

Sistem Kontrol Suhu Dan Laju Pemanasan Proses Pirolisis Pengolahan Limbah Plastik Menjadi BBM Dengan Metode PID

Bagus Rachmanto, Mila Fauziyah, Sungkono

Abstrak — Sampah adalah masalah terbesar yang disebabkan jumlah produksi sampah yang cukup tinggi. Menurut data dari BPS, Indonesia dapat menghasilkan sampah sebanyak 3.2 juta yang merupakan sampah berbentuk plastik yang ada dilaut pada tahun 2018. Untuk menyelesaikan masalah lingkungan pengolahan limbah plastik dapat dilakukan menggunakan proses pirolisis, pirolisis adalah dekomposisi material mentah melalui proses pemanasan, dari proses tersebut menghasilkan sebuah uap panas yang kemudian mengalami pendinginan sehingga menghasilkan zat cair yang disebut minyak. Pengolahan limbah plastik menjadi BBM memiliki prinsip kerja dengan mengatur suhu pada proses pembakaran menggunakan kontrol PID yang diterapkan pada motor servo agar dapat mengatur lebar kecilnya valve kompor agar suhu pada proses sesuai dengan *setpoint* 220 °C, 250 °C, dan 280 °C. Metode ZN 1 dengan nilai $K_p=7.28$, $K_i=0.029$, dan $K_d=451.36$, sehingga didapatkan hasil pengujian suhu optimal pada suhu 280 °C dengan performansi $T_d= 7.41$ menit, $T_s= 23.53$ menit, $T_r =19.9$ menit, $MO= 0.9\%$, Ess atas= 0.9% dan Ess bawah= -1.8% dengan pengujian tanpa plastik sedangkan dengan plastik $T_d= 7.8$ menit, $T_s= 27.4$ menit, $T_r= 18.6$ menit, $MO= 1.4\%$, Ess atas= 1.07% dan Ess bawah= -2.7% dan menghasilkan minyak sebanyak 50ml.

Kata kunci : Pirolisis, Kontrol PID, Suhu, Limbah Plastik

I. PENDAHULUAN

Sampah adalah masalah terbesar yang disebabkan jumlah produksi sampah yang cukup tinggi, Indonesia dapat menghasilkan sampah sebanyak 3.2 juta yang merupakan sampah berbentuk plastik yang berada di laut . Untuk menyelesaikan masalah lingkungan dari sampah plastik dapat dilakukan menggunakan satu metode pengolahan yang dapat mereduksi jumlah limbah plastik yaitu dengan proses pirolisis. Pirolisis merupakan salah satu pengolahan sampah yang dapat mengurangi berat dan volume serta dapat menghasilkan produk yang lain. Dari hasil studi yang pernah dilakukan pada penelitian Ahmad Tawfiequrrahman, dkk yang mengelolah limbah plastik menjadi BBM menggunakan metode pirolisis, dari hasil pirolisis adalah suatu proses pemanasan yang menyebabkan molekul plastik yang panjang terurai menjadi molekul yang lebih pendek. Molekul-Molekul yang telah

terurai membentuk sebuah gas yang kemudian jika didinginkan menjadi sebuah minyak .

Penerapan metode PID yang digunakan untuk mengontrol suhu telah banyak dilakukan pada bidang industri seperti pada tangki air demineralisasi yang digunakan sebagai pendingin pada proses kerja kompresor kotak pengepakan sehingga dapat mengurangi kenaikan suhu , dan ada juga seperti pada tungku pembakaran yang mengontrol suhu proses sehingga dapat menghasilkan suhu yang efisien dari pada pengontrol suhu secara konvensional . Berhubungan dengan banyak tungku bakar berbahan gas yang bekerja secara konvensional maka pada penelitian ini, PID digunakan untuk mengontrol suhu pada proses pirolisis. Kontrol PID diterapkan pada motor servo agar dapat mengatur *valve* kompor sehingga suhu pada proses pirolisis dapat sesuai dengan suhu *setpoint* dan dapat mengurangi nilai error yang dihasilkan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Plastik

Plastik merupakan salah satu jenis limbah yang *non-biodegradable*, plastik memiliki banyak kelebihan dibandingkan bahan lainnya. Secara umum plastik memiliki desitas yang rendah, dan memiliki sifat isolasi terhadap listrik, ketahanan suhu terbatas, serta memiliki bahan kimia bervariasi. Dan juga plastik juga memiliki karakteristik ringan dan biaya pembuatan murah, sehingga plastik sering digunakan untuk pembuatan berbagai peralatan.

