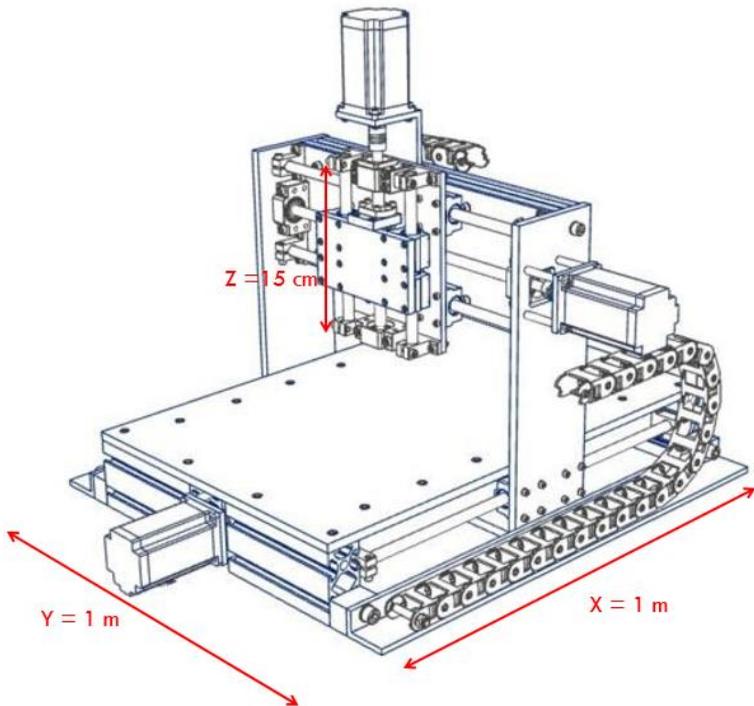
Pada tahap ini, akan dijelaskan mengenai perancangan sistem mesin pemotong *styrofoam* secara keseluruhan. Dilengkapi juga dengan gambar blok diagram sistem seperti pada gambar 3.1, yang meliputi: hubungan antara input desain, software converter, mikrokontroler, motor stepper, dan kontrol suhu PID.

Pada perancangan sistem, untuk melakan pemotongan *Styrofoam* dilakukan pembuatan desain bentuk potongan melalui software designer. Software yang digunakan bermacam-macam, misalnya coreldraw, autocad, 3DsMax, dan lain-lain. Setelah desain potongan jadi, maka selanjutnya adalah mengubah desain potongan menjadi *g-code*. Pada tahap ini, diperlukan software pembuat *g-code* seperti Repetier dan MaxCam. Pada tugas akhir ini, digunakan *g-code* converter untuk memberikan sumbu Z pada desain potongan *styrofoam*, menentukan titik awal pemotongan, prioritas pemotongan, maupun penentuan sisi pemotongan oleh aktuator, dan mengubah desain potongan menjadi *g-code*. Setelah *g-code* jadi, untuk melakukan pemotongan, *g-code* dikirim kepada mikrokontroler menggunakan *Universal G-code Sender* (UGS). Arduino juga melakukan control suhu melalui output PWM melalui gate driver berupa optocoupler dan transistor mosfet n-type. Gate driver ini akan mengedrive tegangan yang lewat melalui *Hot cutting pen*, sehingga suhu nya bisa diatur sesuai *set point*.



Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem

3.1. Perancangan Mekanik



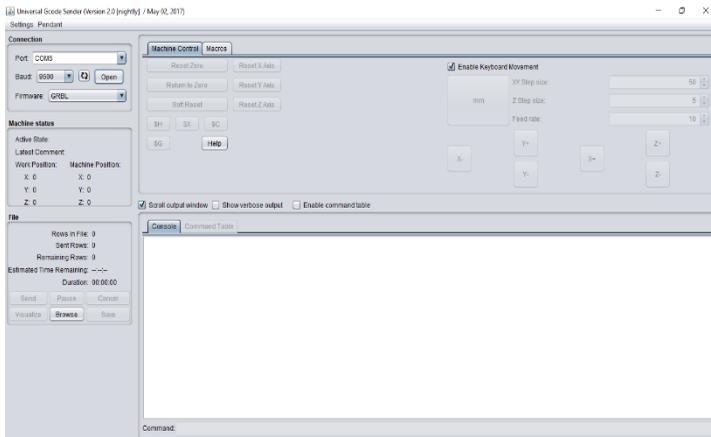
Gambar 3.2 Desain mekanik mesin

Pada perancangan mekanik, tahap pertama yang dilakukan adalah survei pasar mengenai ketebalan dan dimensi dari *Styrofoam* yang biasa dijual. Setelah dilakukan survey pasar, didapatkan hasil bahwa *Styrofoam* biasa dijual dengan variasi ketebalan 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm, 8 cm, dan 10 cm. Sedangkan dimensi *Styrofoam* yang biasa dijual adalah 40x60cm, 60x80cm, 60x100cm, 80x100cm, 100x100cm, 100x150cm, dan 200x200cm. Dari hasil survey pasar, ditentukan dimensi kerja dari alat yaitu sebesar 100cm x 100 cm dengan panjang lintas aksis Z sebesar 11,5 cm seperti pada gambar 3.2.

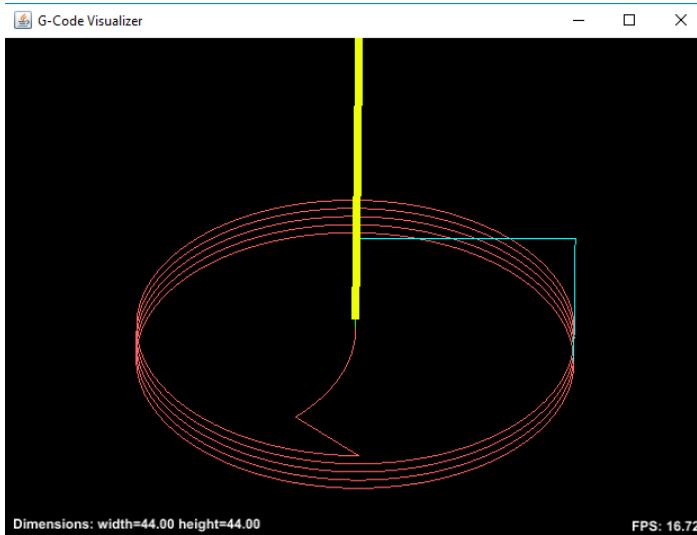
3.2. Universal G-code Sender

Pada tugas akhir ini, digunakan *Graphical User Interface (GUI) opensource*, yaitu sebuah software pengirim *g-code* kepada mikrokontroler dengan nama *Universal G-code Sender (UGS)* [13] dengan tampilan seperti pada gambar 3.2. *Universal G-code Sender* mengirimkan *g-code* kepada mikrokontroler Arduino melalui komunikasi serial menggunakan kabel USB. Setelah Arduino tersambung dengan computer melalui kabel USB, port USB akan terdeteksi pada UGS. Setelah port USB dipilih, kemudian ditentukan bitrate dari aduino yang digunakan. Karena pada tugas akhir ini digunakan Arduino mega, maka digunakan bitrate 115200. Apabila bitrate yang dipilih tidak sesuai dengan bitrate dari Arduino yang digunakan, maka UGS tidak akan aktif.

Pada software UGS, terdapat button untuk menggerakkan aktuator ke arah sumbu X+, X-, Y+, Y-, Z+, Z- dengan jarak tempuh per klik yang bisa diatur dalam satuan millimeter. UGS akan mentranslate perintah kedalam bentuk *g-code* dan mengirim kepada mikrokontroler. Terdapat juga menu browse untuk mengambil file *g-code* yang tersimpan di directory dan mengirimkannya ke mikrokontroler. Ketika menggunakan file *g-code* yang sudah jadi dari directory computer, file tersebut bisa di visualisasikan sebelum di kirim ke mikrokontroler, sehingga user bisa melihat bentuk visualisasi *g-code* secara tiga dimensi.



Gambar 3.3 GUI *Universal G-code Sender*



Gambar 3.4 GUI visualisasi *g-code*

Gambar 3.3 merupakan GUI visualisasi *g-code* yang akan di cetak. Contoh *g-code* yang digunakan adalah lingkara lima lapis ke bawah. Garis kuning merepresentasikan aktuator, dan garis merah merepresentasikan jalur aktuator. Posisi visualisasi *g-code* bisa dilihat secara tiga dimensi dengan menekan tombol kiri mouse dan menggerakkannya. Ketika *g-code* di kirim ke mikroprosesor, maka motor stepper akan menggerakkan posisi aktuator sesuai *g-code* dan garis kuning pada GUI visualisasi akan bergerak seiring dengan gerakan aktuator.

3.3. Perancangan Sistem Aktuator

Pada tahap ini, dijelaskan mengenai sistem closeloop dari aktuator dan sensor suhu menggunakan sensor *thermocouple* seperti yang tertera pada diagram blok sistem pada gambar 3.1. Aktuator yang digunakan untuk memotong *Styrofoam* adalah hot cutting pen. *Hot cutting pen* adalah alat pemotong *styrofoam* yang di desain dapat memotong *styrofoam* dengan cepat. *Hot cutting pen* terbuat dari bahan stainless steel yang memiliki berat 46gram dan diameter 2mm. *Hot cutting pen* merupakan pemanas dengan input arus DC dengan daya 24Watt dan dapat mencapai suhu maksimal hingga

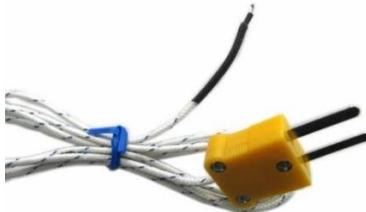
340° Celcius.



Gambar 3.5 *Hot Cutting Pen*

Pemanas tipe *hot cutting pen* seperti pada gambar 3.4 lebih mudah digunakan dari pada pemanas tipe *hot wire* karena ujungnya tidak harus disambung dengan kabel sehingga bisa melakukan pemotongan dari tengah *Styrofoam*. Sedangkan pemanas tipe *hot wire* memiliki kekurangan dalam memotong *styrofoam* karena kedua ujung pemanas harus disambungkan kepada kabel. Hal ini akan menjadi masalah jika bentuk potongan adalah menyambung seperti huruf O, karena pemotongan harus dimulai dari tepi *Styrofoam* dan keluar lagi melalui jalur awal.

Untuk membaca suhu aktuator, digunakan sensor suhu *Resistance Thermocouple type-K*. Sensor ini dipilih karena memiliki rentang pembacaan yang lebar.



