

Rancang Bangun Mesin Pemotong *Styrofoam* 3 Axis Menggunakan *Hot Cutting Pen* dengan Kontrol PID

Putut Dwi Wijaya, Muhammad Rivai, Tasripan

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

E-mail: muhammad_rivai@ee.its.ac.id

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 penelitian 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—*styrofoam*, *hot cutting pen*, kontrol PID.

I. PENDAHULUAN

PERKEMBANGAN industri kreatif semakin pesat akhir-akhir ini. Salah satu contohnya adalah industri kreatif dalam pembuatan dekorasi dari *styrofoam* [1]. 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* [2]. 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* [3][4] 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* [5]. Suhu yang tidak konsisten dapat mengakibatkan hasil pemotongan yang kurang rapi dan *kerf width* [6] 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 penelitian 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.

II. DASAR TEORI

A. Motor Stepper

Motor *stepper* adalah perangkat elektromekanis yang bekerja dengan mengubah pulsa elektronis menjadi gerakan mekanis diskrit [7]. 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 penahanan, 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. Besarnya derajat putaran per step adalah parameter terpenting dalam pemilihan motor stepper karena akan menentukan ukuran langkah gerakan yang paling kecil. 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 penelitian 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 fasa (kelompok gulungan) yang diberi energi sekaligus. Mode ini membutuhkan daya paling sedikit dari pengemudi mode eksitasi manapun. Dalam mode dual phase, motorstepper dioperasikan dengan kedua fasa berenergi pada saat bersamaan. Sedangkan eksitasi *Half Step* adalah operasi fasa tunggal dan ganda bergantian yang menghasilkan langkah-langkah setengah sudut langkah dasar. 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 fasa tunggal diberi energi. Sedangkan *Microstepping* adalah teknik yang meningkatkan resolusi motorik dengan mengendalikan baik arah dan amplitudo aliran arus pada masing-masing lilitan [8]. Arus proporsional dalam gulungan sesuai dengan fungsi sinus dan kosinus. *Microstepping* bisa membagi langkah dasar motor hingga 256 kali. Pada penelitian 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*.

B. 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*) [9]. 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 (1).

$$u(t) = Kp.e(t) + Kd.\frac{d}{dt}e(t) + Ki.\int e(t)dt \quad (1)$$

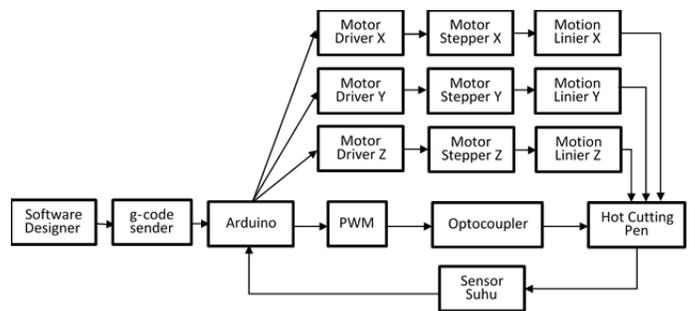
Pada persamaan 2.1, $u(t)$ merupakan sinyal kontrol PID dan $e(t)$ merupakan sinyal *error*. Sedangkan Kp , Ki , dan Kd masing-masing merupakan koefisien. Untuk sistem diskrit, persamaan 2.1 dimodifikasi menjadi persamaan 2.

$$u[n] = Kp.e[n] + Kd.(e[n] - e[n - 1]) + Ki.\sum e[n] \quad (2)$$

Nilai Kp , Ki , dan Kd pada penelitian ini akan dicari menggunakan *tuning* manual. Sinyal kontrol yang akan dihasilkan berupa PWM untuk menggerakkan motor agar mengarah ke posisi yang diinginkan.

