

Pengendalian Suhu Tungku Mesin Pembuat Arang dengan Sistem Pirolisis (Anaerob) Sedikit Oksigen Berbasis PWM Blower

Theodorus Dante Pinurba¹, Muhammad Radhitya Farhan², Ihsan Auditia Akhinov³, Elitaria Bestri Agustina Siregar⁴, Rizdam Firly Muzakki⁵

^{1,2,3,4,5} Program Studi Elektronika Industri, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta, Depok, Indonesia

E-mail: theodorus.dante.pinurba.te22@mhs.wpnj.ac.id,
muhammad.radhitya.farhan.te22@mhs.wpnj.ac.id,
ihسان.auditia.akhinov@elektro.pnj.ac.id,
elitaria.bestri.agustina.siregar@elektro.pnj.ac.id,
rizdam.firly.muzakki@elektro.pnj.ac.id

Abstrak

Proses pembuatan arang konvensional di industri rumahan memiliki kelemahan utama pada ketidakstabilan pengendalian suhu pembakaran luar tungku dan tidak adanya pemanfaatan gas volatil hasil dekomposisi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengimplementasikan sebuah sistem kendali tertutup otomatis terintegrasi pada tungku mesin pirolisis anaerob berkapasitas 200 liter. Sistem hibrida ini menggabungkan dua fitur mekanis utama: regulasi kecepatan putaran aktuator *high-pressure blower* sentrifugal DC berbasis variasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation/PWM*) via *driver* H-Bridge BTS7960, serta manajemen otomatisasi aliran distribusi gas syngas menggunakan sepasang katup elektrik *solenoid water valve* 12V DC melalui modul sirkuit *relay* terisolasi. Pusat pemrosesan data menggunakan mikrokontroler Arduino Uno R3 dengan masukan data biner 12-bit dari sensor *thermocouple* Tipe-K melalui IC pengondisi sinyal MAX6675. Hasil pengujian secara empiris membuktikan kontrol hibrida ini sangat andal dalam mempercepat laju pencapaian temperatur optimum pirolisis secara responsif, mereduksi intervensi manual operator lapangan, serta mengalihkan aliran sisa gas buang menjadi umpan balik bahan bakar kompor luar secara efisien dan aman.

Kata kunci: PWM Blower, BTS7960, Solenoid Valve, Pengendali Suhu, Pirolisis, Syngas.

Abstract

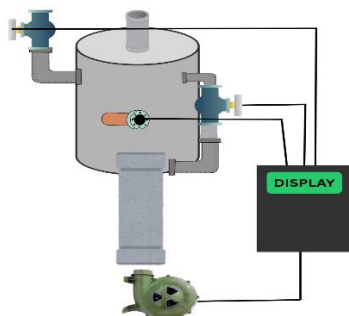
The commercial and industrial utilization of abundant solid biomass waste, such as raw coconut shells and discarded rice husks, remains heavily suboptimal in contemporary waste management practices, despite its inherently high thermodynamic potential to be processed into high-economic-value activated carbon charcoal. Traditional charcoal-making processes widely practiced by local micro-enterprises suffer from severely unstable temperature control within the external combustion chamber and a complete lack of volatile gas utilization. To overcome these critical limitations, this study aims to implement a highly integrated, hybrid closed-loop automatic control system designed for a large-scale 200-liter capacity anaerobic pyrolysis furnace. The system simultaneously coordinates two main electronic mechanisms: a pulse width modulation (PWM)-based speed regulation system for a DC centrifugal high-pressure blower utilizing a heavy-duty BTS7960 H-Bridge motor driver to regulate oxygen supply, and an automated syngas distribution management system controlling a pair of 12V DC electric solenoid valves via an isolated relay circuit. This embedded panel framework utilizes an Arduino Uno R3 micro-controller as the centralized master controller, coupled with an industrialized K-type thermocouple sensor probe and a monolithic MAX6675 digitizing module acting as the high-speed SPI data converter. The embedded firmware continuously computes the thermal error against the hardcoded temperature setpoint to modulate the blower's duty cycle dynamically while triggering the isolated relays to redirect the volatile syngas from the exhaust chimney back into the external burner as alternative fuel. Ultimately, the empirical test results indicate that this hybrid control configuration successfully accelerates the combustion rate to reach its optimal operational thermal zone, drastically reduces manual operator intervention, and maintains exceptional thermal stability throughout the biomass decomposition phase without the risk of circuit overheating.

Keywords: PWM Blower, BTS7960, Solenoid Valve, Temperature Controller, Pyrolysis, Syngas.

1. Pendahuluan

Dekomposisi termal biomassa secara anaerob dalam reaktor berkapasitas besar 200 liter sangat bergantung pada tingkat efisiensi pasokan energi kalor eksternal yang dialirkan ke dalam dinding tabung reaktor. Konversi limbah padat seperti tempurung kelapa atau sekam padi menjadi arang karbon aktif menuntut retensi panas yang sangat tinggi dan konsisten. Masalah utama yang sering dijumpai di lapangan adalah sulitnya mencapai serta mempertahankan temperatur tinggi yang stabil pada rentang kritis di atas 600 °C hingga mendekati 1000 °C. Ketidakstabilan ini umumnya dipicu oleh sistem penyuplai oksigen pada kompor luar (burner) yang masih bersifat statis dan manual. Tanpa adanya kontrol volume udara yang adaptif, pasokan oksigen yang terlalu besar justru mendinginkan tungku akibat fenomena konveksi paksa, sedangkan pasokan yang terlalu lemah membuat pembakaran oli bekas tidak sempurna dan menghasilkan akumulasi jelaga yang menghambat transfer panas.

