

Rancang Bangun Kompor Biomassa Otomatis Berbasis Sensor Suhu dan Mikrokontroler

Design an Automatic Biomass Stove Based on Temperature Sensors and Microcontrollers

Mareli Telaumbanua^{1*}, Ahmad Ridho Kurniawan¹, Agus Haryanto¹, Raizummi Fil'aini², Febryan Kusuma Wisnu¹, Winda Rahmawati¹

¹Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia.

²Program Studi Teknik Biosistem, Fakultas Teknologi Produksi dan Industri, Institut Teknologi Sumatera, Bandar Lampung, Indonesia

Email*): mareli.telaumbanua@fp.unila.ac.id

Received:

27 November 2024

Revised:

3 March 2025

Accepted:

6 March 2025

Published:

29 March 2025

DOI:

10.29303/jrpb.v13i1.1148

ISSN 2301-8119, e-ISSN

2443-1354

Available at

<http://jrpb.unram.ac.id/>

Abstract: Continuous consumption of fossil fuels can cause fuel prices to rise and potentially cause shortages. One alternative renewable energy that can replace fossil fuels is biomass pellets. The use of manual biomass pellet stoves has constraints in controlling the amount of biomass burned, the amount of heat released by the stove, combustion efficiency, safety, and wasteful use of pellets. The purpose of this study was to develop a biomass stove using an automatic control system as a substitute for gas or electric stoves. This stove has the same principle and working method as gas stoves in general, but the pellet fuel is solid. This technology controls the temperature through the integration of temperature sensors, fan blowers, screw feeders, and heat insulators automatically. The results showed that the stove temperature value with the coefficient of determination value from sensor calibration 1 was $R^2 = 0.9945$, sensor calibration 2 obtained the value $R^2 = 0.9956$, the R^2 value in sensor calibration 3 was 0.9946 , and sensor calibration 4 obtained the value $R^2 = 0.9927$. In the system response test, the device was able to reach a temperature of 300°C in 450 to 780 seconds. Stability testing for setting points 100°C , 200°C , and 300°C were 0.98, 0.82, and 0.53, respectively. The accuracy of the device was 92%. In the execution speed test, it took 2.5 to 4 seconds for the pellets to enter the fuel furnace.

Keywords: automatic; biomass fuel; pellet; stove.

Abstrak: Konsumsi bahan bakar fosil secara terus-menerus dapat menyebabkan harga bahan bakar naik dan berpotensi menimbulkan kelangkaan. Salah satu alternatif energi terbarukan yang dapat menggantikan bahan bakar fosil adalah pelet biomassa. Penggunaan kompor pelet biomassa manual memiliki kendala dalam pengendalian jumlah biomassa yang dibakar, jumlah panas yang dilepaskan tungku, efisiensi pembakaran, keamanan, serta penggunaan pelet yang boros. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan kompor biomassa menggunakan sistem kendali otomatis sebagai pengganti kompor gas atau listrik. Kompor ini memiliki prinsip dan cara kerja yang sama dengan kompor gas pada umumnya, namun bahan bakar pelet berbentuk padat. Teknologi ini mengendalikan suhu melalui integrasi sensor suhu, *fan blower*, *screw feeder*, dan isolator panas secara otomatis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai suhu kompor dengan nilai koefisien determinasi dari kalibrasi sensor 1 adalah $R^2 = 0,9945$, kalibrasi sensor 2 diperoleh nilai $R^2 = 0,9956$, nilai R^2 pada kalibrasi sensor 3 adalah $0,9946$, dan kalibrasi sensor 4 diperoleh nilai $R^2 = 0,9927$. Pada pengujian respon sistem, alat mampu mencapai suhu 300°C dalam waktu 450 sampai 780 detik. Pengujian stabilitas untuk *setting point* 100°C , 200°C , dan 300°C masing-masing adalah 0,98, 0,82, dan 0,53. Akurasi alat sebesar 92%. Pada pengujian kecepatan eksekusi, dibutuhkan waktu 2,5 sampai 4 detik agar pelet masuk ke tungku bahan bakar.

Kata kunci: bahan bakar biomassa; kompor; otomatis; pellet

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Kegiatan eksplorasi bahan bakar fosil dalam skala besar dan meningkatnya konsumsi energi seiring dengan pertumbuhan penduduk menyebabkan persediaan bahan bakar fosil tidak mampu memenuhi kebutuhan masyarakat. Para ahli berpendapat bahwa minyak bumi akan habis sekitar 30 tahun lagi pada tahun 2052, gas alam akan habis sekitar 40 tahun lagi pada tahun 2060 dan batu bara akan habis sekitar 70 tahun lagi pada tahun 2090 (Parinduri & Parinduri, 2020). Produksi minyak bumi Indonesia selama 5 tahun terakhir menunjukkan penurunan, dari 831,06 juta barel pada tahun 2016 menjadi 669,36 juta barel pada tahun 2021. Produksi gas alam Indonesia juga mengalami penurunan selama 5 tahun terakhir, dari 1.403 juta gas pada tahun 2016 menjadi 1.168 juta gas pada tahun 2021 (Kementerian ESDM, 2021). Penggunaan bahan bakar fosil secara terus menerus memberikan dampak negatif terhadap lingkungan seperti meningkatnya emisi gas rumah kaca, meningkatnya suhu bumi dan permukaan air laut sehingga iklim menjadi tidak stabil (Pertamina, 2020).

Seiring dengan keterbatasan sumber daya fosil dan dampak negatif yang ditimbulkan terhadap lingkungan, pemerintah Indonesia telah mendorong pengembangan dan pemanfaatan energi terbarukan sebagai alternatif yang berkelanjutan. Namun, hingga tahun 2020 tingkat realisasi pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia masih relatif rendah yakni sebesar 11,31%. Rendahnya pemanfaatan ini disebabkan oleh biaya produksi energi terbarukan yang belum kompetitif dibandingkan dengan energi fosil serta masih tingginya ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sebagai sumber utama energi nasional (Setyono & Kiono, 2021). Bahan bakar digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi bagi industri, kendaraan, dan kebutuhan masyarakat. Sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan dan melimpah di Indonesia berasal dari limbah biomassa yang memiliki kandungan energi tinggi dalam pembakaran (Brunerová *et al.*, 2019). Pelet kayu dibuat dari limbah penebangan hutan berupa sisa penebangan, cabang dan ranting, limbah industri kayu berupa stek, serbuk gergaji, limbah daun kering, kulit kayu, serta limbah pertanian berupa jerami dan sekam. Beberapa penelitian telah mengembangkan pelet biomassa antara lain pelet kayu (Alpian *et al.*, 2019); pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) (Haryanto *et al.*, 2021) dan pelet dari sekam padi (Asri *et al.*, 2022). Pelet tersebut diperkecil ukurannya dengan cara digiling dan dipadatkan menjadi bentuk silinder dengan diameter 0,8 cm. Proses pembuatan pelet bermutu dilakukan dengan cara torefaksi yang bertujuan untuk menurunkan kadar air dan kadar selulosa serta meningkatkan kadar lignin (Telaumbanua *et al.*, 2024; Haryanto *et al.*, 2021). Pelet yang ditorefaksi suhu 260 °C selama beberapa menit menghasilkan kadar air 8,33% (Purnomo *et al.*, 2022). Pelet biomassa yang dihasilkan melalui proses ini memiliki karakteristik yang lebih baik sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif yang efisien.

