SINERGI Polmed: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

PENGUJIAN SISTEM KONTROL TEMPERATUR DAN PEMANTAUAN BERBASIS *ANDROID* PADA TUNGKU ELEKTRIK PELEBURAN LIMBAH ALUMINIUM

Aisha Hafiza Saptomo[a], Meiki Eru Putra[a*], Islahuddin[a]

[a]*Program Studi Teknik Mesin, Universitas Dharma Andalas, Jl. Sawahan No.103 Simpang Haru, Kota Padang, 25123, Indonesia*

**Penulis korespondensi: meikieruputra@unidha.ac.id; meikieruputra@gmail.com, (M.E.Putra), Tel.: +622-1992-9568*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 24 Agustus 2026
Direvisi pada 23 September
Disetujui pada 08 Oktober 2026
Tersedia daring pada 16 November 2026

Kata kunci:
Daur ulang aluminium, kontrol *on–off*, termokopel tipe K, prototipe tungku elektrik, pemantauan Android.

Keywords:
Aluminum remelting, on–off control, K-type thermocouple, electric furnace prototype, Android monitoring.

ABSTRAK

Pemanfaatan limbah aluminium melalui peleburan ulang memerlukan sistem kontrol temperatur dan pemantauan yang dapat dioperasikan secara sederhana. Penelitian ini mengevaluasi secara fungsional prototipe tungku elektrik berbasis mikrokontroler dan Android pada beban uji peleburan limbah aluminium. Sistem menggunakan Arduino Uno, termokopel tipe K dengan MAX6675, *solid state relay* SSR-40DA, LCD, *Bluetooth* HC-05, dan aplikasi Android. Uji kesesuaian pembacaan temperatur dilakukan pada *setpoint* 100–700 °C dengan interval 100 °C dan lima pembacaan berulang pada setiap titik menggunakan termometer inframerah Wintact WT323D sebagai instrumen pembanding. Berdasarkan 35 pasangan pembacaan, bias rata-rata sensor terhadap instrumen pembanding adalah −1,05 °C, *mean absolute error* 1,05 °C, RMSE 1,34 °C, dan galat persentase absolut rata-rata 0,25%. Regresi antara pembacaan instrumen inframerah (X) dan sensor (Y) menghasilkan Y=0,187+0,9969X dengan R=0,999996 dan R^2=0,999992. Lima pengujian fungsional menggunakan 450 g limbah aluminium pada *setpoint* 700 °C menghasilkan waktu 44 menit 27 detik hingga 49 menit 18 detik, dengan rata-rata 47 menit 8 detik, simpangan baku sekitar 2 menit 3 detik, dan koefisien variasi 4,34%. Antarmuka Android mendukung pengaturan *setpoint*, *start*/*stop*, pemantauan temperatur dan waktu proses, serta pencatatan data. Hasil menunjukkan kelayakan fungsional awal prototipe pada beban uji 450 g; penelitian ini belum memvalidasi kapasitas maksimum, efisiensi energi, karakteristik dinamis kontrol, reliabilitas komunikasi, kualitas metalurgi hasil peleburan, maupun operasi lapangan.

ABSTRACT

Aluminum-waste remelting requires a temperature-control and monitoring system that can be implemented with a simple operating architecture. This study functionally evaluates a microcontroller- and Android-based electric-furnace prototype under an aluminum-waste melting test load. The system uses an Arduino Uno, a K-type thermocouple with a MAX6675 interface, an SSR-40DA solid-state relay, an LCD, an HC-05 Bluetooth module, and an Android application. Temperature-reading agreement was assessed at setpoints from 100 *to* 700 °C *at* 100 °C *intervals, using five repeated readings at each point and a Wintact WT323D infrared thermometer as a comparison instrument rather than a traceable calibration standard. From* 35 *paired readings, the mean sensor bias relative to the comparison instrument was* −1.05 °C*, the mean absolute error was* 1.05 °C*, the RMSE was* 1.34 °C*, and the mean absolute percentage error was* 0.25%*. Linear regression between the infrared reading (X) and sensor reading (Y) yielded Y=0.187+0.9969X, with R=0.999996 and R^2=0.999992. Five functional tests using* 450 g *of aluminum waste at a* 700 °C *setpoint produced melting times of* 44 min 27 s *to* 49 min 18 s*, with a mean of approximately* 47 min 8 s*, a standard deviation of approximately* 2 min 3 s*, and a coefficient of variation of* 4.34%*. The Android interface supported setpoint adjustment, start/stop operation, temperature and elapsed-time monitoring, and data logging. The results demonstrate initial functional feasibility of the prototype at the* 450 g *test load; maximum capacity, energy efficiency, control dynamics, communication reliability, metallurgical quality, and field operation were not validated in this study.*

