



**PENERAPAN KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE* (PID)
MENGUNAKAN ESP32 PADA *FURNACE* TEMPERATUR TINGGI
BERBASIS *SILICON CARBIDE* (SiC)**

LAPORAN TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai salah satu syarat menyelesaikan pendidikan pada

Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi

Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi

Universitas Diponegoro

Disusun oleh :

Linggar Gusti Pratama

40040322650011

PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN TEKNOLOGI REKAYASA OTOMASI

DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI SEKOLAH VOKASI

UNIVERSITAS DIPONEGORO

SEMARANG

2026

HALAMAN PERSETUJUAN LAPORAN TUGAS AKHIR
PENERAPAN KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE* (PID)
MENGUNAKAN ESP32 PADA *FURNACE* TEMPERATUR TINGGI
BERBASIS *SILICON CARBIDE* (SiC)

TUGAS AKHIR

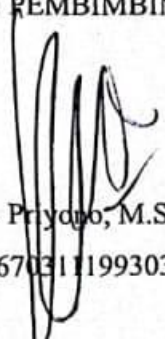
Diajukan oleh :

Linggar Gusti Pratama

40040322650011

TELAH DISETUJUI DAN DITERIMA DENGAN BAIK OLEH

DOSEN PEMBIMBING,

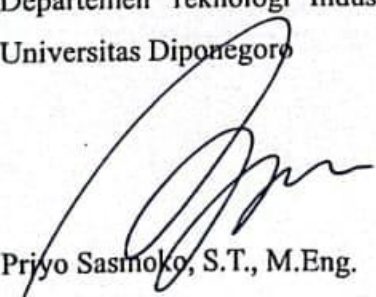

Dr. Drs. Priyono, M.Si
NIP. 196703111993031005

19 Agustus 2026

Mengetahui,

Ketua,

Program Studi S.Tr. Teknologi Rekayasa Otomasi
Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi
Universitas Diponegoro


Priyo Sasnoko, S.T., M.Eng.
NIP. 197009161998021001

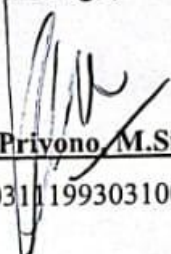
19 Agustus 2026

HALAMAN PENGESAHAN
PENERAPAN KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE* (PID)
MENGUNAKAN ESP32 PADA *FURNACE* TEMPERATUR TINGGI
BERBASIS *SILICON CARBIDE* (SiC)

Disusun oleh :

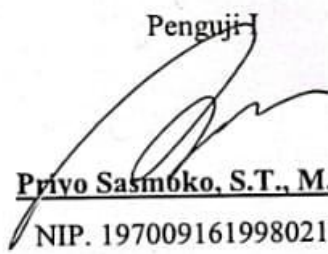
Linggar Gusti Pratama
40040322650011

Tim Penguji
Pembimbing I,


Dr. Drs. Priyono, M.Si

NIP. 196703111993031005

Penguji I


Priyo Sasmitoko, S.T., M.Eng.

NIP. 197009161998021001

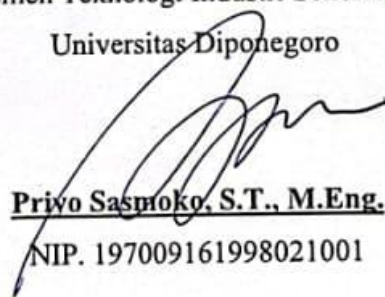
Penguji II


Aulia Istiqomah S.ST., M.T.

NIP. 199306122022042001

Mengetahui

Ketua Program Studi S.Tr Teknologi Rekayasa Otomasi
Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi
Universitas Diponegoro


Priyo Sasmitoko, S.T., M.Eng.

NIP. 197009161998021001

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan dibawah ini,

Nama : Linggar Gusti Pratama

NIM : 40040322650011

Program Studi : Teknologi Rekayasa Otomasi

Judul Tugas Akhir : Penerapan Kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) menggunakan ESP32 Pada *Furnace* Temperatur Tinggi Berbasis *Silicon Carbide* (SiC)

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh derajat keahlian di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka. Apabila dikemudian hari terbukti plagiat dalam tugas akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan Mendiknas RI No. 17 Tahun 2010 dan Peraturan Perundang-undangan yang berlaku.