Gambar 3.6 *Thermocouple Type-K*

Pengaturan alat untuk melakukan kalibrasi termokopel yaitu, misal logam A dan logam B merupakan bahan logam pada

termokopel. Ujung logam A dan B disambung dan ujung-ujung yang lain dihubungkan ke alat ukur listrik dan dimasukkan ke dalam kondisi suhu dingin, dan untuk ujung yang dikopel ditempatkan pada kondisi suhu panas. Jadi, nilai tegangan itu setara dengan suhu yang terukur oleh termometer, sehingga didapatkan nilai tegangan sekian sama dengan suhu sekian. Pada logam termokopel yang berbeda jenis akan memiliki kecepatan alir elektron yang berbeda pula [14], hal inilah yang kemudian menyebabkan beda potensial di ujung-ujung logam tersebut, yang mana telah dihubungkan ke alat ukur listrik sehingga timbul tegangan listrik di ujung-ujung logam tersebut.

Untuk memudahkan pembacaan suhu dari *thermocouple* tipe K, maka digunakan modul MAX6675. MAX6675 dibentuk dari kompensasi cold-junction yang outputnya didigitalisasi dari sinyal termokopel tipe-K. Data output memiliki resolusi 12-bit dan mendukung komunikasi SPI mikrokontroler secara umum. Data dapat dibaca dengan mengkonversi hasil pembacaan 12-bit data.

MAX6675 memiliki bagian ujung *cold end* yang hanya dapat mengukur -20°C sampai $+85^{\circ}\text{C}$ [15]. Pada saat bagian *cold end* MAX6675 mengalami fluktuasi suhu maka MAX6675 akan tetap dapat mengukur secara akurat perbedaan temperature pada bagian yang lain. MAX6675 seperti gambar 2.5 dapat melakukan koreksi atas perubahan pada temperature ambient dengan kompensasi *cold-junction*. Modul MAX6675 dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.7 MAX6675

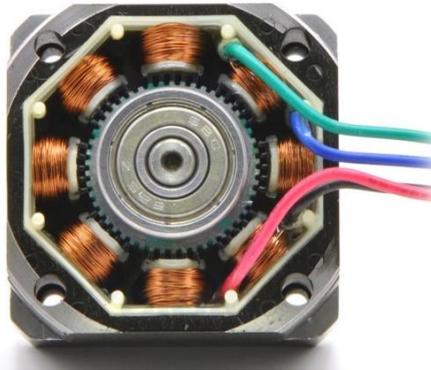
Setelah perancangan aktuator selesai, dilakukan uji coba dan analisa mengenai sistem yang berjalan dengan baik sesuai hipotesa dan rancangan atau tidak. Apabila terdapat error, maka setiap data akan dicatat dan dianalisa untuk dijadikan referensi dalam

memperbaiki sistem selanjutnya.

3.4. Perancangan Sistem Motor Stepper

Pada tugas akhir ini, digunakan motor stepper karena dibutuhkan ketepatan posisi. Keunggulan motor stepper lainnya adalah frekuensi pulsa input-nya tidak tergantung pada beban. Perputaran motor stepper adalah perputaran yang diskrit dan arah perputarannya dapat searah ataupun berlawanan dengan arah jarum jam. Motor stepper yang digunakan yaitu jenis bipolar dari primopal dengan seri PHB57S45-425AD. Motor stepper seri ini memiliki spesifikasi tegangan input 24Volt, arus input 2,5 Ampere, *step angle* sebesar $1,8^\circ$, akurasi *step angle kurang lebih* sebesar 5%, torsi tahanan sebesar 90 N.cm, dan inersia rotor sebesar 230 g.cm. seperti pada gambar 3.8.

Secara teori, sebuah motor stepper dapat digerakkan langsung oleh mikrokontroler. Namun pada kenyataannya, arus dan tegangan yang dikeluarkan oleh mikrokontroler terlalu kecil untuk menggerakkan sebuah motor stepper. Seperti yang dijelaskan dalam bab 2, gerbang-gerbang Transistor Transistor Logic (TTL) mikrokontroler hanya mampu mengeluarkan arus dalam orde mili-ampere dan tegangan antara 2 sampai 5 Volt. Sementara itu untuk menggerakkan motor stepper diperlukan arus yang lebih besar (dalam orde ampere) dan tegangan berkisar 5 sampai 24 Volt. Maka dari itu diperlukan sebuah piranti tambahan yang memenuhi kebutuhan arus dan tegangan yang cukup besar. Rangkaian driver motor stepper merupakan rangkaian “open collector”, output rangkaian ini terhubung dengan sebuah ground sebagai pemicu penggerak yang ada pada motor stepper.



Gambar 3.8 Motor Stepper PHB57S45-425AD

3.5. Driver Motor

Untuk menggerakkan sebuah motor stepper, diperlukan tegangan dan arus tertentu bergantung pada jenis motor stepper yang digunakan. Motor stepper tidak bisa digerakkan langsung menggunakan *pinout* dari mikrokontroler Arduino, karena arus keluaran dari Arduino terlalu kecil. Oleh karena itu, diperlukan sebuah driver motor untuk menggerakkan motor stepper yang membutuhkan tegangan dan arus listrik tertentu dengan dikontrol oleh mikrokontroler Arduino yang hanya memiliki output arus berskala mikro ampere. *Driver* motor yang digunakan pada tugas akhir ini adalah TB6600 sebanyak empat buah. Satu *driver* untuk menggerakkan motor penggerak aksis Z, satu *driver* untuk menggerakkan motor penggerak aksis Y, dan dua *driver* untuk menggerakkan motor penggerak aksis X. Gambar 3.6 menunjukkan bentuk dari *driver* motor TB6600.



Gambar 3.9 Driver stepper motor TB6600

Driver motor TB6600 memiliki 1 buah direksi sebagai pemicu arah pergerakan motor stepper dan 1 buah pulse sebagai pengatur respons kecepatan motor stepper. Frekuensi minimum yang bisa diterima oleh driver motor TB6600 adalah 50Hz sedangkan untuk Maksimal frekuensi yang dapat diterima dari driver motor ini adalah 20Khz. Untuk maksimal arus yang dapat dihasilkan adalah 4,5A dengan voltase minimal adalah 20Vdc dan voltase maksimal adalah 32Volt DC.

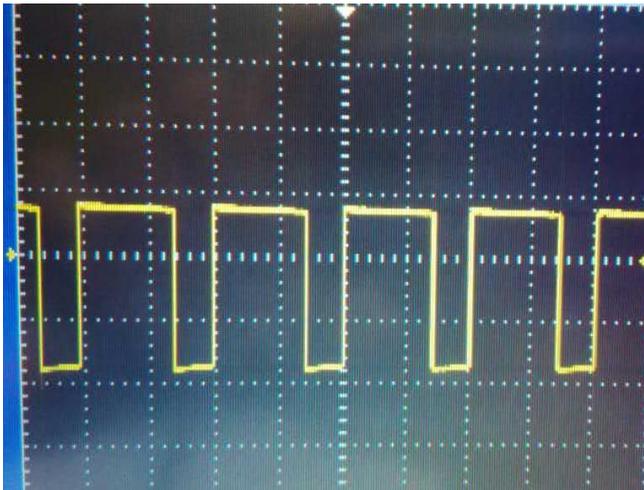
Selain itu, tugas akhir ini menggunakan mode eksitasi *Microstepping*. Tujuan dari proses ini adalah menciptakan motor yang berjalan semulus mungkin. Karena sifat motor step, rotasi mereka tidak sepenuhnya mulus, karena motor bergerak selangkah demi selangkah. Tentu saja, langkah-langkah ini dirancang untuk dipindahkan dengan agak cepat, jadi biasanya tidak ada efek yang sangat merugikan pada kinerja. Namun karena pada tugas akhir ini dibutuhkan resolusi yang halus agar pergerakan aktuator bisa akurat, motor stepper fullstep ataupun halfstep tidak sesuai dengan kebutuhan. Pada tugas akhir ini, digunakan driver motorstepper dengan tipe TB6600 seperti pada gambar 3.9. Driver ini memiliki spesifikasi pulsa tunggal dengan arus input 4 Ampere dan tegangan input 9 hingga 42 Volt.

3.6. PWM

PWM (*Pulse Width Modulation*) adalah salah satu teknik modulasi dengan mengubah lebar pulsa (*duty cycle*) dengan nilai amplitudo dan frekuensi yang tetap [16]. Lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi. *Duty Cycle* merupakan representasi dari kondisi logika *HIGH* dalam suatu periode sinyal dan di nyatakan dalam bentuk (%) dengan range 0% sampai 100%, sebagai contoh jika sinyal berada dalam kondisi *HIGH* terus menerus artinya memiliki duty cycle sebesar 100%. Jika waktu sinyal keadaan *HIGH* sama dengan keadaan *LOW* maka sinyal mempunyai duty cycle sebesar 50%.

Pada tugas akhir ini, digunakan mikrokontroler Arduino untuk mengontrol baik motor stepper maupun suhu aktuator. Output sinyal untuk mengontrol motor stepper dan aktuator yaitu berupa sinyal diskrit dengan prinsip PWM. Pada kontrol suhu

aktuator, *duty cycle* dari PWM berubah-ubah sesuai dengan nilai perhitungan PID. Program yang digunakan untuk menggunakan fungsi PWM pada Arduino sangat sederhana, yaitu dengan mendeklarasikan pin PWM yang akan digunakan sebagai output PWM. Pada tugas akhir ini, digunakan pin 5 pada Arduino Nano sebagai output PWM untuk mengontrol suhu aktuator, sehingga ditulis dengan *syntax* `analogWrite(5,PWM)`. Sinyal output PWM untuk mengontrol suhu aktuator bisa dilihat menggunakan osiloskop seperti pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Bentuk sinyal output PWM

3.7. Pembuatan Kontrol PID

Untuk mengontrol suhu dari aktuator *hot cutting pen* digunakan kontrol PID. Setelah dilakukan pembacaan suhu dari *hot cutting pen*, didapatkan respon suhu merupakan orde dua. Hal inilah yang mendasari digunakan kontrol PID untuk mendapatkan respon sistem yang lebih cepat dan akurat.

Kontrol PID dibuat dalam program mikrokontroler Arduino. Suhu aktuator diukur oleh sensor *thermocouple* type K dengan bantuan modul MAX6675 untuk mendapatkan nilai output data tanpa harus melakukan perhitungan binomial secara manual pada

program. Di dalam arduino, *set point* suhu yang ditentukan oleh pengguna akan dikurangi dengan suhu aktual yang dibaca oleh sensor suhu yang akan menjadi sinyal *error* bagi kontrol PID. Kontrol PID akan menentukan berapa keluaran PWM yang akan menjadi input bagi optocoupler. *Optocoupler* yang dipakai akan menghasilkan arus untuk mendrive mosfet dan menghasilkan tegangan on off dari sumber kepada aktuator. Keluaran kontrol PID dalam Tugas Akhir ini adalah sinyal PWM yang disambungkan pada optocoupler dan transistor NPN untuk memanaskan *hot cutting pen* pada suhu yang diinginkan.