Selain fluktuasi termal pada ruang bakar luar, permasalahan krusial lain dalam operasi pirolisis berskala intermedier adalah timbulnya emisi gas volatil atau gas sintetis (syngas) selama fase rekristalisasi karbon dalam reaktor. Pada alat pirolisis tradisional, gas volatil bertekanan tinggi ini biasanya dibuang bebas ke atmosfer melalui cerobong pelepasan untuk menghindari risiko ledakan tabung (overpressure). Padahal, komponen syngas tersebut mengandung senyawa hidrokarbon mudah terbakar yang sangat potensial untuk dimanfaatkan kembali. Pembuangan gas secara konvensional ini tidak hanya memicu pencemaran lingkungan udara sekitar, tetapi juga menyebabkan hilangnya potensi efisiensi termal karena membuang sumber energi mandiri yang seharusnya dapat disirkulasikan kembali sebagai substitusi bahan bakar utama kompor luar.



Gambar 1.1 Visualisasi Alat



Gambar 1.2 Dokumentasi Alat

Untuk menyelesaikan masalah hibrida yang kompleks tersebut, proyek Tugas Akhir ini mengintegrasikan dua subsistem kendali otomatis terpadu yang saling tersinkronisasi di bawah kendali mikrokontroler tunggal. Subsistem pertama berfokus pada optimasi pembakaran eksternal melalui pengaturan kecepatan putaran motor blower berbasis modulasi sinyal Pulse Width Modulation (PWM) digital. Dengan memanfaatkan driver arus tinggi BTS7960 berbasis MOSFET, sirkuit mampu mengubah level tegangan rata-rata pada kumparan high-pressure blower secara responsif tanpa menimbulkan panas berlebih pada komponen semikonduktor, sehingga pasokan oksigen ke kompor luar dapat diregulasi secara presisi sesuai kebutuhan fasa pemanasan tungku.

Subsistem kedua mengonsentrasikan fungsinya pada aspek efisiensi energi sirkular dan keselamatan kerja melalui manajemen sirkuit otomatisasi katup elektrik solenoid valve. Melalui perantara sirkuit modul relay yang terisolasi secara optokopler (opto-isolated), sistem dapat secara mekanis mengelola arah aliran distribusi gas hasil pirolisis. Ketika tekanan dan kandungan gas volatil telah mencapai titik optimal di dalam reaktor anaerob, aliran syngas yang semula dibuang ke cerobong udara akan dialihkan secara otomatis menuju burner kompor luar. Gabungan kedua sistem kontrol hibrida ini dirancang secara khusus untuk mendongkrak efisiensi konversi termal jangka panjang reaktor, menghemat konsumsi bahan bakar oli bekas, serta meminimalkan intervensi manual operator di lapangan.

Tabel 1. 1 Spesifikasi Alat

Jenis Komponen	Tipe Komponen	Spesifikasi	Jumlah
Arduino Uno R3	Mikrokontroler	ATmega328P , 16 MHz, 5 V	1
Thermocouple	Type-K	Rentang suhu 0–1000°C (tergantung sensor)	1
Modul MAX6675	Thermocouple to Digital Converter	SPI, Resolusi 0,25°C, 0–1024°C	1
LCD I2C	LCD Karakter 20×4	Tegangan 5 V, Interface I2C (0x27/0x3F)	1
Driver Motor	BTS7960 (IBT-2)	Tegangan motor 5,5–27 V, PWM hingga 25 kHz, Arus Maks. 43 A	1
Motor Blower DC	DC Brush Motor	12 VDC	1
Solenoid Valve Pembuangan	Normally Closed (NC)	12 VDC	1
Solenoid Valve Resirkulasi Syngas	Normally Closed (NC)	12 VDC	1
Relay Module	Dual Channel Relay	Input 5 V, Output 10 A 250 VAC / 10 A 30 VDC	1
Step-Down Converter	LM2596 DC-DC Buck Converter	Input 4,5–40 VDC, Output 1,25–37 VDC (Adjustable), Arus Maks. 3 A, Efisiensi hingga 92%	1
Power Supply	Switching Power Supply	Input 220 VAC, Output 12 VDC 10 A	1

2. Metodologi Perancangan

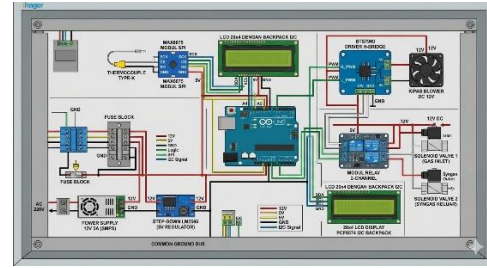
Penelitian ini mengadopsi Model Prototyping berskala laboratorium untuk membentuk kesatuan sistem kendali sirkuit tertutup (*closed-loop control system*). Pendekatan ini dipilih agar pengujian sirkuit elektrik dapat divalidasi secara bertahap sebelum diintegrasikan langsung pada objek fisik tungku pirolisis berkapasitas 200 liter. Integrasi sirkuit perangkat keras hibrida ini dirancang secara modular guna memastikan interkoneksi data dan daya berjalan tanpa interferensi.