III. PERANCANGAN SISTEM

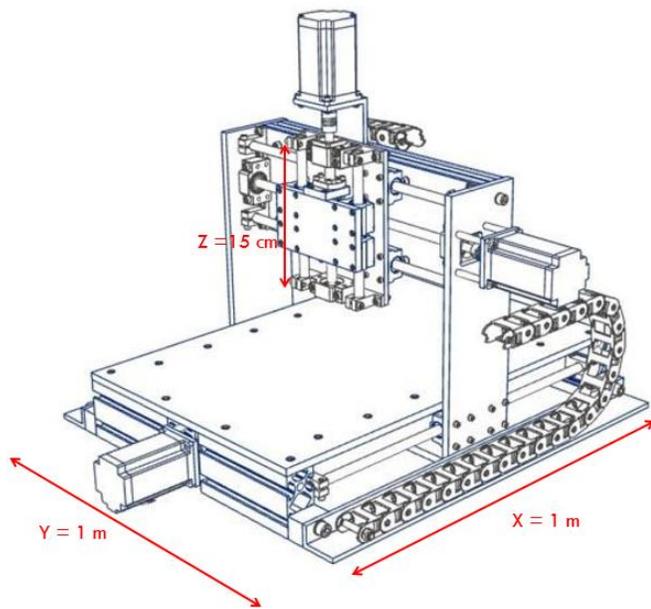
Pada tahap ini, akan dijelaskan mengenai perancangan sistem mesin pemotong *Styrofoam* secara keseluruhan. Gambaran sistem secara keseluruhan diilustrasikan pada blok diagram sistem seperti pada gambar 1, yang meliputi: hubungan antara input desain, *software converter*, *mikrokontroler*, motor stepper, dan kontrol suhu PID.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Pada dasarnya, sistem terdiri dari *software* dan *hardware*. *Software* pada *mikrokontroler* berupa program untuk menjalankan semua motor stepper sesuai input dari g-code, juga untuk melakukan kontrol suhu pada aktuator. Sedangkan *hardware* terdiri *hardware* mekanik dan *hardware* elektronik. *Hardware* mekanik berupa kerangka mesin yang sesuai dengan perancangan mekanik, dan *hardware* elektronik terdiri dari power supply, kontroler, driver motor, motor stepper, sensor suhu, gate driver, dan aktuator.

Pada perancangan mekanik, dilakukan 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 2.



Gambar 2. Desain mekanik mesin

IV. PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Kalibrasi Aksis

Pada tahap ini, dilakukan pengujian 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 1.

Tabel 1.

Uji arah putar motor stepper 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 = ukuran 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)

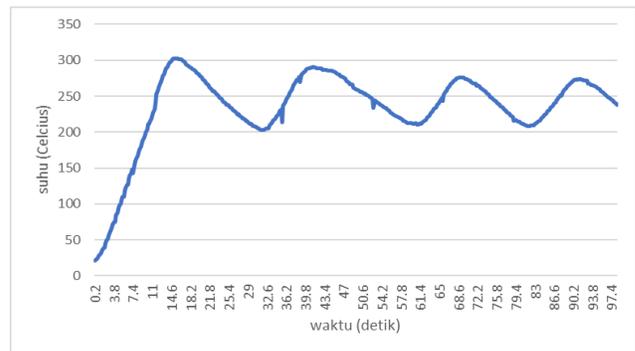
Pada uji ini, di inputkan gerakan dengan panjang tertentu yang disebut target. Resolusi memiliki nilai awal 50 step/mm. Setelah di masukkan gerakan dengan nilai tertentu, didapatkan lintasan nyata yang ditempuh. Setelah didapatkan lintasan nyata yang ditempuh (hasil), maka dilakukan perhitungan resolusi sebenarnya seperti pada persamaan 3.

$$RESOLUSI\ BENAR = (RESOLUSI/HASIL) \times TARGET \quad (3)$$

Setelah pengujian kalibrasi aksis Y dilakukan sebanyak lima kali, didapatkan lima nilai RESOLUSI BENAR yang memiliki nilai yang berdekatan. Untuk menentukan RESOLUSI BENAR yang akan digunakan pada uji selanjutnya, kelima nilai RESOLUSI BENAR di rata-rata dengan cara dijumlah total dan dibagi lima. Maka, didapatkan hasil nilai RESOLUSI BENAR sebesar 21,35 mm/step dan digunakan pada uji ke 6, 7, dan 8. Dengan menggunakan RESOLUSI sebesar 21,35, didapatkan HASIL yang sama dengan TARGET. Maka diputuskan bahwa nilai RESOLUSI untuk motor stepper pada aksis Y adalah 21,35. Untuk selanjutnya, uji pada aksis X dan Z juga menggunakan RESOLUSI sebesar 21,35 dan didapatkan hasil jarak input sesuai dengan jarak tempuh aktuator sebenarnya karena juga menggunakan motor stepper bipolar.