Algoritma dari kontrol PID yang dirancang untuk sistem ini meliputi pencarian nilai sinyal *error*, dilanjutkan dengan pencarian nilai *Kp* dan *Ki*. Setelah nilai tersebut didapatkan, nilai keluaran PWM dapat diperoleh dengan menggunakan perumusan kontrol PID. Nilai *Kp*, *Ki*, dan *Kd* pada Tugas Akhir ini akan dicari menggunakan metode Ziegler-Nicholes, kemudian untuk menyesuaikan hasil output agar sesuai dengan yang diharapkan, dilanjutkan dengan menggunakan metode *tuning* manual. Sinyal kontrol yang akan dihasilkan berupa PWM untuk mengontrol suhu aktuator sehingga suhu bisa berada pada *set point*. Algoritma ini diimplementasikan di arduino dengan *syntax* seperti yang tertulis berikut:

- Mencari *proportional error*
`suhu=thermocouple.readCelsius();`
`error=setPoint-suhu;`
`errors=error;`

Pada program diatas, *error* pembacaan suhu didefinisikan sebagai perbedaan suhu set poin dengan suhu hasil pembacaan sensor dan *errors* didefinisikan sebagai nilai *error* sekarang. Sedangkan untuk mencari keluaran PWM, digunakan rumus PID diskrit seperti pada persamaan 2.2. Algoritma keluaran PWM ditulis dalam *syntax* sebagai berikut:

- Keluaran PWM

$$PWM = PWM + KP * error + KP * KD * (error - errors) + KI * error$$
`errors=errors+error;`
`if(PWM>255)PWM=255;`
`else if(PWM<0)PWM=0;`
`analogWrite(10,PWM);`

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

BAB IV

PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN SISTEM

Setelah dilakukan perancangan sistem pada bab tiga, maka pada bab ini akan dibahas mengenai pengujian dari sistem yang telah dirancang. Bab ini bertujuan untuk mengetahui apakah tujuan dalam perancangan sistem pada tugas akhir ini telah terlaksana atau tidak. Pengujian pada bab ini terdiri dari pengujian arah gerak motor stepper, kalibrasi aksis, tuning PID dan pengujian kontrol suhu *Hot cutting pen*, pengukuran *Kerf width*, dan pengukuran dimensi potong *styrofoam*.

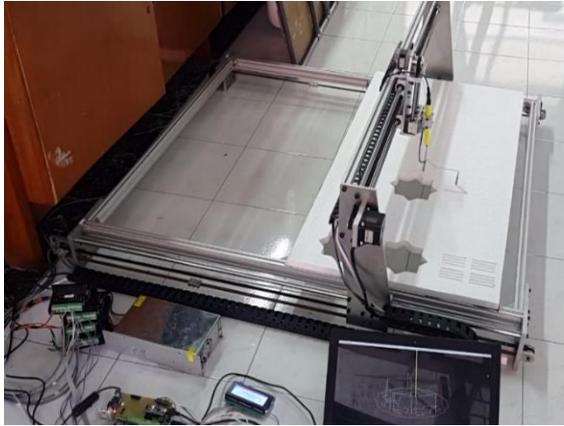
4.1. Perakitan Mesin

Setelah dilakukan perancangan mekanik, maka dilakukan perakitan mesin. Perakitan mesin dilakukan dengan urutan perakitan kerangka mesin seperti pada gambar 4.1. Setelah perakitan kerangka mesin jadi, dilanjutkan dengan pemasangan motor stepper, pemasangan *cable belt*, pemasangan kabel motor stepper dengan driver motor, pemasangan kabel driver motor dengan *power supply* dan mikrokontroler, kemudian dilakukan pengujian arah putaran motor stepper. Setelah arah putaran motor stepper sesuai, dilakukan pemasangan aktuator pada mesin. Setelah aktuator dipasang, kabel dari aktuator dimasukkan ke dalam *cable belt* agar rapi kemudian kabel disambung pada mikrokontroler. Setelah perakitan alat jadi, dilakukan uji pemotongan *Styrofoam*. Alat pemotong *Styrofoam 3 axis* dapat dilihat pada gambar 4.2.



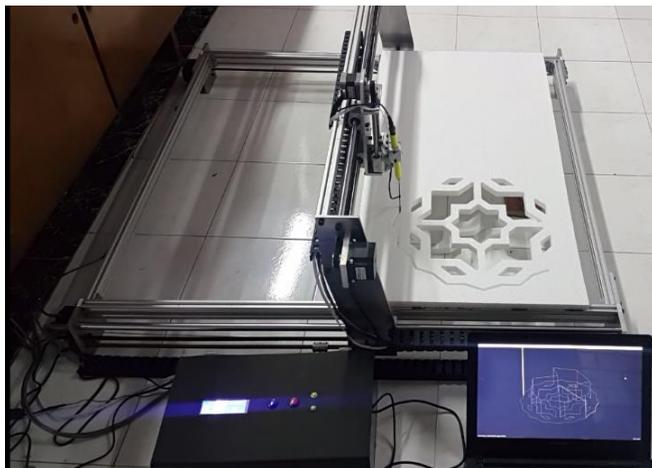
r 4.10 Kerangka mesin

**Ga
mba**



Gambar 4.2 Mesin jadi tanpa kotak panel

Setelah semua pengujian dilakukan dan dihasilkan mesin pemotong *styrofoam* sesuai dengan tujuan tugas akhir, maka langkah terakhir yaitu pembuatan kotak panel untuk wadah semua komponen elektronik yang meliputi: rangkaian pengontrol, power supply, dan driver motor stepper. Mesin pemotong *styrofoam* yang telah diberi panel bisa dilihat pada gambar 4.3.

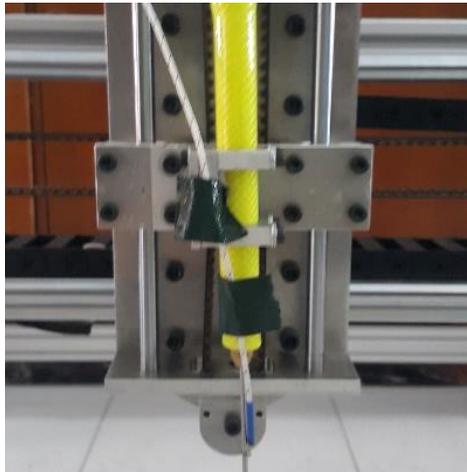


Gambar 4.3 Mesin jadi dengan kotak panel

4.2. Pengujian Arah Putaran Motor Stepper

Setelah alat pemotong *styrofoam* tiga *axis* selesai dibuat, maka dilakukan pengujian arah putaran motor stepper. Hal ini bertujuan agar arah gerakan aktuator sesuai dengan perintah yang diberikan, yaitu X+, X-, Y+, Y-, Z-, dan Z-. Pengujian dilakukan satu persatu dimulai dari aksis Z, aksis Y, kemudian aksis X.

Pengujian pertama yaitu uji gerakan motor pada aksis Z. Aksis Z mesin pemotong *Styrofoam* dapat dilihat pada gambar 4.3. Aksis Z berfungsi untuk menggerakkan aktuator ke arah sumbu Z positif dan sumbu Z negatif.



Gambar 4.4 Aksis Z mesin pemotong *styrofoam*



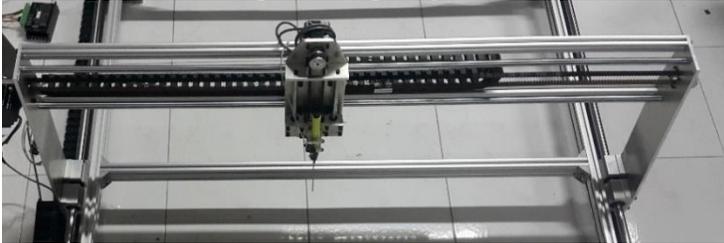
Gambar 4.5 Motor stepper pada aksis Z

Motor stepper yang digunakan pada sumbu Z adalah jenis bipolar yang memiliki input A+, A- yang merupakan dua ujung lilitan dari kutub A, dan B+, B- yang merupakan dua ujung lilitan dari kutub B motor stepper. Input motor stepper ini tersambung dengan output driver motor TB6600 yang juga memiliki output A+, A-, B+, B-. Setelah dilakukan pemasangan input motor stepper sesuai kutubnya, maka dilakukan pengujian gerakan Z+ dan Z-. Setelah dilakukan pengujian, ternyata terjadi kesalahan gerak yaitu arah gerak aksis Z berlawanan dengan arah gerak input data. Input data Z+ menghasilkan gerakan Z- dan input data Z- menghasilkan gerakan Z+. Hal ini terjadi karena pemasangan motor stepper pada mesin berlawanan arah sehingga membutuhkan rotasi yang berlawanan arah apabila ingin digunakan untuk menggerakkan aktuator keatas dan kebawah. Kemudian dilakukan pembalikan input kutub A dan B pada motor stepper aksis Z seperti pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Uji arah putar motor stepper aksis Z

Uji ke	Input lilitan motor stepper				Keterangan
	A+	A-	B+	B-	
1	A+	A-	B+	B-	salah
2	B+	B-	A+	A-	benar

Tahap berikutnya yaitu uji arah putaran motor stepper pada sumbu Y yang memiliki rentang kerja 100cm. Aksis Y mesin pemotong *Styrofoam* dapat dilihat pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Aksis Y mesin

Untuk menggerakkan aktuator, digunakan motor stepper karena memiliki torsi yang cukup besar dan memiliki karakteristik gerakan per step sehingga bisa dikontrol. Motor stepper yang digunakan pada aksis Y adalah motor stepper jenis bipolar dari primopal dengan seri PHB57S45-425AD. Motor stepper seri ini memiliki spesifikasi tegangan input 24Volt, arus input 2,5 Ampere, *step angle* sebesar $1,8^\circ$, akurasi *step angle kurang lebih* sebesar 5%, torsi tahanan sebesar 90 N.cm, dan inersia rotor sebesar 230 g.cm. Motor stepper pada aksis Y bisa dilihat pada gambar 4.7.

Karena motor stepper yang digunakan pada sumbu Y adalah jenis bipolar, maka memiliki input A+, A- yang merupakan dua ujung lilitan dari kutub A, dan B+, B- yang merupakan dua ujung lilitan dari kutub B motor stepper. Input motor stepper ini tersambung dengan output driver motor TB6600 yang juga memiliki output A+, A-, B+, B-.