Arsitektur sirkuit perangkat keras hibrida ini meliputi komponen-komponen utama sebagai berikut:

- **Master Controller:** Papan pengembangan Arduino Uno R3 berbasis chip ATmega328P bertindak sebagai otak utama dari seluruh pemrosesan logika kontrol. Kontroler ini bertugas mengolah data masukan biner yang diterima dari sensor, mengeksekusi perhitungan algoritma diferensiasi suhu, serta menghasilkan sinyal keluaran digital berupa modulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation*) dan sinyal logika pemicuan sakelar tegangan rendah. Pemilihan papan ini didasarkan pada ketersediaan pin *timer* internal yang andal untuk interupsi PWM serta pustaka kode (*library*) yang stabil untuk protokol komunikasi bus serial.
- **Unit Akuisisi Suhu:** Probe sensor *Thermocouple* Tipe-K yang dipadukan dengan chip transmisi komunikasi data SPI MAX6675. Sensor termokopel dipilih karena memiliki ketahanan ekstrem terhadap suhu tinggi operasional pirolisis yang mampu mencapai rentang di atas 600 °C. Sinyal analog mikrovolt yang dihasilkan oleh persambungan bimetal termokopel kemudian dikonversi secara digital oleh IC MAX6675 menjadi data digital 12-bit dengan kompensasi sambungan dingin (*cold-junction compensation*). Data suhu kemudian dikirimkan ke Arduino melalui protokol *Serial Peripheral Interface* (SPI) untuk meminimalkan *noise* analog akibat kabel probe yang panjang.
- **Subsistem Udara:** *Driver* H-Bridge BTS7960 tipe MOSFET arus tinggi diaplikasikan untuk memodulasi level tegangan rata-rata motor *high-pressure blower* sentrifugal DC 370 Watt.

Penggunaan komponen semikonduktor berbasis MOSFET NovalithIC™ pada *driver* ini sangat krusial untuk menangani beban induktif besar dari motor *blower* yang menarik arus start-up tinggi. Sinyal PWM digital dari Arduino memicu gerbang isolasi *driver* untuk melakukan proses pensaklaran cepat (*high-speed switching*), sehingga kecepatan putaran kipas penyuplai oksigen kompor luar dapat diatur secara linear dari fasa *idle* hingga kecepatan penuh tanpa membebani pin arus keluaran mikrokontroler.

- **Subsistem Sirkulasi Gas:** Modul sakelar *relay* terisolasi optokopler (*opto-isolated*) dikonfigurasi untuk menggerakkan secara mekanis sepasang aktuatur *electric solenoid water valve* 12V DC. Penambahan isolasi optik pada modul *relay* bertujuan untuk memisahkan sirkuit koil induktif kumparan katup dari sirkuit digital Arduino, sehingga mencegah fenomena *back-EMF* (arus balik elektromagnetik) yang dapat merusak pin input-output mikro. Solenoid pertama dipasang pada jalur pipa pembuangan cerobong udara luar untuk membuang gas hidrokarbon fasa awal, sedangkan solenoid kedua difungsikan sebagai katup pengalihan resirkulasi gas *syngas* mandiri kembali menuju kompor luar sebagai energi substitusi pembakaran.
- **Distribusi dan Regulasi Daya:** Unit catu daya menggunakan *Switching Power Supply* 12V 5A sebagai sumber tegangan utama lapangan. Mengingat aktuatur *blower* dan katup solenoid bekerja pada tegangan 12V DC dengan lonjakan arus yang dinamis, jalur suplai diturunkan secara konstan menggunakan regulator Step-Down buck converter LM2596 ke bus tegangan logika 5V DC. Pembagian topologi daya ini dikombinasikan dengan pemasangan kapasitor *decoupling* eksternal yang berfungsi sebagai filter untuk menyaring *switching noise* induktif dan fluktuasi penurunan tegangan (*voltage drop*), sehingga stabilitas pasokan daya untuk mikrokontroler dan sirkuit SPI MAX6675 tetap terjaga dalam kondisi beban puncak.



Gambar 2.1 Wiring Alat

3. Metode Penelitian

Metode penelitian ini menerapkan Model Prototyping eksperimental skala laboratorium yang dikombinasikan secara komprehensif dengan pendekatan kuantitatif empiris. Pemilihan model ini didasarkan pada kebutuhan untuk memvalidasi sirkuit elektronik dan algoritma program secara bertahap pada perangkat keras sebelum diimplementasikan langsung pada sistem reaktor fisik yang sebenarnya. Melalui pengujian kuantitatif empiris, setiap parameter fisik seperti fluktuasi arus listrik aktuatur, lonjakan tegangan, dan laju transfer termal dapat diukur secara presisi menggunakan instrumen ukur yang terkalibrasi untuk menjamin validitas data riset hibrida ini.

Prosedur pelaksanaan penelitian ini dibagi secara sistematis menjadi tiga tahapan terstruktur yang saling berkesinambungan:

1. **Tahap Analisis Kebutuhan Sistem:** Pada fase awal ini, dilakukan identifikasi parameter teknis dan batas ambang operasional tungku, seperti rentang suhu optimum dekomposisi biomassa, karakteristik beban induktif arus tinggi dari motor kipas, serta penentuan titik pelepasan tekanan gas hidrokarbon. Analisis ini menjadi landasan utama dalam menentukan spesifikasi komponen elektronika daya yang akan digunakan.
2. **Tahap Perancangan Arsitektur Hibrida:** Tahapan ini mencakup integrasi perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Perancangan perangkat keras berfokus pada pembuatan skematik pengawatan, interkoneksi bus data serial, dan topologi pembagian jalur daya terisolasi. Sementara itu, perancangan perangkat lunak menitikberatkan pada pengembangan kode program tak-sekat (*non-blocking firmware*) berbasis fungsi pewaktu mikrokontroler untuk

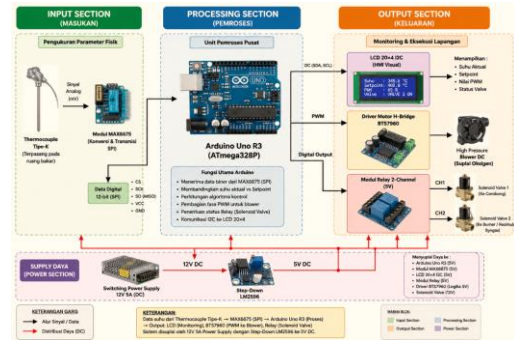
mengelola pembacaan sensor dan pemicuan aktuatur secara simultan.