Salah satu teknologi yang memanfaatkan energi dari pelet biomassa dalam skala rumah tangga adalah kompor biomassa. Beberapa penelitian telah mengembangkan kompor biomassa sebagai alternatif bahan bakar fosil dengan berbagai bahan baku biomassa yang berbeda. Penelitian Prasetiani *et al.* (2019) merancang kompor gasifikasi dengan teknik gasifikasi Top-Lift Updraft untuk bahan bakar pelet kayu sekam padi, pelet kayu jati dan pelet kayu sengon. Selain itu, penelitian (Zikri *et al.*, 2019) merancang kompor biomassa menggunakan biopelet eceng gondok. Rancangan kompor pelet biomassa lainnya yaitu kompor gasifier SPRERI, dengan emisi gas CO sebesar 3-6 ppm pada jarak 1 m (Panwar, 2009) dan kompor Top-Lit Updraft Natural Draft dengan memanfaatkan konveksi alami, baik untuk aliran udara primer maupun sekunder dengan emisi gas CO sebesar 3,5 g/liter (Roth, 2013).

Saat ini penambahan bahan bakar kompor pelet biomassa masih dilakukan secara manual. Permasalahan yang terjadi adalah pemantauan panas dan pembakaran (pemberian) pelet dilakukan secara terus-menerus sehingga api dalam tungku tetap menyala. Hal ini menyebabkan penggunaan pelet biomassa menjadi lebih boros. Selain itu, penggunaan kompor manual tidaklah mudah, penyalaan kompor lebih rumit, keamanan, dan tingkat kebersihan terhadap lingkungan menjadi faktor dalam menurunkan minat masyarakat sebagai pengguna. Salah satu teknologi yang dapat mengoptimalkan penggunaan pelet dan membantu penggunaan kompor biomassa lebih praktis dengan sensor suhu dan mikrokontroler. Teknologi ini bertujuan untuk memudahkan sortasi dan distribusi benda berat dengan jumlah banyak secara terus menerus. Prinsip ini sama dengan *integrated feed/feeding* dan diatur oleh mikrokontroler (Hayatunnufus & Alita, 2020; Telaumbanua et al., 2019). Keunggulan kompor ini adalah mudah digunakan, hemat bahan bakar dan waktu, serta mudah dalam perawatan. Sistem ini bekerja sama dengan *fan blower* untuk meningkatkan suhu di dalam kompor. Penelitian Lio et al. (2025) telah mengembangkan penggunaan *screw feeder* pada kompor pelet kayu dengan sudut 60° untuk menurunkan emisi gas, mengatur laju aliran pelet dan memodulasi daya termal. Laju aliran pelet dipengaruhi oleh rancang bangun kompor dengan perhitungan kecepatan sudut, diameter sekrup dan ukuran pelet. Variasi panjang pelet 17,5-22,6 mm akan menghasilkan penurunan laju aliran massa sebesar 36% (Wohler et al., 2017). Distribusi ukuran pelet yang tidak seragam menyebabkan adanya fluktuasi laju aliran sehingga rasio bahan bakar dan udara tidak optimal yang menyebabkan terbentuknya polutan. Oleh karena itu, diperlukan informasi mengenai jumlah pelet, waktu eksekusi dan stabilitas kompor biomassa terhadap suhu kompor yang dihasilkan dengan emisi gas.

Penelitian ini dirancang dengan menggunakan *screw feeder* sebagai penghantar pelet menuju ruang bakar. Suhu kompor dapat dinaikkan dan diturunkan dengan menggunakan *fan blower* yang terintegrasi dengan *screw feeder* dan dipantau oleh sensor suhu. Kompor pelet biomassa dirancang dengan mengintegrasikan sistem kendali otomatis pada sensor suhu, *fan blower*, dan isolator panas yang terintegrasi dengan sistem cerdas, sehingga pengambilan keputusan (kendali suhu) dapat lebih cepat, efisien, dan aman sesuai keinginan pengguna. Kompor pelet biomassa pada penelitian ini dirancang secara cerdas dengan menerapkan sensor suhu dan mikrokontroler. Teknologi ini diharapkan dapat memudahkan penggunaan kompor biomassa dan efisiensi bahan bakar pelet biomassa.

Tujuan

Penelitian bertujuan mengembangkan kompor biomassa menggunakan sistem kendali otomatis dalam penambahan bahan bakar pelet sebagai alternatif pengganti kompor gas atau listrik.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

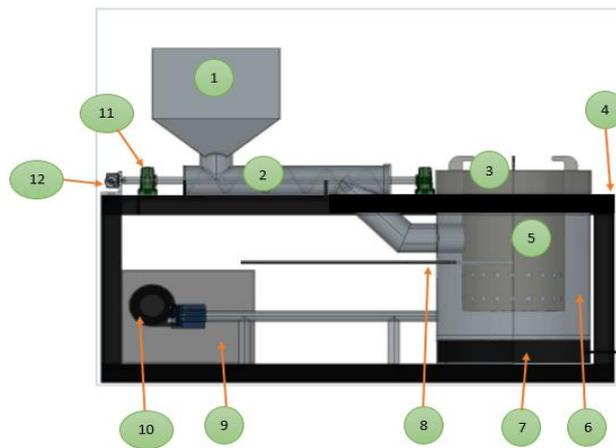
Peralatan yang digunakan adalah termometer non kontak, timbangan, gelas ukur, laptop, alat tulis, seperangkat alat bengkel, dan seperangkat alat listrik. Bahan yang digunakan adalah pelet kayu, pelet TKKS, potongan kayu, mikrokontroler, sensor termokopel tipe K_2 , motor DC 12v, gearbox, *screw feeder*, relay, *fan blower*, plat aluminium, besi siku berlubang, plat besi, pipa ulir, pipa besi, dan modul elektronik lainnya.

Metode

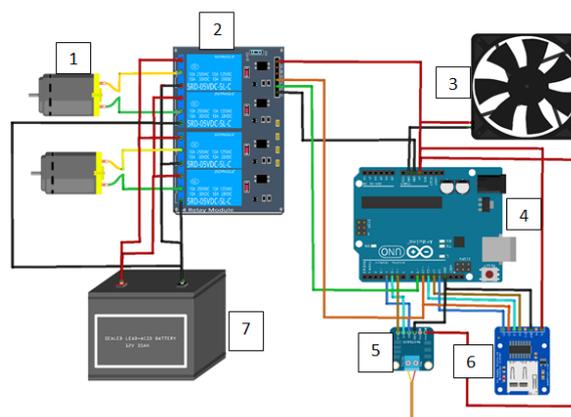
Kegiatan perancangan struktur ini dibagi menjadi dua, yaitu perancangan fisik perangkat kompor dan perancangan sistem kendali otomatis. Struktur kompor biomassa menyerupai struktur fisik kompor gas, yang dapat diatur besar kecilnya nyala api yang

dipancarkan, namun memiliki struktur fisik yang lebih besar untuk alokasi sistem mekanik yang bekerja di dalamnya (Gambar 1).

