

**Rancang Bangun Alat Uji Makro TGA menggunakan Oven Microwave*****Design and Construction of a Macro TGA Test Equipment Using a Microwave Oven*****Hilal Rozaq Akbar^{1,a)}, Samsudin Anis¹, Ibadurrahman Muhammad Taqy¹.**¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang^{a)}Corresponding author: hilalrozaq4@students.unnes.ac.id**Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan merealisasikan alat uji *Macro Thermogravimetric analysis* (TGA) berbasis oven *microwave* sebagai solusi alternatif terhadap alat TGA konvensional yang mahal dan kompleks. Alat ini mengintegrasikan komponen utama seperti oven *microwave* termodifikasi, sensor suhu *thermocouple* tipe K, *load cell* digital, dan mikrokontroler Arduino Mega 2560, yang mampu memantau perubahan suhu dan massa secara *real-time*. Proses perancangan menggunakan pendekatan metode *Pahl and Beitz* yang meliputi tahap perencanaan spesifikasi, perancangan konseptual, perancangan bodi, hingga pembuatan prototipe. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat ini mampu mereproduksi kurva termogravimetri dengan akurasi tinggi, stabilitas suhu $\leq \pm 5^\circ\text{C}$, serta kehilangan massa yang terukur presisi hingga 84,20% pada suhu 425°C . Desain ini terbukti efisien, ekonomis, dan layak diaplikasikan dalam pendidikan teknik, praktikum mahasiswa, serta riset awal berbasis proyek mandiri.

Kata Kunci: *thermogravimetric analysis*; oven *microwave*; arduino mega 2560; sensor suhu; *load cell*

Abstract

This study aims to design and implement a Macro Thermogravimetric analysis (TGA) device using a modified microwave oven as an affordable alternative to conventional TGA systems. The instrument integrates key components such as a modified microwave, K-type thermocouple, digital load cell, and Arduino Mega 2560 microcontroller to monitor real-time temperature and mass changes. The design follows the Pahl and Beitz method, encompassing planning, conceptual and detailed design, and prototyping. Test results show that the device successfully reproduces TGA curves with high accuracy, thermal stability within $\leq \pm 5^\circ\text{C}$, and precise mass loss detection of up to 84,20% at 425°C . The prototype proves to be efficient, cost-effective, and suitable for technical education, student practicum, and entry-level scientific research.

Keywords: *thermogravimetric analysis*; oven *microwave*; arduino mega 2560; temperature sensor; *load cell*

PENDAHULUAN

Dalam era industri modern, karakterisasi termal material menjadi elemen penting dalam pengembangan produk berbasis material. *Thermogravimetric analysis* (TGA) merupakan salah satu metode yang umum digunakan, yakni dengan mengukur perubahan massa material sebagai fungsi suhu atau waktu. Teknik ini banyak diaplikasikan dalam penelitian polimer, komposit,

biomassa, serta limbah padat karena mampu memberikan data degradasi termal yang akurat [1] Namun, tingginya biaya dan kompleksitas operasional alat TGA komersial menjadi hambatan bagi laboratorium kecil atau institusi pendidikan di negara berkembang, sehingga diperlukan inovasi alat yang lebih terjangkau, sederhana, dan andal [2]. Salah satu pendekatan inovatif yang berpotensi menggantikan metode konvensional adalah pemanfaatan energi gelombang mikro (*microwave*) sebagai sumber

pemanasan. *Microwave* memiliki keunggulan berupa efisiensi energi, kecepatan pemanasan, serta kestabilan suhu yang lebih baik dibandingkan pemanas resistif [3]. Konsep *Macro TGA* berbasis *microwave* diharapkan dapat menjembatani kebutuhan penelitian dan keterbatasan infrastruktur, sekaligus menjadi solusi untuk edukasi dan riset awal pada berbagai sektor seperti pertanian, industri daur ulang, hingga praktikum mahasiswa.

Penggunaan *microwave* dalam sistem TGA menawarkan metode pemanasan volumetrik yang lebih seragam dan langsung pada sampel. Keunggulan ini mampu meningkatkan akurasi pengukuran massa serta dinamika termal bahan, khususnya material non-logam seperti biomassa, plastik, dan residu organik [4]. Dengan integrasi sensor massa digital serta sistem kontrol suhu sederhana, alat ini berpotensi dikembangkan menjadi prototipe fungsional dengan biaya rendah namun tetap handal.

