

LAPORAN PENELITIAN



RANCANG BANGUN ALAT PENGOLAH SAMPAH UNTUK PEMANFAATAN DAN PENINGKATAN NILAI SAMPAH PLASTIK RESIDU SEBAGAI MATERIAL PENGIKAT BAHAN BANGUNAN

TIM PENELITIAN

Ketua : Yani Prabowo (030560)

Anggota : Sujono (980002)

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BUDI LUHUR
Juni 2026**

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN PENELITIAN

Judul Penelitian : Rancang Bangun Alat Pengolah Sampah Untuk Pemanfaatan dan Peningkatan Nilai Sampah Plastik Residu Sebagai Material Pengikat Bahan Bangunan

Bidang Penelitian : Teknik

Ketua Peneliti

a. Nama lengkap : Yani Prabowo
b. NIP/NIDN/IS SINTA : 030560/0331057703/5988936
c. Jabatan Fungsional : Lektor
d. Program Studi : Sistem Komputer
e. No. HP : 0815 7417 2025
f. Alamat e-mail : yani.prabowo@budiluhur.ac.id

Anggota Peneliti

a. Nama lengkap : Sujono
b. NIP/NIDN/ID SINTA : 990002/0331087201/ 5984639

Mahasiswa (1)

a. Nama lengkap : Hafizh Rivaldho
b. NIM : 2352500181

Mahasiswa (2)

a. Nama lengkap : Hendi Surya Maulana
b. NIM : 2352500124

Lama Penelitian : 10 bulan

Biaya Penelitian

a. Sumber Universitas Budi Luhur : Rp. 14.740.000,00
b. Sumber lain (sebutkan jika ada) : -

Jakarta, 29 Juni 2026

Mengetahui,
Kepala Pusat Studi Kendaraan Listrik

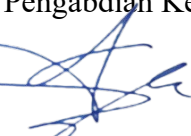

(DR. Sujono, ST.MT.)
NIP. 990002

Ketua Pengusul


(Yani Prabowo)
NIP. 030560

Menyetujui
Direktorat Riset dan Pengabdian Kepada Masyarakat




(Prof. Dr. Ir. Prudensius Maring, M.A.)
NIP. 190043

RINGKASAN

Plastik residu adalah bagian dari sampah plastik yang sudah tidak memiliki nilai ekonomi. Penanganan plastik residu seringkali terlepas dari perhatian kita. Dengan sifatnya yang sangat sulit untuk terurai, plastik residu yang tertimbun dalam tanah sangat berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan. Untuk itu diperlukan penanganan yang tepat dan membuka peluang untuk pemanfaatan plastik residu. Pada penelitian ini dilakukan rancang bangun sistem pengolahan plastik residu untuk bahan baku pada proses pembuatan paving blok. Pemanfaatan plastik residu berfungsi menggantikan bahan semen sehingga lebih ekonomis untuk dicampurkan dengan pasir bangunan dan oli bekas.

Tujuan penelitian ini adalah : (1) untuk menciptakan alat bantu dalam pemanfaatan plastik residu yang murah, praktis, mudah dipahami dan dioperasikan oleh masyarakat umum, (2) mengkaji kombinasi dan komposisi bahan yang paling tepat untuk menghasilkan sampel produk yang paling kuat, dan (3) mendapatkan alternatif upaya untuk mereduksi keberadaan plastik residu yang terbuang langsung ke dalam tanah secara bertahap mendorong kesadaran masyarakat untuk memanfaatkan plastik residu.

Metode yang digunakan adalah burning, melting, mixing, dan molding. Burning dilakukan untuk memanaskan bahan oli bekas hingga suhu mencapai 100°C. Melting adalah proses melelehkan plastik residu dalam bahan oli yang telah dipanaskan. Mixing yaitu proses pencampuran bahan pasir bangunan kedalam plastik residu yang telah dilelehkan hingga suhu campuran mencapai 270°C. Molding adalah proses pencetakan hasil proses menjadi sampel produk. Alat yang dibuat diuji dalam proses pembuatan sampel produk bahan paving blok. Variasi dan kombinasi komposisi bahan yang terdiri dari oli bekas, plastik residu, dan pasir bangunan dilakukan untuk mendapatkan variasi sampel yang akan diuji kekuatannya.

Penelitian ini sangat sesuai dengan Rencana Strategis Penelitian Universitas Budi Luhur khususnya di bidang energi dan lingkungan. Tingkat kesiapterapan teknologi (TKT) hasil penelitian berada pada tingkat dua dan tiga yang akan dinyatakan dalam bentuk artikel yang akan dipublikasikan di jurnal nasional terakreditasi Sinta-2 dan HKI.

PRAKATA

Puji dan syukur dipanjatkan kepada Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya kami dapat menyelesaikan Laporan Akhir penelitian ini. Penelitian ini dilakukan dalam rangka memenuhi kewajiban dosen dalam pelaksanaan Tridharma Perguruan Tinggi. Kami menyadari bahwa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak sangat membantu kami untuk menyelesaikan laporan akhir ini. Oleh karena itu, kami mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Dr. Ir. Prudensius Maring, M.A. selaku Direktur Riset dan Pengabdian Pada Masyarakat Universitas Budi Luhur yang telah memberikan kesempatan kepada para dosen tetap untuk melakukan penelitian ini;
- 2) Dekan Fakultas Teknik Universitas Budi Luhur yang senantiasa memberikan kritik dan saran yang berguna demi kelancaran dan peningkatan kualitas penelitian ini;
- 3) Ketua Program Studi Teknik Elektro atas dukungan yang telah diberikan demi kelancaran pelaksanaan penelitian ini;
- 4) Kepala Pusat Studi Kendaraan Listrik yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini melalui penggunaan peralatan dalam perancangan dan pembuatan sistem kontrol yang diperlukan.
- 5) Serta seluruh tim peneliti yang turut berpartisipasi dalam pelaksanaan penelitian dan penyusunan laporan penelitian hingga tuntas.

Akhir kata, kami berharap penelitian ini bisa bermanfaat dalam pengayaan bahan mengajar dan bisa dijadikan referensi bagi pengembangan penelitian lebih lanjut.

Tim Peneliti

Ketua

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	2
RINGKASAN	3
PRAKATA.....	4
DAFTAR ISI.....	5
DAFTAR TABEL.....	7
DAFTAR GAMBAR	8
DAFTAR LAMPIRAN.....	9
BAB 1 PENDAHULUAN	10
1.1. Latar Belakang dan Rumusan Masalah.....	10
1.2. Pendekatan Pemecahan Masalah.....	10
1.3. State of the art dan Kebaruan	11
1.4. Peta Jalan Penelitian.....	12
BAB 2 METODE.....	13
2.1 Alur Penelitian	13
2.2. Pengolahan sampah plastik residu	14
2.3. Komponen sistem kendali otomatis	15
2.3.1. Sensor suhu non kontak MLX-90614 dengan Modul GY-906.....	15
2.3.2. Elemen pemanas 220 V 4000 W spiral.....	16
2.3.3. Dimmer sebagai pengatur pasokan daya listrik	17
2.3.4. Sistem Pengendali PID (Proportional, Integral, Derivative)	17
2.3.5. Pengendali PID Seri.....	18
2.3.6. Pengendali PID Paralel	19
2.3.7. Pengendali PID MIX.....	19
2.4. Desain mekanik sistem pengolah sampah.....	20
2.5. Diagram blok sistem kendali temperatur	21
2.5. Diagram alir perangkat lunak pengendali alat olah sampah	21
BAB 3 HASIL PELAKSANAAN PENELITIAN.....	23
3.1. Pengujian sistem kendali suhu untuk studi kasus-1	23
3.2. Pengujian sistem kendali suhu untuk studi kasus-2	24
3.3. Pengujian sistem kendali suhu untuk studi kasus-3	25
3.4. Pengujian sistem kendali suhu untuk studi kasus-4.....	26
3.5. Analisa hasil simulasi	26

BAB 4 PENUTUP	29
4.1. Kesimpulan	29
4.2. <i>Future Work</i>	29
DAFTAR PUSTAKA	30
LAMPIRAN.....	31
Lampiran 1. Realisasi Penggunaan Anggaran	31
Lampiran 2. Biodata Ketua dan Anggota Tim Peneliti.....	32
Lampiran 3. Surat Perjanjian Kontrak Penelitian	35
Lampiran 4. Catatan Harian.....	37
Lampiran 5. Artikel Ilmiah (draft).....	39
Lampiran 6. HKI.....	42

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Spesifikasi sensor suhu MLX90614 dan GY-906.....	16
Tabel 2. 2. Spesifikasi elemen pemanas.....	17
Tabel 2. 3. Spesifikasi dimmer pengatur pasokan daya bagi elemen pemanas.....	17
Tabel 3. 1. Studi kasus pengujian sistem kendali suhu berdasarkan komposisi bahan pengolahan sampah plastik residu.....	23
Tabel 3. 2. Rangkuman hasil pengujian untuk empat studi kasus yang berbeda.....	27

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Fishbone diagram kegiatan penelitian terhadap publikasi penelitian yang sudah ada	12
Gambar 1. 2. Roadmap Penelitian.....	12
Gambar 2. 1. Alur proses pengolahan sampah plastik residu	13
Gambar 2. 2. Closed Loop Control System pada pengendalian suhu	13
Gambar 2. 3. Tahapan penelitian	14
Gambar 2. 4. Sensor suhu MLX-90614 dengan modul GY-904	15
Gambar 2. 5. Elemen pemanas bertenaga listrik 220 Volt 4000 Watt	16
Gambar 2. 6. Dimmer AC 220 Volt 6000 Watt	17
Gambar 2. 7. Diagram blok sistem kendali umpan balik negatif dengan pengendali PID	18
Gambar 2. 8. Diagram Blok Pengendali PID Seri	18
Gambar 2. 9. Diagram Blok PID Paralel.....	19
Gambar 2. 10. Diagram Blok PID campuran (mixed)	20
Gambar 2. 11. (a) Tungku pemanas, (b) Tabung peleburan	20
Gambar 2. 12. Diagram blok sistem kendali.....	21
Gambar 2. 13. Diagram alir program kendali suhu otomatis dengan PID.....	22
Gambar 3. 1. Respon sistem pengendali suhu pada pengujian kasus-1	23
Gambar 3. 2. Respon sistem pengendali suhu pada pengujian kasus-1	24
Gambar 3. 3. Respon sistem pengendali suhu pada pengujian kasus-3	25
Gambar 3. 4. Respon sistem pengendali suhu pada pengujian kasus-4	26