Pada desain fungsional, sistem dibangun secara otomatis untuk menyalakan api, menaikkan dan menurunkan suhu. Seluruh proses diatur dan diintegrasikan dengan mikrokontroler. *Hopper* berfungsi sebagai tempat penyimpanan pelet biomassa. Motor DC dan *gearbox* sebagai penggerak *screw feeder* untuk menggerakkan pelet biomassa ke dalam tungku. Tungku sebagai tempat pembakaran pelet. Kotak kontrol untuk menaikkan dan menurunkan suhu dalam tungku. *Fan blower* sebagai pendorong oksigen dalam tungku. Mikrokontroler sebagai pusat pengolahan informasi dan pengambilan keputusan untuk mengatur suhu sesuai *setting point*. Kompor pintar ini memiliki tungku yang berbentuk tabung silinder dengan diameter luar 30 cm dan tinggi 50 cm. *Hopper* berukuran 30x30x30cm. Pipa *fan blower* berdiameter 30 mm dengan panjang 40 cm. Pipa ulir berukuran panjang 35 cm. Rangka alat ini terbuat dari *stainless steel* sedangkan tungku kompor terbuat dari alumunium. Berat kompor biomassa adalah kurang dari 8 kg. Skematik rangkaian kontrol kompor biomassa terdapat pada Gambar 2.



Gambar 1. Desain kompor biomassa cerdas (1) *hopper*, (2) *screw feeder*, (3) tempat memasak, (4) rangka besi, (5) lapisan dalam kompor, (6) lapisan luar kompor, (7) wadah abu, (8) penutup ruang bakar, (9) kotak mikrokontroler, (10) *fan blower*, (11) sekrup *screw feeder*, (12) *gearbox*



Gambar 2. Skematik rangkaian sistem kendali (1) motor DC 12 volt, (2) relay 4 channel, (3) *fan blower*, (4) mikrokontroler, (5) modul sensor termokopel, (6) modul micro SD, (7) *power supply*

Pelet biomassa dimasukkan ke dalam *hopper*, kemudian tombol on (aktif) ditekan. *Screw feeder* berputar karena menyatu dengan putaran motor DC. Pelet biomassa masuk ke dalam pipa *screw feeder* kemudian didorong ke dalam tungku kompor sesuai dengan target

suhu yang diinginkan. Terdapat tombol untuk menyalakan kompor dengan menggunakan pemantik listrik otomatis yang dihubungkan dengan kabel nikelin untuk membakar pelet. Suhu dapat dinaikkan atau diturunkan dengan memutar tombol/handle kontrol. Tombol/handle ini terhubung langsung dengan sistem kecerdasan buatan untuk menggerakkan *screw feeder*, *fan blower*, dan *heat isolator* sesuai dengan keinginan pengguna. Saat kompor dimatikan, *heat isolator* akan menutup secara otomatis.

Analisis Data

Kalibrasi sensor bertujuan membandingkan kinerja sensor dan kalibrator dalam kondisi berbeda serta dikontrol. Hasil pengukuran dari sensor dan kalibrator kemudian dimasukkan ke dalam tabel program Microsoft Excel dan digunakan untuk membuat grafik regresi. Nilai sensor yang telah dimasukkan ke dalam persamaan grafik regresi kemudian dilakukan perbandingan kembali menggunakan validator untuk mendapatkan nilai dari *Root Square Mean Square Error* (RMSE) dengan persamaan 1 dan 2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \dots\dots\dots(1)$$

$$RRMSE = \frac{[n^{-1} \sum_{i=1}^n (x-y)^2]^{1/2}}{\frac{1}{n} \sum y} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

- n = jumlah data
- x = data sumbu x
- O_i = nilai observasi ke-i
- y = data sumbu y
- P_i = nilai prediksi ke-i

Respon sistem bertujuan menunjukkan kondisi gangguan dan waktu terhadap kecepatan kinerja sistem. Respon sistem yang dilakukan pengukuran yaitu respon *transient* dan respon *steady state*. Stabilitas bertujuan menilai kemampuan alat dalam mempertahankan kinerja yang konsisten dalam jangka waktu yang lama. Akurasi alat bertujuan membandingkan pembacaan suhu dari sensor dan pembacaan suhu dari alat ukur suhu. Persamaan matematis akurasi pada rumus persamaan 3.

$$Akurasi = \left(\frac{1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (SP - Na_i)}{n} \right)}{SP} \right) \times 100\% \dots\dots(3)$$

Keterangan:

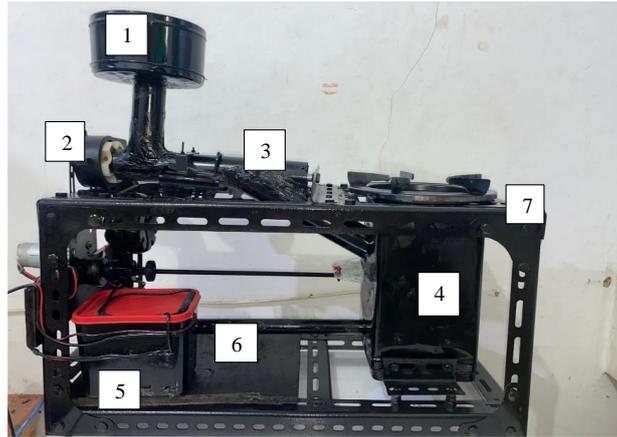
- SP = Nilai setting point
- Na-i = Nilai Aktual ke-i
- n = Jumlah data

Kecepatan eksekusi menunjukkan seberapa cepat kinerja suatu alat terhadap input yang diberikan oleh pengguna. Kecepatan eksekusi dapat diukur dengan mengamati waktu yang diperlukan oleh *screw feeder* untuk mendorong pelet ke dalam tungku kompor. Semakin cepat *screw feeder* dapat mendorong pelet, semakin tinggi kecepatan eksekusinya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancangan Alat

Hasil perancangan kompor pelet terdiri dari *hopper*, dinamo DC, pipa yang berisi *screw feeder*, tungku kompor, kotak mikrokontroler, *fan blower*, rangka kompor, dan tempat penampung abu. Hasil perancangan kompor ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil rancangan kompor pelet (1) *hopper*, (2) *dinamo*, (3) *pipa screw feeder*, (4) *tungku kompor*, (5) *kotak mikrokontroler*, (6) *pipa fan blower*, (7) *rangka kompor*