Semarang, Agustus 2026

Penulis,



Linggar Gusti Pratama

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir berjudul "Penerapan Kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) Menggunakan ESP32 Pada *Furnace* Temperatur Tinggi Berbasis *Silicon Carbide* (SiC)". Tersusunnya laporan ini tentu tidak lepas dari bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Budiyono, M.Si. selaku Dekan Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
2. Bapak Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng. selaku Ketua Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi, Departemen Teknologi Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro.
3. Pak Dr. Drs. Priyono, M.Si selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta masukan yang sangat berarti dalam penyusunan proposal ini.
4. Bapak/Ibu dosen dan civitas akademika di Program Studi S.Tr. Teknologi Rekayasa Otomasi, yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan wawasan selama masa perkuliahan.
5. Orang tua yang selalu memberikan perhatian dan mendukung penulis di mana pun dan kapan pun.
6. Kakak penulis yang telah memberikan dukungan kepada saya selama menjenjang pendidikan perguruan tinggi hingga dalam penyusunan tugas akhir ini.
7. Teman angkatan SATNAYAKA dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan tugas akhir ini maupun penelitian yang akan dilakukan ke depannya.

Akhir kata, semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang membacanya.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN LAPORAN TUGAS AKHIR.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	iii
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
ABSTRAK	xiii
<i>ABSTRACT</i>	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Tugas Akhir.....	4
1.4 Manfaat Tugas Akhir.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
1.6 Sistematika Penulisan Tugas Akhir.....	5
BAB II DASAR TEORI.....	6
2.1 <i>Furnace</i>	6
2.1.1 Klasifikasi Jenis <i>Furnace</i>	6
2.1.2 Karakteristik <i>Furnace</i> Temperatur Tinggi	8
2.1.3 Jenis Pengoperasian Pada <i>Furnace</i>	9
2.2 Mekanisme Pembentukan & Perpindahan Kalor(<i>Heat Transfer</i>)	11
2.2.1 Elemen Pemanas <i>Silicon Carbide</i> (SiC).....	13
2.2.2 <i>Thermocouple</i> Tipe-K	16
2.3 Distribusi Daya Listrik.....	17
2.3.1 <i>Miniature Circuit Breaker</i> 1P 16A.....	17
2.3.2 PLN dan Pengatur Tegangan AC	19
2.3.3 <i>Power supply</i> DC	21

2.3.4 <i>Buck Converter</i> XL4015	23
2.4 Sistem Kontrol Elektrik <i>Furnace</i>	25
2.4.1 Modul MAX6675	25
2.4.2 <i>Proportional Integral Derivative</i> (PID)	27
2.4.3 Metode Penalaan (<i>tuning</i>) Parameter PID	31
2.4.4 ESP32-S3	33
2.4.5 Solid State Relay -40 DA	35
2.4.6 Karakteristik Respon Sistem	36
2.4.7 Akuisisi dan Pemantauan Data	38
2.5 <i>Arduino Integrated Development Environment</i> (IDE)	40
2.6 Alumunium Oksida	40
BAB III METODE PENELITIAN	42
3.1 Diagram Blok dan <i>Flowchart</i>	42
3.1.1 Diagram blok sistem	42
3.1.2 <i>Flowchart</i> sistem keseluruhan	44
3.1.3 <i>Flowchart Furnace</i> SiC dengan kontrol PID	46
3.2 Gambar 3D	47
3.3 Spesifikasi dan fitur	50
3.4 Teknik Fabrikasi	51
3.4.1 Perancangan Perangkat Lunak	51
3.4.2 Perancangan Elektrikal Sistem	53
3.4.3 Perancangan Desain <i>Printed Circuit Board</i> (PCB)	56
3.4.4 Perancangan Sistem Mekanik	60
3.4.5 Proses Pemasangan Komponen pada <i>Furnace</i>	61
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA	65
4.1 Hasil Pengujian Komponen	65
4.1.2 Pengujian Pengatur Tegangan dan PZEM-004T	65
4.1.2 Pengujian <i>Power supply</i> 12V 10A	67