1. PENGANTAR

Aluminium dapat digunakan kembali melalui jalur daur ulang sekunder dengan kebutuhan energi dan sumber daya yang lebih rendah dibandingkan produksi primer, tetapi keberhasilan proses tetap dipengaruhi oleh heterogenitas *scrap*, kontaminasi, oksidasi, dan tahap pra-perlakuan (Al-Alimi dkk., 2024; Raabe dkk., 2022). Pada limbah kemasan, *coating* dan kontaminan organik dapat meningkatkan

pembentukan *dross* dan menurunkan *metal yield* selama *remelting* (Vallejo-Olivares dkk., 2024). Karena itu, pengendalian kondisi termal merupakan salah satu aspek penting pada proses peleburan ulang aluminium.

Untuk kapasitas terbatas, tungku peleburan sederhana tetap relevan karena kebutuhan investasi dan operasinya lebih rendah daripada fasilitas peleburan industri. Penelitian tungku aluminium skala kecil banyak membahas desain termal, insulasi, temperatur, kapasitas, waktu peleburan, dan konsumsi bahan bakar, termasuk tungku berbahan bakar LPG yang diuji pada massa *scrap* berbeda (Hariningsih dkk., 2026; Pancarana & Suherman, 2023). Namun, hasil antar-tungku tidak dapat dibandingkan langsung tanpa mempertimbangkan sumber energi, massa beban, geometri, insulasi, dan kondisi operasi.

Pemanas listrik memberikan jalur pengendalian yang berbeda karena suplai energi dapat diputus-hubungkan secara elektrik. Kombinasi mikrokontroler, termokopel tipe K, MAX6675, dan *solid state relay* telah digunakan untuk kontrol temperatur dua-posisi pada *electric furnace* (Pratama dkk., 2023), sedangkan sistem kontrol tungku berbasis mikrokontroler juga telah diterapkan pada *heat treatment* (Putra & Pratama, 2023). Pada skala industri, pengendalian temperatur telah berkembang menuju metode optimasi dan prediksi berbasis data (Chen dkk., 2022; Dai dkk., 2024; Ekinci dkk., 2025; Hussein dkk., 2022).

Pemantauan digital juga telah diterapkan pada *furnace*. Yılmaz dkk. (2018) mengembangkan sistem pemantauan dan kontrol *furnace* industri melalui aplikasi iOS/Android yang terhubung dengan PLC/SCADA, sedangkan Prayoga & Risfendra (2025) menggunakan perangkat terkoneksi internet untuk pemantauan temperatur *furnace*. Temuan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan mikrokontroler, termokopel, Android, maupun konektivitas digital secara individual bukan merupakan kebaruan.

Literatur yang dikaji menunjukkan bahwa masih terdapat ruang untuk mengevaluasi integrasi prototipe tungku elektrik sederhana, kontrol temperatur *on–off*, antarmuka Android, dan pengukuran temperatur pada satu sistem yang digunakan dalam siklus peleburan limbah aluminium aktual. Kontribusi yang dituju bukan pengembangan algoritma kontrol baru atau pembuktian efisiensi energi, melainkan integrasi dan evaluasi fungsional perangkat pada kondisi uji yang terdokumentasi.

Berdasarkan posisi tersebut, kesenjangan penelitian dirumuskan pada kebutuhan evaluasi fungsional terintegrasi yang mencakup kesesuaian pembacaan temperatur, implementasi kontrol dua-posisi, fungsi pemantauan bergerak, dan keterulangan waktu proses pada prototipe tungku elektrik. Penelitian ini tidak dirancang untuk mengkarakterisasi respons dinamis pengendali secara lengkap, mengukur efisiensi termal, menentukan kapasitas maksimum, atau menilai kualitas metalurgi hasil peleburan.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi secara fungsional sistem kontrol dan pemantauan tungku elektrik berbasis mikrokontroler dan Android untuk peleburan limbah aluminium pada beban uji 450 g. Evaluasi difokuskan pada: (1) implementasi kontrol temperatur *on–off*; (2) uji kesesuaian pembacaan termokopel tipe K/MAX6675 terhadap instrumen inframerah pembanding pada 100–700 °C; (3) analisis deskriptif lima siklus peleburan; dan (4) verifikasi fungsi antarmuka Android. Kontribusi penelitian diposisikan sebagai integrasi dan validasi fungsional prototipe, bukan sebagai klaim superioritas pengendali, efisiensi energi, atau kesiapan operasi lapangan.