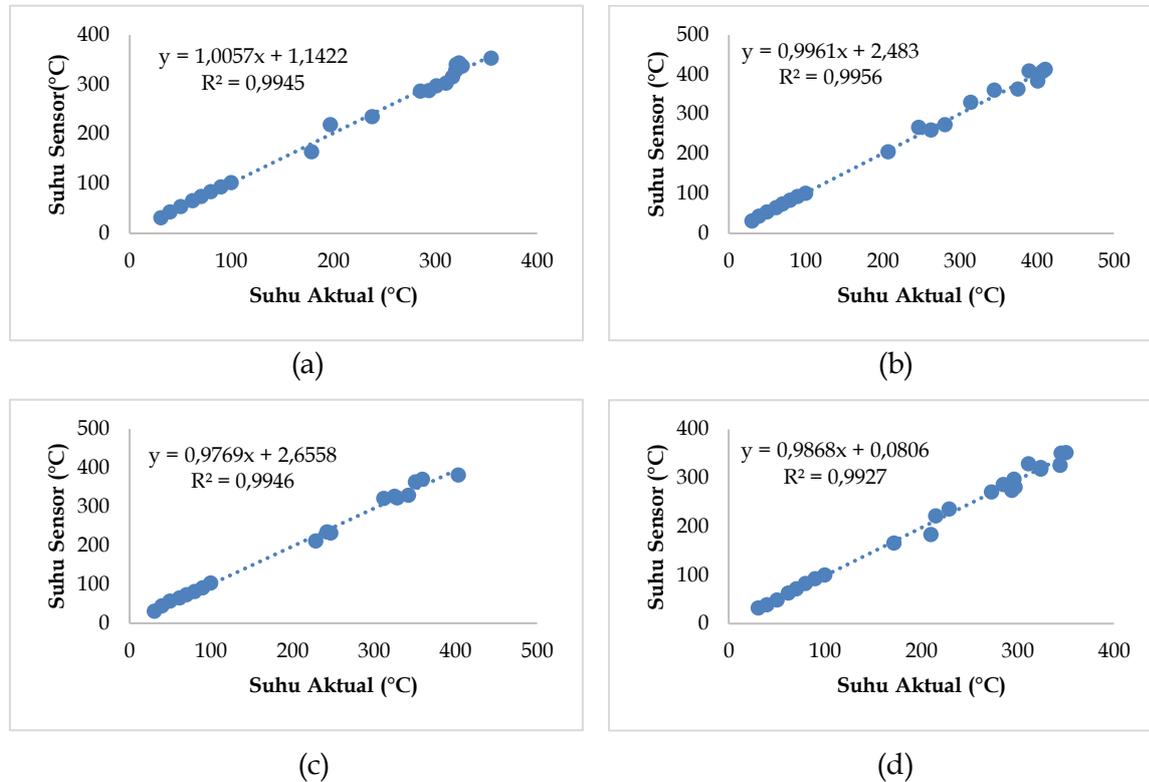
Kerangka kompor memiliki panjang 61 cm, lebar 26,5 cm, dan tinggi 30,5 cm. Tungku kompor terbuat berukuran panjang 14 cm, lebar 17 cm, dan tinggi 17,5 cm. Sekat antara ruang pembakaran dengan tempat penampung abu terdapat dalam tungku kompor. Sekat ini terbuat dari besi yang diberikan lubang-lubang atau celah berongga sehingga menyerupai penyaring agar abu sisa pembakaran dapat jatuh ke tempat penampung abu. Tempat penampung abu berukuran panjang 14 cm, lebar 17 cm, dan tinggi 7 cm. Tinggi total tungku kompor adalah 24,5 cm. *Hopper* pada kompor pelet ini berfungsi sebagai tempat memasukkan pelet. *Hopper* berbentuk tabung silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 8 cm. *Hopper* dihubungkan dengan pipa dengan diameter 4,5 cm dan panjang 10 cm yang tegak lurus dengan pipa yang berisi *screw feeder*. *Hopper* dapat menampung bahan bakar pelet dengan berat 500 hingga 600 gram. *Screw feeder* berada di dalam pipa besi berukuran panjang 27,5 cm dan diameter 4,5 cm. *Screw feeder* ini terintegrasi dengan *dinamo* 12 V DC, dan memiliki kecepatan putaran 139 RPM. *Screw feeder* berfungsi sebagai pendorong bahan bakar dari *hopper* menuju tungku kompor. *Screw feeder* memiliki bentuk menyerupai ulir pada baut dengan panjang 20 cm dan diameter 4 cm.

Fan blower digunakan sebagai aktuator pada kompor yang memberikan udara panas pada tungku kompor sehingga dapat memperbesar api kompor dan meningkatkan suhu. *Fan blower* dihubungkan dengan tungku kompor melalui pipa sepanjang 32,5 cm. Spesifikasi dari *fan blower* ini memiliki output 12 volt DC, dengan arus 2 amp, kecepatan 2500 RPM, berukuran 75 x 75 x 30 mm³, diameter saluran udara 27 mm, dan memiliki kecepatan aliran udara 6 m/s. Jumlah udara yang keluar dari *fan blower* diatur pada level paling besar dengan tujuan untuk mempercepat api agar membesar. Kotak kontrol terbuat dari plastik dengan dimensi 14 x 14 x 8 cm³. Kotak kontrol diletakkan pada bagian bawah dekat dengan *fan blower*, berfungsi untuk mengontrol alat dan suhu melalui program sintaksis dalam Arduino IDE.

Kalibrasi

Kalibrasi bertujuan untuk memastikan nilai pembacaan sensor sesuai dengan standar alat ukur. Alat ukur yang digunakan sebagai kalibrator dan validator untuk sensor termokopel tipe-k. Proses kalibrasi sensor termokopel tipe-k dilakukan dengan mengukur suhu air mendidih hingga diperoleh rentang suhu hingga 100°C. Kalibrasi juga dilakukan untuk suhu tinggi hingga 300°C dengan mengukur suhu pada besi yang dipanaskan dengan lilin. Dengan cara ini, panas yang dihasilkan lilin akan mengenai besi sehingga terjadi perpindahan panas secara konduksi. Sensor termokopel tipe-k dipasang pada besi dan hasil pengukuran sensor termokopel ditampilkan pada LCD I2C yang terhubung dengan

Arduino. Nilai sensor yang ditampilkan pada LCD I2C memiliki akurasi suhu sebesar $0,25^{\circ}\text{C}$, sedangkan kalibrator memiliki akurasi suhu sebesar $0,1^{\circ}\text{C}$. Hasil pengukuran sensor dan kalibrator kemudian dicatat dan diolah ke dalam Microsoft Excel, untuk memperoleh grafik regresi linier dan menghasilkan nilai x (Gambar 4).



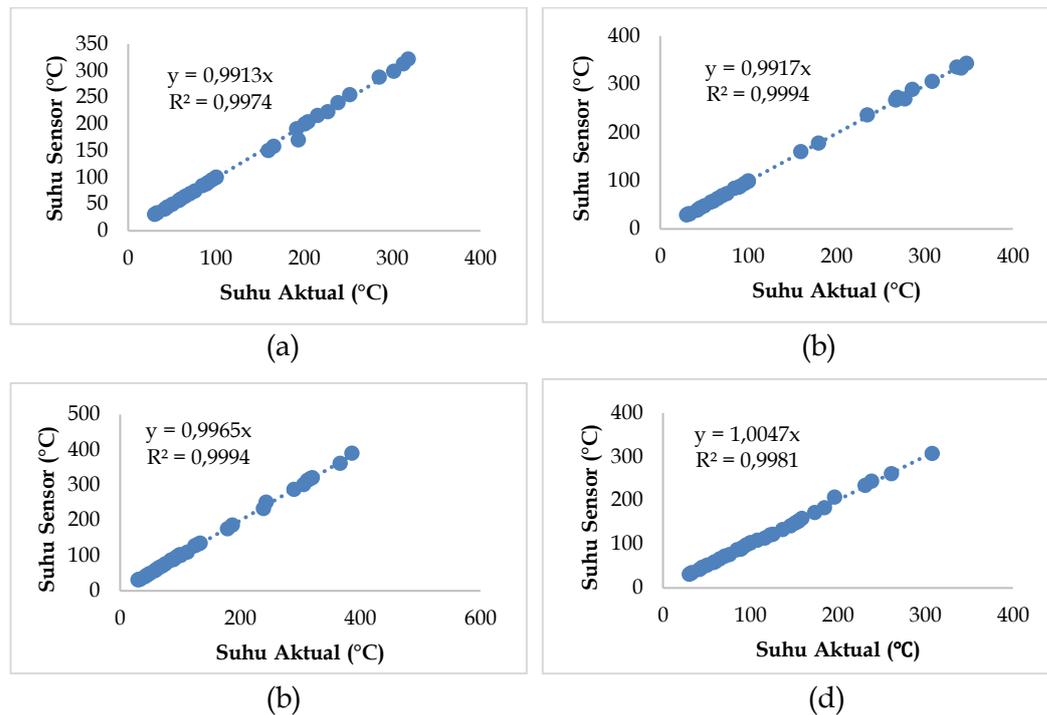
Gambar 4. Kalibrasi sensor 1 (a), sensor 2 (b), sensor 3 (c) dan sensor 4 (d)