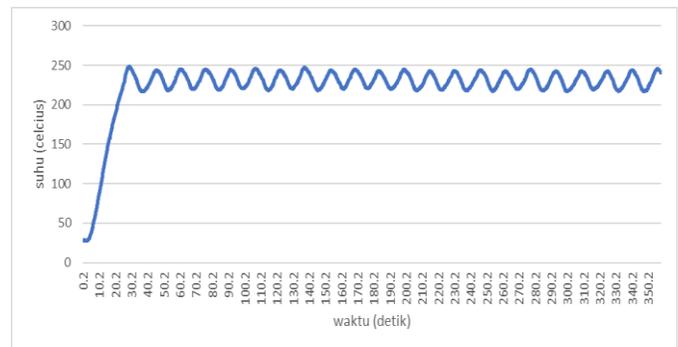
B. Tuning PID dan Uji Kontrol Suhu Aktuator

Pada tahap ini, dilakukan tuning dengan metode Ziegler-Nicholes. Pada metode ini, hanya dimasukkan nilai Kp sebagai gain kritis (Kcr), kemudian dicari grafik dengan osilasi yang konsisten. Pertama, dimasukkan nilai Kcr = 0.5 dan dihasilkan grafik seperti pada gambar 3.



Gambar 3. Grafik suhu dengan Kcr=0.5

Grafik pada gambar 3 menunjukkan osilasi yang semakin menurun. Menurut teori Ziegler-Nicholes, hal ini karena gain kritis (Kcr) nya terlalu kecil. Maka dilakukan uji lagi dengan menaikkan gain kritis dengan nilai 1, 2, 3, 4, dan 5. Namun lama-kelamaan osilasi masih semakin turun. Setelah dimasukkan nilai Kcr=6, dihasilkan grafik osilasi yang cukup konsisten seperti pada gambar 4.



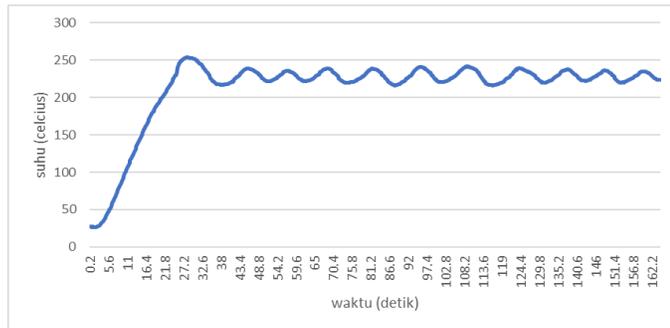
Gambar 4. Grafik suhu dengan Kcr=6

Grafik pada gambar 4 menunjukkan osilasi yang konsisten. Maka, ditentukan Kcr=6 sebagai gain kritis dari metode Ziegler-Nicholes kemudian dihitung nilai Kp, Ki, dan Kd sesuai dengan rumus pada tabel 2.

Tabel 2.
Rumus variable PID metode Ziegler-Nicholes

Tipe Controller	Kp	Ki	Kd
P	0.5Kcr	∞	0
I	0.45Kcr	(1/1.2)Pcr	0
D	0.6Kcr	0.5Pcr	0.125Pcr

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 5.

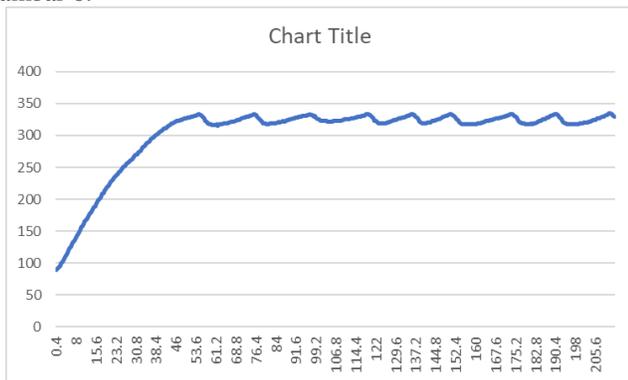


Gambar 5. Grafik suhu dengan metode Ziegler-Nicholes

Gambar 6 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 K_d dibuat tetap dan yang diubah adalah nilai K_p dan K_i untuk memperkecil lebar osilasi. Nilai K_p dibuat 4,2, $K_i = 24$, dan $K_d = 1,945$ dan dihasilkan lebar osilasi sebesar 11 derajat celcius. Maka ditentukan nilai tersebut sebagai variable PID. Grafik pembacaan suhu dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Grafik suhu dengan tuning PID

C. 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.

- Uji Pemotongan *Styrofoam* 1 cm

Pada uji 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 tersebut masih belum bagus seperti yang terlihat pada gambar 7. Maka dari itu, dilakukan uji ulang dengan menambahkan suhu sebesar 10 ° C pada setiap pengujian hingga didapatkan hasil yang optimal.