2. METODE

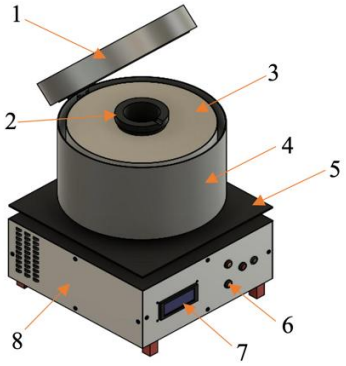
2.1 Rancangan penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan eksperimental dan dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Dharma Andalas. Tahapan penelitian meliputi identifikasi kebutuhan sistem, pemilihan perangkat kontrol dan sensor, perakitan rangkaian, pengembangan *firmware* dan aplikasi Android, integrasi sistem, uji kesesuaian pembacaan temperatur, serta lima pengujian fungsional peleburan. Evaluasi dibatasi pada fungsi sistem dan data yang direkam selama penelitian; pengujian kapasitas maksimum, efisiensi energi, karakteristik dinamis pengendali secara lengkap, dan evaluasi metalurgi tidak termasuk dalam rancangan eksperimen.

Rangkaian sistem kontrol disusun agar termokopel tipe K/MAX6675 memberikan umpan balik temperatur kepada Arduino Uno, yang selanjutnya mengendalikan SSR pada jalur elemen pemanas. Antarmuka lokal menggunakan LCD dan push button, sedangkan komunikasi dengan perangkat Android menggunakan Bluetooth HC-05.

2.2 Sistem tungku dan elemen pemanas

Tungku yang diuji merupakan prototipe tungku peleburan elektrik berdimensi 342 × 351 × 459 mm (Gambar 1). Daya elemen pemanas 945 W pada sumber 220 V AC dan temperatur rancangan maksimum 800 °C. Nilai 945 W diperlakukan sebagai nilai rancangan, bukan pengukuran konsumsi daya aktual selama pengujian. Wadah peleburan menggunakan krusibel grafit berkapasitas nominal 5 kg; kapasitas tersebut merupakan kapasitas nominal wadah dan tidak ditafsirkan sebagai kapasitas operasi tungku yang telah tervalidasi. Elemen pemanas menggunakan kawat resistif komersial berdiameter 0,7 mm dengan hambatan nominal 5,12 Ω/m. Panjang elemen dan resistansi total aktual setelah fabrikasi tidak tercatat pada dataset penelitian sehingga tidak digunakan untuk menghitung performa energi. Untuk spesifikasi teknis detail tungku dapat dilihat pada Tabel 1.



No	Keterangan
1	Penutup tungku
2	Kowi
3	Lapisan dinding tungku
4	*Cover* dinding tungku
5	Pembatas *cover* dan ruang kontrol
6	*Push Button*
7	*LCD* 20x4
8	Ruang kontrol