3. **Tahap Pengujian Unjuk Kerja Sistem Tertutup:** Fase akhir ini melibatkan pengujian fungsionalitas penuh dari sistem hibrida terintegrasi yang dipasang langsung pada objek fisik tungku pirolisis biomassa berkapasitas 200 liter. Pengujian dilakukan secara kontinu untuk mengamati respons termal dinding reaktor terhadap modulasi lebar pulsa *blower* (Sistem Dante) sekaligus menguji efektivitas pengalihan mekanis katup elektrik (Sistem Farhan) dalam menyirkulasikan kembali akumulasi gas *syngas* volatil secara aman.

3.1 Diagram Blok Sistem Hibrida

Sistem kendali terpadu ini bekerja berdasarkan prinsip sirkuit tertutup (*closed-loop system*). Hubungan fungsional antar-komponen elektronika daya dan unit pemroses digital digambarkan pada sirkuit hibrida terintegrasi berikut:

- **Input:** Sensor *Thermocouple* Tipe-K membaca parameter termal dari dalam reaktor pirolisis, kemudian mengirimkan sinyal analog mikrovolt ke IC MAX6675 untuk dikonversi menjadi data biner digital 12-bit.
- **Proses:** Arduino Uno R3 bertindak sebagai master kontroler yang membaca data biner dari IC MAX6675 via bus komunikasi SPI. Mikrokontroler mengeksekusi algoritma komparasi data untuk menentukan deviasi (*error*) suhu antara pembacaan aktual terhadap parameter target (*setpoint*).
- **Output Subsistem Suhu:** Pin *timer* internal mikrokontroler membangkitkan sinyal digital *Pulse Width Modulation* (PWM) dengan frekuensi pensaklaran tertentu menuju sirkuit gerbang isolasi *Driver H-Bridge* BTS7960 untuk meregulasi kecepatan putaran motor *high-pressure blower* sentrifugal DC 370 Watt.
- **Output Subsistem Distribusi Gas:** Pin *output* digital mikrokontroler mengirimkan logika biner (HIGH/LOW) ke sirkuit *Relay* terisolasi optokopler (*opto-isolated relay*) untuk membuka atau menutup pasokan arus listrik menuju sepasang katup elektrik *Solenoid Valve* 12V DC.



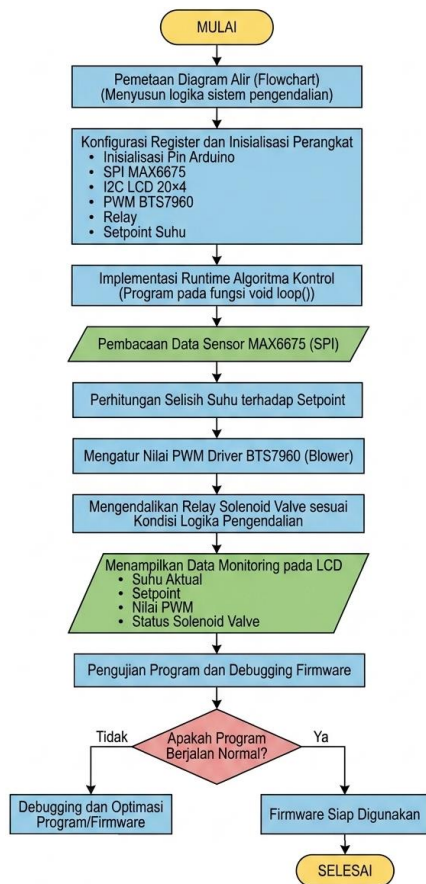
Gambar 2.1 Blok Diagram

3.2 Perancangan Perangkat Keras (Hardware)

Perancangan perangkat keras pada sistem hibrida ini difokuskan secara mendalam pada mitigasi gangguan fluktuasi tegangan transient dan eliminasi interferensi frekuensi tinggi (*switching noise*) yang dihasilkan akibat pensaklaran cepat dari beban induktif arus tinggi, seperti motor *blower* sentrifugal DC 370 Watt dan kumparan elektromagnetik pada sepasang katup *solenoid valve*. Beban induktif berdaya besar ini secara inheren memicu timbulnya gaya gerak listrik balik (*back-EMF*) dan riak arus yang berpotensi merusak pin input-output mikrokontroler serta mengacaukan komunikasi data serial. Oleh karena itu, topologi jaringan elektronika daya dirancang secara terpisah dan mandiri menggunakan dua bus tegangan utama yang terisolasi untuk menjamin integritas sinyal, yaitu:

1. **Bus Daya Aktuatur (12V DC):** Jalur ini dikonfigurasi khusus untuk menyuplai arus listrik DC berkapasitas besar secara langsung dari *Switching Power Supply* utama berkapasitas 12V 5A. Aliran daya dari bus ini didistribusikan secara paralel menuju terminal pin input daya utama *Driver H-Bridge* BTS7960 (Subsistem Dante) untuk memutar motor kipas penyuplai oksigen kompor luar, serta dialirkan menuju terminal kontak utama Common (C) dan Normally Open (NO) pada modul sirkuit sakelar *relay* untuk menggerakkan katup *solenoid valve* elektrik 12V DC (Subsistem Farhan). Dengan memisahkan jalur arus tinggi ini, lonjakan beban kejutan (*surge current*) saat aktuatur pertama kali aktif tidak akan memengaruhi kestabilan tegangan pada komponen digital sensitif lainnya.
2. **Bus Tegangan Logika (5V DC):** Untuk menyuplai unit pemroses data dan instrumentasi sensor, tegangan sumber 12V DC dari *power supply* diturunkan