Limbah plastik memiliki dua jenis sifat yaitu thermoplastik dan *thermosetting*. Thermoplastik adalah bahan plastik yang jika dipanaskan sampai suhu tertentu maka plastik tersebut menjadi cair dan dapat dibentuk kembali menjadi bentuk yang diinginkan. Sedangkan *thermosetting* adalah plastik yang berbentuk padat dan tidak dapat dicairkan kembali. Dari sifat – sifat tersebut plastik dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu:

Tabel 1 Jenis-Jenis Plastik

Kode	Jenis Plastik	Penggunaan
1	PET (<i>Polyethylene Terephthalate</i>)	Botol kemasan air mineral
2	HDPE (<i>High Density Polyethylene</i>)	Botol obat, Botol susu cair
3	PVC (<i>Polyvinyl Chloride</i>)	Pipa selang air
4	LDPE (<i>Low Density Polyethylene</i>)	Tutup Plastik
5	PP (<i>Polypropylene</i>)	Cup plastik margarine
6	PS (<i>Polystyrene</i>)	Kotak CD, Sendok
7	ABS (<i>Akrilonitril Butadiena Stiren</i>)	Helm, Bodi kendaraan
8	PLA (<i>Poylatic Acid</i>)	Filamen 3D printer

2.2 Poses Pirolisis

Pirolisis didefinisikan sebagai perlakuan thermal (pembakaran) dari biomassa, dengan tidak adanya oksigen yang dapat menghasilkan padatan (arang), cairan (tar dan larutan organik) dan produk gas. Selama proses pirolisis, rantai panjang senyawa karbon, hidrogen, dan oksigen dalam biomassa secara termal terurai menjadi molekul yang lebih kecil, melepaskan fase uap dan residu *solidbio-charphase*.

Proses pirolisis dibagi menjadi 3 yaitu :

- Fase pengeringan

Fase pengeringan adalah fase ini sangatlah penting untuk bahan-bahan yang akan dilakukan proses pirolisis masih dalam kondisi basah atau dimasukan steam (uap air panas) kedalam reaktor. Fase pengeringan terjadi pada suhu 200 °C disertai produksi uap air.
- Fase pirolisis

Fase pirolisis ini terdapat sebuah proses pembakaran, suatu reaksi kimia antara bahan bakar dan pengoksidasi (udara atau oksigen) yang menghasilkan panas dan cahaya. Pada proses pembakaran makromolekul pada bahan yang dilakukan pirolisis akan pecah menjadi gas, komponen organik cair maupun padat. Fase ini terjadi pada suhu 200 °C - 500 °C
- Fase evolusi gas

Fase evolusi gas adalah fase produk hasil pirolisis yang diturunkan lebih lanjut menjadi karbon padat dan produk cair yang dapat menghasilkan gas yang stabil.

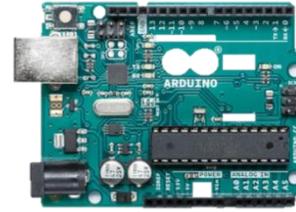
2.3 Sensor Suhu (Thermocouple Tipe K)

Thermocouple adalah sensor suhu yang terdiri dari 2 material yang berbeda dan disambung pada kedua ujungnya. Kedua ujung yang tersambung disebut *junction*, terdapat T dari kedua ujung-ujung dari kedua material tersebut diukur menggunakan voltmeter, maka mendeteksi adanya beda potensial. Secara teori dua bahan konduktif tak sejenis dapat digunakan untuk membentuk suatu *thermocouple*. [9]

Sensor *Thermocouple* tipe K, dapat mengukur temperature dalam jangkauan suhu antara -200°C sampai 1250°C dengan batas kesalahan pengukuran kurang dari 1°C. *Thermocouple* tipe K terdiri dari nikel dan kromium pada sisi positif (*thermocouple grade*) sedangkan pada sisi negatif (*extension grade*) terdiri dari nikel dan aluminium.

2.4 Arduino UNO

Arduino Uno adalah sebuah mikrokontroler yang berbentuk *board* yang memiliki *chip* IC mikrokontroler berjenis ATmega328. Arduino UNO memuat segala hal yang dibutuhkan untuk mendukung sebuah mikrokontroler dengan memiliki 14 pin digital yang terdiri dari 6 pin yang dapat digunakan sebagai output PWM, 6 pin analog, dan memiliki *clock speed* sebesar 16 MHz, sebuah koneksi USB, sebuah konektor sumber tenaga, sebuah *header ICSP*, dan sebuah tombol reset.[10]



Gambar 1. Arduino UNO [10]

2.5 Motor Servo

Motor servo adalah motor yang berkerja dengan sistem *closed feedback* untuk memberikan informasi posisi motor pada rangkaian kontrol yang ada di dalam motor servo. Motor ini terdiri dari serangkaian *gear*, potensiometer dan rangkaian kontrol. Potensiometer pada servo berfungsi untuk menentukan batas sudut dari putaran servo. Motor servo mampu bekerja dua arah (CW dan CCW) dimana arah dan sudut pergerakan rotornya dapat dikendalikan hanya dengan memberikan pengaturan *duty cycle* sinyal PWM (frekuensi 50Hz) pada bagian pin kontrol.