Nilai koefisien determinasi kalibrasi sensor 1 adalah $R^2 = 0,9945$ dengan nilai persamaan $y = 1,0057x + 1,1422$. Pada kalibrasi sensor 2 nilai $R^2 = 0,9956$ dengan nilai persamaan $y = 0,9961x + 2,483$. Nilai R^2 pada kalibrasi sensor 3 adalah $0,9946$ dengan nilai persamaan $y = 0,9769x + 2,6558$. Nilai R^2 pada kalibrasi sensor 4 adalah $0,9927$ dengan persamaan $y = 0,9868x + 0,0806$. Koefisien determinasi (R^2) menunjukkan sejauh mana perubahan-perubahan dalam variabel terikat dapat dijelaskan oleh variasi dalam variabel bebas. Nilai R^2 menunjukkan sejauh mana model mampu memprediksi variabel yang diteliti. Hasil penelitian menunjukkan nilai R^2 yang dihasilkan masing-masing sensor pada kalibrasi ini $< 1,000$ dengan rata-rata $0,9943$. Nilai R^2 ini mendekati 1 artinya sensor suhu yang digunakan dapat mengukur suhu aktual dengan baik sesuai dengan kinerja kalibrator. Nilai R^2 dianggap baik jika rentangnya berada antara 0 hingga 1 dimana semakin mendekati 1 maka model semakin akurat artinya hubungan antara sensor dengan kalibrator sangat kuat (Rhamadhani & Saputri, 2023).

Validasi

Validasi dilakukan dengan cara yang sama seperti proses kalibrasi. Nilai sensor yang ditampilkan pada LCD I2C menunjukkan perubahan yang sebelumnya memiliki akurasi $0,25^{\circ}\text{C}$, menjadi berubah setelah kalibrasi sehingga nilai sensor mendekati nilai thermometer sebenarnya. Nilai validasi didapatkan baik dari hasil pengukuran sensor maupun validator berupa termometer termokopel yang direkam kemudian diolah ke dalam Microsoft Excel, hingga didapatkan grafik regresi linier dan menghasilkan nilai x . Selain itu, validasi

dilakukan untuk mendapatkan nilai Root Mean Square Error (RMSE) dari sensor yang digunakan. Grafik validasi sensor ditunjukkan pada Gambar 5.



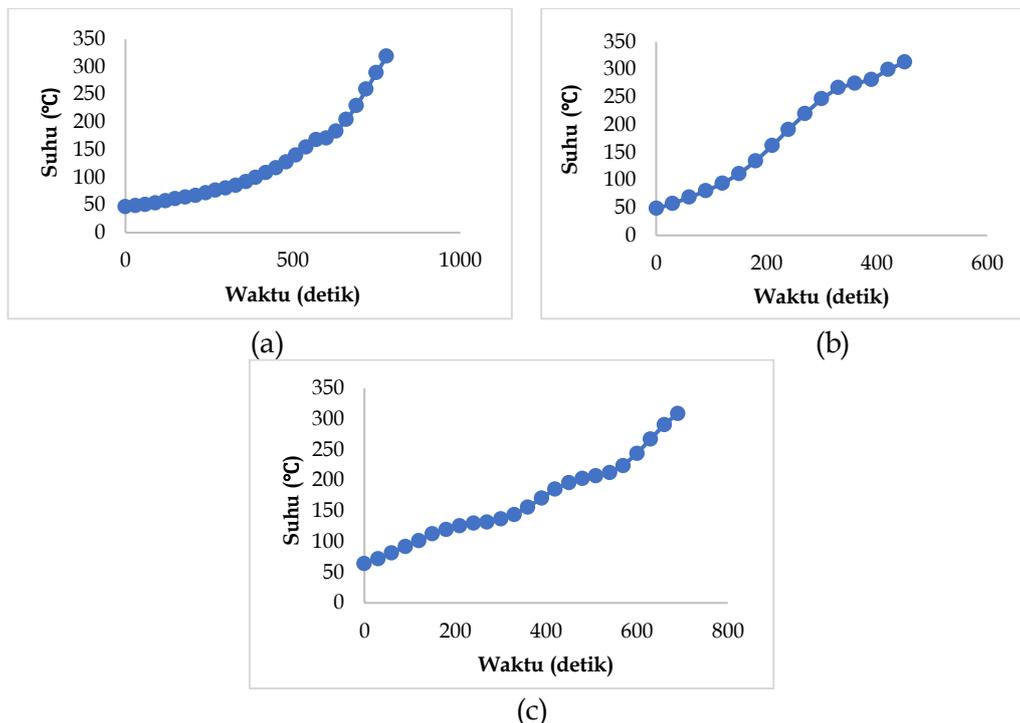
Gambar 5. Validasi sensor 1 (a), sensor 2 (b), sensor 3 (c) dan sensor 4 (d)

Nilai koefisien determinasi dari validasi sensor 1 adalah $R^2 = 0,9992$. Pada validasi sensor 2 diperoleh nilai koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,9998$. Nilai koefisien determinasi yang diperoleh melalui validasi sensor 3 adalah $R^2 = 0,9998$. Validasi sensor 4 diperoleh nilai koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,9995$. Data suhu kemudian dianalisis dan diperoleh nilai RMSE. Pengertian RMSE adalah akar kuadrat dari rata-rata kuadrat kesalahan yang diperoleh dari perhitungan (Prasetyo et al., 2021). RMSE digunakan untuk mengevaluasi perbedaan kinerja model antara periode kalibrasi dan validasi serta sebagai indikator dalam membandingkan performa berbagai model prediksi (Hosseini et al., 2014). Nilai RMSE untuk sensor 1 adalah 4,90, untuk sensor 2 adalah 3,12, untuk sensor 3 adalah 2,81, dan untuk sensor 4 nilai RMSE adalah 3,04. Menurut Faiz et al. (2021) nilai RMSE menunjukkan tingkat kesalahan dalam hasil prediksi, dimana semakin kecil nilai RMSE (mendekati 0), maka prediksi yang dihasilkan semakin akurat. Rata-rata nilai RMSE dalam penelitian ini adalah 3,47, nilai R^2 mendekati nilai 1 sehingga dapat dikatakan bahwa sensor suhu telah sangat mendekati kalibrator atau alat acuan. Nilai RMSE yang kecil mengindikasikan bahwa hasil prediksi suatu model mendekati nilai sebenarnya. Sebaliknya, semakin tinggi nilai RMSE maka semakin rendah tingkat akurasi hasil yang diperoleh (Herwanto et al., 2019). Nilai RMSE yang kecil menunjukkan bahwa penyimpangan data yang terjadi relatif kecil, sehingga model dapat dianggap stabil dan layak digunakan (Rhamadhani & Saputri, 2023).