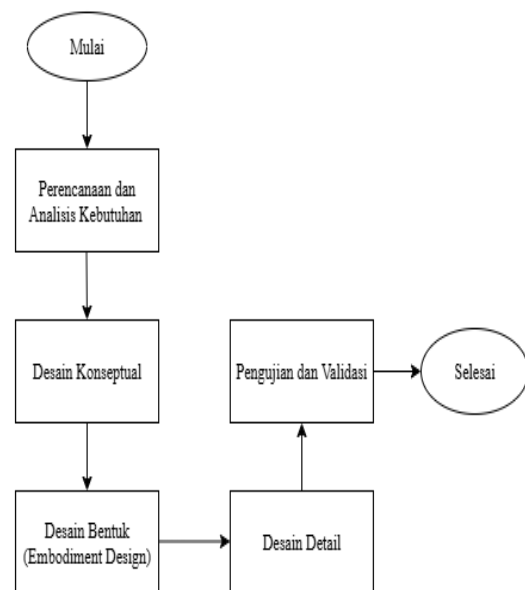
Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan mendesak untuk menghadirkan solusi tepat guna dalam bidang karakterisasi termal, terutama di lingkungan akademik dan laboratorium riset lokal. *Tren do-it-yourself scientific instruments* (DIY-SI) semakin populer sebagai alternatif riset mandiri yang hemat biaya dan fleksibel [5]. Hal ini membuka peluang pengembangan alat *Macro TGA* berbasis *microwave* untuk mendukung riset maupun pembelajaran teknik instrumentasi. Secara prinsip, TGA konvensional menggunakan pemanas resistif seperti furnace yang dikontrol secara bertahap untuk memanaskan sampel [6]. Namun, metode ini memiliki kelemahan berupa waktu analisis yang lama dan konsumsi energi tinggi. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pemanfaatan *microwave* mampu mempercepat proses dekomposisi termal material organik hingga 70% lebih cepat dibanding metode TGA konvensional [7]. Membuktikan bahwa hasil analisis termogravimetri menggunakan *microwave* konsisten dengan hasil dari alat TGA standar. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian mengenai TGA berbasis *microwave* masih terbatas pada simulasi atau skala laboratorium dengan biaya tinggi. Hanya sedikit yang fokus pada pengembangan alat berskala makro yang murah dan aplikatif untuk pendidikan atau penelitian dasar [8]. Perkembangan teknologi Arduino dan sensor suhu digital (misalnya *thermocouple* T/K dengan modul MAX6675) menjadi solusi potensial untuk merancang sistem pemantauan suhu *real-time* yang terintegrasi dengan pengukuran massa digital [9].

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan membangun alat uji *Macro TGA* berbasis *microwave* yang dilengkapi sistem monitoring suhu dan massa digital. Pendekatan ini diharapkan mampu mengisi celah antara alat TGA konvensional yang mahal

dan kebutuhan laboratorium pendidikan yang membutuhkan peralatan ekonomis serta aplikatif. Selain mendukung pembelajaran berbasis proyek sesuai kebijakan Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM), pengembangan alat ini juga diharapkan berkontribusi pada kemandirian teknologi lokal serta penguatan kapasitas riset nasional

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa (*engineering research*) dengan pendekatan perancangan. Tujuan utamanya adalah untuk merancang dan menguji alat uji makro TGA berbasis *microwave*, sebagai alternatif dari alat TGA konvensional yang memerlukan biaya operasional tinggi serta waktu pengujian yang relatif lama. Penelitian ini menggabungkan proses perancangan sistem mekanis dan elektronik, integrasi perangkat lunak, terhadap sampel dengan bahan tertentu serta di mix dengan absorber melalui metode termal.



Gambar 1. Konsep Diagram Alir Pahl and Beitz

Berdasarkan Gambar 1 metode Pahl and Beitz terdiri dari 5 tahapan utama [10] :

1. Perencanaan dan Penentuan Spesifikasi Kebutuhan pada Tabel 1 dijelaskan tahap awal dilakukan studi pustaka dan observasi terhadap alat TGA konvensional untuk mengidentifikasi kebutuhan teknis dan fungsional. Kriteria utama alat uji ditetapkan meliputi rentang suhu pemanasan (100–600°C), kemampuan penimbangan dengan akurasi tinggi maksimal 1 KG, serta pengaturan waktu pemanasan (maksimal 30 menit). Alat TGA komersial memiliki keterbatasan berupa harga tinggi dan akses terbatas di laboratorium teknik, sehingga diperlukan pengembangan alat sederhana berbasis modifikasi *microwave* rumah tangga.