Gambar 2. Motor Servo

2.6 Metode Tuning Ziegler-Nichols I

Metode *Tuning* Ziegler Nichols 1 atau sering disebut metode kurva reaksi yaitu respon plant dari metode ini dapat diperoleh secara eksperimental dengan masukan berupa *unit-step*, sehingga menghasilkan kurva S seperti pada Gambar 3 dan didapatkan dua karakteristik konstanta yaitu waktu tunda (L) dan waktu konstanta (T). Waktu tunda dan waktu konstanta ditentukan dengan menggambar sebuah garis tangen pada titik pembelokan dari kurva S, dan menentukan perpotongan antara garis tangen dengan sumbu waktu (t) dan sumbu $c(t) = K$. Dari L dan T pada kurva S, Ziegler-Nichols menyarankan untuk mencari nilai K_p , K_i , dan K_d berdasarkan formula pada Tabel 2.



Gambar 3. Kurva Respon Berbentuk S

Tabel 2 Aturan Ziegler-Nichols I

Tipe Kontrol	KP	KI	KD
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \times \frac{T}{L}$	$\frac{0.3}{L}$	0
PID	$1.2 \times \frac{T}{L}$	$2 \times L$	$0.5 \times L$

III. METODE PENELITIAN

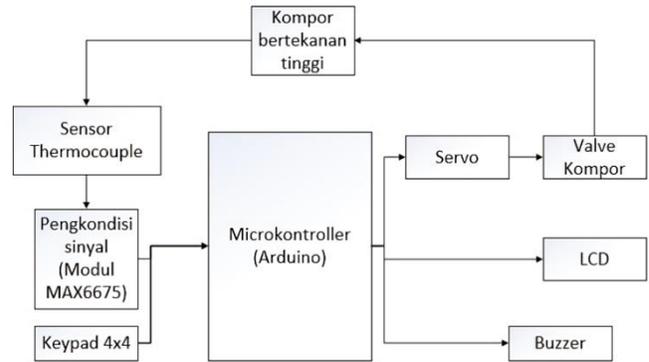
3.1. Spesifikasi Alat:

1. Dimensi Mekanik Keseluruhan
 - Panjang : 113 cm
 - Lebar : 35 cm
 - Tinggi : 140.5 cm
2. Dimensi Tabung Pembakaran
 - Diameter : 30 cm
 - Tinggi : 35 cm
3. Dimensi Tabung Pendingin
 - Diameter : 40 cm
 - Tinggi : 65 cm
4. Dimensi Pipa Penghubung
 - Diameter : 3 cm
 - Panjang : 45 cm
5. Bahan casing
 - Kerangka : Besi
 - Tungku pembakaran : Besi
 - Tungku pendingin : Besi

3.2. Prinsip Kerja Alat

Prinsip kerja pada alat ini dengan memasukan limbah plastik berjenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) atau sejenis kantong kresek pada tabung pembakaran, yang kemudian ditutup rapat agar uap tidak keluar dari tempat masuknya bahan limbah plastik. Setelah itu atur nilai setpoint suhu, waktu proses pembakaran dan nilai PID kemudian tekan tombol start pada *panelbox* sehingga kompor mengeluarkan

gas dan disulut dengan api agar kompor dapat mengeluarkan api. Sensor yang diletakan pada tabung pembakaran akan membaca perubahan suhu pada tabung pembakaran, kemudian output sensor diolah mikrokontroller (Arduino UNO) dengan nilai PID untuk menggerakkan arah putar servo sehingga lebar kecil *valve* kompor dapat berubah sesuai dengan *setpoint* yang ditentukan. Sehingga LCD pada *panelbox* akan menampilkan suhu pembacaan sensor dan sudut putar servo.



Gambar 4. Diagram Blok Sistem

3.3 Perancangan dan Pembuatan Mekanik



Gambar 5 Mekanik Sistem Pirolisis

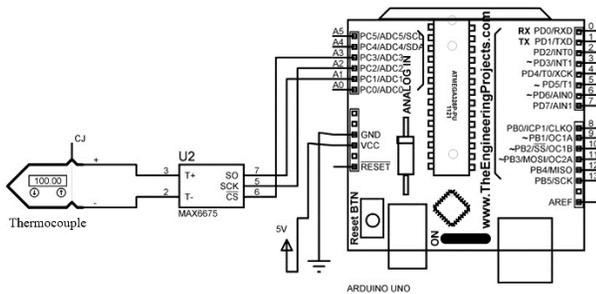
Pada gambar 5 mesin pirolisis terdiri dari *Incinerator* sebagai tempat pembakaran limbah plastik, dan kondesor sebagai pendingin uap hasil proses pembakaran limbah plastik

3.4 Perancangan dan Rangkaian Elektronik

3.4.1 Rangkaian Sensor Suhu dan Pengkondisi Sinyal

Pada sistem pirolisis limbah plastik dengan suhu pembakaran yang cukup tinggi (ekstrim), maka dibutuhkan sensor suhu yang mampu menahan suhu proses pirolisis yaitu pada range suhu *range* 220 – 280 °C. Sensor suhu yang sesuai untuk digunakan pada perancangan ini adalah sensor suhu *thermocouple* tipe K. Sensor *thermocouple* tipe K adalah sensor analog sehingga pembacaan suhu pada sensor *thermocouple* menghasilkan sebuah tegangan yang kemudian tegangan tersebut dapat dikonversi menjadi suhu. Seperti pada gambar 6, perancangan sensor suhu ini tidak lepas dari pengkondisi sinyal sebagai pengelolah output yang dihasilkan

sensor menjadi output yang sesuai dengan kontroller, yang dimana output yang dihasilkan oleh sensor *thermocouple* sangatlah lemah atau belum sesuai dengan spesifikasi *range* tegangan Arduino UNO.