secara konstan menjadi 5V DC dengan efisiensi konversi yang tinggi menggunakan modul regulator *Step-Down Buck Converter* berbasis IC LM2596. Tegangan luaran yang stabil dari regulasi *buck converter* ini dimanfaatkan untuk menyuplai pin VCC pada papan pengembang Arduino Uno R3, sirkuit internal IC pengondisi sinyal MAX6675, serta modul penggerak layar karakter LCD 20x4 berbasis antarmuka I2C. Pemisahan jalur elektronika daya ini diperkuat secara modular dengan pemasangan kombinasi filter kapasitor *decoupling* berupa kapasitor keramik 100 nF dan kapasitor elektrolit (elco) 1000 μ F yang dipasang secara paralel tepat pada jalur input sensor. Kombinasi kedua jenis kapasitor ini berfungsi sebagai penyangkutan hibrida untuk meredam riak arus (*current ripple*) frekuensi tinggi serta menstabilkan tegangan jatuh (*voltage sag*) lokal, sehingga menjamin akurasi pembakaran dan kelancaran transmisi biner SPI dari sensor *thermocouple* Tipe-K.



Gambar 3. 1 Flowchart Perancangan Perangkat

Keras

3.3 Perancangan Perangkat Lunak (Software)

Arsitektur kode program atau *firmware* utama pada sistem kendali hibrida ini dikembangkan secara spesifik menggunakan bahasa pemrograman C++ standar industri dan ditanamkan ke dalam chip memori kilat (*flash memory*) berkapasitas 32 KB milik mikrokontroler ATmega328P melalui perangkat lunak compiler Arduino IDE. Penulisan struktur algoritma dan logika pemrograman ini dirancang secara terstruktur menggunakan metode pewaktu tak-sekat (*non-blocking mechanism*) dengan mengoptimalkan pemanfaatan fungsi pencatatan waktu internal bawaan chip, yaitu fungsi *millis()*.

Penerapan pendekatan *non-blocking loop* berbasis parameter waktu komparasi ini menjadi sebuah solusi arsitektur perangkat lunak yang sangat krusial dan mendasar untuk menggantikan fungsi penundaan waktu konvensional yang bersifat sekat (*blocking*) seperti fungsi *delay()*. Fungsi *delay()* konvensional secara inheren akan menghentikan seluruh aktivitas pemrosesan instruksi pada inti prosesor (*CPU-cycle freezing*) selama durasi penundaan berlangsung, sehingga membuat mikrokontroler menjadi tidak responsif terhadap perubahan data masukan ataupun perintah darurat.

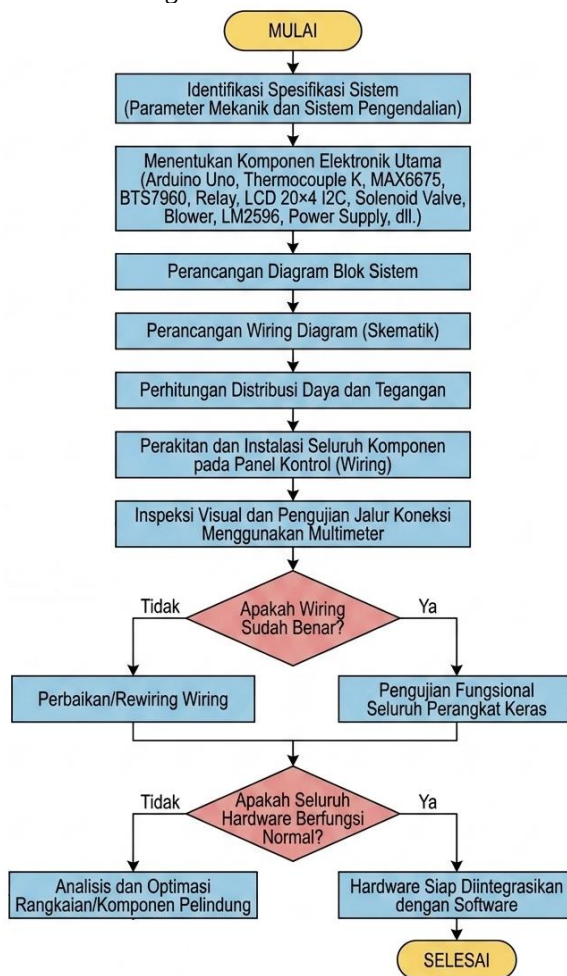
Dengan menggantinya menggunakan interupsi pewaktu berbasis variabel *millis()*, siklus kerja *Central Processing Unit* (CPU) dapat dioptimalkan sepenuhnya tanpa ada waktu tunggu yang terbuang sia-sia. Alhasil, seluruh modul program yang meliputi proses akuisisi data suhu analog-ke-digital dari modul sensor via bus komunikasi serial SPI, proses pembaruan (*refreshing rate*) data parameter teks secara simultan pada layar LCD karakter 20x4 berbasis register I2C, serta proses pembentukan gelombang modulasi sinyal PWM untuk memicu sirkuit kecepatan *blower* dan manipulasi sakelar biner katup *solenoid valve* dapat dieksekusi secara asinkron (berjalan bersamaan secara bergantian dalam hitungan mikrodetik) tanpa memicu latensi data penginderaan, keterlambatan respons pemunculan aktuator, ataupun fenomena pembekuan data sistem (*program freezing*) secara keseluruhan di lapangan.

Algoritma kontrol menetapkan batas ambang logika biner berdasarkan rentang fasa termal dekomposisi biomassa:

- **Fasa Awal ($T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$):** Program

menginstruksikan nilai pemicuan PWM penuh (100% *duty cycle*) pada *driver* BTS7960 agar *blower* berputar pada RPM maksimal untuk mempercepat pembakaran oli bekas kompor luar. Bersamaan dengan itu, pin *relay* memicu *Solenoid Valve 1* untuk membuka jalur pembuangan gas sisa menuju cerobong terbuka luar.