Gambar 7. Uji 1 pemotongan *styrofoam* 1 cm

Setelah dilakukan uji kelima dengan menggunakan $feed\ rate$ 200 mm/min dan suhu $set\ point$ 270° C, didapatkan hasil sebagai berikut:

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

Hasil tersebut sudah bagus dan optimal seperti terlihat pada gambar 8. Maka dari itu, disimpulkan bahwa untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalan 1 cm dengan $feed\ rate$ 200 mm/min diperlukan suhu minimal 270° C.



Gambar 8. Hasil pemotongan *styrofoam* 1 cm

Setelah didapatkan suhu minimal untuk memotong *styrofoam* dengan ketebalah 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 dan 300 mm/min. Setelah dilakukan uji pemotongan dengan meningkatkan $feed\ rate$, didapatkan hasil pemotongan bagus pada $feed\ rate$ 250 mm/min dengan suhu 280 ° C dan pada $feed\ rate$ 300 mm/min dengan suhu 290° C. Maka agar didapatkan hasil optimal digunakan $feed\ rate$ 300 mm/min dan 290 ° C untuk memotong *styrofoam* 1 cm karena semakin cepat proses pemotongan, maka akan menghemat waktu dan energi listrik yang diperlukan untuk mengoperasikan mesin dan komputer.

- Uji Pemotongan *Styrofoam* 1,5 cm

Pada uji pemotongan *styrofoam* dengan ketebalan 1,5 cm, digunakan pengaturan $feed\ rate$ 300 mm/min dan suhu $set\ point$

290° C. Akan tetapi, hasilnya masih belum optimal karena aktuator sedikit tertinggal dan masih ada jarring-jaring sisa potongan. Maka dari itu, dilakukan uji ulang dengan meningkatkan suhu *set point* menjadi 30° C. Setelah dilakukan pemotongan, didapatkan hasil yang optimal seperti terlihat pada gambar 9. 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 9. Uji pemotongan *styrofoam* 1,5 cm

- Uji Pemotongan *Styrofoam* 2 cm

Pada uji pemotongan *styrofoam* 2 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 300° C. Namun didapatkan hasil yang kurang optimal karena masih ada sedikit sisa jarring-jaring *styrofoam* sehingga suhu *set point* ditingkatkan menjadi 310° C dan didapatkan hasil potongan rapi seperti pada gambar 10.



Gambar 10. Uji pemotongan *styrofoam* 2 cm

- Uji Pemotongan *Styrofoam* 3 cm

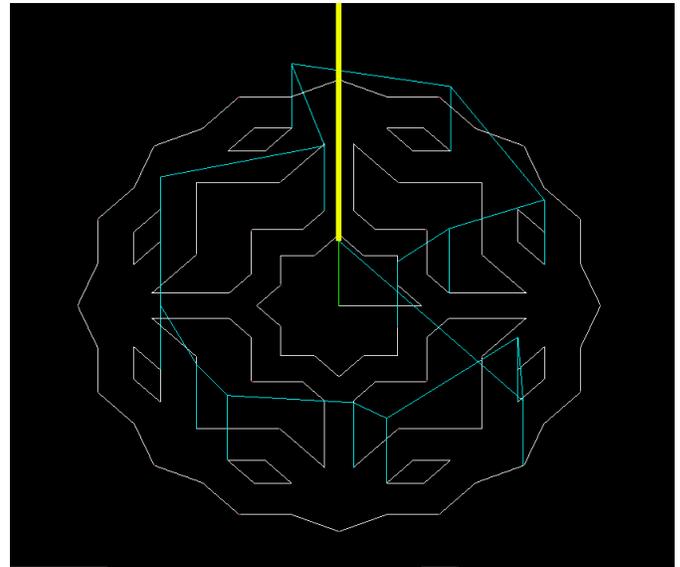
Pada uji pemotongan *styrofoam* 3 cm, digunakan pengaturan *feed rate* 300 mm/min dan suhu *set point* 320° C. Namun didapatkan hasil yang kurang optimal karena masih ada sedikit sisa jarring-jaring *styrofoam* sehingga suhu *set point* ditingkatkan menjadi 330° C dan didapatkan hasil potongan rapi seperti pada gambar 11.