Gambar 6. Rangkaian Suhu dan Pengkondisi Sinyal

Pada *datasheet* MAX6675 pembacaan suhu pada *thermocouple* belum dikatakan aktual karena pembacaan sensor *thermocouple* hanya menghasilkan tegangan output yang berasal dari bagian *hot junction* sehingga output yang dihasilkan berbeda dari *datasheet thermocouple*. Agar pembacaan sensor menjadi aktual maka output tegangan dari *thermocouple* ditambahkan dengan tegangan dari bagian *cold junction (temperature ambient)* [14]. Dengan mengacu pada rumus pada *datasheet* MAX6675, apabila pada *datasheet thermocouple* dengan nilai suhu 60°C memiliki tegangan output sebesar 2.436 mV dan tegangan *temperature ambient* (25°C) dengan nilai output sebesar 1mV maka dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut:

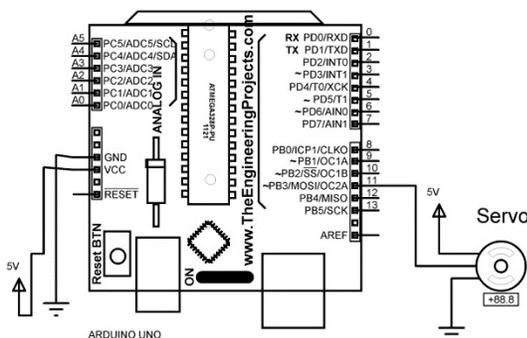
$$V_{out} = V_{thermo} - V_{ambient} \quad (1)$$

$$V_{out} = 2.436 \text{ mV} - 1 \text{ mV}$$

$$V_{out} = 1.436 \text{ mV}$$

Dari hasil perhitungan sensor *thermocouple* pada suhu 60 °C pada bagian *hot junction* memiliki tegangan sebesar 1.436mV.

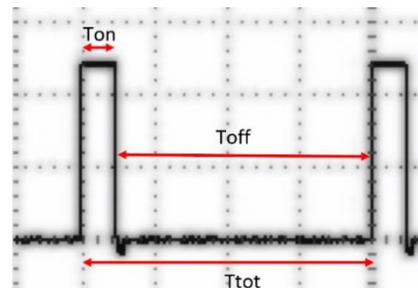
3.4.2 Rangkaian Motor Servo



Gambar 7. Rangkaian Motor Servo

Pada alat pirolisis limbah plastik ini digunakan motor servo sebagai akuator untuk menggerakkan atau mengatur lebar kecilnya *valve* kompor gas sehingga pada saat proses pembakaran suhu dapat dikontrol. Prinsip kerja motor servo pada sistem pirolisis limbah plastik ini digunakan sebagai pengatur buka tutup *valve* kompor, sehingga suhu pembakaran dapat sesuai dengan *setpoint*, jika suhu dibawah *setpoint* maka motor servo akan memutar *valve* kompor agar suhu naik dan jika telah mencapai *setpoint* maka servo akan memutar *valve* kompor agar suhu turun.

Pada perancangan servo untuk mengatur lebar kecilnya *valve* kompor agar api pada pirolisis dapat terkontrol, maka dapat dilakukan perhitungan dengan melihat bentuk PWM (*Pulse Width Modulation*) pada saat motor servo berputar 180 derajat yang didapat dari PIN 11 Arduino UNO seperti pada gambar 7.



Gambar 8 Bentuk PWM pada Sudut 180

Pada sudut 180 derajat (gambar 8)

$$\begin{aligned} \text{Nilai } T_{total} &: \\ T_{total} &= T_{on} + T_{off} \\ T_{total} &= 0.6 + 3.4 \\ T_{total} &= 4 \end{aligned} \quad (2)$$

Nilai Duty Cycle :

$$\begin{aligned} D &= \frac{T_{on}}{T_{total}} \\ D &= \frac{0.6}{4} \\ D &= 0.15 \end{aligned} \quad (3)$$