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Realisasi Penggunaan Anggaran	31
Lampiran 2. Biodata Ketua dan Anggota Tim Peneliti.....	32
Lampiran 3. Surat Perjanjian Kontrak Penelitian	35
Lampiran 4. Catatan Harian.....	37
Lampiran 5. Artikel Ilmiah (draft).....	39
Lampiran 6. HKI.....	42

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang dan Rumusan Masalah

Salah satu temuan terbesar di abad ini adalah plastik. Penggunaan plastik sejak ditemukan hingga saat ini telah membuktikan betapa besar peranan inovasi yang telah menghasilkan plastik. Penggunaan plastik yang sangat populer dikarenakan sifatnya yang ringan, tidak berkarat, murah, dapat digunakan secara berulang. Dibalik popularitas plastik dalam memenuhi sebagian besar kebutuhan manusia, plastik menimbulkan permasalahan yang sangat serius khususnya adalah pencemaran lingkungan dikarenakan sifat sampah plastik yang tidak sangat sulit untuk terurai di dalam tanah [1]. Sebagian dari sampah plastik masih memiliki nilai ekonomi dan dapat digunakan kembali melalui proses dengan teknologi tertentu hingga menghasilkan biji plastik daur ulang [2]. Biji plastik daur ulang tersebut sudah umum digunakan sebagai bahan baku untuk berbagai produk lain berbahan dasar plastik.

Sebagian dari sampah plastik tidak lagi memiliki nilai ekonomis dan bersifat non-recyclable yang lebih dikenal sebagai sampah plastik residu. Jenis sampah plastik yang masuk dalam kategori residu diantaranya adalah bekas kantong plastik, plastik multilayer seperti kemasan sachet berbagai produk deterjen dan shampoo, bahan sedotan, bungkus kemasan mie instan, dan sejenisnya. Ketiadaan nilai ekonomis dan kesadaran yang rendah pada masyarakat untuk melakukan pemilahan sampah telah pada umumnya tidak dimanfaatkan dan dibuang ke lingkungan secara langsung [3]. Kondisi tersebut sangat berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan dikarenakan sifat sampah plastik residu yang sangat sulit untuk terurai. Membutuhkan waktu puluhan hingga ratusan tahun untuk bisa menguraikan sampah plastik residu [4].

Salah satu teknologi pengolahan sampah residu adalah pirolisis dengan metode daur ulang termokimia. Dalam proses pirolisis, senyawa organik (polimer) yang dipanaskan pada suhu tinggi (350oC hingga 900oC) hingga menghasilkan produk gas dan cairan terdiri dari parafin, olefin, naften, dan senyawa aromatik dan limbah padat yang mengandung residu anorganik [5]. Sebagian kecil pelaku industri mengalokasikan dana corporate social responsibility untuk menangani plastik residu. Melalui CSR dilakukan pengolahan plastik residu untuk diproses dengan sistem pirolisis untuk menghasilkan bahan bakar minyak. Kajian pemanfaatan tiga produk plastik daur ulang untuk modifikasi campuran aspal melalui proses pencampuran kering, cacahan dan pelet limbah plastik daur ulang mereduksi sebesar 6% dari volume kebutuhan aspal [6]. Namun demikian secara ekonomis proses tersebut tidak menguntungkan dan secara teknologi juga memerlukan biaya investasi yang besar. Kondisi tersebut menjadi tantangan tersendiri pada program penanganan sampah plastik dikarenakan sangat sulit untuk didaur ulang dan memerlukan teknologi khusus dalam penanganannya.

Berdasarkan studi literatur dan studi lapangan tentang pemanfaatan sampah plastik residu, kami menyusun gagasan untuk membuat prototipe alat peleburan sampah plastik secara sederhana, kompak, praktis, portable, skala kecil, dan mudah dioperasikan. Dengan karakteristik desain tersebut memungkinkan untuk diterapkan secara langsung kepada masyarakat umum. Melalui kegiatan ini kami berharap hasil desain bisa diimplementasikan pada masyarakat dalam rangka menangani sampah plastik residu untuk menambah nilai ekonomis dan mampu mereduksi potensi pencemaran lingkungan sekitar.

1.2.Pendekatan Pemecahan Masalah

Pelaksanaan penelitian dikelompokkan dalam empat tahap sebagai berikut:

Tahap Pertama adalah melakukan kajian terhadap potensi dari sampah plastik residu untuk mendapatkan peluang jenis pemanfaatannya. Penelusuran literatur dilakukan untuk mendapatkan referensi tentang teknologi pemanfaatan sampah plastik residu. Dari tahapan ini dapat diketahui proses pemanfaatan sampah plastik melalui proses peleburan dan pencetakan menjadi bahan paving blok. Kombinasi, komposisi bahan plastik dengan bahan lain, dan variasi jenis plastik residu yang digunakan juga akan sangat mempengaruhi kekuatan dari hasil cetakan bahan paving blok.

Tahap kedua adalah melakukan perancangan prototipe alat pengolah sampah plastik residu yang sederhana, kompak, praktis, portabel, skala kecil, dan mudah dioperasikan. Dengan karakteristik tersebut diharapkan bisa dengan mudah untuk diimplementasikan pada masyarakat umum. Pada tahapan ini dilakukan perhitungan dan estimasi kebutuhan komponen yang terdiri dari tabung penampungan plastik untuk proses peleburan, kapasitas elemen pemanas yang diperlukan, sistem kendali suhu pada proses pemanasan, dan sistem proteksi dan keamanan pada saat pengoperasian alat.

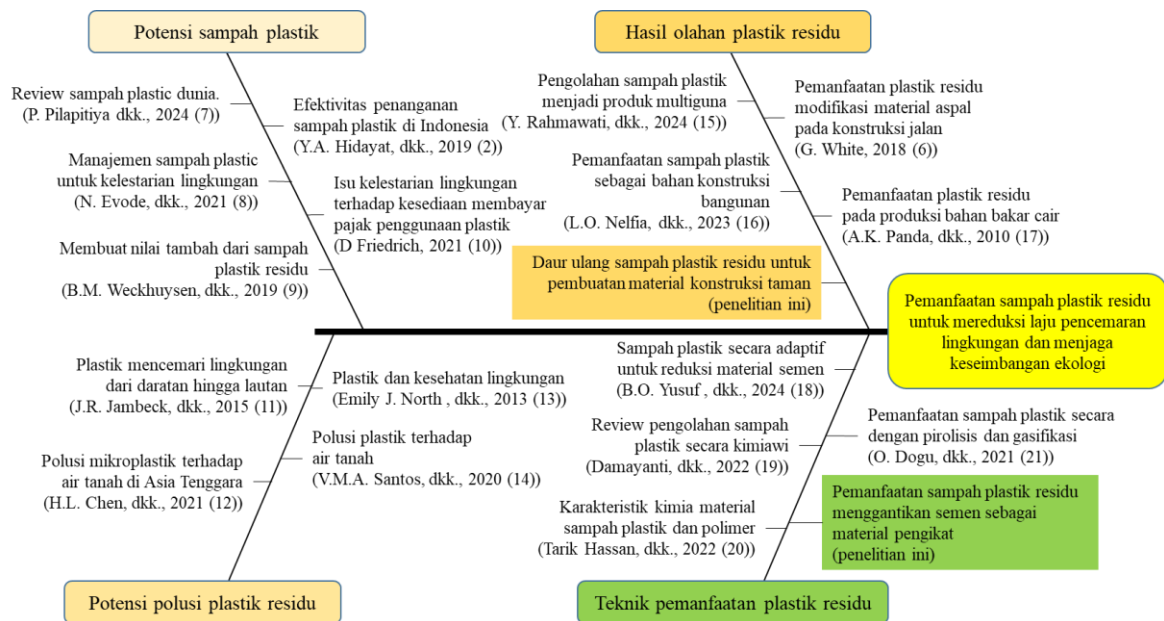
Tahap ketiga adalah melakukan uji coba alat yang dibuat untuk proses pembuatan bahan paving blok yang dicetak dalam bentuk sampel. Pada tahapan ini dilakukan eksperimen dengan melakukan variasi komposisi bahan plastik residu, oli bekas dan pasir bangunan. Bahan semen tidak lagi digunakan karena telah digantikan oleh plastik residu. Variasi jenis sampah plastik residu juga dilakukan untuk mendapatkan data lebih lengkap berkaitan dengan kekuatan hasil cetakan. Selanjutnya uji tekan dilakukan di laboratorium untuk mengetahui kekuatan dan kelayakan dari sampel untuk dimanfaatkan sebagai bahan pembuatan paving blok.

Tahap keempat adalah penyusunan paper publikasi dan pengajuan HKI sebagai luaran penelitian.

1.3.State of the art dan Kebaruan

Kontribusi dari penelitian ini antara lain: (1) menyelidiki kemampuan sampah plastik residu olahan dalam fungsinya sebagai bahan perekat khususnya dalam pembuatan bahan konstruksi berupa paving block, (2) mengkaji peluang sampah plastik residu olahan untuk digunakan sebagai bahan pengganti material semen sehingga lebih ekonomis, (3) menentukan komposisi yang paling tepat dari bahan-bahan yang digunakan dalam proses pembuatan paving block untuk memaksimalkan kekuatannya, (4) mengkaji peluang pemanfaatan sampah plastik residu untuk mereduksi potensi pencemaran lingkungan.