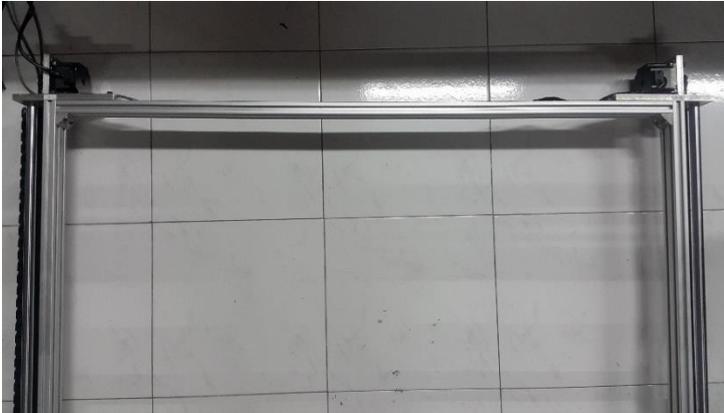
Gambar 4.7 Motor stepper pada aksis Y

Setelah dilakukan pemasangan output driver motor sesuai kutub motor stepper, maka dilakukan pengujian gerakan Y+ dan Y-. Setelah dilakukan pengujian, didapatkan hasil arah gerak aksis Y searah dengan arah gerak input data. Input data Y+ menghasilkan gerakan Y+ dan input data Y- menghasilkan gerakan Y-. Hal ini terjadi karena pemasangan motor stepper pada mesin sudah searah sehingga rotasi motor stepper searah ketika digunakan untuk menggerakkan aktuator keatas dan kebawah. Berikut adalah tabel pemasangan kutub A dan B pada motor stepper aksis Y:

Tabel 4.2 Uji arah putar motor stepper aksis Y

Uji ke	Input lilitan motor stepper				Keterangan
	A+	A-	B+	B-	
1	A+	A-	B+	B-	benar

Tahap berikutnya yaitu uji arah putaran motor stepper pada sumbu X. Pengujian putaran motor stepper pada sumbu X sedikit berbeda dari dua pengujian pada sumbu Y dan Z. Hal ini disebabkan karena pada sumbu X menggunakan dua motor stepper yang dipasang berlawanan arah pada ujung kanan dan kiri mesin. Berikut adalah aksis X mesin pemotong *styrofoam*:



Gambar 4.8 Aksis X mesin

Pada sumbu X, terdapat dua motor stepper yang dipasang berlawanan arah pada ujung kanan dan kiri mesin. Hal ini karena konstruksi mesin yang membutuhkan motor stepper pada sumbu X untuk dapat menggerakkan aksis Y dan Z. Motor stepper di sebelah kiri dipasang sumbu motor stepper menghadap ke kiri, sedangkan motor stepper di sebelah kanan dipasang sumbu motor stepper menghadap ke kanan. Selanjutnya, motor stepper di sebelah kiri disebut motor stepper X dan di sebelah kanan disebut motor stepper X'. Motor stepper yang digunakan pada aksis X sama dengan motor stepper yang digunakan pada sumbu Y, yaitu jenis bipolar dari primopal dengan seri PHB57S45-425AD. Motor stepper seri ini memiliki spesifikasi tegangan input 24Volt, arus input 2,5 Ampere, *step angle* sebesar $1,8^\circ$, akurasi *step angle kurang lebih* sebesar 5%, torsi tahanan sebesar 90 N.cm, dan inersia rotor sebesar 230 g.cm. seperti pada gambar 4.9.



Gambar 4.9 Motor stepper pada aksis X

Motor stepper yang digunakan pada sumbu X adalah jenis bipolar yang memiliki input A+, A- yang merupakan dua ujung lilitan dari kutub A, dan B+, B- yang merupakan dua ujung lilitan dari kutub B motor stepper. Input motor stepper ini tersambung dengan output driver motor TB6600 yang juga memiliki output A+, A-, B+, B-. Setelah dilakukan pemasangan output driver motor sesuai kutub motor stepper, maka dilakukan pengujian gerakan X+ dan X-. Pengujian pada tahap ini berbeda dengan pengujian pada aksis Y dan Z karena menggunakan dua motor stepper. Hasil pemasangan kutub A dan B pada motor stepper aksis Y dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Uji arah putar motor stepper aksis X

Uji ke	Input lilitan motor stepper								Keterangan
	X				X'				
	A+	A-	B+	B-	A+	A-	B+	B-	
1	A+	A-	B+	B-	A+	A-	B+	B-	Salah
2	B+	B-	A+	A-	B+	B-	A+	A-	Salah
3	A+	A-	B+	B-	B+	B-	A+	A-	Salah
4	B+	B-	A+	A-	A+	A-	B+	B-	Benar

Pada uji pertama, pemasangan kutub sesuai dengan output dari motor driver. Hal ini berlaku pada motor stepper X dan X'. Ketika diberikan input data gerakan kearah X+, terjadi perbedaan gerakan yaitu motor X mengarah ke X- dan motor X' mengarah ke X+. Pada uji arah gerak kedua, pemasangan kutub dibalik sesuai tabel 4.3. Ketika diberikan input data gerakan kearah X+, terjadi perbedaan gerakan yaitu motor X mengarah ke X+ dan motor X'

mengarah ke X-. Hal ini terjadi karena pemasangan motor stepper pada aksis X saling berlawanan arah sehingga dibutuhkan rotasi motor stepper X dan X' yang berlawanan arah agar terjadi gerakan yang sinkron. Pada uji arah gerak ketiga, pemasangan kutub dibalik sesuai tabel 4.3 uji ke 3. Ketika diberikan input data gerakan kearah X+, gerakan aksis X sudah sinkron, akan tetapi berlawanan arah dengan input data yaitu input data X+ menghasilkan gerakan X- dan input data X- menghasilkan gerakan X+. Kemudian dilakukan pengujian ke empat dengan urutan pemasangan kabel input sesuai tabel 4.3 uji ke 4. Setelah diberikan input data gerakan kearah X+, gerakan aksis X sudah sinkron dan searah dengan input data yang diberikan, yaitu input data X+ menghasilkan gerakan X+ dan input data X- menghasilkan gerakan X-.

4.3. Pengujian Kalibrasi Aksis

Pada tahap ini, dilakukan pegujian kalibrasi aksis yang bertujuan agar mesin pemotong *Styrofoam* dapat menempuh jarak yang sesuai dengan jarak yang di inputkan. Kalibrasi aksis dilakukan dengan cara menyesuaikan jumlah step / mm dari setiap motor stepper di setiap aksis. Hasil kalibrasi aksis pada sumbu Y dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Uji kalibrasi aksis Y

UJI KE	TARGET (mm)	RESOLUSI (step/mm)	HASIL (mm)	RESOLUSI BENAR (step/mm)
1	300	50	703	21.3371266
2	300	25	351	21.36752137
3	300	21.35	299	21.42140468
4	400	21.35	400.5	21.32334582
5	500	21.35	501	21.30738523
6	600	21.35	600	21.35
7	700	21.35	700	21.35
8	800	21.35	800	21.35

Keterangan:

Target = target panjang gerakan yang di inputkan (mm)
 Resolusi = jumlah step dari motor stepper tiap millimeter (step/mm)
 Hasil = lintasan nyata yang ditempuh (mm)
 Resolusi benar = resolusi sebenarnya (step/mm)

Pada uji ini, di inputkan gerakan dengan panjang tertentu yang disebut target. Pada awalnya, resolusi memiliki nilai awal yaitu 50 step/mm. Setelah di inputkan gerakan dengan nilai tertentu, didapatkan lintasan nyata yang ditempuh. Pengukuran lintasan nyata dilakukan dengan menggunakan penggaris seperti ditunjukkan pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Pengukuran lintasan tempuh sumbu Y

Setelah didapatkan lintasan nyata yang ditempuh (HASIL), maka dilakukan perhitungan resolusi sebenarnya dengan rumus seperti pada persamaan 4.1.

$$\text{RESOLUSI BENAR} = (\text{RESOLUSI}/\text{HASIL}) \times \text{TARGET} \dots \dots (4.1)$$

Setelah pengujian kalibrasi aksis Y dilakukan sebanyak lima kali, didapatkan lima nilai RESOLUSI BENAR yang memiliki nilai yang berdekatan. Kemudian untuk menentukan RESOLUSI BENAR yang akan digunakan pada uji selanjutnya, maka kelima nilai true resolusi pada uji kalibrasi aksis Y di rata-rata dengan cara dijumlah total dan dibagi lima. Maka, didapatkan hasil nilai RESOLUSI BENAR sebesar 21,35 dan digunakan pada uji ke 6, 7, dan 8. Dengan menggunakan nilai RESOLUSI BENAR sebesar 21,35, didapatkan jarak tempuh sebenarnya (HASIL) yang sama

dengan jarak tempuh yang di inputkan (TARGET). Maka diputuskan bahwa nilai RESOLUSI BENAR untuk motor stepper pada aksis Y adalah 21,35.

Tahap selanjutnya yaitu uji kalibrasi pada aksis X. dokumentasi pengukuran aksis X menggunakan penggaris dapat dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 Pengukuran lintasan tempuh sumbu X

Karena jenis motor stepper yang digunakan pada sumbu X sama dengan jenis motor stepper yang digunakan pada sumbu Y, maka diputuskan untuk menggunakan nilai RESOLUSI BENAR sebesar 21,35 yang juga digunakan pada motor setepper aksis Y. Hasil uji kalibrasi pada aksis X dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Uji kalibrasi aksis X

UJI KE	TARGET (mm)	RESOLLUSI (step/mm)	HASIL (mm)	RESOLUSI SEBENARNYA (step/mm)
1	300	21.35	300	21.35 step/mm
2	600	21.35	600	21.35 step/mm
3	700	21.35	700	21.35 step/mm
4	800	21.35	800	21.35 step/mm
5	900	21.35	900	21.35 step/mm

Setelah pengujian kalibrasi aksis Y dilakukan sebanyak lima kali dengan menggunakan nilai RESOLUSI BENAR sebesar 21,35,

didapatkan hasil bahwa jarak tempuh sebenarnya (HASIL) sama dengan jarak tempuh yang di inputkan (TARGET). Maka diputuskan bahwa nilai RESOLUSI untuk motor stepper pada aksis X adalah 21,35.

Tahap selanjutnya yaitu uji kalibrasi pada aksis Z. Langkah uji kalibrasi sama dengan uji kalibrasi pada sumbu Y dan Z, yaitu dengan memasukkan nilai RESOLUSI *default*, menggerakkan aksis dengan panjang tertentu, kemudian mengukur lintasan tempuh sebenarnya. Setelah didapatkan lintasan tempuh sebenarnya, maka dihitung RESOLUSI BENAR seperti pada rumus uji kalibrasi aksis Y. Dokumentasi uji kalibrasi aksis Z dapat dilihat pada gambar 4.12.