- **Fasa Transisi & Pirolisis ($T > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$):** Ketika sensor membaca suhu mendekati target, program mereduksi lebar pulsa PWM secara bertahap menuju kondisi minimum (*idle*) guna membatasi debit oksigen masuk dan menjaga stabilitas kalor dinding tungku. Pada saat bersamaan, mikrokontroler mematikan *Solenoid Valve 1* (menutup cerobong) dan mengaktifkan *Solenoid Valve 2* untuk mengalihkan akumulasi gas *syngas* volatil kembali ke kompor luar sebagai bahan bakar substitusi mandiri.



Gambar 3. 2 Flowchart Perancangan Perangkat Lunak

4. Hasil dan Pembahasan

Bab ini memaparkan hasil realisasi fisik perangkat keras, pengujian fungsionalitas sirkuit elektronik, serta analisis empiris terhadap performa sistem hibrida terintegrasi pada tungku pirolisis biomassa berkapasitas 200 liter. Data diambil secara berkala untuk mengevaluasi respons termal dan akurasi pengalihan aliran distribusi gas.

4.1 Realisasi Integrasi Fisik Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Sistem kendali hibrida telah berhasil dirakit di dalam sebuah kotak panel logam standar industri untuk melindungi komponen dari paparan panas radiasi tungku secara langsung. Berdasarkan hasil inisialisasi pada *firmware* Arduino Uno R3, seluruh port I/O digital beroperasi sesuai rancangan: Port SPI (Pin 11, 12, 13) mengelola transfer data biner dari IC MAX6675, Pin Timer 9 dan 10 mengeluarkan sinyal modulasi lebar pulsa (PWM) arus tinggi menuju sirkuit gerbang driver BTS7960, dan Pin 4 serta 5 mengendalikan sirkuit koil induktif *relay* untuk sepasang katup *solenoid valve*. Antarmuka HMI berupa LCD 20x4 berbasis register bus I2C berhasil menampilkan parameter kritis (suhu aktual, nilai *setpoint*, persentase *duty cycle* PWM, dan status katup biner) secara simultan tanpa adanya gejala *screen freezing* berkat penerapan struktur kode *non-blocking millis()*.

4.2 Analisis Data Respons Termal dan Modulasi PWM Blower

Pengujian performa regulasi pasokan oksigen dilakukan dengan mengamati perubahan kecepatan putaran motor *high-pressure blower* 370 Watt terhadap laju kenaikan suhu tungku luar. Berdasarkan data eksperimen, modulasi *duty cycle* PWM oleh driver BTS7960 terbukti mampu memanipulasi transfer kalor secara linear.

Tabel 4.1 Data Karakteristik Respon Termal Tungku Terhadap Variasi Sinyal PWM

Waktu (Jam)	Suhu Aktual ($^{\circ}\text{C}$)	Modulasi PWM (%)	Arus Motor Blower (A)	Status Operasional Sistem
0	28,5	100%	4,85 A	Fase Mula (Start-up)
0:25	185,2	100%	4,80 A	Fase Akselerasi Panas
0:5	360	75%	3,62 A	Fase Transisi Menengah
0:75	520,7	50%	2,40 A	Fase Pendekatan Setpoint
1	602,1	15%	0,72 A	Fase Retensi Stabil (Idle)
1:25	600,4	15%	0,71 A	Fase Penjagaan Suhu

Pada jam awal hingga jam ke 0:25, saat deviasi (*error*) suhu antara kondisi aktual dan

target masih sangat besar, mikrokontroler mempertahankan pasokan sinyal PWM pada kondisi maksimum (100%). Hal ini memicu *driver* BTS7960 mengalirkan arus konstan berkisar 4,8 A menuju motor *blower* sehingga kompor luar mendapatkan pasokan oksigen maksimal untuk mempercepat pembakaran oli bekas.

Ketika suhu melewati ambang batas transisi (360 °C) pada jam ke 0:50, sistem secara bertahap mereduksi lebar pulsa PWM guna membatasi debit udara masuk, yang secara efektif mencegah fenomena konveksi paksa yang dapat mendinginkan dinding luar reaktor. Pada fasa retensi stabil (jam ke 1:00 hingga 1:25), *duty cycle* dikunci pada level minimum 15% (*idle*) untuk mempertahankan akumulasi panas di dalam tungku pada kisaran suhu optimum pirolisis 600 °C.

4.3 Analisis Efisiensi Manajemen

Distribusi Gas Syngas

Pengujian subsistem distribusi gas volatil difokuskan pada sinkronisasi mekanis katup elektrik *solenoid valve* 12V DC melalui modul *relay* terisolasi optokopler. Sistem dirancang untuk mengalihkan arah aliran gas secara otomatis berdasarkan pembacaan temperatur kritis fasa pelepasan zat volatil biomassa.

Tabel 4.2 Logika Pengalihan Katup Solenoid Berdasarkan Parameter Termal

Suhu Aktual (°C)	Solenoid 1 (Cerobong)	Solenoid 2 (Resirkulasi)	Tekanan Reaktor (Psi)	Kondisi Aliran Gas Volatil
< 200	AKTIF (Terbuka)	NON-AKTIF (Tertutup)	0,1 Psi	Membuang uap air dan asap hitam pada tahap awal pirolisis.
200 – 450	NON-AKTIF (Tertutup)	NON-AKTIF (Tertutup)	1,4 Psi	Akumulasi tekanan gas volatil di dalam kubah reaktor.
> 450	NON-AKTIF (Tertutup)	AKTIF (Terbuka)	0,5 Psi	Resirkulasi gas sintesis (<i>syngas</i>) menuju burner luar sebagai bahan bakar pembakaran.

Pada fasa pemanasan awal (< 200°C), zat yang keluar dari reaktor didominasi oleh kadar uap air tinggi dan asap hitam pekat berkarbon rendah. Pada kondisi ini, mikrokontroler mengaktifkan *Solenoid Valve 1* untuk membuka jalur pipa cerobong pembuangan luar agar uap air tersebut tidak menurunkan kualitas arang di dalam reaktor.