4.1.3 Pengujian <i>Silicon Carbide</i>	70
4.1.4 Hasil Kalibrasi Sensor <i>Thermocuple</i> tipe-K	75
4.2 Hasil Pengujian dan Analisis Sistem Kontrol PID	76
4.2.1 Identifikasi Model FOPDT	77
4.2.2 Pengujian Sistem dengan Parameter Lambda <i>Tuning</i>	79
4.2.3 Pengujian dan Analisis Variasi Setpoint.....	80
BAB V PENUTUP	90
5.1 Kesimpulan	90
5.2 Saran.....	90
DAFTAR PUSTAKA.....	92
LAMPIRAN.....	97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Klasifikasi Furnace berdasarkan sumber daya	7
Gambar 2. 2 Ilustrasi proses pembentukan kalor.....	11
Gambar 2. 3 Ilustrasi Proses Perpindahan Kalor Yang Terjadi saat Pemanasan Furnace	13
Gambar 2. 4 Berbagai Bentuk Elemen Pemanas Silicon Carbide Komersial	13
Gambar 2. 5 Silicon Carbide (SiC) Tipe Straight Hot Rod Untuk Elemen Pemanas	14
Gambar 2. 6 Comparison of Kanthal SiC Elements	15
Gambar 2. 7 Sensor Thermocouple Tipe-K.....	16
Gambar 2. 8 Komponen pada MCB digunakan untuk Proteksi Kelistrikan	17
Gambar 2. 9 Skematik sederhana rangkaian Pengatur Tegangan untuk sumber SiC	19
Gambar 2. 10 Contoh Keluaran Sinyal Gelombang Sinus yang telah diproses oleh Pengatur Tegangan	20
Gambar 2. 11 Power supply DC 12V 10A untuk suplai ke sistem kontrol	21
Gambar 2. 12 Daigram Blok Fungsi Buck Converter XL4015 untuk aplikasi konversi tegangan DC-DC	23
Gambar 2. 14 Blok Diagram Modul MAX6675 untuk converter sinyal sensor <i>thermocouple</i>	25
Gambar 2. 15 Jumlah Pin Modul MAX6675	26
Gambar 2. 16 Grafik hubungan antara keluaran kontrol dan duty cycle.....	28
Gambar 2. 17 Diagram Blok Kontrol PID untuk Sistem Furnace	29
Gambar 2. 18 I/O ESP32-S3 yang digunakan untuk Pengontrol Pada Sistem.....	33
Gambar 2. 19 Solid State Relay 40-DA untuk saklar menyalurkan listrik dari Pengatur Tegangan	35
Gambar 2. 20 Karakteristik Respon Transien pada sistem closed loop.....	36
Gambar 2. 21 Diagram Blok Akuisisi pada Sistem	39
Gambar 2. 22 Alumunium Oksida untuk Reflektor Panas pada Ruang Bakar.....	41
Gambar 3. 1 Diagram blok sistem furnace.....	42
Gambar 3. 2 Flowchart keseluruhan sistem.....	44
Gambar 3. 3 Flowchart furnace SiC dengan kontrol PID.....	46
Gambar 3. 4 Design 3D furnace temperatur tinggi	47
Gambar 3. 5 Exploded view dan detail design furnace temperatur tinggi	48
Gambar 3. 6 Model Transfer Function untuk simulasi pada MATLAB	52
Gambar 3. 7 Rangkaian Skematik Komponen Seluruh Sistem	54
Gambar 3. 8 Design Printed Circuit Board untuk Komponen Elektrikal	56
Gambar 3. 9 Hasil pemasangan dan wiring komponen pada panel box	60
Gambar 3. 10 Ukuran satu batang heater Silicon Carbide	61