Gambar 1: Sistem tungku pelebur elektrik

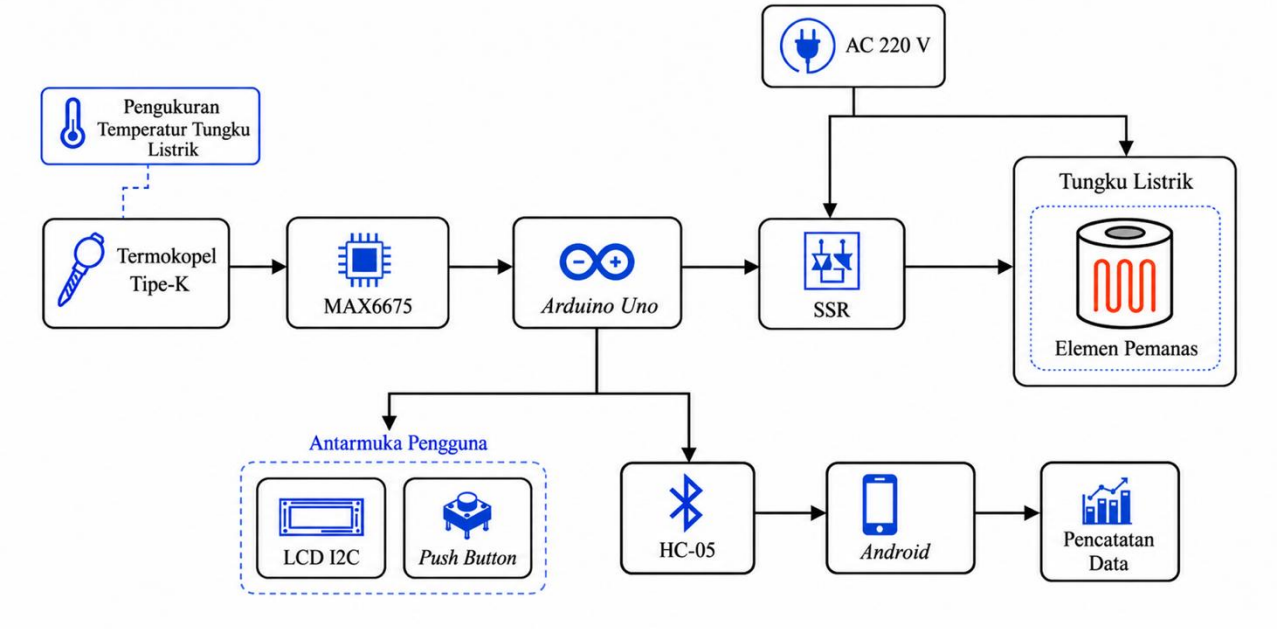
Tabel 1: Spesifikasi Tungku Elektrik Pelebur Aluminium

Sub-sistem / Komponen	Spesifikasi
Jenis alat	: Prototipe tungku pelebur elektrik
Dimensi tungku (P×L×T)	: 342 × 351 × 459 mm
Sistem pemanasan	: Elemen pemanas resistif berbentuk *coil*
Sumber listrik utama	: 220 V AC, 1 fase
Daya elemen pemanas	: 945 W (nilai rancangan; bukan daya aktual terukur)
Temperatur maksimum rancangan	: 800 °C
Rentang *setpoint* pengujian	: 100–700 °C
Wadah peleburan	: Krusibel grafit
Kapasitas nominal krusibel	: 5 kg (belum divalidasi sebagai kapasitas operasi tungku)
Dinding/isolasi tungku	: Semen tahan api / *refractory* C-16
Elemen pemanas	: Kawat resistif/*coil*
Material kawat pemanas	: Kawat resistif komersial
Diameter kawat pemanas	: 0,7 mm
Hambatan nominal kawat	: 5,12 Ω/m
Sistem kontrol	: Kontrol temperatur *closed-loop* dua-posisi (*on–off*)
Mikrokontroler	: Arduino Uno
Sensor temperatur	: Termokopel tipe-K
Modul konverter termokopel	: MAX6675
Resolusi nominal MAX6675	: 0,25 °C/*count*
Data keluaran MAX6675	: Digital, 12-bit temperatur
Aktuator/saklar daya	: FOTEK SSR-40DA (masukan kendali DC, keluaran beban AC; model aktual)
Antarmuka pengguna lokal	: LCD I2C (4 x 20)
Input pengguna	: *Push button*
Modul komunikasi	: *Bluetooth* HC-05
Komunikasi MCU–Android	: *Bluetooth* Serial/UART, 9600 bps
Perangkat monitoring	: *Smartphone Android*
Perangkat lunak aplikasi Android	: MIT *App Inventor*
Pencatatan data	: *Google Spreadsheet* melalui *smartphone Android* sebagai *gateway*
Perangkat lunak pemrograman MCU	: Arduino IDE
Library utama	: *LiquidCrystal_*I2C dan MAX6675
Arsitektur sinyal utama	: Tipe-K → MAX6675 → Arduino Uno → SSR → *heater*
Arsitektur monitoring	: Arduino → HC-05 → Android → *Google Spreadsheet*

Sumber: data eksperimen 2026

2.3 Sistem kontrol temperatur

Sistem kontrol menggunakan Arduino Uno sebagai pengendali utama. Temperatur dibaca dari termokopel tipe K melalui MAX6675. Keluaran digital Arduino mengendalikan FOTEK SSR-40DA, yaitu SSR dengan masukan kendali DC dan keluaran beban AC, untuk memutus atau menghubungkan suplai 220 V AC ke elemen pemanas. Rancangan Arsitektur sistem kontrol dan pemantauan tungku elektrik ini dapat dilihat pada Gambar 2.