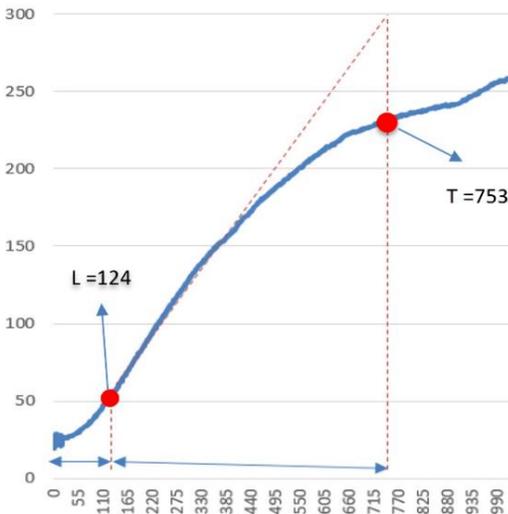
Nilai V_{out} :

$$\begin{aligned} V_{out} &= \frac{T_{on}}{T_{total}} \times V_{in} \\ V_{out} &= \frac{0.6}{4} \times 5 \\ V_{out} &= 0.75 \text{ V} \end{aligned} \quad (4)$$

Pada hasil perhitungan dapat diketahui bahwa semakin tinggi sudut yang dihasilkan oleh motor servo maka tegangan yang dihasilkan meningkat. Pada sudut maksimum yaitu 180 derajat servo menghasilkan tegangan sebesar 0.75 V

3.5 Perancangan Kontrol PID

Dalam menentukan nilai Kp, Ki, dan Kd terdapat berbagai macam metode, tetapi pada perancangan ini metode yang digunakan metode Ziegler-Nichols 1 atau disebut sebagai metode kurva respon. Metode Ziegler Nichols dipilih karena metode ini sesuai untuk sistem yang digunakan untuk mengontrol suhu. Hasil dari pembacaan sensor suhu memiliki respon yang akan membentuk kurva S. Pertama untuk merancang kontrol PID ini dengan mengatur sistem tanpa kontrol disaat kondisi tanpa beban (tanpa plastik) sehingga akan menghasilkan grafik seperti pada gambar 9, dari gambar tersebut maka kita dapat mencari dua konstanta yaitu waktu tunda (L) dan waktu konstanta (T). Waktu tunda adalah waktu dari suhu awal proses hingga mencapai titik awal linier dan waktu konstanta adalah awal waktu linier hingga sampai titik pembelokan atau suhu *setpoint*. Pada kurva S, Ziegler-Nichols menyarankan untuk mencari nilai Kp, Ki, dan Kd berdasarkan formula pada Tabel 2



Gambar 9. Grafik Hasil Pengujian tanpa Kontrol

$$Kp = 1.2 \times \frac{T}{L} \tag{5}$$

$$Kp = 1.2 \times \frac{753}{124}$$

$$Kp = 7.28$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} \tag{6}$$

$$Ki = \frac{7.28}{2 \times L}$$

$$Ki = 0.029$$

$$Kd = Kp \times (0.5 \times L) \tag{7}$$

$$Kd = 7.28 \times (0.5 \times L)$$

$$Kd = 451.36$$

Dari hasil perhitungan dengan metode ZN maka ditemukan nilai Kp sebesar 7.28, nilai Ki sebesar 0.029 dan nilai Kd sebesar 451.36

IV. HASIL DAN ANALISA

4.1 Pengujian Sensor Suhu

Pengujian sensor suhu bertujuan untuk mengetahui apakah sensor suhu *thermocouple* mampu membaca perubahan suhu. Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan pembacaan suhu menggunakan *thermometer* dan hasil pengukuran dari sensor *thermocouple*.

$$error = (P2 - P1) \tag{8}$$

$$error\% = \left(\frac{P2 - P1}{P2} \right) \times 100\% \tag{9}$$

Keterangan :

P₁ = Pembacaan pada Termometer (°C)

P₂ = Pembacaan pada sensor (°C)

Tabel 3. Tabel Hasil Pengujian Sensor Suhu

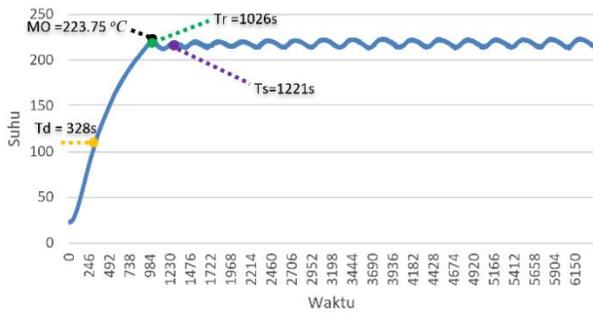
No	Suhu Thermometer	Suhu Sensor Dengan MAX6675	Tegangan Thermocouple	Error	Error (%)
1	0	0	-1.0 mV	0	0
2	5.0	5.25	-0.9 mV	0.25	5
3	9.9	10.25	-0.7 mV	0.35	3.5
4	20.1	20.25	-0.2 mV	0.15	0.7
5	25.5	25.25	-0.1 mV	0.25	0.9
6	30.6	30.00	0.1 mV	0.6	1.9
7	40.7	39.25	0.5 mV	1.45	3.5
8	50.6	50.00	1.0 mV	0.6	1.1
9	60.2	60.50	1.4 mV	0.3	0.4
10	70.5	70.25	1.7 mV	0.25	0.3
11	80.6	80.75	2.2 mV	0.15	0.1
12	90.3	90.75	2.6 mV	0.45	0.4
RATA - RATA				0.42	1.4%