Tabel 1. Spesifikasi Awal Alat Makro TGA

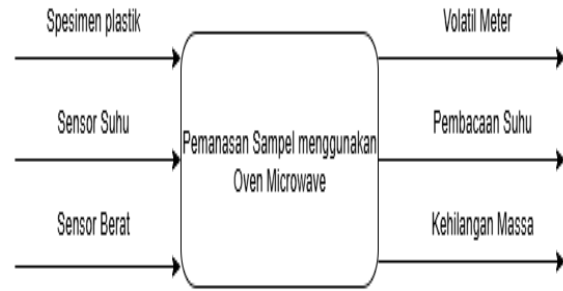
No	Parameter	Spesifikasi Awal	Sumber/Dasar Pertimbangan
1.	Rentang Suhu	100-500°C	Studi TGA konvensional
2.	Sistem Penimbangan	<i>Load cell</i> 1 KG	Standart uji kehilangan massa
3.	Durasi Pemanasan	15-30 menit	Kebutuhan eksperimen
4.	Pemanas	<i>Microwave</i> modifikasi (400 W)	Kemampuan distribusi panas

2. Perancangan Konseptual

Tahap ini dilakukan analisis stuktur fungsi dijelaskan pada **Gambar 2** untuk mendefinisikan cara kerja alat dalam melakukan pemanasan sampel dan pencatatan perubahan massa. Beberapa alternatif konsep desain dikembangkan dengan mempertimbangkan efisiensi, keamanan, biaya, dan kemudahan implementasi. Komponen utama yang dipilih antara lain *microwave* sebagai sumber pemanas, *thermocouple K-type* untuk pengukuran suhu *real-time*, *crucible* berbahan kaca borosilikat tahan panas sebagai wadah sampel, serta *load cell* untuk pengukuran massa. Setiap alternatif desain dievaluasi dan dibandingkan, kemudian dipilih konsep yang paling sesuai dengan spesifikasi kebutuhan pada dijelaskan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Komponen Utama Alat Uji Makro TGA

No	Nama Komponen	Spesifikasi Teknis	Fungsi Utama
1.	<i>Microwave</i>	400-600 W Kapasitas 20-25 L	Sumber Pemanas
2.	<i>Thermocouple</i> Tipe-K	-50°C s.d. 1100°C	Pengukuran Suhu <i>real-time</i>
3.	<i>Crucible</i>	Kaca borosilikat 3.3	Wadah Sampel
4.	<i>Load cell</i>	Akurasi 1 Kg	Penentu massa sebelum dan sesudah pemanasan
5.	Timer digital	Presisi detik maksimal 60 menit.	Kontrol waktu pemanas
6.	Gelas Reaktor	Kaca Borosilikat 3.3	Pendinginan sampel
7.	Gas Nitrogen	Gas inert ISO 8573-1:2010	Media untuk membuang oksigen dalam suhu ruang.
8.	Sarung Tangan Panas	<i>Kevlar/silicon</i> > 300°C	Proteksi saat pengambilan sampel



Gambar 2. Konseptual Desain

3. Perancangan Body (*Embodiment Design*)

Tahap perancangan rinci, desain konseptual yang telah dipilih disimulasikan secara teknis dengan memperhitungkan tata letak dan integrasi komponen utama di dalam ruang *microwave*. Salah satu aspek utama yang diperhatikan adalah penempatan *crucible* pada posisi yang stabil dan simetris agar distribusi panas merata[5]. *Crucible* ditempatkan di dalam gelas reaktor dengan ketahanan panas ($\geq 600^\circ\text{C}$) yang berfungsi sebagai isolator serta penahan getaran selama pemanasan berlangsung. Simulasi distribusi panas menggunakan sampel uji *dummy* dilakukan untuk memastikan bahwa posisi *crucible* optimal dan tidak mengalami pergeseran maupun pemanasan tidak merata.

Selanjutnya, dilakukan modifikasi jalur pemasangan *thermocouple* untuk mengukur suhu secara *real-time* tanpa mengganggu kinerja gelombang mikro. Tutup Reaktor sebagai jalur kabel *thermocouple*, kemudian dilapisi dengan *seal* keramik agar tidak terjadi kebocoran gelombang elektromagnetik yang berpotensi membahayakan pengguna. Penempatan kabel sensor juga diatur pada jalur non-reflektif guna mencegah terjadinya interferensi yang dapat mengurangi efisiensi pemanasan. Setelah penyesuaian komponen dilakukan, uji awal durasi pemanasan dan distribusi suhu dilaksanakan dengan menggunakan bahan uji berupa plastik. Pengujian dilakukan waktu pemanasan 15 menit dengan daya *microwave* 400–800 W. Data suhu diambil 15 menit untuk membentuk profil kenaikan suhu terhadap waktu, yang selanjutnya dianalisis untuk menentukan waktu pemanasan optimal dan kestabilan distribusi panas di dalam ruang *microwave*.