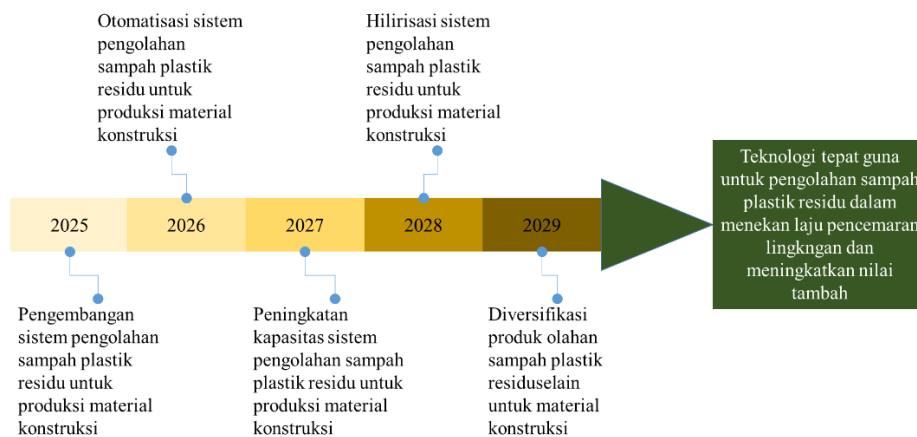
Gambar 1.1 menyajikan posisi penelitian yang akan dilakukan terhadap publikasi yang sudah ada hingga saat sekarang.



Gambar 1. 1. Fishbone diagram kegiatan penelitian terhadap publikasi penelitian yang sudah ada

1.4.Peta Jalan Penelitian

Topik penelitian ini adalah bagian dari roadmap penelitian yang telah disusun dan direncanakan untuk beberapa masa mendatang sebagaimana disajikan dalam Gambar 1.2.



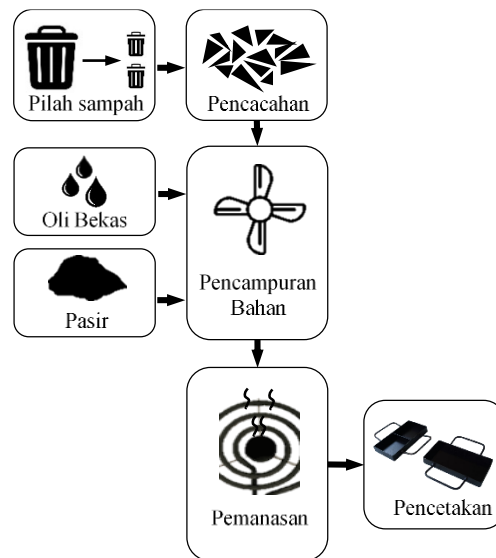
Gambar 1. 2. Roadmap Penelitian

BAB 2

METODE

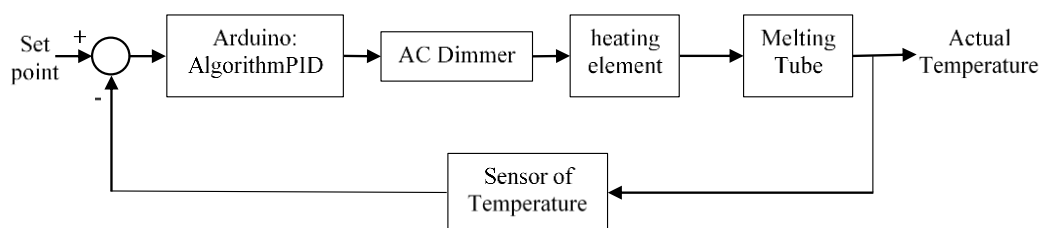
2.1 Alur Penelitian

Dalam proses pengolahan sampah plastik residu untuk pembuatan bahan paving blok, dibutuhkan bahan campuran yang terdiri dari sampah plastik residu, oli bekas, dan pasir bangunan. Bahan plastik residu berfungsi sebagai bahan perekat menggantikan bahan semen sehingga lebih ekonomis. Komposisi bahan yang digunakan dan pengendalian sistem selama proses peleburan sangat menentukan kekuatan hasil cetakan untuk bahan paving blok. Diagram proses pengolahan sampah plastik residu adalah sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1. Alur proses pengolahan sampah plastik residu

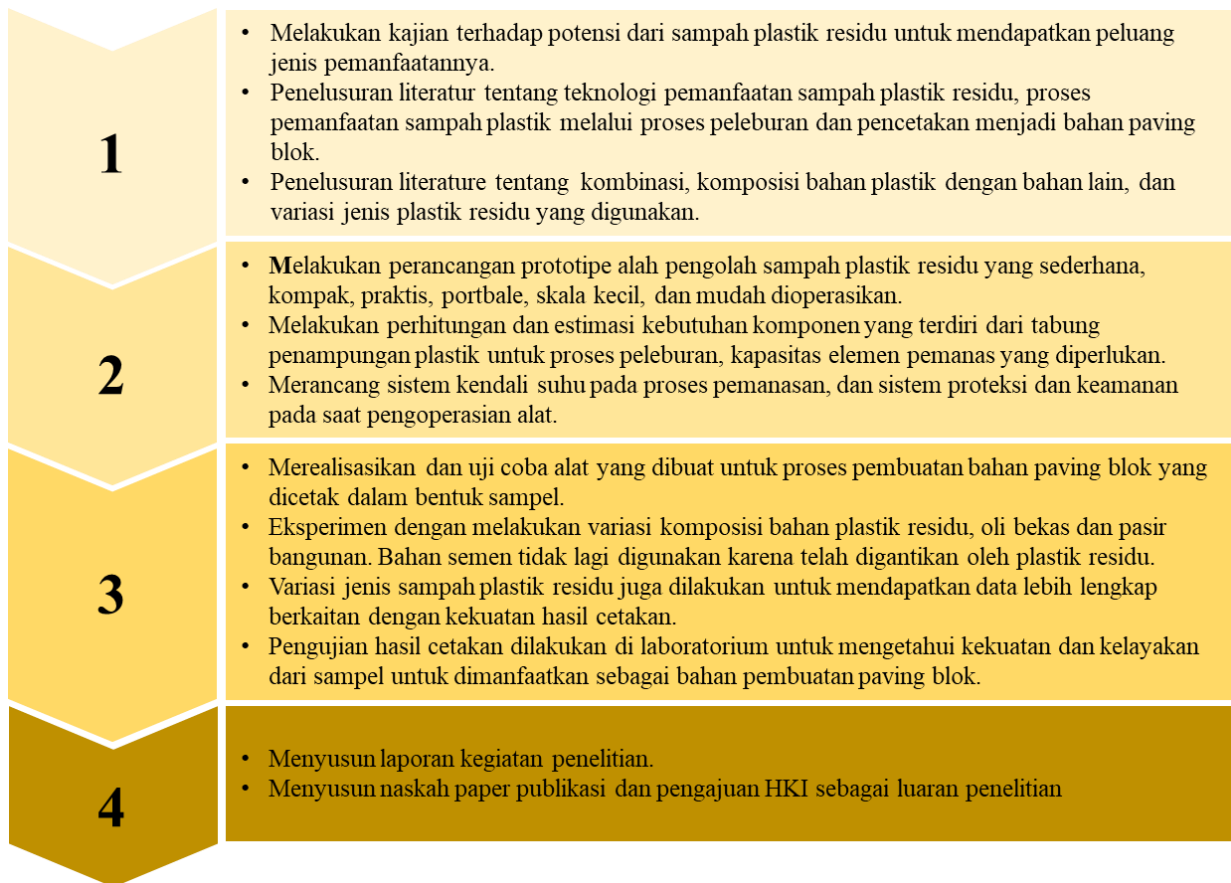
Pengendalian suhu dilakukan selama proses pemanasan untuk meleburkan bahan plastik residu dengan menerapkan *Closed Loop Control System* (CLCS) dengan algoritma *Proportional Integral Differensial* (PID) dengan diagram sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2. Closed Loop Control System pada pengendalian suhu

Untuk mengukur kekuatan spesimen hasil cetakan bahan paving blok, dilakukan pengujian dengan metode *Compressive Strength Test* (CST).

Secara rinci, metode pelaksanaan penelitian dilakukan dengan mengikuti tahapan sebagaimana disajikan pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3. Tahapan penelitian

Hasil akhir yang ditargetkan dari penelitian ini adalah sebuah alat pengolah sampah plastik residu sebagai pengganti material semen pada pembuatan bahan bangunan paving blok. Sebagai luaran penelitian adalah dalam bentuk artikel ilmiah yang dipublikasikan pada jurnal nasional terakreditasi Sinta-2 dan HKI.

2.2. Pengolahan sampah plastik residu

Sampah residu, juga dikenal sebagai sampah *non-recyclable* atau sampah tidak dapat ditukar, adalah jenis sampah yang sulit atau bahkan tidak mungkin untuk didaur ulang atau diproses kembali menjadi bahan yang dapat digunakan kembali. Dengan demikian sampah plastik residu bisa dikatakan sudah tidak memiliki nilai ekonomis. Pengelolaan dan penanganan sampah plastik residu merupakan tantangan kritis, terutama di daerah perkotaan negara-negara berpendapatan rendah dan menengah, di mana infrastruktur dan sumber daya tidak memadai dibandingkan dengan volume sampah yang terus meningkat.

Penelitian ini berfokus pada teknologi pendukung pemanfaatan sampah plastik residu untuk digunakan sebagai material pengikat (bending material) pengganti semen dalam proses produksi paving blok. Penerapan teknologi dilakukan pada pengendalian temperatur secara otomatis selama proses pelelehan sampah plastik residu dan pencampuran dengan bahan lainnya (oli bekas dan pasir bangunan) yang diperlukan pada proses produksi paving blok.

Proses produksi terdiri dari tiga tahap utama:

- Tahap 1: Inisialisasi

Pada tahap awal ini, tangki pengolahan pada Gambar dipanaskan hingga mencapai suhu 100°C, mempersiapkannya untuk tahap proses 2.

- Proses 2: Pemanasan minyak

Pada tahap ini, minyak dipanaskan dalam tangki pengolahan hingga mencapai 130°C, pada titik ini minyak telah siap untuk dicampurkan dengan bahan plastik residu.

- Proses 3: Peleburan dan pencampuran

Sampah plastik ditambahkan secara bertahap ke minyak yang dipanaskan dari Proses 2. Pengadukan terus menerus dilakukan untuk memastikan distribusi panas yang merata dan peleburan plastik yang sempurna. Setelah plastik meleleh sepenuhnya, pasir ditambahkan secara bertahap ke campuran. Campuran diaduk secara menyeluruh dengan tangan untuk memastikan homogenitas. Proses ini berlanjut hingga suhu campuran plastik-pasir mencapai sekitar 260°C.