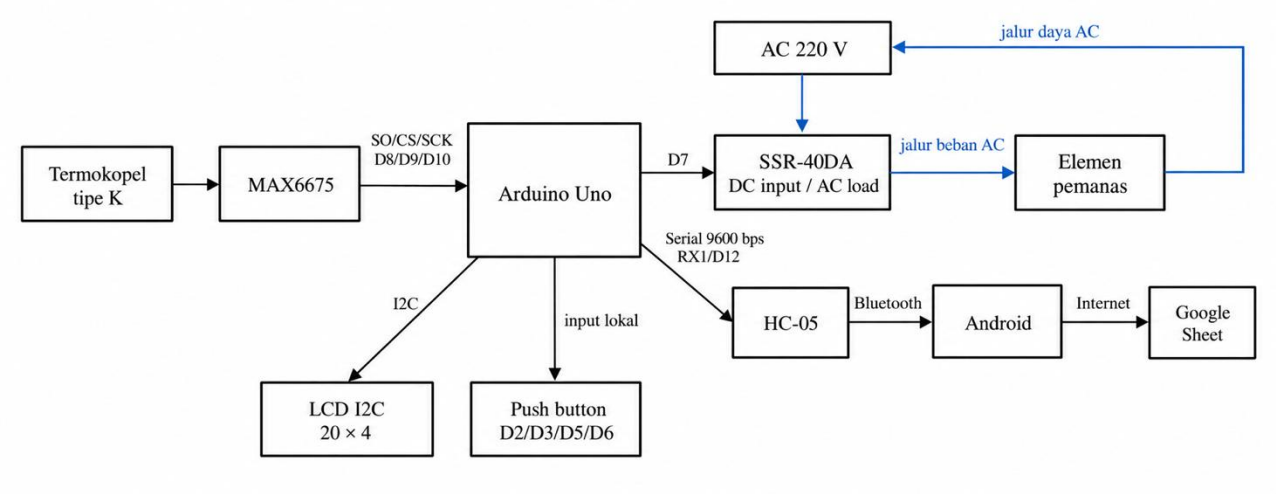
Gambar 2: Arsitektur sistem kontrol dan pemantauan tungku elektrik.

Logika kontrol yang diterapkan merupakan kontrol dua-posisi (*on–off*). Berdasarkan *firmware*, SSR diaktifkan ketika temperatur terukur lebih rendah daripada *setpoint* dan dinonaktifkan ketika temperatur sama dengan atau melebihi *setpoint*. Sistem tidak menerapkan *hysteresis* atau *dead band* eksplisit. Keputusan kontrol dilakukan pada setiap siklus *loop* setelah pembacaan temperatur.

$$\boldsymbol{u(k) = 1} \text{ untuk } \boldsymbol{T(k) < T_set}; \qquad \boldsymbol{u(k) = 0} \text{ untuk } \boldsymbol{T(k) \geq T_set}; \tag{1}$$

dengan *u(k)=1* menunjukkan *heater* aktif, *u(k)=0* menunjukkan *heater* tidak aktif, *T(k)* adalah temperatur yang digunakan oleh pengendali pada siklus ke-*k,* dan *T_set* adalah *setpoint* temperatur. *Firmware* memuat jeda eksplisit 100 ms setelah pembacaan temperatur; karena eksekusi LCD, komunikasi serial, dan fungsi lain terjadi dalam *loop* yang sama, interval aktual keputusan kontrol sedikit lebih besar daripada 100 ms dan tidak direkam secara terpisah. Frekuensi *switching* SSR di sekitar *setpoint* juga tidak direkam sehingga tidak digunakan sebagai indikator performa.