Gambar 11. Uji pemotongan *styrofoam* 3 cm

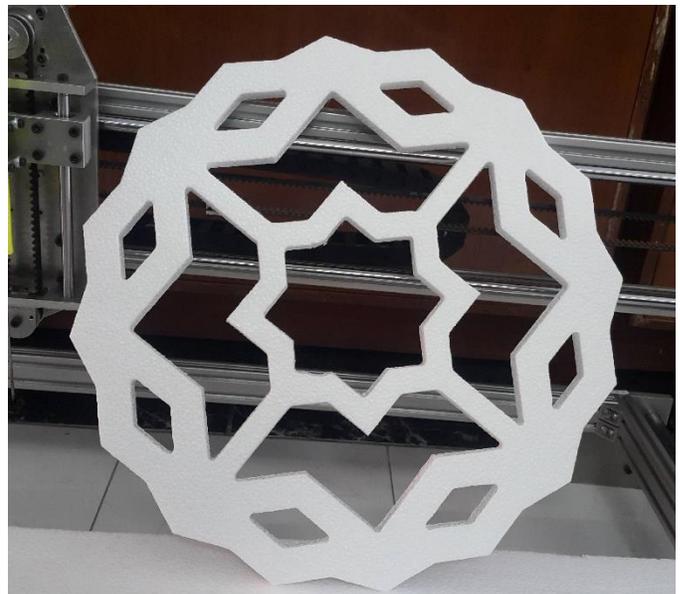
D. Uji Pemotongan *Styrofoam* dengan G-code

Setelah dilakukan uji pemotongan untuk mencari suhu dan *feed rate* optimal untuk memotong *styrofoam*, dilakukan uji pemotongan *styrofoam* menggunakan g-code. File g-code kemudian di masukkan kedalam GUI *Universal G-code Sender* dan dilihat hasil visualisasinya seperti pada gambar 12. 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 12. Visualisasi file g-code

Setelah proses pemotongan selesai, didapatkan hasil pemotongan yang rapi dan bentuk sesuai dengan desain g-code yang di inputkan. Hasil *styrofoam* yang telah di potong dapat dilihat pada gambar 13.



Gambar 13. Hasil pemotongan *styrofoam* dengan g-code

V. KESIMPULAN

Berdasarkan perancangan, pembuatan dan pengujian keseluruhan sistem pada alat penelitian 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 lebar osilasi 20°C .
- Tuning PID menggunakan metode Trial-Error berdasarkan hasil Ziegler-Nicholes menghasilkan nilai optimal 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 nilai optimal *feed rate* 300 mm/min dengan suhu 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.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Sulkowski, W. W.; Nowak, K.; Sulkowska, A; Wolinska, A; Bajdur, W. M.; Pentak, D.; Mikula, "Study of the sulfonation of expanded polystyrene waste and of properties of the products obtained," p. 2417–2424, 2009.
- [2] Stege, *Method of producing test components by a hot wire cutter*. Canada Patent CA2744470 A1, 2011.
- [3] J. B. and D. P. D. Aitchison, David Aitchison, "An investigation into the prediction of optimal machining conditions for polystyrene foam cut with a taut hot-wire," 2009.
- [4] S. N. Cheng, *Hot-wire cutter*. United States Patent US 8278585 B2, 2012.
- [5] M. Aitchison, D.R., Bain, J., Brooks, H., Taylor, "Transient temperature effects in hot-wire plastic foam cutting," in *4th Int. Conf. on Design and Production of Machines & Dies/Molds*, 2007, pp. 219–224.
- [6] H. L. B. and D. R. Aitchison, *Force feedback temperature control for hot-tool*. New Zealand, 2009.
- [7] U. M. S.G.Abeyratne, "A new power conversion strategy for a uni-polar stepper motor drive," in *Power Electronics Specialists Conference*, 2006.
- [8] M. K. S. S. D. R. Gaan, "Frequency Modulation based Microstepping of Stepper Motor for Real Time Position Tracking Applications," *IEEE*, 2016.
- [9] S. . Basilio, J.C. dan Matos, "Design of PI and PID Controllers with Transient Performance Specification," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 45, no. 4, pp. 364–370, 2002.