Gambar 4.12 Pengukuran lintasan tempuh sumbu Z

Pada sumbu Z, pengukuran yang dilakukan agak sulit karena model mekanik mesin dan sumbu Z hanya memiliki panjang 115mm. Maka dari itu, pengukuran dilakukan lebih banyak daripada pengukuran pada aksis X dan Y agar didapatkan hasil uji yang presisi. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan penggaris. Berikut adalah hasil uji kalibrasi aksis Z:

Tabel 4.6 Uji kalibrasi aksis Z

No	TARGET	RESOLUSI (step/mm)	HASIL (mm)	RESOLUSI BENAR (mm)
1	50	10	22	22.72727273
2	70	10	31	22.58064516

3	100	10	45	22.22222222
4	120	10	56	21.42857143
5	140	10	65	21.53846154
6	50	22.1	50.3	21.96819085
7	60	22.1	60.5	21.91735537
8	70	22.1	71	21.78873239
9	80	22.1	81	21.82716049
10	90	22.1	93	21.38709677
11	90	21.6	90.1	21.57602664
12	60	21.8	60.5	21.61983471
13	70	21.8	71	21.49295775
14	80	21.8	81	21.5308642
15	90	21.8	92	21.32608696

Setelah pengujian kalibrasi aksis Z dilakukan sebanyak lima belas kali, didapatkan nilai RESOLUSI BENAR yang memiliki nilai yang berdekatan. Kemudian untuk menentukan RESOLUSI BENAR yang akan digunakan pada uji selanjutnya, maka kelima nilai true resolusi pada uji kalibrasi aksis Z di rata-rata dengan cara dijumlah total dan dibagi lima belas. Maka, didapatkan hasil nilai RESOLUSI BENAR sebesar 21,35 dan digunakan pada uji ke 16, 17, dan 18. Dengan menggunakan nilai RESOLUSI BENAR sebesar 21,35, didapatkan jarak tempuh sebenarnya (HASIL) yang sama dengan jarak tempuh yang di inputkan (TARGET). Maka diputuskan bahwa nilai RESOLUSI untuk motor stepper pada aksis Z adalah 21,35. Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa walaupun tipe motor stepper yang digunakan pada aksis Z berbeda dengan motor stepper yang digunakan pada aksis X dan Y, akan tetapi jumlah step per millimeter (RESOLUSI) yang digunakan sama apabila tipe motor stepper yang digunakan sama, yaitu bipolar.

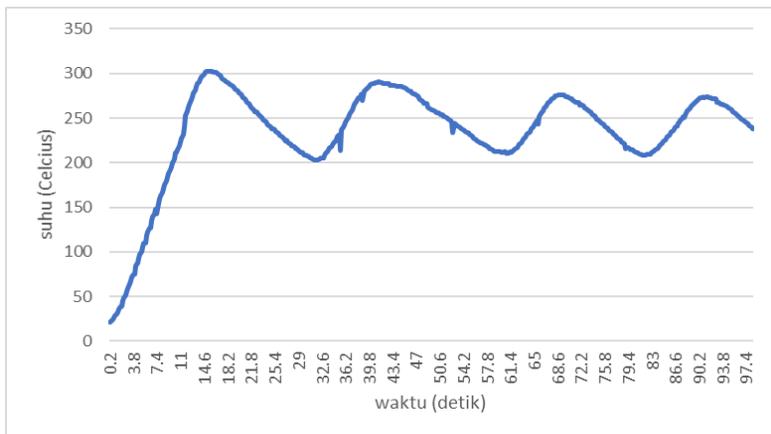
4.4. Tuning PID dan Uji Kontrol Suhu Aktuator

Di dalam pengujian ini, digunakan control PI untuk menstabilkan suhu *hot cutting pen* sesuai dengan *set point*. Nilai Kp

dan K_i diubah-ubah dan dicari agar perubahan suhu berhasil seminimum mungkin ketika diberi suatu *setpoint*. Nilai *setpoint* bisa diubah-ubah sesuai keinginan pengguna melalui button pada mesin dan ditampilkan pada lcd 4x20.

Pertama dilakukan tuning dengan metode Ziegler – Nicholes. Pada metode ini, hanya dimasukkan nilai K_p sebagai *gain* kritis (K_{cr}). Kemudian dicari grafik osilasi dengan grafik yang konsisten.

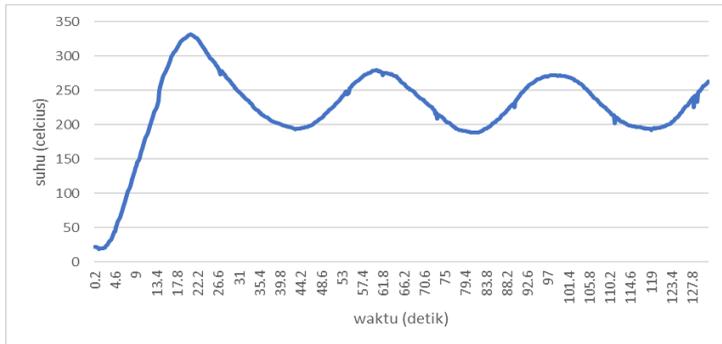
- Tuning Ziegler Nicholes dengan $K_{cr} = 0.5$
Berikut adalah grafik suhu dengan $K_{cr} = 0.5$



Gambar 4.13 Grafik suhu dengan $K_{cr}=0.5$

Grafik 4.13 menunjukkan osilasi yang semakin menurun. Menurut teori Ziegler-Nicholes, hal ini karena *gain* kritis nya terlalu kecil. Maka dilakukan uji lagi dengan menaikkan K_p sebagai *gain* kritis.

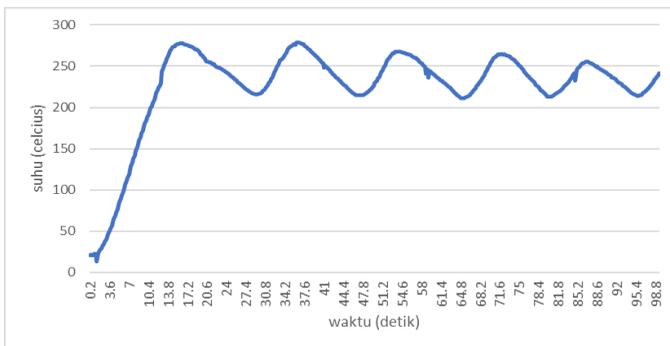
- Tuning Ziegler Nicholes dengan $K_{cr} = 1$
Berikut adalah grafik suhu dengan $K_{cr} = 1$



Gambar 4.14 Grafik suhu dengan Kcr=1

Grafik gambar 4.14 menunjukkan osilasi yang semakin menurun. Menurut teori Ziegler-Nicholes, hal ini karena *gain* kritis nya terlalu kecil. Maka dilakukan uji lagi dengan menaikkan K_p sebagai *gain* kritis.

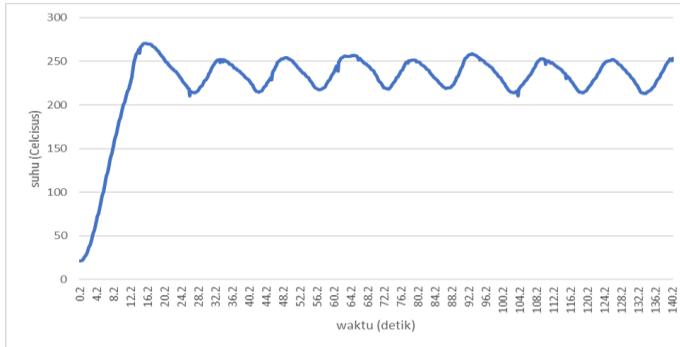
- Tuning Ziegler Nicholes dengan Kcr = 2
Berikut adalah grafik suhu dengan Kcr = 2



Gambar 4.15 Grafik suhu dengan Kcr=2

Grafik pada gambar 4.15 menunjukkan osilasi yang semakin menurun. Menurut teori Ziegler-Nicholes, hal ini karena *gain* kritis nya terlalu kecil. Maka dilakukan uji lagi dengan menaikkan *gain* kritis.

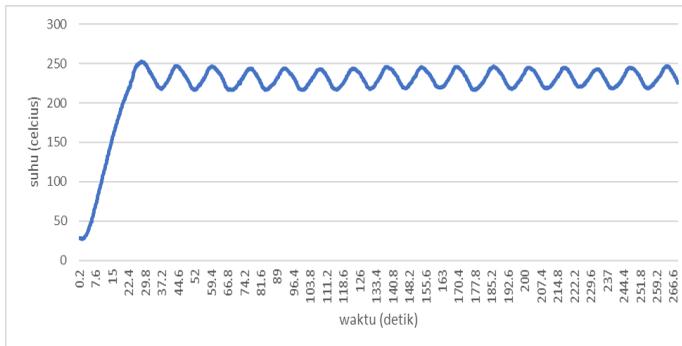
- Tuning Ziegler Nicholes dengan Kcr = 4
Berikut adalah grafik suhu dengan Kcr = 4



Gambar 4.16 Grafik suhu dengan Kcr=4

Grafik di atas menunjukkan osilasi yang semakin menurun. Menurut teori Ziegler-Nicholes, hal ini karena *gain* kritis nya terlalu kecil. Maka dilakukan uji lagi dengan menaikkan K_p sebagai *gain* kritis.

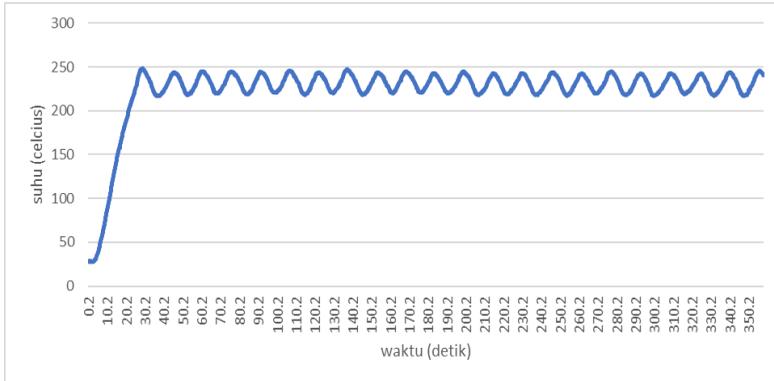
- Tuning Ziegler Nicholes dengan Kcr = 5
Berikut adalah grafik suhu dengan Kcr = 5



Gambar 4.17 Grafik suhu dengan Kcr=5

Grafik pada gambar 4.17 menunjukkan osilasi yang cukup konsisten namun lama-kelamaan masih semakin menurun. Menurut teori Ziegler-Nicholes, hal ini karena *gain* kritis nya terlalu kecil. Maka dilakukan uji lagi dengan menaikkan K_p sebagai *gain* kritis.