Sistem dilengkapi LCD I2C 20×4 untuk menampilkan *setpoint*, temperatur aktual, waktu proses, dan status operasi. HC-05 berkomunikasi dengan Arduino pada 9600 bps. *Firmware* memeriksa bit status *open-circuit* dari MAX6675 pada fungsi pembacaan termokopel, tetapi penelitian tidak melakukan validasi *fail-safe* independen terhadap kegagalan sensor, kegagalan SSR, atau temperatur berlebih. Karena itu, manuskrip ini tidak menyatakan sistem telah memenuhi persyaratan keselamatan untuk operasi lapangan. Skema kelistikan fungsional sistem kontrol, komunikasi, dan jalur beban sistem tungku elektrik ini dapat dilihat pada Gambar 3.

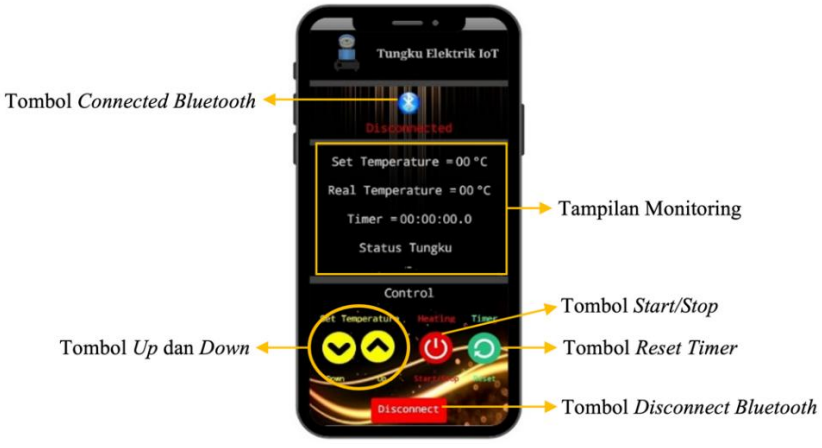


Gambar 3: Skema kelistrikan fungsional sistem kontrol, komunikasi, dan jalur beban.

2.4 Sistem pemantauan Android

Komunikasi antara mikrokontroler dan perangkat Android dilakukan melalui HC-05 menggunakan komunikasi serial *Bluetooth* pada 9600 bps. Aplikasi dikembangkan dengan MIT App Inventor. Berdasarkan fungsi yang diimplementasikan, antarmuka menyediakan koneksi/pemutusan Bluetooth, perubahan *setpoint*, perintah *start*/*stop*, reset waktu proses, pemantauan *setpoint* dan temperatur aktual, serta status tungku (Gambar 4). *Smartphone* selanjutnya dapat meneruskan data ke *Google Spreadsheet* sehingga berperan sebagai *gateway* antara koneksi *Bluetooth* lokal dan layanan pencatatan daring.

Penelitian tidak merekam metrik komunikasi seperti *latency*, *packet loss*, jangkauan efektif, interval pembaruan aktual, maupun tingkat keberhasilan pengiriman perintah. Oleh karena itu, bagian ini diperlakukan sebagai verifikasi fungsi antarmuka dan pencatatan data, bukan evaluasi performa komunikasi waktu nyata. Istilah IoT tidak digunakan untuk menggambarkan jalur Arduino–HC-05; konektivitas daring terjadi melalui smartphone sebagai *gateway*.



Gambar 4: Antarmuka aplikasi Android untuk pengaturan dan pemantauan proses peleburan.

2.5 Pengujian

Material uji berupa limbah aluminium dari kaleng minuman bekas dan digunakan sebagai *feedstock* pada pengujian fungsional. *Dataset* penelitian tidak menyimpan rincian terstandar mengenai merek, komposisi paduan, kondisi *coating*, ukuran potongan, penggunaan

fluks, massa *dross*, atau *metal yield*; karena itu parameter tersebut tidak digunakan sebagai dasar analisis. Pengujian temperatur dilakukan dengan membandingkan pembacaan termokopel tipe K/MAX6675 terhadap termometer inframerah *Wintact* WT323D pada tujuh *setpoint*, yaitu 100, 200, 300, 400, 500, 600, dan 700 °C. Pada setiap *setpoint* tersedia lima pembacaan berulang, sehingga analisis menggunakan 35 pasangan data. Lima pembacaan tersebut diperlakukan sebagai *repeated readings* pada kondisi pengujian.