- Proses 4: Pencetakan paving blok

Setelah dicampur secara merata, bahan tersebut dituangkan ke dalam cetakan yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan dibiarkan mendingin dan mengeras selama 24 jam. Cetakan terbuat dari plat besi dengan ketebalan 2 mm. Cetakan tersebut memiliki lebar, panjang, dan kedalaman masing-masing 10 cm, 20 cm, dan 3 cm.

2.3. Komponen sistem kendali otomatis

Komponen utama dari sistem kendali terdiri dari sensor sebagai pendeteksi parameter suatu proses yang dikendalikan, algoritma pengendalian yang digunakan dalam proses perhitungan matematis sinyal kendali, dan aktuator sebagai piranti untuk menterjemahkan sinyal kendali menjadi besaran listrik yang digunakan untuk merevisi kondisi proses.

2.3.1. Sensor suhu non kontak MLX-90614 dengan Modul GY-906

MLX-90614 adalah pendeteksi temperatur nonkontak dengan memanfaatkan cahaya inframerah dalam proses pengindraannya [7]. MLX-90614 didukung chip detektor thermopile sensitif IR yang diintegrasikan dengan rangkaian penguat pengkondisi sinyal, 17-bit ADC dan unit DSP sehingga memiliki akurasi tinggi [8]. Kemampuan dalam mendeteksi suhu adalah berkisar antara -70 °C hingga 380 °C dengan resolusi 0,02 °C. Gambar 2.4 menyajikan bentuk fisik sensor MLX-9016 yang sudah diintegrasikan ke dalam modul GY-904.



Gambar 2. 4. Sensor suhu MLX-90614 dengan modul GY-904

Spesifikasi sensor adalah sebagaimana dijelaskan pada tabel 1 berikut ini:

Tabel 2. 1. Spesifikasi sensor suhu MLX90614 dan GY-906

Model	GY-906
Catu daya	5 volt dc
Sensor	MLX90614
Suhu operasional	-40°C s/d 125°C
Jangkauan pengukuran suhu	-70°C s/d 380°C
Resolusi	0,02°C
Bahan	<i>Immersion Gold PCB</i>

Prinsip kerja sensor MLX90614 ini adalah dengan menyerap sinar inframerah yang dipancarkan suatu benda atau obyek yang diukur suhunya. Radiasi infra merah adalah bagian dari spektrum elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang dari 0.7 hingga 1000 mikron, namu demikian hanya sebagian saja yang dapat digunakan dalam pengukuran suhu yaitu 0.7 – 14 mikron. Intensitas energi inframerah yang dipancarkan suatu benda atau obyek yang diukur akan berbanding lurus dengan suhunya sehingga besarnya intensitas infrared yang diterima sensor akan merepresentasikan suhu dari suatu benda atau obyek tersebut. Hasil penginderaan suhu yang didapatkan adalah sinyal digital hingga 17 bit yang akan dikeluarkan oleh sensor MLX-90614 dengan standar komunikasi serial I²C. Dengan demikian nilai suhu bisa didapatkan secara langsung dengan mengkonversi sinyal digital tersebut ke dalam nilai nominal dari suhu yang diukur.

2.3.2. Elemen pemanas 220 V 4000 W spiral

Elemen pemanas listrik adalah piranti yang digunakan untuk merubah energi listrik menjadi energi panas [9]. Besarnya energi listrik yang diberikan ke elemen pemanas akan berbanding lurus dengan besarnya panas yang dihasilkan [10]. Pada penelitian ini, elemen pemanas listrik dengan kapasitas 400 Watt digunakan sebagai sumber pemanasan pada tungku peleburan sampah plastik residu sebagaimana dinjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5. Elemen pemanas bertenaga listrik 220 Volt 4000 Watt

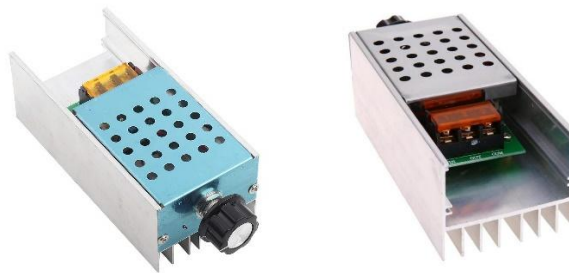
Spesifikasi elemen pemanas ditunjukkan pada tabel 2 beriku ini:

Tabel 2. 2. Spesifikasi elemen pemanas

Tipe	Tubular
Bentuk	Spiral
Tegangan, daya	230 Volt, 4000 Watt
Diameter spiral	25 cm
Suhu pemanasan	Hingga 400 °C

2.3.3. Dimmer sebagai pengatur pasokan daya listrik

Tingkat pemanasan yang dihasilkan oleh elemen pemanas berbanding lurus dengan daya listrik yang dipasok ke elemen tersebut. Dengan mengatur besarnya pasokan daya listrik bisa didapatkan pengaturan tingkat pemanasan dari elemen pemanas. Sistem pengaturan lebar pulsa atau *pulse width modulation* (PWM) adalah cara yang paling umum dilakukan dalam pengaturan pasokan daya ke suatu perangkat listrik termasuk elemen pemanas listrik. Pada penelitian ini, pengaturan daya dengan teknik PWM dilakukan dengan menerapkan perangkat dimmer yang mampu mengaur pasokan daya ke elemen pemanas dengan rentang 0 Watt sampai dengan 6000 Watt. Gambar 2.6 menunjukkan perangkat dimmer AC 220 Volt 6000 Watt yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 2. 6. Dimmer AC 220 Volt 6000 Watt

Tabel 3 menjelaskan spesifikasi sistem dimmer yang digunakan sebagai pengatur pasokan daya bagi elemen pemanas dalam penelitian ini.

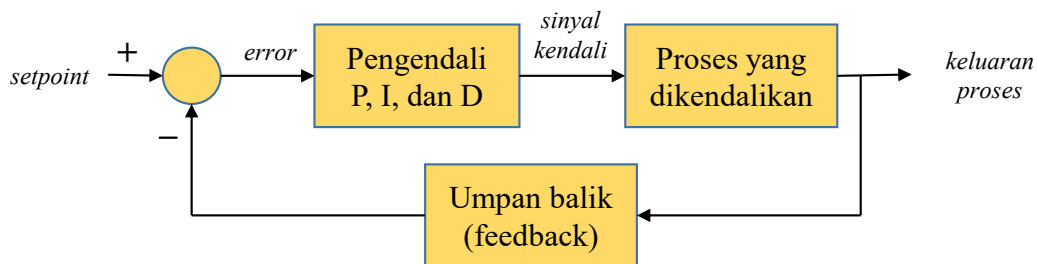
Tabel 2. 3. Spesifikasi dimmer pengatur pasokan daya bagi elemen pemanas

Tegangan input	220 Volt AC
Kapasitas daya maksimum	6000 Watt
Regulasi tegangan	10 Volt – 220 Volt AC
Metode regulasi	<i>Pulse width modulation</i> (PWM)
Sistem pendingin	<i>Heat-sink</i> alumunium

2.3.4. Sistem Pengendali PID (Proportional, Integral, Derivative)

Pengendali PID (Proporsional-Integral-Derivatif) adalah sebuah cara kendali umpan balik yang banyak diimplementasikan dalam otomatisasi untuk mempertahankan variabel proses berada pada suatu nilai yang diinginkan (*setpoint*) dengan melibatkan peranan dari tiga

komponen pengendali [11]. Kendali proporsional (P) memiliki kemampuan untuk menanggapi terhadap kondisi saat ini dari keluaran suatu proses, kendali integral (I) memiliki kemampuan untuk menanggapi keluaran proses yang terjadi sebelumnya, sedangkan kendali derivatif (D) mampu memprediksi tanggapan terhadap keluaran proses yang akan terjadi berikutnya [12]. Dalam penerapan kendali PID, penggabungan ketiga pengendali bertujuan untuk mendapatkan kinerja sistem kendali yang terbaik. Kinerja sistem kendali ini diukur berdasarkan respon sistem pada kondisi transisi (*transient*) dan kondisi akhir (*steady*) [13]. Diagram sistem kendali umpan balik negatif dengan pengendali PID ditunjukkan pada gambar 2.7 berikut ini.



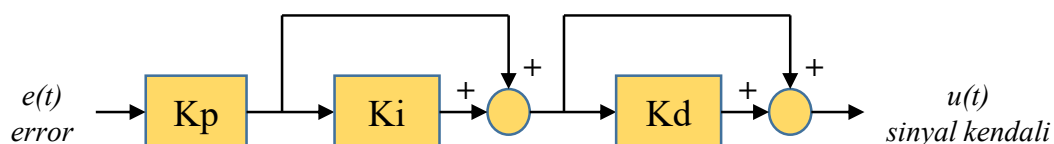
Gambar 2. 7. Diagram blok sistem kendali umpan balik negatif dengan pengendali PID

Berdasarkan gambar 2.7, pengendali PID mendapat masukan nilai error sebagai perbedaan antara variabel proses yang diukur (*feedback*) dan nilai target (*set point*) yang diinginkan. Pengendali PID mengolah nilai error menjadi sinyal kendali (*manipulated variable*) untuk diumpankan ke proses dengan maksud untuk merubah konsisi keluaran proses sehingga mendekati nilai target yang diinginkan.

Karakteristik pengendali PID sangat dipengaruhi oleh kontribusi dari ketiga pengendali melalui besarnya parameter/konstanta pengendali (K_p , K_i dan K_d). Pengaturan nilai K_p , K_i , dan K_d akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing pengendali. Satu atau dua dari ketiga parameter tersebut dapat diatur lebih menonjol dibanding yang lain. Kombinasi pengendali PID terbagi menjadi 3 struktur yaitu PID seri, PID paralel dan PID Mix (gabungan dari PID seri dan PID paralel).

2.3.5. Pengendali PID Seri

Gambar 2.8 menunjukkan diagram pengendali PID dalam struktur dimana ketiga pengendali disusun secara seri.