Hasil pengujian awal ini digunakan untuk memvalidasi kestabilan suhu dan keamanan operasional alat. Kriteria validasi meliputi *fluktuasi* suhu yang tidak melebihi $\pm 5^\circ\text{C}$ dari target, tidak terjadinya percikan atau kerusakan pada *microwave*, serta kinerja jalur *thermocouple* yang bebas dari gangguan gelombang mikro. Langkah-langkah

tersebut memastikan bahwa prototipe *Macro* TGA berbasis *microwave* yang dirancang aman, stabil, serta mampu menghasilkan data pengujian yang akurat dan dapat dibandingkan dengan literatur TGA konvensional.

4. Perancangan Detail dan Pembuatan Prototipe

Setelah desain rinci disepakati, tahap selanjutnya adalah pembuatan prototipe alat *Macro* TGA. Proses ini meliputi modifikasi struktur *microwave*, pemasangan sensor *thermocouple* dan sistem timer eksternal, serta kalibrasi *load cell* untuk pengukuran massa.

5. Pengujian dan Validasi

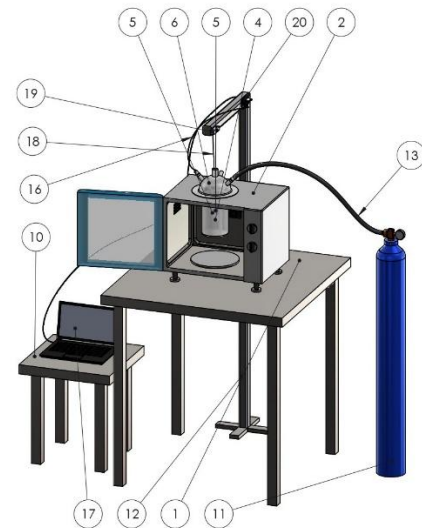
Prototipe yang sudah dirakit diuji melalui serangkaian eksperimen menggunakan sampel plastik. Uji coba alat dilakukan dengan memanaskan sampel hingga waktu (30-60 menit) dan daya pemanas (400–800 W), sambil memonitor suhu *real-time* menggunakan *thermocouple*. Setelah pemanasan, sampel ditimbang kembali untuk menghitung kehilangan massa ($\% \Delta m$) sebagai indikator degradasi termal.

Tahap validasi hasil dilakukan dengan membandingkan data uji dengan referensi literatur atau hasil dari alat TGA konvensional, untuk mengevaluasi akurasi, kestabilan suhu, serta keamanan alat selama pengoperasian. Hasil validasi ini menjadi dasar untuk menyempurnakan desain dan menentukan kelayakan alat *Macro* TGA yang dikembangkan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain Alat

Desain alat uji Makro *Thermogravimetric analysis* (TGA) berbasis oven *microwave* pada Gambar 3 dirancang dengan mengacu pada prinsip analisis termogravimetri, yaitu pengukuran perubahan massa sampel terhadap suhu dan waktu. Desain utama terdiri dari tiga komponen utama, yaitu: (1) ruang pemanas berbasis *microwave*, (2) sistem penimbang berbasis *load cell* presisi tinggi, dan (3) sistem kontrol serta akuisisi data berbasis mikrokontroler dan pada Tabel 3 dijelaskan dengan kompleks jenis part pada desain ini. Pemodelan 3D dilakukan menggunakan perangkat lunak solidwork 2021 untuk memastikan integrasi antar-komponen tidak mengalami interferensi, terutama pada penempatan *crucible* di dalam ruang pemanas yang harus berada pada posisi stabil untuk meminimalkan kesalahan pengukuran. Jalur kabel *thermocouple* didesain dengan perlindungan isolasi elektromagnetik agar tidak terganggu oleh gelombang mikro [11]. Desain ini juga dilengkapi dengan ruang ventilasi untuk menghindari akumulasi uap hasil degradasi material.