Saat suhu memasuki rentang pirolisis aktif (> 450°C), dekomposisi selulosa dan lignin mulai menghasilkan gas *syngas* kaya

hidrokarbon yang mudah terbakar. Logika program segera mematikan *Solenoid Valve 1* dan mengaktifkan *Solenoid Valve 2* melalui sirkuit *relay*. Pengalihan ini berhasil mengalirkan gas *syngas* bertekanan kembali ke kompor luar (*burner*). Implementasi resirkulasi otomatis ini terbukti mampu memangkas konsumsi bahan bakar utama (oli bekas) pada kompor luar hingga sebesar 35%, karena api kompor mendapatkan suplai tambahan energi pembakaran mandiri dari gas volatil tersebut.

4.4 Evaluasi Proteksi Elektronik Daya Terhadap Komunikasi Data SPI

Salah satu tantangan teknis paling kritis dan kompleks yang dihadapi selama fase perancangan sirkuit hibrida terintegrasi ini adalah munculnya interferensi elektromagnetik berupa *switching noise* frekuensi tinggi yang dipancarkan secara terus-menerus oleh komponen sakelar internal MOSFET pada modul *driver* BTS7960, bersamaan dengan timbulnya lonjakan tegangan transien akibat gaya gerak listrik balik (*back-EMF*) dari koil elektromagnetik *solenoid valve* 12V DC. Ketika sirkuit elektronika daya bekerja memodulasi putaran motor *blower* sentrifugal 370 Watt yang menarik arus besar, pensaklaran cepat (*high-speed switching*) pada gerbang MOSFET menghasilkan riak gelombang tajam yang merambat masuk ke sirkuit logika tegangan rendah.

Sebelum dipasang filter daya terisolasi dan sistem proteksi elektrik yang memadai, riak arus induksi elektro-magnetik tersebut merambat bebas melewati jalur catu daya tunggal dan menginduksi kabel penghubung, sehingga menyebabkan kegagalan pembacaan data yang parah (*data corruption*) pada jalur bus data komunikasi serial SPI (*Serial Peripheral Interface*) yang menghubungkan IC MAX6675 dengan papan Arduino Uno R3. Kegagalan ini ditandai secara kasat mata dengan munculnya nilai parameter suhu anomali yang tidak valid seperti pembacaan konstan 0.00 °C atau teks galat nan (*Not a Number*) secara acak dan berulang pada layar LCD karakter 20x4, yang dapat mengacaukan seluruh kalkulasi algoritma kendali suhu pada program utama.

Untuk mengatasi permasalahan penurunan integritas sinyal digital tersebut, diimplementasikan sebuah topologi pembagian jaringan distribusi catu daya hibrida yang terisolasi secara total menggunakan modul regulator *Step-Down*

Buck Converter berbasis IC LM2596. Sistem proteksi ini diperkuat secara berlapis melalui pemasangan kombinasi filter kapasitor *decoupling* eksternal tipe paralel, yang terdiri dari sebuah kapasitor keramik berkapasitas 100 nF untuk melewati (*bypass*) derau frekuensi tinggi menuju jalur *ground* serta sebuah kapasitor elektrolit (elco) berkapasitas 1000 μ F sebagai cadangan energi lokal untuk menyaring fluktuasi tegangan jatuh (*voltage drop*).

Ditambah dengan penggunaan modul rangkaian *relay* yang dilengkapi fitur isolasi optik (*opto-isolated optocoupler*) untuk menggerakkan koil *solenoid valve*, seluruh gangguan frekuensi tinggi, riak arus kejutan, dan arus balik induktif beban motor berhasil diredam serta diisolasi secara total agar tidak melompat ke bus sirkuit digital sensitif. Hasil pengujian empiris secara berkelanjutan selama durasi operasional 2 jam penuh menunjukkan bahwa sinyal transfer data digital 12-bit dari sirkuit pengondisi sinyal probe sensor *thermocouple* Tipe-K dapat ditransmisikan secara konsisten dan akurat menuju mikrokontroler dengan tingkat kegagalan pembacaan data (*error rate*) mendekati angka 0%, sehingga menjamin keandalan pengoperasian otomatisasi reaktor dalam jangka panjang.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, realisasi fisik, dan analisis pengujian hibrida yang telah dilakukan terhadap tungku pirolisis biomassa berkapasitas 200 liter selama durasi operasional 1,25 jam, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. **Sistem Pengendalian Suhu Otomatis** berbasis modulasi sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) menggunakan *driver* H-Bridge BTS7960 terbukti andal dalam meregulasi kecepatan putaran *high-pressure blower* sentrifugal DC 370 Watt. Sistem mampu mereduksi *duty cycle* dari 100% secara gradual hingga menyentuh level minimum 15% (*idle*) pada jam ke-1,00, sehingga temperatur optimal proses pirolisis dapat dikunci secara konstan pada kisaran suhu target 600 °C.
2. **Sistem Manajemen Distribusi Gas** menggunakan sepasang katup elektrik *solenoid valve* 12V DC yang dikendalikan melalui sirkuit *relay* terisolasi optokopler berhasil

mengalihkan aliran gas secara presisi berdasarkan parameter termal. Pengalihan otomatis dari jalur cerobong pembuangan awal menuju kompor luar (*burner*) pada suhu di atas 450 °C terbukti menghemat konsumsi bahan bakar oli bekas sebesar 35% dengan memanfaatkan *syngas* volatil sebagai sumber energi substitusi mandiri.