Gambar 3. 11 Proses Pemasangan sensor Thermocouple yang berada ditengah empat batang SiC	63
Gambar 3. 12 Proses Pemasangan dan Penempatan SSR-40DA	63
Gambar 3. 13 Pemasangan Alumunium Oksida untuk Reflektor Panas	64
Gambar 4. 1 Pengukuran Output Tegangan Catu Daya Menggunakan Multimeter...	68
Gambar 4. 2 Pengukuran Output Arus pada Catu Daya	69
Gambar 4. 3 Pengukuran Resistansi pada SiC	70
Gambar 4. 4 Grafik Respon Sistem Open Loop Furnace untuk Memperoleh Karakteristik Sistem.....	78
Gambar 4. 5 Grafik Respon Sistem Furnace dengan Lambda Tuning	79
Gambar 4. 6 Grafik Respon Setpoint 200°C	81
Gambar 4. 7 Grafik Respon Setpoint 400°C	83
Gambar 4. 8 Grafik Respon Setpoint 600°C	85
Gambar 4. 9 Grafik Respon Setpoint 800°C	87

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Spesifikasi Thermocouple Tipe-K	16
Tabel 2. 2 Spesifikasi PSU 12V 10A yang digunakan untuk suplai ke sistem kontrol	22
Tabel 2. 3 Spesifikasi Buck Converter XL4015 untuk menurunkan tegangan PSU 12VDC	24
Tabel 2. 4 Spesifikasi MAX6675	27
Tabel 2. 5 Spesifikasi ESP32-S3	34
Tabel 2. 6 Spesifikasi SSR-40 DA.....	36
Tabel 3. 1 Kebutuhan bahan mekanikal pada sistem.....	49
Tabel 3. 2 Penggunaan pin I/O pada ESP32-S3	57
Tabel 3. 3 Estimasi Perhitungan Transmisi dari Sumber Daya ke Elemen Pemanas .	58
Tabel 3. 4 Estimasi Perhitungan Daya yang ada pada sistem kontrol	58
Tabel 4. 1 Pengujian Output Pengatur Tegangan AC	66
Tabel 4. 2 Pengujian <i>Power supply</i> Tanpa Beban.....	68
Tabel 4. 3 Pengujian Power supply Dengan Beban.....	68
Tabel 4. 4 Tabel Pengujian Respon Silicon Carbide	70
Tabel 4. 5 Tabel Pengukuran pada SiC 1 (1.5 Ω)	71
Tabel 4. 6 Tabel Pengukuran pada SiC 2 (1.3 Ω)	72
Tabel 4. 7 Tabel Pengukuran pada SiC 3 (1.5 Ω)	73
Tabel 4. 8 Tabel Pengukuran pada SiC 4 (2.7 Ω)	74
Tabel 4. 9 Tabel Perbandingan Data Sensor Thermocouple.....	75
Tabel 4. 10 Tabel Output TPC Setpoint 200°C.....	82
Tabel 4. 11 Tabel Output TPC Setpoint 400°C.....	84
Tabel 4. 12 Tabel Output TPC Setpoint 600°C.....	86
Tabel 4. 13 Tabel Output TPC Setpoint 800°C.....	88
Tabel 4. 14 Tabel Performa Sistem pada Variasi Setpoint.....	89

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Percobaan PID dengan Setpoint 200°C	97
Lampiran 2. Percobaan PID dengan Setpoint 400°C	99
Lampiran 3. Percobaan PID dengan Setpoint 600°C	101
Lampiran 4. Percobaan PID dengan Setpoint 800°C	103
Lampiran 5. Pengujian Keluaran Pengatur Tegangan AC dan pembacaan PZEM .	105
Lampiran 6. Proses Kalibrasi Sensor Thermocouple dibandingkan dengan Thermogun	107
Lampiran 7. Datasheet Solid State Relay 40-DA	109
Lampiran 8. Datasheet Buck Converter XL4015	110
Lampiran 9. Datasheet Modul MAX6675	111
Lampiran 10. Perhitungan penentuan parameter PID dengan Lambda Tuning	112
Lampiran 11. Contoh Perhitungan PID menjadi output persentase dan konversi metode TPC	113
Lampiran 12. Perhitungan dan Analisis Awal Perancangan Perangkat Lunak	114