Gambar 3. Desain Alat Makro TGA

Tabel 3. List Part Alat Uji Makro TGA

No	QTY	Nama Part	Deskripsi
1.	1	Meja Kerangka	Besi Holo 4x4
2.	1	Microwave	800-1000 W
3.	1	Basket Spesimen	Kaca Borosilikat 3.3
4.	1	Gelas Reaktor	Kaca Borosilikat 3.3
5.	1	Tutu Gelas Reaktor	Kaca Borosilikat 3.3
6.	1	Thermocouple	Tipe K
7.	1	Meja Laptop	Besi Holo 4x4
8.	1	Nitrogen	SS 304 Sch. 10
9.	1	Kerangka Load cell	Besi Holo 4x4
10.	1	Hose	HX711
11.	1	Kabel	Nyvin
12.	1	Laptop	Kontroler
13.	1	Kawat Nikel	0.5 mm
14.	1	Arduino Mega 2560	Kontroler
15.	1	Load cell	Stainless Stell

Prinsip Alat Kerja

Prinsip kerja alat dimulai dengan penempatan sampel uji plastik dengan jenis tertentu di dalam basket spesimen yang sebelumnya sudah ditimbang. Basket spesimen kemudian dimasukkan ke dalam gelas reaktor yang berada di dalam oven *microwave*. Aliran gas nitrogen (N_2) diaktifkan untuk menghilangkan oksigen dan mencegah oksidasi sampel. Proses pemanasan dimulai dengan menyalakan oven *microwave* pada level daya yang

telah ditentukan. Pemanasan dengan gelombang mikro memungkinkan pemanasan *volumetric* yang cepat dan merata pada sampel. Selama proses pemanasan, *thermocouple* akan merekam perubahan suhu, sementara *Load cell* akan mencatat pengurangan massa sampel akibat penguapan senyawa volatil. Data suhu dan massa ini secara simultan dikirimkan oleh Arduino Mega 2560 ke laptop. Dimana perangkat lunak akan menampilkan grafik TGA (Presentase masa vs suhu) secara *real-time*.

Proses Fabrikasi

1. Microwave Modifikasi

Microwave dengan spesifikasi R21D0(S)IN frekuensi 2.45 GHz dengan daya 400 Watt. *Microwave* ini dipilih karena kestabilan output daya dan kemudahan modifikasi pada struktur ruang pemanasnya [12]. Proses awal melibatkan pembongkaran panel luar serta pengamanan komponen bertegangan tinggi seperti *magnetron*, transformator, dan kapasitor. Setelah komponen aktif diamankan, ruang pemanas dimodifikasi dengan menambahkan dudukan *crucible* berbahan keramik isolator tahan suhu tinggi, yang diposisikan simetris terhadap pusat distribusi gelombang mikro untuk memastikan pemanasan merata. Lubang kecil dibuat secara presisi di dasar ruang pemanas untuk jalur kabel sensor, dengan mempertahankan integritas resonansi gelombang agar tidak mengganggu efisiensi pemanasan. Sensor *thermocouple* tipe K dipasang dekat *crucible* dan dihubungkan ke modul MAX6675, sementara *loadcell* 1 kg dengan amplifier sinyal HX711 dipasang pada rangka bawah alat, terhubung ke *mikrokontroler* Arduino Mega 2560 untuk akuisisi dan pencatatan data suhu serta massa secara *real-time* [13].

Seluruh kabel sensor yang melintasi ruang *microwave* diberi pelindung berbahan aluminium foil yang di-*grounding* dan dilengkapi *filter ferit* untuk mereduksi interferensi elektromagnetik akibat paparan gelombang mikro. Sistem pemrosesan data ditempatkan di luar *cavity* pemanas untuk menjaga kestabilan kerja sensor serta menghindari *overheating*. Setelah perakitan selesai, dilakukan kalibrasi *termocopel* dengan membandingkan pembacaan suhu aktual menggunakan termometer digital inframerah, dan kalibrasi *load cell* menggunakan anak timbangan baku. Uji fungsional menggunakan sampel *dummy* menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan suhu dan massa secara simultan tanpa gangguan elektromagnetik signifikan. Pendekatan modifikasi ini terbukti efektif menghadirkan sistem TGA berskala makro yang hemat biaya namun tetap presisi dan dapat diandalkan, sekaligus mendukung tren instrumen ilmiah mandiri berbasis open *hardware* di lingkungan akademik [14].