Hasil pengujian dari tabel 3 menunjukkan bahwa perbandingan antara sensor suhu (*thermocouple*) dengan pembacaan *thermometer* didapatkan hasil *error* 1.4%

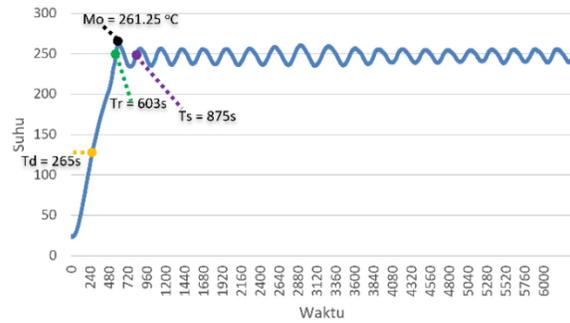
4.3 Pengujian PID Ziegler-Nichols 1

Pengujian PID pada sistem kontrol suhu dan laju pemanasan pada proses pirolisis limbah plastik menjadi BBM ini terbagi menjadi dua yaitu tanpa beban (tanpa limbah plastik) dan dengan beban (dengan limbah plastik). Dan pada pengujian ini dilakukan dengan sistem kontrol PID yang telah ditentukan dengan nilai Kp = 7.28; Ki = 0.029; Kd = 451.36. Pengujian ini telah dilakukan secara berulang dan diambil data yang terbaik seperti gambar dibawah ini:

- Pengujian Suhu 220°C



Gambar 10. Grafik Pengujian Kontrol PID pada Suhu 220°C tanpa Plastik

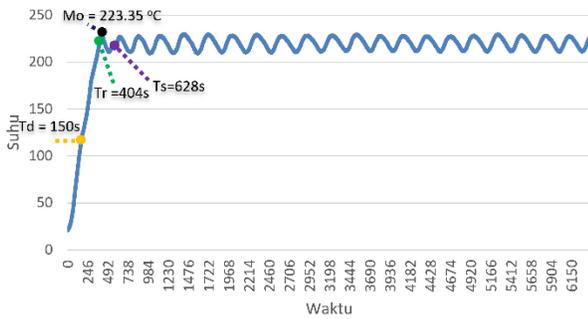


Gambar 13. Grafik Pengujian Kontrol PID pada Suhu 250°C dengan Plastik

Dari grafik respon sistem pada gambar 12 dan 13, diperoleh karakteristik respon sistem seperti yang ditunjukkan pada tabel 5 berikut:

Tabel 5. Respon Sistem pada Suhu 250°C

Performa Respon	Tanpa Plastik	Dengan Plastik
Delay time (<i>Td</i>)	6.2 menit	4.4 menit
Settling time (<i>Ts</i>)	23.2 menit	14.4 menit
Rise Time (<i>Tr</i>)	18.45 menit	10 menit
Maksimum <i>Overshoot</i> (<i>MO</i>)	0.5 %	4.5 %
<i>Error Steady State</i> (atas)	1.1%	4.6%
<i>Error Steady State</i> (bawah)	-3.1%	-4.1%



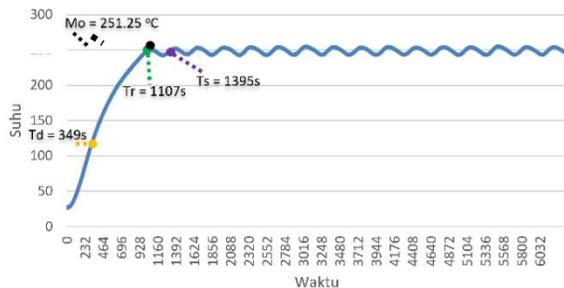
Gambar 11. Grafik Pengujian Kontrol PID pada Suhu 220°C dengan Plastik

Dari grafik respon sistem pada gambar 10 dan 11, diperoleh karakteristik respon sistem seperti yang ditunjukkan pada tabel 4 berikut:

Tabel 4. Respon Sistem pada Suhu 220°C

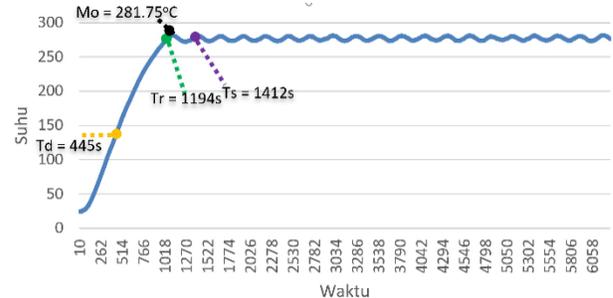
Performa Respon	Tanpa Plastik	Dengan Plastik
Delay time (<i>Td</i>)	5.4 menit	2.5 menit
Settling time (<i>Ts</i>)	20.3 menit	10.4 menit
Rise Time (<i>Tr</i>)	17.1 Menit	6.7 Menit
Maksimum <i>Overshoot</i> (<i>MO</i>)	1.7%	3.06%
<i>Error Steady State</i> (atas)	1.7%	4.5%
<i>Error Steady State</i> (bawah)	-3.06%	-4.9%