- Tuning Ziegler Nicholes dengan Kcr = 6
Berikut adalah grafik suhu dengan Kcr = 6



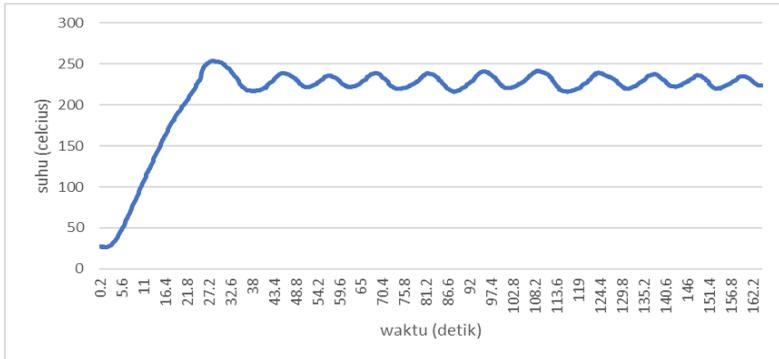
Gambar 4.18 Grafik suhu dengan $K_{cr}=6$

Grafik di atas menunjukkan osilasi sudah konsisten. Maka, ditentukan $K_{cr}=6$ sebagai *gain* kritis dari metode Ziegler Nicholes dan menghitung nilai K_p , K_i , dan K_d sesuai dengan rumus pada tabel 4.7.

Tabel 4.7. Rumus variable PID dengan metode Ziegler-Nicholes

Tipe Kontroller	K_p	K_i	K_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
I	$0.45K_{cr}$	$(1/1.2)P_{cr}$	0
D	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Dari rumus variable PID dengan metode Ziegler-Nicholes, maka didapatkan hasil $K_p = 3,6$, $K_i=7,78$, dan $K_d=0,1945$. Kemudian nilai ini dimasukkan pada program PID pada mikrokontroler dan dihasilkan grafik seperti pada gambar 4.16.

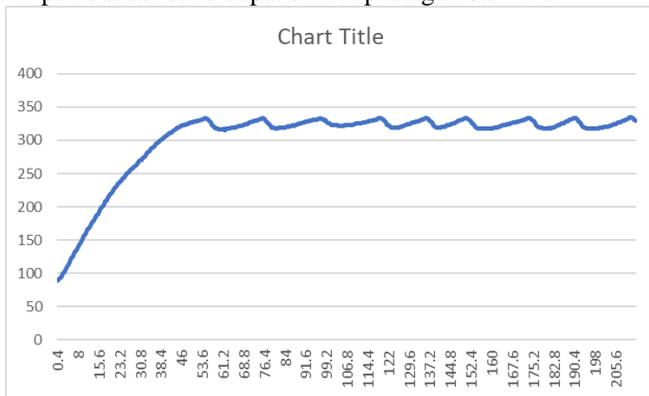


Gambar 4.19 Grafik suhu dengan metode Ziegler-Nicholes

Gambar 4.19 menunjukkan grafik hasil pembacaan suhu aktuator namun masih memiliki lebar jarak osilasi yang cukup besar yaitu 20 derajat celcius. Maka dari itu dilakukan tuning PID untuk memperkecil lebar osilasi.

- Tuning PID

Pada tuning PID, nilai Kd dibuat tetap dan yang diubah adalah nilai Kp dan Ki untuk memperkecil lebar osilasi. Nilai Kp dibuat 4,2, Ki = 24, dan Kd=1,945 dan dihasilkan lebar osilasi sebesar 11 derajat celcius. Maka ditentukan nilai tersebut sebagai variable PID. Grafik pembacaan suhu dapat dilihat pada gambar 4.17.



Gambar 4.20 Grafik suhu dengan tuning PID

4.5. Uji Pemotongan *Styrofoam*

Pengujian ini dilakukan dengan tujuan mencari nilai *feed rate* dan suhu yang tepat untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalan berbeda. Pengujian dilakukan dengan melakukan pemotongan *styrofoam* dengan *hot cutting pen* dengan bentuk memanjang sebesar 5cm dan dilakukan empat kali pada setiap pengaturan suhu *set point* dan *feed rate*. *Styrofoam* yang digunakan untuk uji pemotongan memiliki ketebalan 1 cm, 1,5cm, 2cm, dan 3 cm karena *styrofoam* dengan ketebalan inilah yang biasa dipakai untuk industri kreatif *styrofoam* di pasar Indonesia.

4.4.1. Pemotongan *Styrofoam* 1 cm

- Uji 1 pemotongan *styrofoam* 1 cm

Pada uji 1 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 200 mm/min dan suhu *set point* 230° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- aktuator tertinggal, bengkok
- Banyak jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- banyak jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm menggunakan pengaturan *feed rate* dan suhu *set point* ini masih belum optimal seperti yang terlihat pada gambar 4.21. Maka dari itu, dilakukan uji ulang untuk mendapatkan hasil yang optimal.



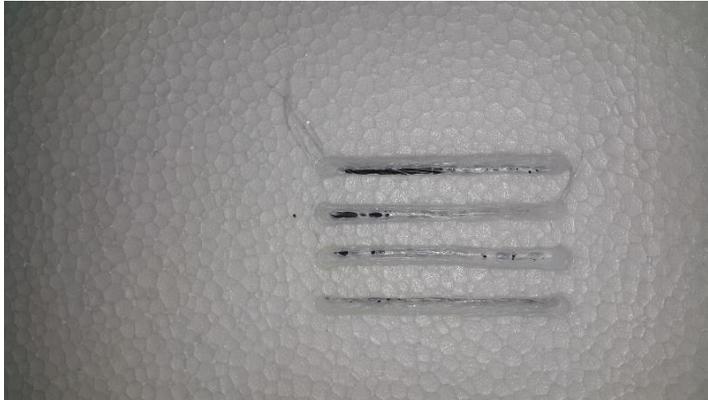
Gambar 4.21 Uji 1 pemotongan *styrofoam* 1 cm

- **Uji 2 pemotongan *styrofoam* 1 cm**

Pada uji 2 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 200 mm/min dan suhu *set point* 240° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- aktuator tertinggal, bengkok
- Banyak jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- banyak jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm menggunakan pengaturan *feed rate* dan suhu *set point* ini masih belum optimal seperti terlihat pada gambar 4.22. Maka dari itu, dilakukan uji ulang untuk mendapatkan hasil yang optimal.



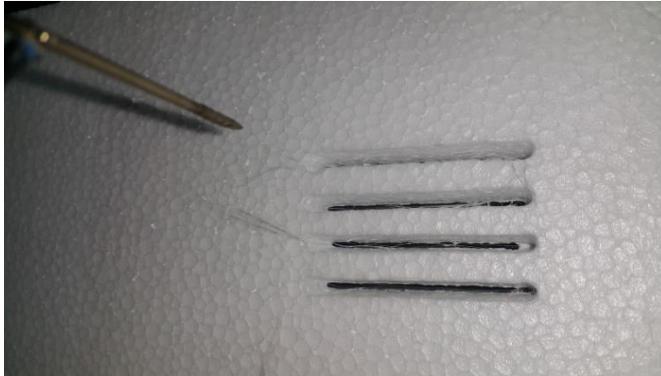
Gambar 4.22 Uji 2 pemotongan *styrofoam* 1 cm

- **Uji 3 pemotongan *styrofoam* 1 cm**

Pada uji 3 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 200 mm/min dan suhu *set point* 250° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- Aktuator tertinggal, agak bengkok
- Banyak jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- Banyak jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm menggunakan pengaturan *feed rate* dan suhu *set point* ini masih belum optimal seperti terlihat pada gambar 4.23. Maka dari itu, dilakukan uji ulang untuk mendapatkan hasil yang optimal.



Gambar 4.23 Uji 3 pemotongan *styrofoam* 1 cm

- **Uji 4 pemotongan *styrofoam* 1 cm**

Pada uji 4 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 200 mm/min dan suhu *set point* 260° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- Sktuator sedikit tertinggal
- Banyak jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- Ada jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm menggunakan pengaturan *feed rate* dan suhu *set point* ini masih belum optimal seperti terlihat pada gambar 4.24. Maka dari itu, dilakukan uji ulang untuk mendapatkan hasil yang optimal.



Gambar 4.24 Uji 4 pemotongan *styrofoam* 1 cm

- **Uji 5 pemotongan *styrofoam* 1 cm**

Pada uji 5 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 200 mm/min dan suhu *set point* 270° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- Aktuator sedikit tertinggal
- Ada jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- Ada jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm menggunakan pengaturan *feed rate* 200 mm/min dan suhu *set point* 270° C sudah bagus dan optimal seperti terlihat pada gambar 4.25. Maka dari itu, disimpulkan bahwa untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm dengan *feed rate* 200 mm/min diperlukan suhu minimal 270° C.



Gambar 4.25 Uji 5 pemotongan *styrofoam* 1 cm

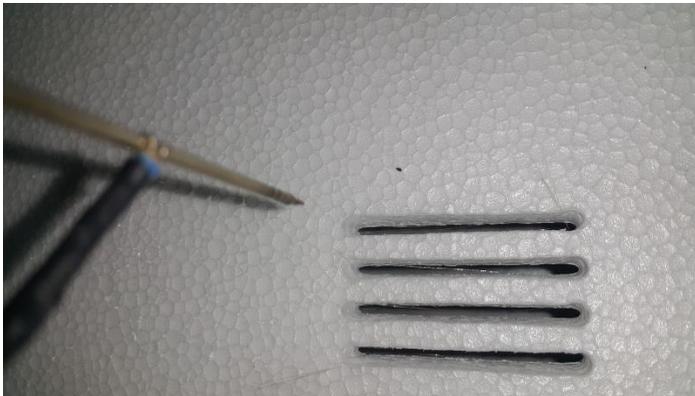
Setelah didapatkan suhu minimal untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm dengan *feed rate* 200 mm/min, selanjutnya dilakukan uji pemotongan *styrofoam* dengan *feed rate* yang lebih tinggi agar proses pemotongan bisa dilakukan lebih cepat, yaitu 250 mm/min. Semakin cepat proses pemotongan, maka akan menghemat waktu dan energi listrik yang diperlukan untuk mengoperasikan mesin dan komputer. Semakin cepat proses pemotongan, juga akan berdampak pada banyaknya jumlah *styrofoam* yang bisa dipotong sehingga pengguna mesin akan semakin diuntungkan apabila memiliki banyak *customer*.

- **Uji 6 pemotongan styrofoam 1 cm**

Pada uji 6 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 250 mm/min dan suhu *set point* 260° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- aktuator sedikit tertinggal
- Masih ada jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm menggunakan pengaturan *feed rate* dan suhu *set point* ini masih belum optimal seperti yang terlihat pada gambar 4.26. Maka dari itu, dilakukan uji ulang untuk mendapatkan hasil yang optimal.