Respon Sistem

Respon sistem dilakukan untuk mengetahui kecepatan sistem kendali sejak penyalaan awal sistem kendali diberi perintah hingga waktu eksekusi aktuator. Pada pengujian respon sistem ini, pengambilan data dilakukan dengan mencatat setiap kenaikan suhu dari suhu awal hingga suhu 300°C setiap 30 detik dan diulang sebanyak 3 kali (Gambar 6). Respon sistem ulangan 1 terjadi kenaikan suhu yang cukup stabil dari suhu 46,59°C menjadi suhu

167,9°C dalam waktu 570 detik, kemudian pada suhu 170,39°C terjadi kenaikan suhu menjadi suhu 319,4°C selama 600 detik hingga 780 detik. Respon sistem 2 juga mengalami kenaikan suhu yang cukup signifikan dalam waktu 300 detik dari suhu 48,33°C menjadi suhu 246,7°C dan kemudian dari suhu 267,33°C menjadi suhu 313,07°C terjadi kenaikan yang tidak terlalu signifikan namun cukup stabil mulai dari 330 detik sampai 450 detik. Respon sistem 3 menunjukkan adanya peningkatan yang cukup signifikan mulai dari suhu awal 63,99°C menjadi suhu 119,92°C dalam waktu 180 detik, kemudian terjadi peningkatan suhu yang cukup stabil pada suhu 196,49°C menjadi 213,14°C dari waktu 450 detik menjadi 540 detik, kemudian suhu mengalami peningkatan yang cukup signifikan dari waktu 570 detik menjadi 690 detik yaitu dari suhu 224,33°C menjadi 309,34 °C. Proses ini menunjukkan bahwa alat tersebut mampu mencapai suhu 300 °C dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu 300 °C dari suhu awal adalah 450 hingga 780 detik.



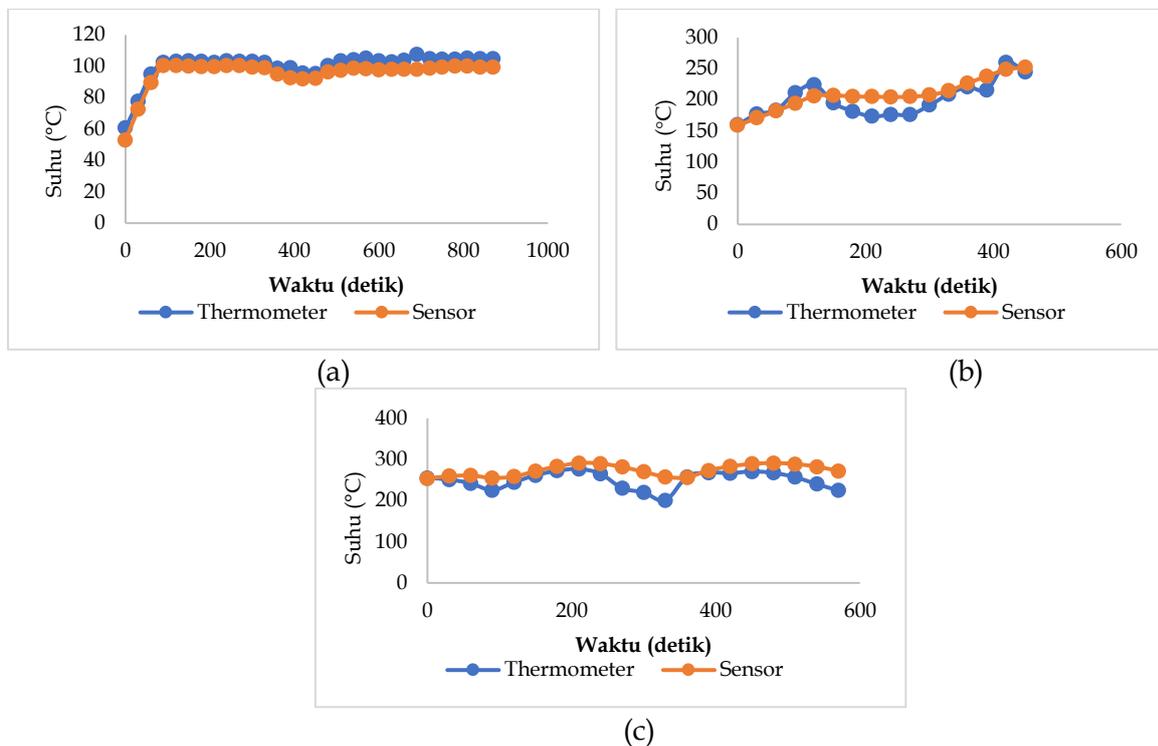
Gambar 6. Respon sistem ulangan 1 (a), respon sistem ulangan 2 (b) dan respon sistem ulangan 3 (c)

Stabilitas

Stabilitas alat bertujuan mengetahui kemampuan suatu alat dalam menghasilkan kinerja yang stabil atau tetap dalam jangka waktu yang lama (Telaumbanua et al., 2021). Alat dapat dikatakan stabil apabila pengaturan suhu tidak terlalu berbeda dengan *setting point* yang telah ditetapkan. Metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai reliabilitas pada penelitian ini menggunakan metode Test Retest dan Parallel menggunakan rumus $=CORREL(array1;array2)$ pada Microsoft Excel, kemudian masukkan nilai x yaitu nilai termometer pada array1 dan nilai y yaitu nilai sensor pada array2, sehingga diperoleh nilai reliabilitas untuk setiap *setting point* nilai sensor. Grafik stabilitas suhu ditunjukkan pada Gambar 7.

Pengambilan data pada *setting point* 100°C dalam waktu 14,5 menit diperoleh nilai RMSE sebesar 5,05 dan nilai reliabilitas sebesar 0,99. Pengambilan data pada *setting point* 200°C dilakukan dalam waktu 7,5 menit, diperoleh nilai RMSE sebesar 17,72 dan nilai reliabilitas sebesar 0,82. Pengambilan data uji stabilitas suhu 300°C dilakukan selama 9,5 menit menghasilkan nilai RMSE sebesar 29,36 dan nilai reliabilitas sebesar 0,53. Nilai reliabilitas berfungsi sebagai indikator stabilitas dan konsistensi dalam mengukur suatu