• Pengujian Suhu 250°C tanpa limbah plastik

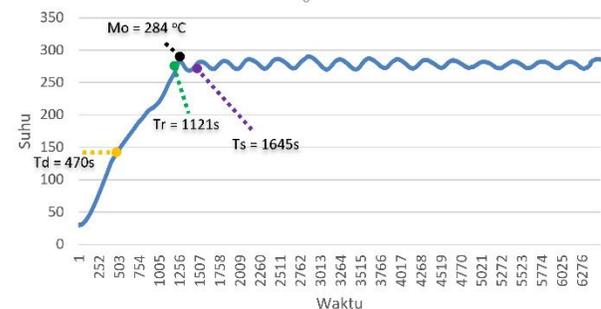


Gambar 12. Grafik Pengujian Kontrol PID pada Suhu 250°C tanpa Plastik

• Pengujian Suhu 280°C



Gambar 14. Grafik Pengujian Kontrol PID pada Suhu 280°C tanpa Plastik



Gambar 15. Grafik Pengujian Kontrol PID pada Suhu 280°C dengan Plastik

Dari grafik respon sistem pada gambar 14 dan 15, diperoleh karakteristik respon sistem seperti yang ditunjukkan pada tabel 6 berikut:

Tabel 6. Respon Sistem pada Suhu 280°C

Performa Respon	Tanpa Plastik	Dengan Plastik
<i>Delay time (Td)</i>	7.41 menit	7.8 menit
<i>Settling time (Ts)</i>	23.53 menit	27.4 menit
<i>Rise Time (Tr)</i>	19.9 menit	18.6 menit
Maksimum <i>Overshoot (MO)</i>	0.9 %	1.4 %
<i>Error Steady State (atas)</i>	0.9%	1.07 %
<i>Error Steady State (bawah)</i>	-1.8%	-2.7%

Berdasarkan hasil pengujian PID pada proses pirolisis tanpa plastik yang ditunjukkan pada gambar 10, 12, dan 14 menghasilkan grafik yang stabil, sedangkan pengujian PID pada proses pirolisis dengan plastik yang ditunjukkan pada gambar 11, 13, dan 15 menghasilkan grafik yang stabil akan tetapi memiliki perbedaan pada respon sistem. Seperti pada tabel 4, 5, dan 6 pengujian dengan plastik respon sistem pada *delay time*, dan *rise time* yang yang dihasilkan lebih cepat, kemudian untuk nilai maksimum *overshoot*, dan *error steady state* yang dihasilkan akan lebih tinggi dari pengujian tanpa plastik. Dari pengujian PID yang telah dilakukan, suhu yang optimal pada penelitian proses pirolisis ini adalah pada pengujian dengan suhu 280°C yang memiliki respon sistem seperti pada tabel 6 dengan nilai maksimum *overshoot* dan *error steady state* yang lebih kecil dibandingkan pengujian dengan suhu 220 °C, dan 250 °C (tabel 4, dan 5).

Sedangkan untuk hasil pengamatan laju pemanasan dapat dilakukan perhitungan dengan rumus sebagai berikut:

$$LP = \frac{SM - SA}{WP} \tag{10}$$

Keterangan:

- LP : Laju Pemanasan (°C/menit)
- SM : Suhu Maksimum atau suhu akhir (°C)
- SA : Suhu Awal (°C)
- WP : Waktu Pemanasan (menit)

Berdasarkan rumus persamaan 10, laju pemanasan pada proses pirolisis limbah plastik dengan waktu pemanasan 120 menit menghasilkan laju pemanasan seperti pada pada tabel 7

Tabel 7. Laju Pemanasan

<i>Setpoint</i>		Suhu Awal	Suhu Akhir	Laju Pemanasan
220	Tanpa Plastik	23	223.75	1.6 °C/menit
	Dengan Plastik	21.50	230	1.7 °C/menit
250	Tanpa Plastik	26.25	252.75	1.8 °C/menit
	Dengan Plastik	23	261.50	1.9 °C/menit
280	Tanpa Plastik	27.50	282.75	2.1 °C/menit
	Dengan Plastik	30.75	282	2.0 °C/menit

Dari Tabel 7 diperoleh bahwa semakin tinggi suhu *setpoint* maka laju pemanasan akan mengalami kenaikan. Dari hasil pengujian yang dilakukan, dengan suhu 280 °C minyak yang dihasilkan lebih banyak dari pada dengan suhu 220 °C dan 250 °C seperti pada Tabel 8.