Gambar 2. 8. Diagram Blok Pengendali PID Seri

$$u(t) = (K_p e(t) + K_p K_i \int e(t) dt) + K_d \frac{d(K_p e(t) + K_p K_i \int e(t) dt)}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

dimana:

$u(t)$ = output dari sistem

K_p = parameter proporsional (P)
 $e(t)$ = sinyal *error*
 K_i = parameter integral (I)
 K_d = parameter derivatif (D)

Transformasi *Laplace* dari persamaan (1) adalah sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (2):

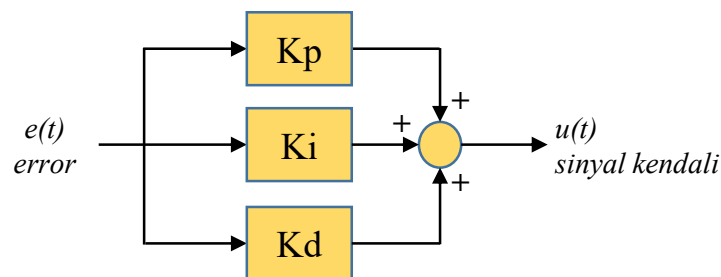
$$U(s) = \left(K_p E(s) + \frac{K_p K_i}{s} E(s) \right) + \left(K_p + \frac{K_p K_i}{s} \right) K_d s E(s) \dots\dots\dots(2)$$

Dari persamaan (2) dapat dirumuskan fungsi alhir pendali PID struktur seri seperti pada persamaan (3).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \left(K_p + K_p \frac{1}{T_{is}} \right) + \left(K_p + K_p \frac{1}{T_{is}} \right) T_d \dots\dots\dots(3)$$

2.3.6. Pengendali PID Paralel

Gambar 2.9 menunjukkan diagram pengendali PID dalam struktur dimana ketiga pengendali disusun secara paralel [14].



Gambar 2. 9. Diagram Blok PID Paralel

Keluaran kendali dihitung dengan persamaan (4) berikut ini.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots(4)$$

Transformasi *Laplace* dari persamaan (4) adalah sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (5):

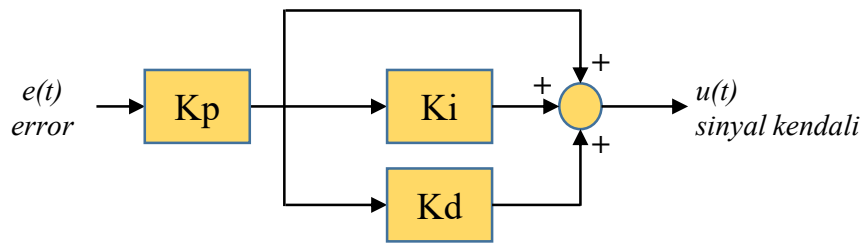
$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s) \dots\dots\dots(5)$$

Dari persamaan (5) dapat dirumuskan fungsi alhir pendali PID struktur seri seperti pada persamaan (6).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \dots\dots\dots(6)$$

2.3.7. Pengendali PID MIX

Gambar 2.10 menunjukkan diagram pengendali PID dalam struktur dimana ketiga pengendali disusun secara campuran (*mixed*).



Gambar 2. 10. Diagram Blok PID campuran (mixed)

Keluaran kendali dihitung dengan persamaan (7) berikut ini.

$$u(t) = Kp e(t) + Kp.Ki \int e(t)dt + Kp.Kd \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots(7)$$

Transformasi *Laplace* dari persamaan (7) adalah sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (8):

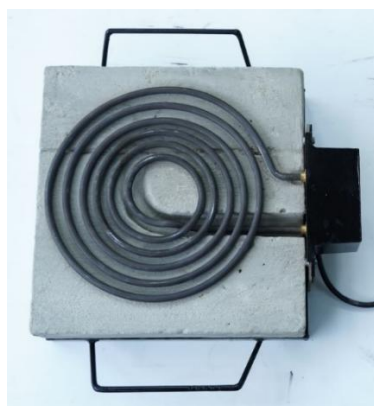
$$U(s) = Kp E(s) + \frac{Kp.Ki}{s} E(s) + Kp.Kds E(s) \dots\dots\dots(8)$$

Dari persamaan (8) dapat dirumuskan fungsi alhir pendali PID struktur seri seperti pada persamaan (9).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \left(1 + \frac{Ki}{s} + Kds \right) \dots\dots\dots(9)$$

2.4. Desain mekanik sistem pengolah sampah

Bagian mekanik dari proses terdiri dari tungku pemanas dan tabung peleburan sampah plastik residu. Prototipe dibuat dalam skala kecil dengan kapasitas 5 liter. Gambar 2.11 (a) menunjukkan mekanik tungku pemanas menggunakan elemen pemanas listrik berkapasitas daya hingga 4000 Watt. Sebagai bantalan dari elemen pemanas digunakan bahan yang anti bakar dengan menggunakan bata ringan.



(a)



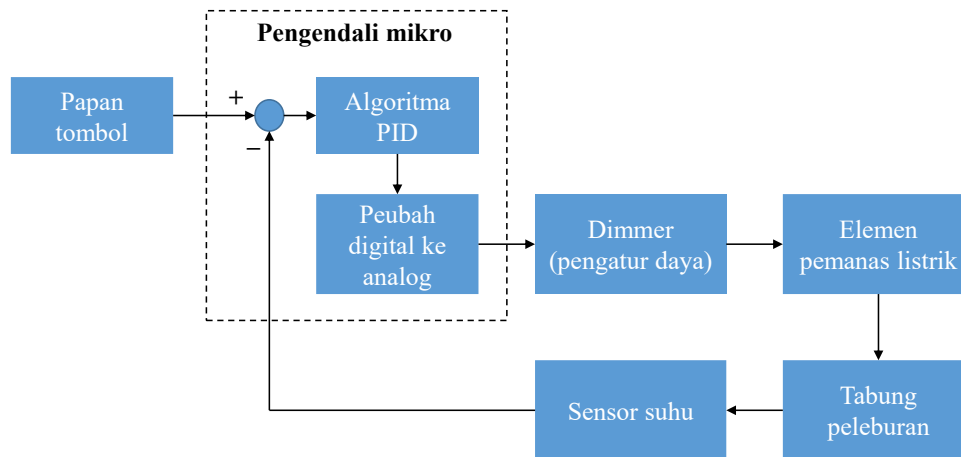
(b)

Gambar 2. 11. (a) Tungku pemanas, (b) Tabung peleburan

Gambar 2.11 (b) menyajikan mekanik dari tabung peleburan. Tabung peleburan dibuat dari tangki bekas tabung freon.

2.5. Diagram blok sistem kendali temperatur

Sistem kendali suhu yang diterapkan menggunakan algoritma PID yang diintegrasikan ke dalam kode program dan ditanamkan ke dalam pengendali mikro (arduino mega). Gambar 2.12 menunjukkan diagram blok antar bagian sistem kendali.

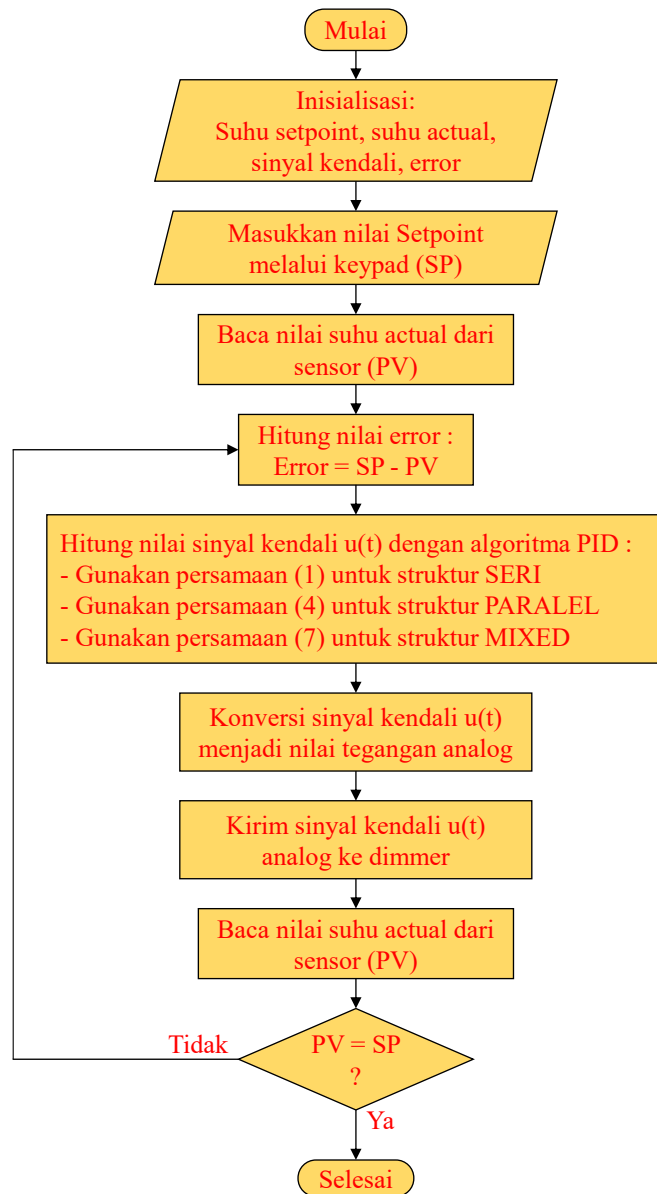


Gambar 2. 12. Diagram blok sistem kendali

Prinsip kerja sistem diawali dengan memasukkan nilai *setpoint* suhu melalui papan tombol (keypad). Nilai *setpoint* suhu akan dibandingkan dengan nilai suhu aktual hasil pembacaan sensor suhu untuk mendapatkan nilai selisihnya (*error*). Besarnya nilai error akan digunakan sebagai masukan algoritma PID dalam menghitung besarnya sinyal kendali yang harus diberikan ke aktuator dimmer. Keluaran perhitungan algoritma PID dalam format nilai digital diubah ke analog dengan memanfaatkan fitur peubah sinyal digital ke analog yang terdapat dalam pengendali mikro. Sinyal kendali analog yang didapatkan selanjutnya diumpankan ke pengatur daya (*dimmer*) untuk mengkoreksi jumlah pasokan daya yang diberikan ke elemen pemanas. Dengan demikian tingkat pemanasan akan terkoreksi menyesuaikan daya pasokan yang diterima elemen. Perubahan suhu yang didapatkan dibaca ulang oleh sensor suhu dan diumpankan kembali ke pengendali mikro untuk diproses ulang. Siklus ini akan terulang secara terus menerus hingga didapatkan suhu aktual dalam tabung peleburan sama dengan *setpoint* suhu yang diinginkan.