2. Gelas Reaktor

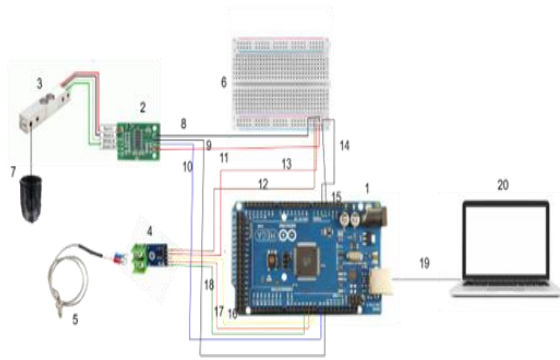
Gelas reaktor dibuat dari bahan kaca borosilikat 3.3 yang memiliki ketahanan termal tinggi dan bersifat transparan terhadap gelombang mikro. Proses Fabrikasi dimulai dengan memotong tabung kaca borosilikat sesuai dengan dimensi yang telah dirancang. Bagian bawah tabung ditutup dan diratakan dengan teknik pemanasan dan peniupan kaca (*glass blowing*) untuk membentuk dasar gelas reaktor yang stabil. Pada bagian tutup reaktor, dibuat beberapa lubang presisi. Lubang utama di bagian tengah berfungsi sebagai jalur untuk kawat nikel yang menggantung basket spesimen. Lubang kedua dibuat untuk jalur masuk *thermocouple* tipe K, dan lubang ketiga sebagai *inlet* untuk aliran gas nitrogen. Setiap lubang dipoles untuk memastikan kerapatan keamanan saat komponen dipasang.

3. Kerangka Load cell

Kerangka *load cell* dirancang untuk memberikan dudukan yang kaku dan stabil diatas oven *microwave*, memastikan pengukuran massa tidak terganggu oleh getaran. Proses fabrikasi dimulai dengan memotong besi *hollow* berukuran 4x4 cm sesuai dengan gambar desain. Potongan-potongan besi tersebut Kemudian dirakit menggunakan proses pengelasan untuk membentuk struktur utama. Sebuah pelat dudukan dari *stainless steel* dipasang di bagian atas kerangka, Dimana *load cell* dibaut dengan kencang. Terdapat lubang tembus dibuat ditengah pelat agar kawat nikel penggantung basket spesimen dapat terhubung langsung ke *load cell* tanpa bersentuhan dengan kerangka. Seluruh struktur kerangka Kemudian dicat untuk mencegah korosi dan memberikan tampilan yang rapi dan kuat.

4. Program Kontroler

Pemrograman mikrokontroler Arduino Mega 2560 seperti pada Gambar 4 untuk mengintegrasikan pembacaan data dari *thermocouple* (via sensor MAX6675) dan *load cell* (via HX711). Bahasa pemrograman yang digunakan adalah C++ dengan basis pustaka Arduino. Program ini dirancang untuk mencatat data suhu dan massa secara berkala setiap 5 detik, serta menyimpannya dalam format CSV melalui komunikasi serial monitor [15]. Kode program dilengkapi dengan fungsi kalibrasi awal, pengendali kesalahan (*error handling*), dan penanda waktu untuk setiap pembacaan. Program ini juga dapat dikembangkan lebih lanjut untuk otomatisasi sistem *shut-off* suhu atau transmisi data nirkabel. Pengujian awal menunjukkan bahwa sistem dapat berjalan stabil dengan deviasi suhu di bawah $\pm 2^{\circ}\text{C}$ dan kesalahan pembacaan massa di bawah ± 0.02 gram. Stabilitas sinyal dan akurasi pembacaan menunjukkan keberhasilan fabrikasi dan integrasi sistem sensor secara menyeluruh.



Gambar 4. Program Wiring Arduino

Hasil Pengujian

Modifikasi oven *microwave* tipe R21D0(S)IN (400 W, 2.45 GHz) pada Gambar 5 dijelaskan, proses ini dilakukan dengan pendekatan rekayasa adaptif untuk mengubah fungsi pemanas domestik menjadi reaktor termal sistem *Thermogravimetric analysis* (TGA) skala makro. Perubahan difokuskan pada tiga aspek utama: integrasi komponen pengukuran massa (*load cell*), penetrasi sensor suhu (*thermocouple*), dan pengendalian distribusi gelombang mikro. Jalur *thermocouple* dirancang melalui bukaan sisi atas *microwave*, dengan perlindungan isolatif agar tidak mengganggu medan elektromagnetik di dalam ruang reaktor. Penempatan *crucible* berada di titik fokus radiasi mikro untuk mencapai pemanasan isothermal, sesuai dengan prinsip distribusi gelombang transversal). Desain tersebut menghasilkan profil termal yang stabil dengan fluktuasi $<5^{\circ}\text{C}$ pada durasi pemanasan konstan 25 menit.