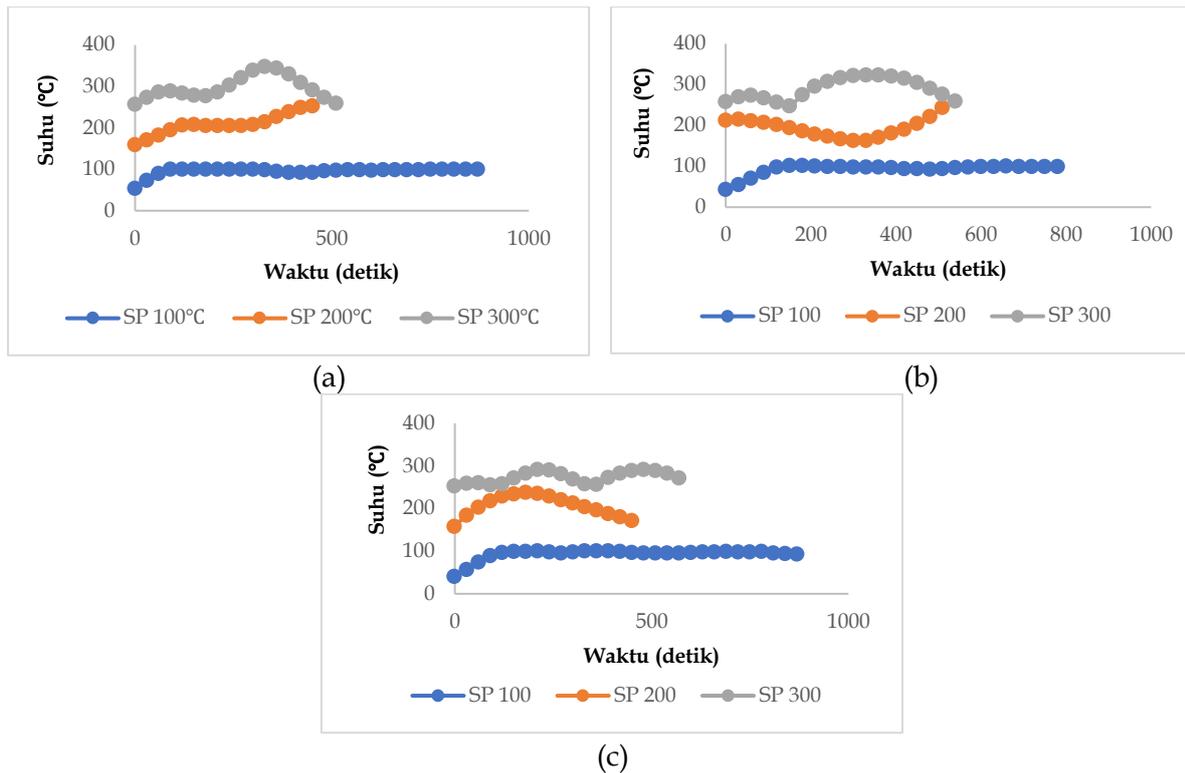
konsep serta menilai kesesuaian instrumen. Tingkat reliabilitas secara empiris dinyatakan dalam bentuk nilai koefisien reliabilitas. Semakin tinggi reliabilitas suatu instrumen, semakin mendekati angka 1 maka menunjukkan konsistensi yang baik dalam pengukuran (Sanaky et al., 2021). Nilai reliabilitas pada *setting point* 100°C, 200°C dan 300°C mendekati nilai 1 dari rentang antara $(-1 \leq P \leq 1)$, karena nilai reliabilitasnya berada di atas 0 pada bilangan bulat. Oleh karena itu, disimpulkan bahwa sistem dapat bekerja cukup stabil dalam mengendalikan temperatur karena tidak terlalu berbeda dengan *setting point* yang telah ditentukan.



Gambar 7. Stabilitas suhu 100°C (a), suhu 200°C (b) dan suhu 300°C (c)

Akurasi

Pengujian akurasi bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi kinerja alat sesuai *setting point* (Telaumbanua et al., 2024). Akurasi penelitian ini ditujukan dalam pengendalian kenaikan suhu api kompor pelet biomassa (Gambar 8). Akurasi suhu pengamatan pertama diperoleh nilai akurasi pada *setting point* 100°C adalah 95%. Selanjutnya pada *setting point* 200°C memiliki akurasi 90%. Pada *setting point* 300°C nilai ketelitian sebesar 92%. Rata-rata ketelitian yang diperoleh pada pengulangan pertama adalah 92%. Akurasi suhu pengamatan kedua, diperoleh nilai akurasi pada *setting point* 100°C adalah 93%. Selanjutnya pada *setting point* 200°C nilai akurasi sebesar 90%. Pada *setting point* 300°C nilai akurasi sebesar 92%. Rata-rata akurasi yang diperoleh pada pengulangan kedua adalah 92%. Akurasi suhu pengamatan ketiga, nilai akurasi yang diperoleh pada *setting point* 100°C adalah 93%. Selanjutnya pada *setting point* 200°C nilai akurasi sebesar 89%. Pada titik pengaturan 300°C nilai akurasi adalah 91%. Akurasi rata-rata yang diperoleh pada pengulangan ketiga adalah 91%.



Gambar 8. Akurasi suhu ulangan 1 (a), akurasi suhu ulangan 2 (b) dan akurasi suhu ulangan 3 (c)

Kecepatan Eksekusi

Kecepatan eksekusi menunjukkan seberapa cepat kinerja perangkat berdasarkan masukan pengguna. Dalam uji kinerja kompor biopellet, kecepatan eksekusi mengacu pada waktu yang dibutuhkan oleh *screw feeder* untuk mendorong pelet ke dalam tungku kompor. Semakin cepat *screw feeder* dapat mendorong pelet, semakin tinggi kecepatannya. Hasil uji kinerja kecepatan eksekusi dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian kecepatan eksekusi

Jumlah Bahan Bakar Pelet	Waktu (detik)			Rata-rata (detik)
	Ulangan 1	Ulangan 2	Ulangan 3	
1	2,93	2,34	2,49	2,59 ^a
3	3,09	3,54	2,97	3,20 ^{ab}
5	4,11	3,37	3,48	3,65 ^b
7	4,04	3,83	3,45	3,77 ^b
10	4,01	3,68	4,79	4,16 ^b

Keterangan: Superskrip yang berbeda menunjukkan perbedaan yang nyata ($p < 0,05$)

Pada pengujian kecepatan eksekusi dengan menggunakan bahan bakar pelet kayu sebanyak 10 buah, rata-rata waktu yang dibutuhkan pelet untuk masuk ke tungku kompor adalah 4,16 detik. Pengujian kinerja pada kecepatan eksekusi hanya dilakukan dengan maksimal 10 pelet. Hal ini dikarenakan pipa dan *screw feeder* belum mampu menampung pelet lebih dari 10 pelet. Sebelumnya telah dilakukan pengujian dengan menggunakan pelet seberat 100 gram, namun pelet tersangkut dan tidak dapat terdorong ke dalam tungku kompor. Oleh karena itu, dilakukan pengujian hingga batas maksimal *screw feeder* yang dapat mendorong pelet ke dalam tungku kompor yaitu sebanyak 10 pelet.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, didapatkan hasil kalibrasi 4 buah sensor termokopel tipe K untuk nilai suhu kompor dengan nilai koefisien determinasi dari kalibrasi sensor 1 adalah $R^2 = 0,9945$, kalibrasi sensor 2 diperoleh nilai $R^2 = 0,9956$, nilai R^2 pada kalibrasi sensor 3 adalah $0,9946$, dan kalibrasi sensor 4 diperoleh nilai $R^2 = 0,9927$. Nilai koefisien determinasi (R^2) dari tahap kalibrasi memiliki hubungan sangat kuat antara sensor dengan kalibrator, karena nilai yang dihasilkan berada pada rentang $0,80 - 1,000$. Pengujian alat telah dilakukan untuk memperoleh nilai kinerja yang meliputi respon sistem, kestabilan, akurasi, dan kecepatan eksekusi. Pada pengujian respon sistem, alat mampu mencapai suhu 300°C dalam waktu 450 hingga 780 detik. Stabilitas alat pada *setting point* 100°C , 200°C , dan 300°C masing-masing adalah $0,98$, $0,82$, dan $0,53$. Akurasi rata-rata untuk pengulangan 1, 2, dan 3 masing-masing adalah 92% , 92% , dan 91% . Kecepatan eksekusi pelet masuk ke dalam tungku kompor dibutuhkan waktu $2,5$ hingga 4 detik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Lampung khususnya Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Pertanian yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian penelitian.