Tabel 8 Hasil Pirolisis

No	Suhu	Hasil
1	220°C	10ml
2	250 °C	30ml
3	280 °C	50ml



Gambar 16. Hasil Pirolisis

V. PENUTUP

Dari hasil perancangan dengan pengujian yang dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan yang berdasarkan pengolahan data dan analisis yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Implementasi menggunakan metode PID pada alat pirolisis limbah plastik telah tercapai hasil maksimal pada nilai konstanta K_p , K_i , dan K_d yang tepat dengan nilai sebesar $K_p = 7.28$; $K_i = 0.029$; $K_d = 451.36$.
2. Pengujian PID pada proses pirolisis tanpa limbah plastik dan dengan limbah plastik memiliki nilai error (*overshoot*, dan *steady state*) yang lebih besar saat dilakukan proses pirolisis dengan limbah plastik karena adanya bahan yang dibakar sehingga terjadi peningkatan nilai suhu yang dihasilkan.
3. Pada pengujian PID pada suhu yang optimal pada pirolisis limbah plastik adalah pada *setpoint* 280 °C dengan lama pembakaran 120 menit dengan pengujian tanpa plastik memiliki performansi $T_d = 7.41$ menit, $T_s = 23.53$ menit, $T_r = 19.9$ menit, $MO = 0.9\%$, Ess atas = 0.9% , dan Ess bawah -1.8% sedangkan dengan plastik menghasilkan performansi $T_d = 7.8$ menit, $T_s = 27.4$ menit, $T_r = 18.6$ menit, $MO = 1.4\%$, Ess atas = 1.07% , dan Ess bawah -2.7% dan menghasil minyak terbanyak sebesar 50 ml dengan laju pemanasan sebesar 2.0 °C/menit

Pada *mini plant* pirolisis limbah plastik menjadi BBM ini masih banyak kekurangan dan perlu dilakukan perbaikan dan penyempurnaan agar alat ini dapat bekerja secara optimal, sebagai berikut:

1. Perlu adanya pengontrolan suhu pada kondensor agar air pada kondensor tetap dingin dikarenakan uap hasil pembakaran dengan *setpoint* suhu yang cukup tinggi
2. Hasil pirolisis limbah plastik yang telah dilakukan untuk agar dapat dikatakan setara dengan BBM yang ada

dimasyarakat maka dibutuhkan penambahan bahan kimia maupun penelitian lebih lanjut agar hasil dapat mendekati BBM yang ada dimasyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik (BPS). “Statik Lingkungan Hidup Indonesia 2018”.
- [2] Yuliansyah, Ahmad Tawfieurahman; dkk. (2015). *Pyrolysis Of Plastic Waste To Produce Pyrolytic Oil As An Alternative Fuel*. Yogyakarta.Universitas Gadjah Mada (UGM). International Journal of Technology (2015) 7: 1076-1083.
- [3] Mahmood, Qahtan A; dkk. (2018). *PID Temperature Control of Demineralized Water Tank*. International Conference on Materials Engineering and Science. IOP Publishing
- [4] D.Anggoro dkk. (2019). *Optimization of high temperature furnace system as one of the spray pyrolysis subsystems based on R type thermocouples and PID control*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). 9th International Conference on Physics and Its Applications (ICOPIA). IOP Publishing
- [5] Kencana, Gilang Heru. (2018). *Prototipe Pengolah Sampah Plastik Menjadi Filament 3D Printer*. Karya Tulis Ilmiah. Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.
- [6] G. Maschio, C. Koufopanos, and A. Lucchesi. *Pyrolysis, a promising route for biomass utilization*. *Bioresour. Technol.*, vol. 42, no. 3, pp. 219–231, 1992.
- [7] Aladin A; dkk. 2018, *Pyrolysis of Corncob Waste to Produce Liquid Smoke*. ICon-ITSD. IOP Publishing
- [8] Ridhuan, Kemas; Irwan, Dwi; Inthifawzi, Rizki. (2019). *Proses Pembakaran Pirolisis dengan Jenis Biomassa dan Karakteristik Asap Cair yang Dihasilkan*. Lampung. Universitas Muhammadiyah Metro. Turbo Vol 8. No1. 2019
- [9] Kristanto, Philip. (2018). *Alat Ukur dan Teknik Pengukuran*. Yogyakarta: Andi.
- [10] Farnell, Datasheet Arduino Uno
- [11] Sudarmanto, Cahyani Alviana (2007). *Perancangan Sistem Pengendali Motor Servo Pada Robot Berkaki Menggunakan Mikrokontroler PIC 16F84*. Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi 2007 (SNATI 2007).
- [12] Tower Pro, Datasheet Motor Servo MG996R
- [13] Suryatini, Fitria; Firasanti, Annisa. (2018). *Kendali P, PI, dan PID Analog Pada Pengaturan Kecepatan Motor DC Dengan Penalaan Ziegler – Nichols*. JERC (Journal of Electrical and Electronics Vol 6 No 1).
- [14] MAXIM, Datasheet MAX6675. 2014