Gambar 5. Modifikasi Oven Microwave

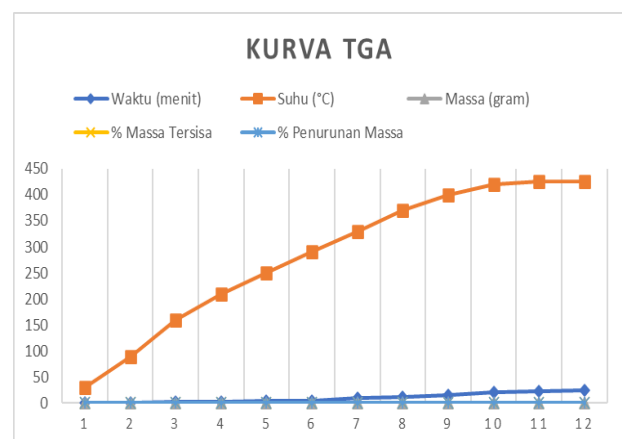
Gelas reaktor berbahan borosilikat didesain vertikal silinder dengan diameter 10 mm dan ketebalan dinding 3 mm, tahan terhadap suhu hingga 800°C dan transparan terhadap radiasi mikro seperti pada Gambar 6. Reaktor ini dikopel langsung ke *load cell* berjenis *strain gauge* melalui dudukan mekanis berbahan besi *hollow* untuk menghindari

pengaruh termal dan getaran. Sistem suspensi mikro digunakan untuk meningkatkan akurasi pembacaan massa selama proses pemanasan berlangsung. *Load cell* dikalibrasi menggunakan metode 3 titik dengan rentang pembacaan 0–100 g dan *error* sistemik $<1,2\%$. Struktur penopang dirakit menggunakan profil aluminium 2020 yang ringan namun *rigid*, menjaga konsistensi posisi vertikal dan kestabilan sistem.



Gambar 6. Gelas reaktor

Mikrokontroler Arduino Mega 2560 dikombinasikan dengan modul HX711 dan MAX6675 untuk mengolah data dari *load cell* dan *thermocouple* secara simultan. Algoritma dikembangkan untuk pencatatan *real-time* dengan interval 1 detik, menghasilkan *output* log berbentuk kurva massa terhadap suhu (termogram) seperti pada Gambar 7. Implementasi ini memungkinkan observasi titik *onset* degradasi dan laju dekomposisi material. Uji coba terhadap sampel karbon aktif dan bahan plastik menunjukkan fase dekomposisi mulai terjadi pada suhu 425°C , dengan kehilangan massa 84,20% dalam 15 menit. Sistem mampu mereproduksi kurva termal dengan presisi cukup tinggi dan menawarkan potensi untuk pengembangan metode TGA murah namun fungsional.



Gambar 7. Data Hasil Uji Coba

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang Prodi Teknik Mesin S1 atas dukungan fasilitas laboratorium dalam proses penelitian ini. Penghargaan juga disampaikan kepada rekan-rekan tim laboratorium atas kontribusinya dalam pengujian dan kalibrasi alat. Penelitian ini tidak akan terselesaikan tanpa bantuan dan bimbingan dari para dosen pembimbing serta dukungan moral dari keluarga dan kolega yang turut memberikan semangat selama proses penyusunan artikel ini.

PENUTUP

Simpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan merealisasikan alat uji *Macro Thermogravimetric analysis* (TGA) berbasis oven *microwave* yang terintegrasi dengan sistem pemantauan suhu dan massa secara *real-time*. Prototipe yang dikembangkan menggunakan komponen yang relatif terjangkau dan mudah diperoleh, seperti oven *microwave* modifikasi, sensor *thermocouple* tipe K, *load cell* 1 kg, serta mikrokontroler Arduino Mega 2560, mampu menghasilkan data analisis termogravimetri yang akurat dan konsisten. Hal ini membuktikan bahwa alat ini mampu mereproduksi kurva TGA yang setara dengan alat konvensional, sekaligus menawarkan efisiensi waktu dan biaya. Selain itu, penggunaan reaktor kaca *borosilikat* dan sistem *insulasi* elektromagnetik terbukti efektif dalam menjaga kestabilan suhu dan keamanan operasional. Perlu pengembangan lanjutan untuk alat ini dan Optimasi lebih lanjut terkait program dan komposisi alat. Implementasi metode rekayasa berbasis pendekatan *Pahl and Beitz* terbukti efektif dalam merancang perangkat instrumentasi ilmiah secara sistematis dan terstruktur. Integrasi antara aspek mekanik, termal, dan elektronik menghasilkan prototipe yang layak digunakan untuk riset awal, praktikum mahasiswa, maupun pengembangan teknologi lokal