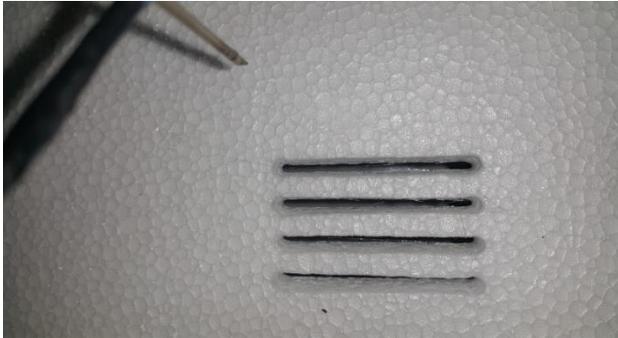
Gambar 4.26 Uji 6 pemotongan *styrofoam* 1 cm

- **Uji 7 pemotongan styrofoam 1 cm**

Pada uji 7 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 250 mm/min dan suhu *set point* 270° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- aktuator sedikit tertinggal
- Masih ada jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm menggunakan pengaturan *feed rate* dan suhu *set point* ini masih belum optimal seperti yang terlihat pada gambar 4.27. Maka dari itu, dilakukan uji ulang untuk mendapatkan hasil yang optimal.



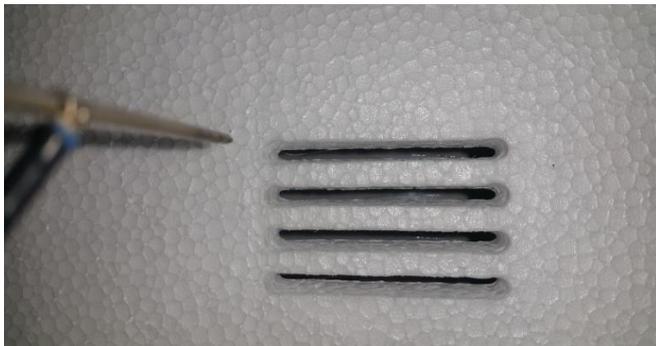
Gambar 4.27 Uji 7 pemotongan *styrofoam* 1 cm

- **Uji 8 pemotongan *styrofoam* 1 cm**

Pada uji 8 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 250 mm/min dan suhu *set point* 280° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- Aktuator tidak tertinggal
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm menggunakan pengaturan *feed rate* 250 mm/min dan suhu *set point* 280° C sudah bagus dan optimal seperti terlihat pada gambar 4.28. Maka dari itu, disimpulkan bahwa untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm dengan *feed rate* 250 mm/min diperlukan suhu minimal 280° C.



Gambar 4.28 Uji 8 pemotongan *styrofoam* 1 cm

Setelah didapatkan suhu minimal untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalah 1 cm dengan *feed rate* 250 mm/min, selanjutnya dilakukan uji pemotongan *styrofoam* lagi dengan *feed rate* yang lebih tinggi, yaitu 300 mm/min. Semakin cepat proses pemotongan, maka akan menghemat waktu dan energi listrik yang diperlukan untuk mengoperasikan mesin dan komputer.

- **Uji 9 pemotongan *styrofoam* 1 cm**

Pada uji 9 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 280° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- Aktuator sedikit tertinggal
- Masih ada jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm menggunakan pengaturan *feed rate* dan suhu *set point* ini masih belum optimal seperti yang terlihat pada gambar 4.29. Maka dari itu, dilakukan uji ulang untuk mendapatkan hasil yang optimal.



Gambar 4.29 Uji 9 pemotongan *styrofoam* 1,5cm

- **Uji 10 pemotongan *styrofoam* 1 cm**

Pada uji 10 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 290° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- Aktuator tidak tertinggal
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm menggunakan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 290° C sudah bagus dan optimal seperti terlihat pada gambar 4.30. Maka dari itu, disimpulkan bahwa untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm dengan *feed rate* 300 mm/min diperlukan suhu minimal 290° C.



Gambar 4.30 Uji 10 pemotongan *styrofoam* 1 cm

4.4.2. Pemotongan Styrofoam 1,5 cm

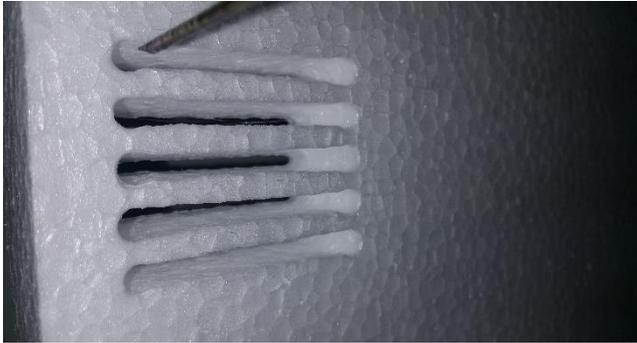
Setelah didapatkan suhu minimal untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm dengan *feed rate* 300 mm/min, selanjutnya dilakukan uji pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1,5 cm. Pada pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1,5 cm *feed rate* awal langsung diatur sebesar 300 mm/min.

- **Uji 1 pemotongan *styrofoam* 1,5 cm**

Pada uji 1 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1,5 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 290° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- Aktuator sedikit tertinggal
- Masih ada jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1,5 cm menggunakan pengaturan *feed rate* dan suhu *set point* ini masih belum optimal seperti yang terlihat pada gambar 4.31. Maka dari itu, dilakukan uji ulang untuk mendapatkan hasil yang optimal.



Gambar 4.31 Uji 1 pemotongan *styrofoam* 1,5 cm

- **Uji 2 pemotongan *styrofoam* 1,5 cm**

Pada uji 2 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1,5 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 300° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- Aktuator tidak tertinggal
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1,5 cm menggunakan pengaturan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 300° C sudah bagus dan optimal seperti terlihat pada gambar 4.32. Maka dari itu, disimpulkan bahwa untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalan 1,5 cm dengan *feed rate* 300 mm/min diperlukan suhu minimal 300° C.



Gambar 4.32 Uji 2 pemotongan *styrofoam* 1,5 cm

4.4.3. Pemotongan *Styrofoam* 2 cm

Setelah didapatkan suhu minimal untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm dan 1,5 cm dengan *feed rate* 300 mm/min, selanjutnya dilakukan uji pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 2 cm. Pada pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 2 cm, *feed rate* awal langsung diatur sebesar 300 mm/min.

- **Uji 1 pemotongan *styrofoam* 2 cm**

Pada uji 1 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 2 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 300° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- Aktuator sedikit tertinggal
- Masih ada jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 2 cm menggunakan pengaturan *feed rate* dan suhu *set point* ini masih belum optimal seperti yang terlihat pada gambar 4.33. Maka dari itu, dilakukan uji ulang untuk mendapatkan hasil yang optimal.



Gambar 4.33 Uji 1 pemotongan *styrofoam* 2 cm

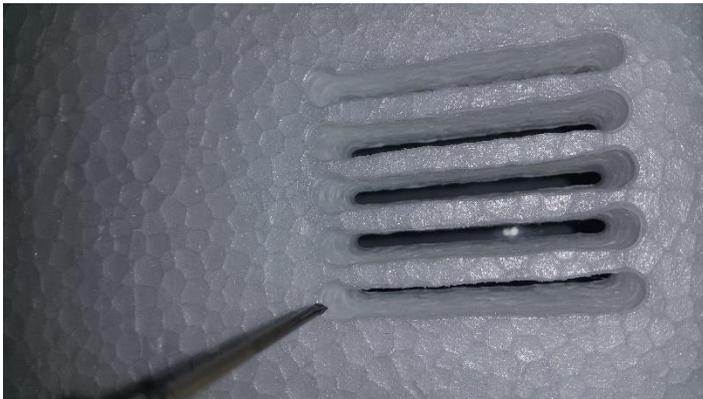
- **Uji 2 pemotongan *styrofoam* 2 cm**

Pada uji 2 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 2 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 310° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- Aktuator tidak tertinggal
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan

- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 2 cm menggunakan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 310° C sudah bagus dan optimal seperti terlihat pada gambar 4.34. Maka dari itu, disimpulkan bahwa untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalan 2 cm dengan *feed rate* 300 mm/min diperlukan suhu minimal 310° C.



Gambar 4.34 Uji 2 pemotongan *styrofoam* 2 cm

4.4.4. Pemotongan Styrofoam 3 cm

Setelah didapatkan suhu minimal untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm, 1,5 cm, dan 2 cm dengan *feed rate* 300 mm/min, selanjutnya dilakukan uji pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 3 cm. Pada pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 3 cm, *feed rate* awal diatur sebesar 300 mm/min.

- **Uji 1 pemotongan *styrofoam* 3 cm**

Pada uji 1 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 3 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 320° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- Aktuator sedikit tertinggal
- Masih ada jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 3 cm menggunakan pengaturan *feed rate* dan suhu *set point* ini masih

belum optimal seperti yang terlihat pada gambar 4.35. Maka dari itu, dilakukan uji ulang untuk mendapatkan hasil yang optimal.



Gambar 4.35 Uji 1 pemotongan *styrofoam* 3 cm

- **Uji 2 pemotongan *styrofoam* 1,5 cm**

Pada uji 2 pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 3 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 330° C. Pada uji pemotongan ini didapatkan hasil sebagai berikut:

- Aktuator tidak tertinggal
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada sisa potongan
- Tidak ada jaring-jaring *styrofoam* pada aktuator

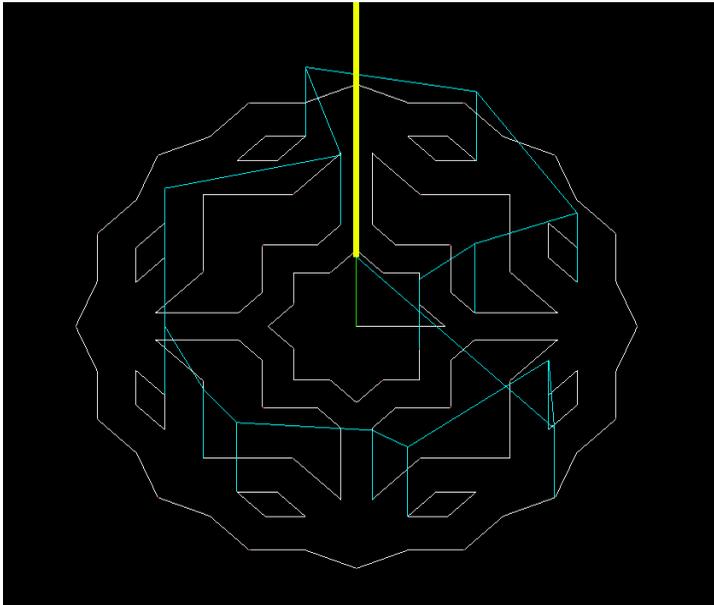
Hasil pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 3 cm menggunakan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 330° C sudah bagus dan optimal seperti terlihat pada gambar 4.36. Maka dari itu, disimpulkan bahwa untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalah 3 cm dengan *feed rate* 300 mm/min diperlukan suhu minimal 330° C.