CONFLICT OF INTEREST

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dengan pihak mana pun.

DAFTAR REFERENSI

- Alpian, Yanciluk, & Supriyati, W. (2019). Pembuatan pelet dari serbuk limbah kayu menggunakan alat pengempa dan cetak sederhana. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 13(2).
- Asri, M., Kurniawan, E., & Sylvia, N. (2022). Pemanfaatan limbah sekam padi sebagai bahan alternatif dalam pembuatan biopelet. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, 2(2). <https://doi.org/10.29103/cejs.v2i2.7232>
- Brunerová, A., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Telaumbanua, M., & Herák, D. (2019). Sustainable management of coffee fruit waste biomass in ecological farming systems at West Lampung, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 345(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/345/1/012007>
- Faiz, M.G., Rakhmatsyah, A., & Yasirandi, R. (2021). Klasifikasi data aktivitas setelah jogging menggunakan fuzzy logic. *Jurnal RESTI*, 5(3). <https://doi.org/10.29207/resti.v5i3.2938>
- Haryanto, A., Agustina Iryani, D., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., & Hidayat, W. (2021). Biomass fuel from oil palm empty fruit bunch pellet: potential and challenges. In *Procedia Environmental Science, Engineering and Management* (Vol. 8, Issue 1). EIAETM. <http://www.procedia-esem.eu>
- Haryanto, A., Nita, R., Telaumbanua, M., Suharyatun, S., Hasanudin, U., Hidayat, W., Iryani, D. A., Triyono, S., Amrul, & Wisnu, F. K. (2021). Torrefaction to improve biomass pellet made of oil palm empty fruit bunch. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 749(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/749/1/012047>
- Hayatunnufus, H., & Alita, D. (2020). Sistem cerdas pemberi pakan ikan secara otomatis. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Tertanam*, 1(1). <https://doi.org/10.33365/jtst.v1i1.799>
- Herwanto, H. W., Widiyaningtyas, T., & Indriana, P. (2019). Penerapan Algoritme linear regression untuk prediksi hasil panen tanaman padi. *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, 8(4), 364. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v8i4.537>
- Hosseini, M., Javaherian, A., & Movahed, B. (2014). Determination of permeability index using stoneley slowness analysis, nmr models, and formation evaluations: a case study

- from a gas reservoir, South of Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 109, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.07.016>
- Kementerian ESDM. (2021). *Statistik Minyak dan Gas Bumi Semester I*. 2021. Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, Jakarta.
- Lio, L.D., Bortolus, M., & Canu, P. (2025). Emission reduction from wood pellet stoves by uniform feeding. *Renewable Energy*, 242, 122273, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122273>
- Panwar, N. L. (2009). Design and performance evaluation of energy efficient biomass gasifier based cookstove on multi fuels. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 14(7). <https://doi.org/10.1007/s11027-009-9187-4>
- Parinduri, L. & T. Parinduri. (2020). Konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan. *Journal of Electrical Technology*, 5(2), 88-92. <https://doi.org/10.30743/jet.v5i2.2885>
- Pertamina. (2020). *Pertamina Energy Outlook 2020*. Pertamina Energy Institute, Jakarta.
- Prasetyani, C.F., Suwandi, & R.F. Iskandar. (2019). Pengaruh jenis biomassa dan kecepatan aliran udara terhadap kinerja kompor gasifikasi biomassa. *E-Proceeding of Engineering*, 6(2), 5217-5224.
- Prasetyo, V. R., Lazuardi, H., Mulyono, A. A., & Lauw, C. (2021). Penerapan aplikasi rapidminer untuk prediksi nilai tukar rupiah terhadap us dollar dengan metode regresi linier. *Jurnal Nasional Teknologi Dan Sistem Informasi*, 7(1), 8-17. <https://doi.org/10.25077/teknosi.v7i1.2021.8-17>
- Purnomo, C. E., Haryanto, A., Wisnu, F. K., & Telaumbanua, M. (2022). Torefaksi pelet tandan kosong kelapa sawit menggunakan reaktor putar. *Agricultural and Biosystem Engineering*, 1.
- Roth, C. (2013). Micro-gasification: Cooking with gas from biomass. *Hera*, 2.
- Rhamadhani, D.A., & Saputri, E.E.D. (2023). Analisa model machine learning dalam memprediksi laju produksi sumur migas 15/9-F-14H. *Journal of Sustainable Energy Development*, 1(1), 48-55.
- Sanaky, M.M., Saleh, L.M., & Titaley, H.D. (2021). Analisis faktor-faktor penyebab keterlambatan pada proyek pembangunan gedung asrama MAN 1 Tulehu Maluku Tengah. *Jurnal Simetrik*, 11(1), 432-439.
- Setyono, A. E., & Kiono, B. F. T. (2021). Dari energi fosil menuju energi terbarukan: potret kondisi minyak dan gas bumi Indonesia tahun 2020 - 2050. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 2(3). <https://doi.org/10.14710/jebt.2021.11157>
- Telaumbanua, M., Haryanto, A., Wisnu, F. K., Lanya, B., & Wiratama, W. (2021). Design of insect trap automatic control system for cacao plants. In *Procedia Environmental Science, Engineering and Management* (Vol. 8, Issue 1). EIAETM. <http://www.procedia-esem.eu>
- Telaumbanua, M., Triyono, S., Haryanto, A., & Wisnu, F. K. (2019). Controlled electrical conductivity (EC) of tofu wastewater as a hydroponic nutrition. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(3).
- Telaumbanua, M., W. H. Setiawan, A. Haryanto, F. K. Wisnu, W. Rahmawati & B. Lanya. (2024). Design of temperature control system at torrefaction reactor using microcontroller. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian dan Biosistem*, 12(2), 272-283. <https://doi.org/10.29303/jrpb.v12i2.669>
- Wohler, M., Jaeger, D., Reichert, G., Schmidl, C., & Pelz, S.K. (2017). Influence of pellet length on performance of pellet room heaters under real life operation conditions. *Renewable Energy*, 205, 66-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.047>
- Zikri, A., Fatria, Zulkarnain, A., & Syahputra, D. (2019). Analisa unjuk kerja kompor biomassa terhadap karakteristik biopellet eceng gondok (*Eichhornia Crassipes*) dengan getah damar (*Agathis Loranthifolia*). *Jurnal Kinetika*, 10(03).