2.5. Diagram alir perangkat lunak pengendali alat olah sampah

Pengendali mikro adalah perangkat kendali yang bekerja berdasarkan algoritma program yang ditanamkan dalam chip pengendali mikro tersebut. Pada penelitian ini, algoritma program yang digunakan adalah sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.13 berikut ini.



Gambar 2. 13. Diagram alir program kendali suhu otomatis dengan PID

BAB 3

HASIL PELAKSANAAN PENELITIAN

Pengujian pengendalian suhu dilakukan dalam beberapa studi kasus berdasarkan komposisi perbandingan jumlah bahan pengolahan sampah plastik residu yang secara rinci disajikan pada tabel 4 berikut ini.

Tabel 3. 1. Studi kasus pengujian sistem kendali suhu berdasarkan komposisi bahan pengolahan sampah plastik residu

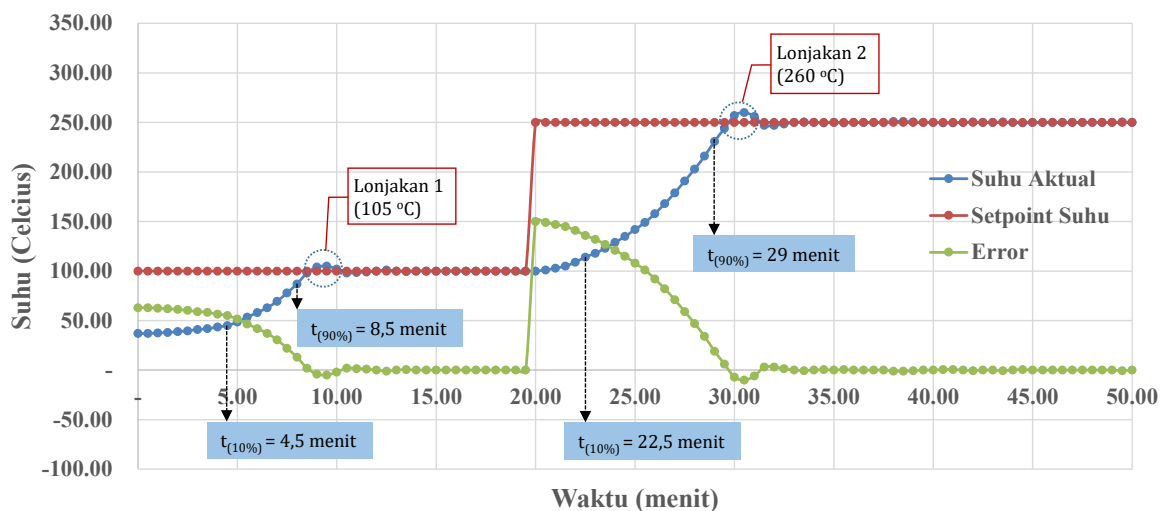
Kasus pengujian	Komposisi bahan		
	Oli	Plastik	Pasir
Kasus 1	1.00	1.00	0.50
Kasus 2	1.00	1.00	0.75
Kasus 3	1.00	1.00	1.00
Kasus 4	1.00	1.00	1.25

Komposisi tersebut divariasikan untuk mendapatkan bahan cetakan dengan kekuatan yang berbeda dan akan dipilih komposisi yang mampu menghasilkan bahan cetakan dengan kekuatan tertinggi melalui uji tekan.

3.1. Pengujian sistem kendali suhu untuk studi kasus-1

Pada pengujian ini dilakukan pengendalian suhu pada saat proses pengolahan sampah plastik residu dengan komposisi oli 1 bagian, plastik 1 bagian, dan pasir 0,5 bagian. Komposisi ini setara dengan oli seberat 400 gram, plastik seberat 400 gram, dan pasir seberat 200 gram untuk mendapatkan total campuran seberat 1000 gram.

Proses diawali dengan memanaskan oli hingga mencapai suhu *setpoint* 100°C. Kemudian merubah *setpoint* suhu menjadi 250°C untuk proses peleburan plastik dan pasir bangunan. *Setpoint* sebesar 250°C dipertahankan hingga seluruh bahan telah melebur secara merata dan siap dilakukan pencetakan hasil. Gambar 3.1 menyajikan respon sistem pengendalian suhu dari awal hingga akhir proses.



Gambar 3. 1. Respon sistem pengendali suhu pada pengujian kasus-1

Pada saat proses awal (pemanasan oli), suhu awal (T_{awal}) adalah 37°C dan *setpoint* suhu pemanasan oli adalah ($T_{setpoint}$) sebesar 100°C sehingga total perubahan suhu (ΔT) yang diinginkan adalah 63°C . Kenaikan suhu pemanasan oli sebesar 10% dari ΔT dicapai pada waktu $t_{10\%} = 4,5$ menit. Sedangkan suhu pemanasan mencapai 90% dari ΔT dicapai pada waktu $t_{90\%} = 8,5$ menit. Lonjakan tertinggi dari suhu pemanasan oli mencapai 105°C . Jumlah osilasi yang terjadi adalah dua kali.

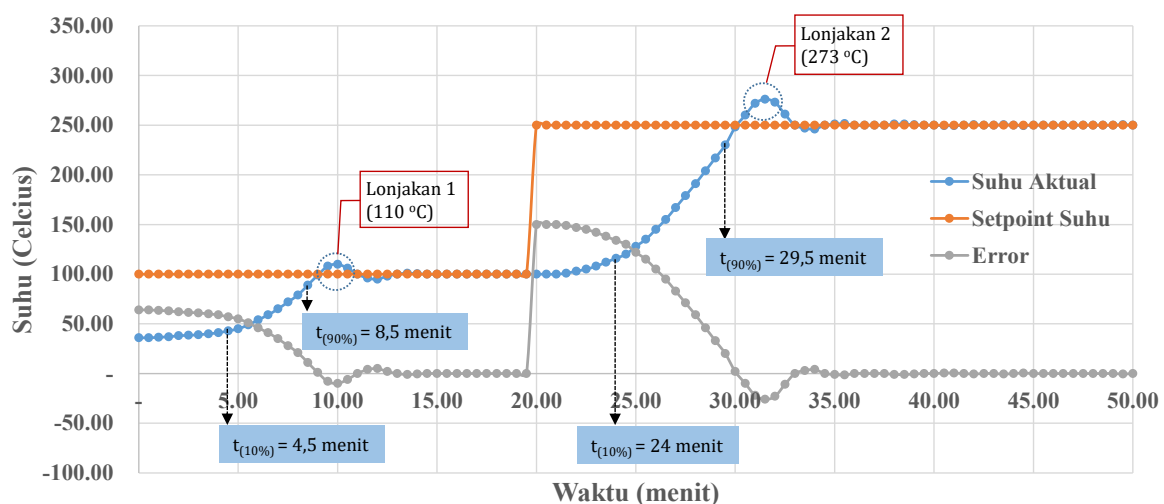
Proses selanjutnya adalah pencampuran dan peleburan bahan plastik residu. Suhu awal (T_{awal}) adalah 100°C kemudian pada menit ke-20 *setpoint* suhu ($T_{setpoint}$) dinaikkan menjadi 250°C sehingga perubahan suhu (ΔT) yang diinginkan adalah sebesar 150°C . Suhu ruang peleburan mencapai kenaikan sebesar 10% dari ΔT didapatkan pada 2,5 menit terhitung sejak perubahan *setpoint* diberikan. Sedangkan kenaikan sebesar 90% dari ΔT didapatkan pada 9 menit setelah perubahan *setpoint* diberikan. Jumlah osilasi yang terjadi adalah sebanyak dua kali dengan lonjakan suhu tertinggi mencapai 260°C .

3.2. Pengujian sistem kendali suhu untuk studi kasus-2

Pada pengujian dengan kasus 2, pengendalian suhu pada saat proses pengolahan sampah plastik residu dengan komposisi oli 1 bagian, plastik 1 bagian, dan pasir 0,75 bagian. Komposisi ini setara dengan oli seberat 364 gram, plastik seberat 364 gram, dan pasir seberat 273 gram untuk mendapatkan total campuran seberat 1000 gram.

Proses diawali dengan memanaskan oli hingga mencapai suhu *setpoint* 100°C . Kemudian merubah *setpoint* suhu menjadi 250°C untuk proses peleburan plastik dan pasir bangunan. *Setpoint* sebesar 250°C dipertahankan hingga seluruh bahan telah melebur secara merata dan siap dilakukan pencetakan hasil. Gambar 3.2 menyajikan respon sistem pengendalian suhu dari awal hingga akhir proses.

Pada saat awal proses (pemanasan oli), suhu awal (T_{awal}) adalah 36°C dan *setpoint* suhu pemanasan oli adalah ($T_{setpoint}$) sebesar 100°C sehingga total perubahan suhu (ΔT) yang diinginkan adalah 64°C . Kenaikan suhu pemanasan oli sebesar 10% dari ΔT dicapai pada waktu $t_{10\%} = 4,5$ menit. Sedangkan suhu pemanasan mencapai 90% dari ΔT dicapai pada waktu $t_{90\%} = 8,5$ menit. Lonjakan tertinggi dari suhu pemanasan oli mencapai 110°C . Jumlah osilasi yang terjadi adalah dua kali.