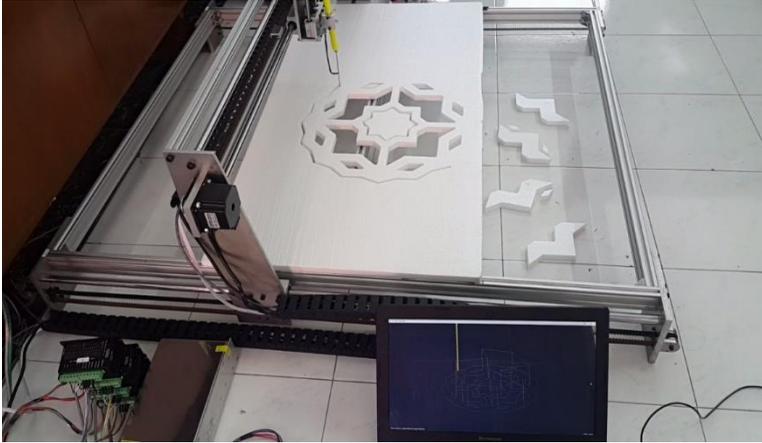
Gambar 4.36 Uji 2 pemotongan *styrofoam* 3 cm

4.6. Uji Pemotongan *Styrofoam* dengan G-code

Setelah dilakukan uji pemotongan untuk mencari suhu dan *feed rate* optimal agar dapat memotong *Styrofoam*, maka dilakukan uji pemotongan *Styrofoam* dengan desain potongan yang lebih kompleks. Desain potongan *Styrofoam* dibuat menggunakan software desain tiga dimensi, kemudian di konversi menjadi file g-code. File g-code kemudian di masukkan kedalam GUI *Universal G-code Sender* dan dilihat hasil visualisasinya seperti pada gambar 4.22. Pada jendela visualisasi terdapat garis kuning yang merepresentasikan posisi aktuator dan akan bergerak sesuai dengan gerakan aktuator. Setelah hasil visualisasi sesuai dengan desain pada software dasainer, maka file g-code dikirim kepada mikrokontroler dan proses pemotongan berjalan secara otomatis.



Gambar 4.37 Visualisasi *file g-code*



Gambar 4.38 Proses pemotongan *styrofoam* 1,5cm

Setelah proses pemotongan selesai, didapatkan hasil pemotongan yang rapi dan sesuai dengan desain g-code yang di inputkan. Hasil *Styrofoam* yang telah di potong dapat dilihat pada gambar 4.33.



Gambar 4.39 Hasil pemotongan *styrofoam* 1,5cm

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan perancangan, pembuatan dan pengujian keseluruhan sistem pada alat tugas akhir ini dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- Penggunaan *hot cutting pen* pada mesin 3 axis untuk memotong *Styrofoam* memiliki kelebihan dapat membentuk *Styrofoam* tanpa memotong salah satu sisi *Styrofoam*, namun memiliki *kerf width* yang cukup lebar yaitu sekitar 3 mm.
- Kontrol suhu dengan metode PID menggunakan Ziegler-Nicholes menghasilkan nilai optimum dengan $K_p=3,6$, $K_i=7,78$, dan $K_d=0,1945$ dan range osilasi 20°C .
- Tuning PID menggunakan metode Trial-Error berdasarkan hasil Ziegler-Nicholes menghasilkan nilai optimum dengan $K_p=4,2$, $K_i = 24$, dan $K_d=1,945$ dan range osilasi 11°C .
- Pemotongan *Styrofoam* menggunakan *hot cutting pen* memiliki *feed rate* optimal 300 mm/min dengan suhu optimal 290°C untuk ketebalan 1 cm, 300°C untuk ketebalan 1,5 cm, 310°C untuk ketebalan 2 cm, 330°C untuk ketebalan 3 cm.

5.2. Saran

Pada perancangan, pembuatan dan pengujian alat tugas akhir ini terdapat beberapa kekurangan dan disarankan untuk pengembangan selanjutnya dapat mengembangkan beberapa poin sebagai berikut:

- Pisau pemotong diperkecil atau dipertajam agar ketika melakukan pemotongan, *kerf width* tidak terlalu lebar dan pemotongan bisa dilakukan lebih cepat.
- Kecepatan pemotongan dipercepat agar bisa memotong banyak *styrofoam* dalam waktu yang tidak terlalu lama.
- Ditambahkan limit switch pada tiap ujung *axis* sehingga apabila terjadi kesalahan, mesin tidak menabrak ujung *axis*.
- Metode *return home* ditambahkan dengan menggunakan metode *maximal limit switch* sehingga posisi *home* selalu sama.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

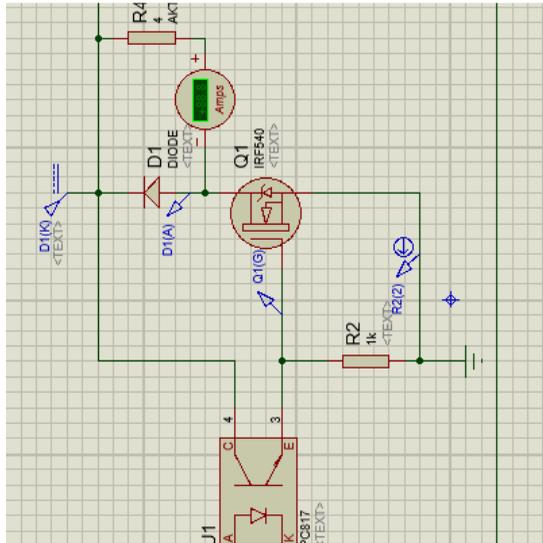
DAFTAR PUSTAKA

- [1] Stege, "Method of producing test components by a *hot wire* cutter". Canada Patent CA2744470 A1, 29 December 2011.
- [2] D. Aitchison, David Aitchison, Joe Bain and Dirk Pons, "An investigation into the prediction of optimal machining conditions for polystyrene foam cut with a taut hot-wire," Christchurch, New Zealand, 2009.
- [3] S. N. Cheng, "Hot-wire cutter". United States Patent US 8278585 B2, 02 10 2012.
- [4] Aitchison, D.R., Bain, J., Brooks, H., Taylor, M., Transient temperature effects in hot-wire plastic foam cutting. 4th Int. Conf. on Design and Production of Machines & Dies/Molds, 2007, pag. 219-224.
- [5] H. L. Brooks and D. R. Aitchison, "Force feedback temperature control for hot-tool," Christchurch, New Zealand, 2009.
- [6] A. E. H. A. a. S. B. A. Mohamed E. Mahmoud, "Conversion of Waste Styrofoam into Engineered Adsorbents for Efficient Removal of Cadmium, Lead and Mercury from Water," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. IV, no. 3, pp. 819-827, 2016.
- [7] Sulkowski, W. W.; Nowak, K.; Sulkowska, A; Wolinska, A; Bajdur, W. M.; Pentak, D.; Mikula, B. Study of the sulfonation of expanded polystyrene waste and of properties of the products obtained. *Pure Appl. Chem.* 2009,81, 2417–2424
- [8] P. K. S. C. P. Devendra Singh, "Calibration of Thermocouples for Low Temperature Applications," in *International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)* , Jaipur, India, 2016.
- [9] U. M. S.G.Abeyratne, "A new power conversion strategy for a uni-polar stepper motor drive," in Power Electronics Specialists Conference, Jeju, South Korea, 2006.
- [10] R. C. a. M. Bianchi, "Sensor-less Estimation of Frictions and Moment of Inertia of a Stepper Motor in a Machining Device," in IEEE, Manno, Switzerland, 2017. [8] W. T. Clark, "*Hot wire* cutting system". United States Patent US 4601224, 05 10 1984.
- [11] M. K. S. S. Dhruvi Ranjan Gaan, "Frequency Modulation based Microstepping of Stepper Motor for Real Time Position Tracking Applications," in IEEE, Bangalore, India, 2016.

- [12] Basilio, J.C. dan Matos, S.R., "Design of PI and PID Controllers with Transient Performance Specification", *IEEE Transaction on Education*, vol. 45 – no.4, pp. 364-370, November, 2002.
- [13] Winder, "github," Arduino, [Online]. Available: <https://github.com/winder/Universal-G-Code-Sender>. [Accessed 16 2017].
- [14] C. Z. Y. X. Hao Feng, "Research on Dynamic Calibration and Dynamic Compensation of K-type Thermocouple," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Montevideo, Uruguay, 2014.
- [15] maxim integrated, 24 2014. [Online]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>. [Accessed 26 2017].
- [16] H. Dallagi, "Implementation of the PWM pre-calculated technique for elimination harmonic using microcontroller," in *Advanced Systems and Electric Technologies (IC_ASET)*, Hammamet, Tunisia, 2017.

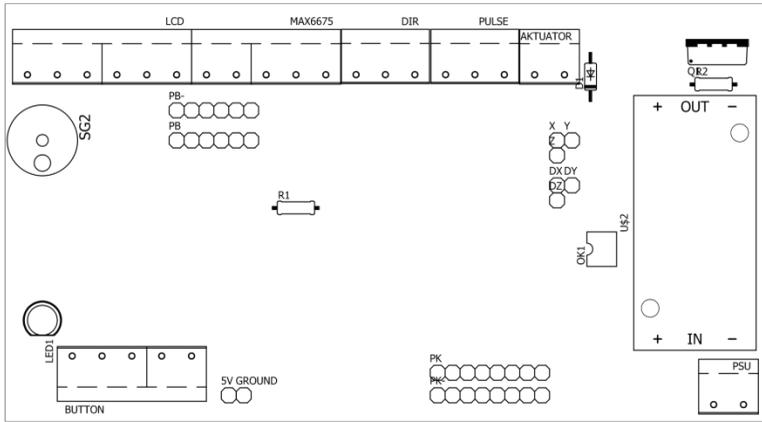
LAMPIRAN A

Skematik Rangkaian *Close Loop* Aktuator




LAMPIRAN B

Desain PCB bagian atas Rangkaian Kontroller




Desain PCB bagian bawah Rangkaian Kontroller



LAMPIRAN C

Gambar Mesin Keseluruhan



LAMPIRAN D

Gambar Hasil Pemotongan *Styrofoam*



BIODATA PENULIS



Putut Dwi Wijaya lahir di Ngawi pada 01 Desember 1994, yang merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Ahmad Rukminto dan Ninik Sri Purwanti. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN Kedunggalar 1 dan dilanjutkan dengan pendidikan menengah pertama di SMPN 2 Ngawi. Setelah tamat dari Pendidikan menengah pertama, penulis meneruskan Pendidikan menengah atas di kota lain di Jawa Tengah, yaitu di SMA MTA Surakarta. Pada tahun 2013, penulis memulai pendidikan di jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama kuliah, penulis aktif membantu penyelenggaraan kegiatan dan aktif sebagai asisten laboratorium Elektronika Dasar.

Email:
pututdwiwijaya@gmail.com

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....