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Robinson *et al.*, “Unravelling the mechanisms of *microwave* pyrolysis of biomass,” *Chem. Eng. J.*, vol. 430, no. P3, p. 132975, 2022, doi: 10.1016/j.cej.2021.132975.
- [2] E. A. Varol and U. Mutlu, “TGA-FTIR Analysis of Biomass Samples Based on the Thermal,” *Energies*, vol. 16, no. 367, pp. 1–19, 2023.
- [3] N. N. Anisa, R. R. D. Julia, N. Subagyo, and V. L. Allo, “ANALISIS TERMOGRAVIMETRI *Spirulina pelatensis* DENGAN KATALIS Ni / Al-SBA-15 RASIO Si / Al = 10 MENGGUNAKAN
- LAJU PEMANASAN 10 ° C / MENIT *THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS OF Spirulina pelatensis* WITH Ni / Al-SBA-15 CATALYST AT Si / Al , RATIO = 10 USING HEATING RA,” pp. 151–155, 2024.
- [4] X. Jing *et al.*, “Interaction between feedstocks, absorbers and catalysts in the *microwave* pyrolysis process of waste plastics,” *J. Clean. Prod.*, vol. 291, p. 125857, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.125857.
- [5] J. M. Rami, C. D. Patel, C. M. Patel, and M. V. Patel, “*Thermogravimetric analysis* (TGA) of some synthesized metal oxide nanoparticles,” *Mater. Today Proc.*, vol. 43, pp. 655–659, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.554.
- [6] A. Meng, S. Chen, H. Zhou, Y. Long, Y. Zhang, and Q. Li, “Pyrolysis and simulation of typical components in wastes with *macro-TGA*,” *Fuel*, vol. 157, pp. 1–8, 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2015.04.056.
- [7] T. Onsree, N. Tippayawong, A. Zheng, and H. Li, “Pyrolysis behavior and kinetics of corn residue pellets and eucalyptus wood chips in a *macro thermogravimetric analyzer*,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 12, no. July, pp. 546–556, 2018, doi: 10.1016/j.csite.2018.07.011.
- [8] M. S. Abbas-Abadi, K. M. Van Geem, M. Fathi, H. Bazgir, and M. Ghadiri, “The pyrolysis of oak with polyethylene, polypropylene and polystyrene using fixed bed and stirred reactors and TGA instrument,” *Energy*, vol. 232, p. 121085, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121085.
- [9] D. Aller, S. Bakshi, and D. A. Laird, “Modified method for proximate analysis of biochars,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 124, pp. 335–342, 2017, doi: 10.1016/j.jaap.2017.01.012.
- [10] E. K. Laksanawati, A. Sulaeman, and A. Rosyidin, “Desain Rancang Bangun Cooling Tower menggunakan Aplikasi Autocad Skala Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Tangerang,” *Mot. Bakar J. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 1, p. 37, 2022, doi: 10.31000/mbjtm.v6i1.6698.
- [11] S. A. Novita, A. Fudholi, and Doktor, “Parameter Operasional Pirolisis Biomassa,” *Agroteknika*, vol. 4 (1), no. 1, pp. 53–67, 2021.
- [12] S. Li, C. Li, and Z. Shao, “*Microwave* pyrolysis of sludge: a review,” *Sustain. Environ. Res.*, vol. 32, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s42834-022-00132-z.

- [13] B. Setiawan, D. A. Himawanto, E. P. Budiana, and P. Joko, "Analisa thermogravimetric pada Limbah pertanian," *J. Penelit. dan Pengabd. Masy.*, vol. 4, pp. 49–56, 2016.
- [14] N. Caroko, "Pirolisis Campuran PET dan LDPE Menggunakan Oven *Microwave*," *JMPM (Jurnal Mater. dan Proses Manufaktur)*, vol. 5, no. 1, pp. 25–34, 2021, doi: 10.18196/jmpm.v5i1.11947.
- [15] I. Pratama, B. Purnomo, and A. W. Yahya, "Rancang Bangun Pengisian Gula Pasir Otomatis Menggunakan Sensor *Load cell* Berbasis Arduino Berdasarkan Berat Dan Volume," *J. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 2, p. 45, 2023, doi: 10.31000/jte.v7i2.9802.