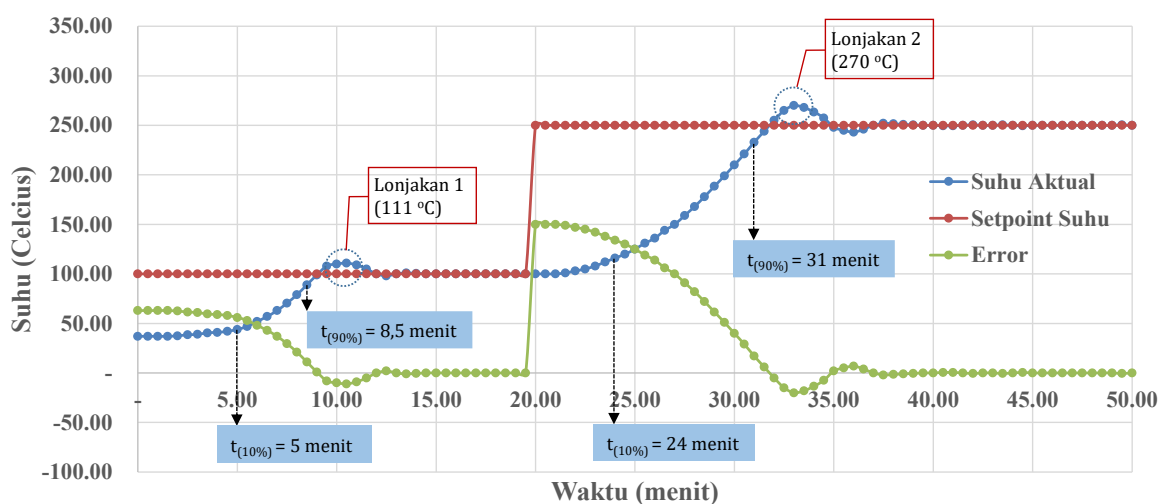
Gambar 3. 2. Respon sistem pengendali suhu pada pengujian kasus-2

Proses selanjutnya adalah pencampuran dan peleburan bahan plastik residu. Suhu awal (T_{awal}) adalah 100°C kemudian pada menit ke-20 $setpoint$ suhu ($T_{setpoint}$) dinaikkan menjadi 250°C sehingga perubahan suhu (ΔT) yang diinginkan adalah sebesar 150°C . Suhu ruang peleburan mencapai kenaikan sebesar 10% dari ΔT didapatkan pada 4 menit terhitung sejak perubahan $setpoint$ diberikan. Sedangkan kenaikan sebesar 90% dari ΔT didapatkan pada 9,5 menit setelah perubahan $setpoint$ diberikan. Jumlah osilasi yang terjadi adalah sebanyak dua kali dengan lonjakan suhu tertinggi mencapai 273°C .

3.3. Pengujian sistem kendali suhu untuk studi kasus-3

Pada pengujian dengan kasus 3, pengendalian suhu pada saat proses pengolahan sampah plastik residu dengan komposisi oli 1 bagian, plastik 1 bagian, dan pasir 1 bagian. Komposisi ini setara dengan oli seberat 333 gram, plastik seberat 333 gram, dan pasir seberat 333 gram untuk mendapatkan total campuran seberat 1000 gram.

Prosedur yang sama dengan pengujian pertama dilakukan pada pengujian kasus 1 dan kasus 2. Proses diawali dengan memanaskan oli hingga mencapai suhu $setpoint$ 100°C . Setelah plastik dan pasir dimasukkan, $setpoint$ suhu dinaikkan menjadi 250°C untuk proses peleburan plastik dan pasir bangunan. $Setpoint$ sebesar 250°C dijaga tetap nilainya hingga seluruh bahan telah melebur secara merata dan siap dilakukan pencetakan hasil. Gambar 3.3 menyajikan respon sistem pengendalian suhu dari awal hingga akhir proses.



Gambar 3. 3. Respon sistem pengendali suhu pada pengujian kasus-3

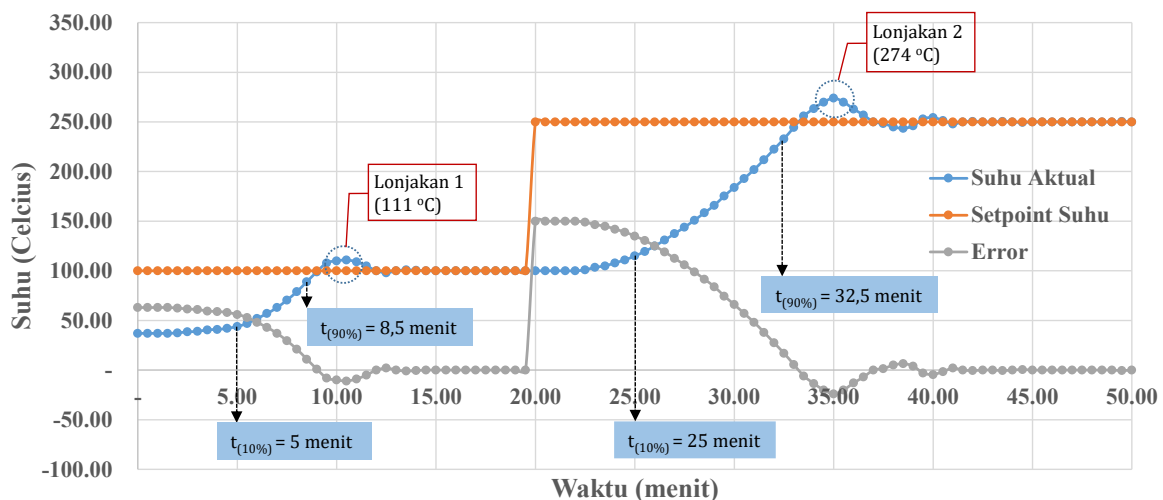
Proses pemanasan oli dengan suhu awal (T_{awal}) adalah 37°C dan $setpoint$ suhu pemanasan oli adalah ($T_{setpoint}$) sebesar 100°C sehingga total perubahan suhu (ΔT) yang diinginkan adalah 63°C . Kenaikan suhu pemanasan oli sebesar 10% dari ΔT dicapai pada waktu $t_{10\%} = 5$ menit. Sedangkan suhu pemanasan mencapai 90% dari ΔT dicapai pada waktu $t_{90\%} = 8,5$ menit. Lonjakan tertinggi dari suhu pemanasan oli mencapai 111°C . Jumlah osilasi yang terjadi adalah dua kali.

Proses selanjutnya adalah pencampuran dan peleburan bahan plastik residu. Suhu awal (T_{awal}) adalah 100°C kemudian pada menit ke-20 $setpoint$ suhu ($T_{setpoint}$) dinaikkan menjadi 250°C sehingga perubahan suhu (ΔT) yang diinginkan adalah sebesar 150°C . Suhu ruang peleburan mencapai kenaikan sebesar 10% dari ΔT didapatkan pada 4 menit terhitung sejak perubahan $setpoint$ diberikan. Sedangkan kenaikan sebesar 90% dari ΔT didapatkan pada 11 menit setelah perubahan $setpoint$ diberikan. Jumlah osilasi yang terjadi adalah sebanyak dua kali dengan lonjakan suhu tertinggi mencapai 270°C .

3.4. Pengujian sistem kendali suhu untuk studi kasus-4

Pada pengujian dengan kasus 4, pengendalian suhu pada saat proses pengolahan sampah plastik residu dengan komposisi oli 1 bagian, plastik 1 bagian, dan pasir 1.25 bagian. Komposisi ini setara dengan oli seberat 308 gram, plastik seberat 308 gram, dan pasir seberat 384 gram untuk mendapatkan total campuran seberat 1000 gram.

Prosedur yang sama dengan pengujian pertama dilakukan pada pengujian kasus 1 dan kasus 2. Proses pemanasan oli dilakukan dengan *setpoint* suhu 100°C. Setelah plastik dan pasir dimasukkan, *setpoint* suhu dinaikkan menjadi 250°C untuk proses peleburan plastik dan pasir bangunan. *Setpoint* sebesar 250°C dijaga tetap nilainya hingga seluruh bahan telah melebur secara merata dan siap dilakukan pencetakan hasil. Gambar 3.4 menyajikan respon sistem pengendalian suhu dari awal hingga akhir proses.



Gambar 3. 4. Respon sistem pengendali suhu pada pengujian kasus-4

Suhu awal (T_{awal}) pada proses pemanasan oli adalah 37°C dan *setpoint* suhu pemanasan oli adalah ($T_{setpoint}$) sebesar 100°C sehingga total perubahan suhu (ΔT) yang diinginkan adalah 63°C. Kenaikan suhu pemanasan oli sebesar 10% dari ΔT dicapai pada waktu $t_{10\%} = 5$ menit. Sedangkan suhu pemanasan mencapai 90% dari ΔT dicapai pada waktu $t_{90\%} = 8,5$ menit. Lonjakan tertinggi dari suhu pemanasan oli mencapai 111°C. Jumlah osilasi yang terjadi adalah dua kali.

Proses selanjutnya adalah pencampuran dan peleburan bahan plastik residu. Suhu awal (T_{awal}) adalah 100°C kemudian pada menit ke-20 *setpoint* suhu ($T_{setpoint}$) dinaikkan menjadi 250°C sehingga perubahan suhu (ΔT) yang diinginkan adalah sebesar 150°C. Suhu ruang peleburan mencapai kenaikan sebesar 10% dari ΔT didapatkan pada 5 menit terhitung sejak perubahan *setpoint* diberikan. Sedangkan kenaikan sebesar 90% dari ΔT didapatkan pada 12,5 menit setelah perubahan *setpoint* diberikan. Jumlah osilasi yang terjadi adalah sebanyak dua kali dengan lonjakan suhu tertinggi mencapai 274°C.

3.5. Analisa hasil simulasi

Kinerja suatu sistem kendali dinilai berdasarkan beberapa parameter diantaranya adalah jumlah osilasi, *rise time*, dan *overshoot*. Parameter tersebut didapatkan berdasarkan grafik respon keluaran proses terhadap perubahan *setpoint* yang diberikan. Jumlah osilasi adalah banyaknya osilasi yang terjadi terhitung sejak perubahan *setpoint* diberikan hingga sistem mencapai kondisi mantab (steady state). Makin sedikit jumlah osilasi menunjukkan kemampuan

pengendali yang makin baik dalam mengendalikan parameter proses. *Rise time* adalah waktu yang diperlukan oleh sistem terhitung sejak output mencapai 10 % hingga 90% dari perubahan *setpoint* yang diberikan. Makin singkat *rise time* menunjukkan bahwa sistem kendali mampu menanggapi perubahan *setpoint* secara cepat dan responsif. *Overshoot* adalah besarnya penyimpangan tertinggi dari nilai suhu aktual terhadap suhu *setpoint* yang dinyatakan dalam persen (%). Dari hasil pengujian terhadap empat studi kasus sesuai pada tabel 3.1 dapat dirangkum hasil keseluruhan pengujian sebagaimana disajikan pada tabel 3.2.