Termometer inframerah digunakan sebagai instrumen pembanding dan bukan sebagai standar kalibrasi tertelusur. Informasi ketertelusuran kalibrasi, pengaturan emisivitas, jarak/sudut pengukuran, waktu stabilisasi, dan gradien temperatur ruang tungku tidak terdokumentasi lengkap pada dataset yang tersisa. Oleh sebab itu, hasil dibatasi sebagai uji kesesuaian pembacaan dalam konfigurasi eksperimen yang digunakan. Analisis meliputi rerata dan simpangan baku pada setiap *setpoint*, bias, *mean absolute error (MAE)*, *root mean square error (RMSE)*, galat persentase absolut, serta regresi linear menggunakan 35 pasangan pembacaan dengan T_IR sebagai X dan *T*_sensor sebagai Y. Koefisien R dan R^2 digunakan hanya untuk menggambarkan linearitas, bukan akurasi absolut. Pengujian fungsional peleburan dilakukan lima kali pada massa 450 g dan *setpoint* 700 °C. Waktu proses mengikuti *endpoint* operasional yang tercatat ketika material dinyatakan telah melebur oleh operator; kriteria observasional rinci tidak terdokumentasi sehingga waktu tersebut diperlakukan sebagai indikator fungsional, bukan *endpoint* metalurgi baku.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Realisasi sistem kontrol dan pemantauan

Sistem yang direalisasikan mengintegrasikan Arduino Uno, termokopel tipe K/MAX6675, FOTEK SSR-40DA, elemen pemanas resistif, LCD, HC-05, dan aplikasi Android. Sensor memberikan umpan balik temperatur kepada mikrokontroler dan SSR memutus/menghubungkan daya elemen pemanas berdasarkan perbandingan temperatur terhadap *setpoint*. Pemeriksaan *firmware* menegaskan bahwa pengendali merupakan kontrol *on–off* tanpa *hysteresis* eksplisit; karena itu sistem tidak dikategorikan sebagai PID dan penelitian tidak mengklaim karakterisasi dinamis pengendali secara lengkap.

Konfigurasi kontrol memiliki kemiripan dengan *electric furnace* yang dilaporkan (Pratama dkk., 2023) , yang juga menggunakan Arduino Uno, termokopel tipe K, MAX6675, dan SSR. Perbedaan sistem penelitian ini berada pada integrasi antarmuka Android dan penerapannya pada siklus peleburan limbah aluminium. Perbedaan tersebut diposisikan sebagai perbedaan arsitektur dan konteks aplikasi, bukan sebagai bukti keunggulan kuantitatif terhadap penelitian sebelumnya.

Pada penelitian ini, indikator yang dapat dievaluasi dari *dataset* adalah kesesuaian pembacaan temperatur, keterulangan waktu peleburan pada beban tetap 450 g, dan fungsi antarmuka. Parameter *rise time*, *settling time*, *overshoot*, amplitudo osilasi, frekuensi *switching* SSR, serta *respons* terhadap gangguan tidak dapat dihitung karena *log* temperatur terhadap waktu tidak tersedia. Pembatasan ini menjadi dasar perubahan positioning penelitian dari evaluasi performa kontrol komprehensif menjadi evaluasi fungsional prototipe.