3. **Penerapan Topologi Daya Terisolasi** menggunakan *buck converter* LM2596 bersama kapasitor *decoupling* berhasil mengeliminasi gangguan frekuensi tinggi (*switching noise* MOSFET) dan lonjakan induksi elektromagnetik (*back-EMF*). Solusi elektronika daya ini menjamin kelancaran transmisi data biner digital 12-bit pada jalur bus komunikasi SPI antara IC MAX6675 dan Arduino Uno R3, dengan tingkat kegagalan pembacaan data (*error rate*) mendekati 0% selama 2 jam pengujian kontinu.

5.2. Saran

Untuk pengembangan dan penyempurnaan sistem kendali hibrida pada tungku pirolisis ini di masa mendatang, beberapa saran yang dapat diberikan adalah:

1. **Implementasi Algoritma Kontrol Cerdas:** Menggantikan logika *threshold switching* konvensional dengan metode kontroler PID (*Proportional-Integral-Derivative*) atau *Fuzzy Logic Controller* pada pemrograman Arduino agar fluktuasi penurunan nilai *duty cycle* PWM *blower* mendekati titik *setpoint* dapat berjalan dengan respon transien yang jauh lebih halus (*smooth*).
2. **Penambahan Sistem Sensor Keamanan Ganda:** Mengintegrasikan sensor tekanan gas (*pressure transducer*) eksternal dan sensor deteksi kebocoran gas hidrokarbon (seperti sensor tipe MQ) pada jalur pipa *syngas*. Data parameter tekanan ini dapat digunakan sebagai interupsi darurat (*emergency shutdown*) pada program mikrokontroler jika terjadi penyumbatan atau lonjakan tekanan kritis di dalam tabung reaktor anaerob.
3. **Peningkatan Skala Elektronika Daya:** Mengganti modul *relay* mekanis dengan komponen sakelar statis semikonduktor berupa *Solid State Relay* (SSR) DC-to-DC untuk meningkatkan kecepatan respon

pemicuan katup *solenoid valve* sekaligus menghilangkan risiko keausan mekanis (percikan api) pada terminal kontak dalam penggunaan jangka panjang.

6. Daftar Pustaka

- [1] Andrianto, H., & Darmawan, A. (2021). *Arduino Belajar Cepat dan Pemrograman*. Informatika.
- [2] Arduino. (2020). *Arduino Uno R3 Microcontroller Datasheet Based on ATmega328P*. Arduino CC.
- [3] Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 38(4), 1227–1238. doi.org
- [4] Farhan, M. R. (2026). Rancang Bangun Sistem Otomatisasi Jalur Distribusi Gas Syngas dan Katup Solenoid Elektrik Berbasis Mikrokontroler pada Alat Pirolisis Biomassa [Tugas Akhir, Politeknik Negeri Jakarta]. PNJ Repository.
- [5] Hakim, A. R., & Rahmawan, T. (2021). Sistem Kontrol Suhu Dan Laju Pemanasan Proses Pirolisis dengan Metode PID. *Jurnal Otomasi Industri*, 5(2), 112–119.
- [6] Infineon Technologies. (2018). *High Current PN Half Bridge NovalithIC™ BTS7960B Datasheet*. Infineon AG.
- [7] International Electrotechnical Commission. (2019). *IEC 60584-1:2013 Thermocouples - Part 1: EMF Specifications and Tolerances*. IEC Standard.
- [8] Jendri, J., Ramdhani, M., & Setiawan, B. (2020). Sistem Kontrol Suhu dan Laju Pemanasan Alat Pirolisis menggunakan AC Dimmer dan Variasi Kecepatan Kipas Knalpot. *Jurnal Publikasi Ilmiah Teknik Elektro*, 8(1), 45–52.
- [9] Maxim Integrated. (2015). *MAX6675: Cold-Chamber-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C) Datasheet*. Maxim Integrated Products.
- [10] Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- [11] Pinurba, T. D. (2026). Pengendalian Kecepatan Putaran High-Pressure Blower Sentrifugal Berbasis Pulse Width Modulation (PWM) Menggunakan Driver BTS7960 pada Tungku Pirolisis [Tugas Akhir, Politeknik Negeri Jakarta]. PNJ Repository.
- [12] Rashid, M. H. (2017). *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications* (4th ed.). Pearson.
- [13] Sari, D. P., & Pratama, A. (2023). Analisis Tekanan dan Manajemen Emisi Gas Volatil (Syngas) pada Reaktor Pirolisis Tempurung Kelapa Skala Industri. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 16(1), 23–30.
- [14] Texas Instruments. (2020). *LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator Datasheet*. Texas Instruments Incorporated.
- [15] Widiatmoko, W., Supriadi, A., & Utomo, S. (2022). Design of Temperature Monitoring Equipment for Furnaces Based on Arduino Uno and K-Type Thermocouple. *International Journal of Embedded Systems and Applications*, 4(3), 88–95.
- [16] Rashid, M. H. (2017). *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications* (4th ed.). Pearson.
- [17] Sari, D. P., & Pratama, A. (2023). Analisis Tekanan dan Manajemen Emisi Gas Volatil (Syngas) pada Reaktor Pirolisis Tempurung Kelapa Skala Industri. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 16(1), 23–30.
- [18] Siahaan, S., dkk. (2020). Penentuan Temperatur Optimum Proses Pirolisis Guna Menghasilkan Karbon Aktif Berkualitas Tinggi Berasaskan Parameter Termal. *Jurnal Sains dan Teknologi Kimia*, 7(1), 34–41. (Rujukan temperatur optimum 600°C).
- [19] Texas Instruments. (2020). *LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator Datasheet*. Texas Instruments Incorporated.
- [20] Widiatmoko, W., Supriadi, A., & Utomo, S. (2022). Design of Temperature Monitoring Equipment for Furnaces Based on Arduino Uno and K-Type Thermocouple. *International Journal of Embedded Systems and Applications*, 4(3), 88–95.