Tabel 3. 2. Rangkuman hasil pengujian untuk empat studi kasus yang berbeda

Studi Kasus	Parameter	Proses Awal (Pemanasan oli)	Proses Akhir (Peleburan)
Kasus 1	Suhu awal (T_{awal}) (°C)	37	100
	Suhu <i>setpoint</i> ($T_{setpoint}$) (°C)	100	250
	$\Delta T = T_{setpoint} - T_{awal}$ (°C)	63	150
	Waktu output=10% ($t_{10\%}$) (menit)	4,5	22,5
	Waktu output=90% ($t_{90\%}$) (menit)	8,5	29,0
	Jumlah osilasi (kali)	2	2
	Suhu tertinggi (T_{max}) (°C)	105,0	260,0
	$Rise\ time = t_{90\%} - t_{10\%}$ (menit)	4,0	6,5
	$Overshoot = \frac{T_{max} - T_{setpoint}}{T_{setpoint}} \times 100\%$ (%)	5,0	4,0
Kasus 2	Suhu awal (T_{awal}) (°C)	36	100
	Suhu <i>setpoint</i> ($T_{setpoint}$) (°C)	100	250
	$\Delta T = T_{setpoint} - T_{awal}$ (°C)	64	150
	Waktu output=10% ($t_{10\%}$) (menit)	4,5	24,0
	Waktu output=90% ($t_{90\%}$) (menit)	8,5	29,5
	Jumlah osilasi (kali)	2	2
	Suhu tertinggi (T_{max}) (°C)	110	273
	$Rise\ time = t_{90\%} - t_{10\%}$ (menit)	4,0	5,5
	$Overshoot = \frac{T_{max} - T_{setpoint}}{T_{setpoint}} \times 100\%$ (%)	10,0	9,2
Kasus 3	Suhu awal (T_{awal}) (°C)	37	100
	Suhu <i>setpoint</i> ($T_{setpoint}$) (°C)	100	250
	$\Delta T = T_{setpoint} - T_{awal}$ (°C)	63	150
	Waktu output=10% ($t_{10\%}$) (menit)	5,0	24,0
	Waktu output=90% ($t_{90\%}$) (menit)	8,5	31,0
	Jumlah osilasi (kali)	2	2
	Suhu tertinggi (T_{max}) (°C)	111	270
	$Rise\ time = t_{90\%} - t_{10\%}$ (menit)	3,5	7,0
	$Overshoot = \frac{T_{max} - T_{setpoint}}{T_{setpoint}} \times 100\%$ (%)	11,0	8,0
Kasus 4	Suhu awal (T_{awal}) (°C)	37	100
	Suhu <i>setpoint</i> ($T_{setpoint}$) (°C)	100	250
	$\Delta T = T_{setpoint} - T_{awal}$ (°C)	63	150
	Waktu output=10% ($t_{10\%}$) (menit)	5	25,0
	Waktu output=90% ($t_{90\%}$) (menit)	8,5	32,5
	Jumlah osilasi (kali)	2	3
	Suhu tertinggi (T_{max}) (°C)	111	274
	$Rise\ time = t_{90\%} - t_{10\%}$ (menit)	3,5	7,5
	$Overshoot = \frac{T_{max} - T_{setpoint}}{T_{setpoint}} \times 100\%$ (%)	11,0	9,6

Berdasarkan tabel 3.2, hasil pengendalian dari ke-empat studi kasus menunjukkan bahwa sistem kendali mampu mengendalikan suhu mengikuti perubahan setpoint yang diberikan. Perubahan *setpoint* pertama kali diberikan pada saat proses awal sebesar 100°C dan perubahan kedua diberikan pada saat proses peleburan dengan *setpoint* suhu sebesar 250°C. Sistem kendali mampu merealisasikan suhu sesuai *setpoint* tersebut dengan *rise time* relatif sama dalam kisaran 3,5 – 4 menit untuk perubahan *setpoint* pertama dan 5,5 – 7,5 menit untuk perubahan *setpoint* kedua. Nilai *rise time* sangat dipengaruhi oleh karakteristik respon proses yang dikendalikan. Untuk sistem thermal dimana terdapat proses pemanasan memiliki kecenderungan respon yang lambat, sehingga nilai *rise time* mencapai ordo menit.

Untuk kedua perubahan *setpoint* yang diberikan, sistem kendali mampu merespon dan merealisasikan suhu aktual menjadi sama dengan *setpoint*. Jumlah osilasi dari keseluruhan pengujian menunjukkan hasil yang relatif sama berkisar antara 2 – 3 kali osilasi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kendali mampu meredam osilasi sehingga tidak berkepanjangan dan output nilai suhu segera mencapai nilai yang stabil sesuai *setpoint* yang diberikan.

Overshoot yang terjadi dari keseluruhan pengujian memiliki nilai pada kisaran antara 4% hingga 11%. Nilai *overshoot* juga dipengaruhi oleh *time sampling* yang digunakan. Sebagaimana disampaikan sebelumnya bahwa proses thermal memiliki respon yang lambat, sehingga pemilihan *time sampling* harus menyesuaikan dengan kecepatan respon dari proses yang dikendalikan. Pada pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini digunakan *time sampling* sebesar 30 detik (0,5 menit).

BAB 4

PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Sistem kendali suhu pada rancang bangun alat pengolah sampah plastik residu telah dilakukan. Sistem kendali yang diterapkan adalah pengendali PID digital dengan struktur paralel dalam bentuk kode program yang ditanamkan ke dalam mikrokontroller arduino mega. Sistem kendali diuji untuk empat studi kasus peleburan bahan sampah residu dengan komposisi bahan yang berbeda. Pengujian kinerja sistem kendali juga diuji keandalannya terhadap perubahan *setpoint* suhu 100°C dan 250°C.

Pengendali PID yang diterapkan menunjukkan kinerja yang mampu mengikuti perubahan *setpoint* sesuai dengan kebutuhan proses yang ada pada alat pengolah sampah plastik residu. Sistem kendali mampu mewujudkan nilai suhu sesuai dengan *setpoint* dengan jumlah osilasi berkisar 2-3 kali osilasi, rise time antara 3,5 – 4 menit untuk *setpoint* suhu 100°C dan 5,5 – 7,5 menit untuk *setpoint* suhu 250°C.

Secara keseluruhan desain sistem kendali PID digital dalam pengendalian suhu pada proses pengolahan sampah plastik residu telah menunjukkan hasil yang memuaskan. Sistem kendali mampu mengikuti dan menyesuaikan perubahan *setpoint* suhu yang diberikan sesuai kebutuhan proses pengolahan sampah.

4.2. Future Work

Sebagai tindak lanjut penelitian, akan dikembangkan sistem kontrol tekanan pada alat pencetak paving. Dengan demikian akan didapatkan satu paket sistem lengkap yang bisa digunakan dalam pengolahan sampah plastik residu menjadi bahan paving blok mulai dari proses peleburan bahan hingga proses pencetakan. Sistem kontrol juga akan dikembangkan dengan menerapkan logika fuzzy sebagai pembanding dari sistem kontrol PID.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Bishop, D. Styles, and P. N. L. Lens, "Recycling of European plastic is a pathway for plastic debris in the ocean," *Environ. Int.*, vol. 142, no. June, p. 105893, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105893.
- [2] Y. A. Hidayat, S. Kiranamahsa, and M. A. Zamal, "A study of plastic waste management effectiveness in Indonesia industries," *AIMS Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 350–370, 2019, doi: 10.3934/ENERGY.2019.3.350.
- [3] H. Harun, "Gambaran Pengetahuan dan Perilaku Masyarakat Dalam Proses Pemilahan Sampah Rumah Tangga Di Desa Hegarmanah," *Dharmakarya J. Apl. Ipteks untuk Masy.*, vol. 6, no. 2, pp. 86–88, 2017, [Online]. Available: <http://journal.unpad.ac.id/dharmakarya/article/view/14789/7890>
- [4] N. H. Fithriyah, "Kenapa sampah plastik sulit diurai.pdf." Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jakarta, 2023. [Online]. Available: <https://umj.ac.id/opini-1/kenapa-sampah-plastik-sulit-diurai/>
- [5] S. M. Al-Salem, A. Antelava, A. Constantinou, G. Manos, and A. Dutta, "A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW)," *J. Environ. Manage.*, vol. 197, no. 1408, pp. 177–198, 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.03.084.
- [6] G. White and G. Reid, "Recycled waste plastic for extending and modifying asphalt binders," in *Proceedings of the 8th Symposium on Pavement Surface Characteristics*, 2018, pp. 1–13.
- [7] J. L. F. Vasquez, G. Z. Guillen, and L. J. Troncoso, "Evaluation and correction of infrared temperature readings inside a neonatal incubator with the MLX90614 sensor using a temperature controlled black-body emulating a neonatal head," *Proc. 2021 IEEE 28th Int. Conf. Electron. Electr. Eng. Comput. INTERCON 2021*, pp. 2–5, 2021, doi: 10.1109/INTERCON52678.2021.9532618.
- [8] I. Inayah, H. Kiswanto, A. Dimyati, and M. G. Prasetya, "Design and Implementation of Non-Contact Infrared Thermometer based MLX90614 and Ultrasonic Sensors," *J. Fis. dan Apl.*, vol. 18, no. 2, p. 42, 2022, doi: 10.12962/j24604682.v18i2.10746.
- [9] A. E. Hassen and L. Pagliano, "Heat transfer characterization with alternative heating element layout in electric 'Injera' baking technology," *Results Eng.*, vol. 19, no. May 2022, p. 101373, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101373.
- [10] S. Fang, R. Wang, H. Ni, H. Liu, and L. Liu, "A review of flexible electric heating element and electric heating garments," *J. Ind. Text.*, vol. 51, no. 1, pp. 101S-136S, 2022, doi: 10.1177/1528083720968278.
- [11] T. Hägglund and J. L. Guzmán, "Give us PID controllers and we can control the world," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 58, no. 7, pp. 103–108, 2024, doi: 10.1016/j.ifacol.2024.08.018.
- [12] Z. Li, "Review of PID control design and tuning methods," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2649, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2649/1/012009.
- [13] R. Chen, "A Comprehensive Analysis of PID Control Applications in Automation Systems: Current Trends and Future Directions," *Highlights Sci. Eng. Technol.*, vol. 97, pp. 126–132, 2024, doi: 10.54097/6q4xxg69.
- [14] E. S. Ghith and F. A. A. Tolba, "Design and Optimization of PID Controller using Various Algorithms for Micro-Robotics System," *J. Robot. Control*, vol. 3, no. 3, pp. 244–256, 2022, doi: 10.18196/jrc.v3i3.14827.