3.2 Hasil pengujian pembacaan temperatur

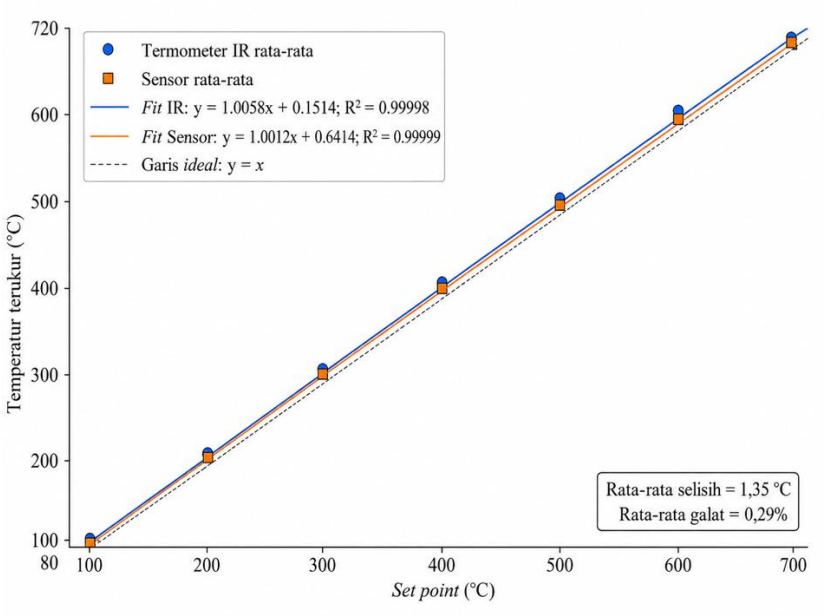
Tabel 2 memperlihatkan hasil perhitungan menunjukkan bahwa pembacaan sensor cenderung lebih rendah daripada termometer inframerah pada rentang pengujian. Bias rata-rata T_sensor−T_IR adalah −1,05 °C, MAE 1,05 °C, RMSE 1,34 °C, dan galat persentase absolut rata-rata 0,25%. Selisih rerata terkecil terjadi pada *setpoint* 100 °C sebesar 0,25 °C dan terbesar pada 700 °C sebesar 2,23 °C. Regresi pembacaan dengan T_IR sebagai X dan T_sensor sebagai Y menghasilkan Y=0,187+0,9969X, R=0,999996, dan R^2=0,999992. Nilai R dan R^2 yang sangat tinggi menunjukkan linearitas hubungan pada rentang 100–700 °C, tetapi tidak diperlakukan sebagai bukti akurasi absolut.

Tabel 2: Statistik uji kesesuaian pembacaan termokopel tipe K/MAX6675 terhadap termometer inframerah.

Setpoint (°C)	Sensor, rerata ± SD (°C)	IR, rerata ± SD (°C)	Bias rerata sensor−IR (°C)	Selisih rerata absolut (°C)	Galat absolut rerata (%)
100	100,41 ± 0,22	100,66 ± 0,36	-0,25	0,25	0,25
200	201,15 ± 0,52	201,50 ± 0,72	-0,35	0,35	0,17
300	301,50 ± 0,66	302,38 ± 0,41	-0,88	0,88	0,29
400	401,30 ± 0,80	402,38 ± 0,53	-1,08	1,08	0,27
500	500,60 ± 0,42	501,48 ± 0,44	-0,88	0,88	0,18
600	601,15 ± 0,52	602,86 ± 0,57	-1,71	1,71	0,28
700	701,95 ± 1,05	704,18 ± 1,38	-2,23	2,23	0,32
Bias rata-rata	—	—	-1,05	—	—
MAE	—	—	—	1,05	—
MAPE	—	—	—	—	0,25
RMSE	—	—	—	1,34	—
Regresi linear	Y=0,187+0,9969X	—	—	—	—
Koefisien korelasi (R)	0,999996	—	—	—	—
Koefisien determinasi (R^2)	0,999992	—	—	—	—

Sumber: data eksperimen 2026

Gambar 5 dihasilkan dari 35 pasangan data pembacaan sensor termokopel tipe K/MAX6675 dan termometer inframerah. Simpangan baku pembacaan sensor pada setiap *setpoint* berada sekitar 0,22–1,05 °C, sedangkan instrumen inframerah sekitar 0,36–1,38 °C. Statistik tersebut menggambarkan penyebaran *repeated readings* pada konfigurasi pengujian, tetapi tidak ditafsirkan sebagai ketidakpastian metrologis karena ketertelusuran instrumen pembanding dan komponen ketidakpastian lain tidak tersedia.



Gambar 5: Hubungan 35 pasangan pembacaan termokopel tipe K/MAX6675 dan termometer inframerah.

Pratama dkk. (2023) melaporkan pengujian termokopel tipe K pada *electric furnace* dengan konfigurasi dan prosedur berbeda. Angka hasil kedua penelitian tidak digunakan untuk menyatakan superioritas karena rentang temperatur, instrumen pembanding, konfigurasi sensor, dan prosedur pengukuran tidak identik. Keterbatasan utama uji kesesuaian penelitian ini adalah penggunaan termometer inframerah sebagai instrumen pembanding, emisivitas, serta geometri pengukuran yang lengkap. Validasi berikutnya sebaiknya menggunakan sensor referensi kontak yang terkalibrasi dan tertelusur.

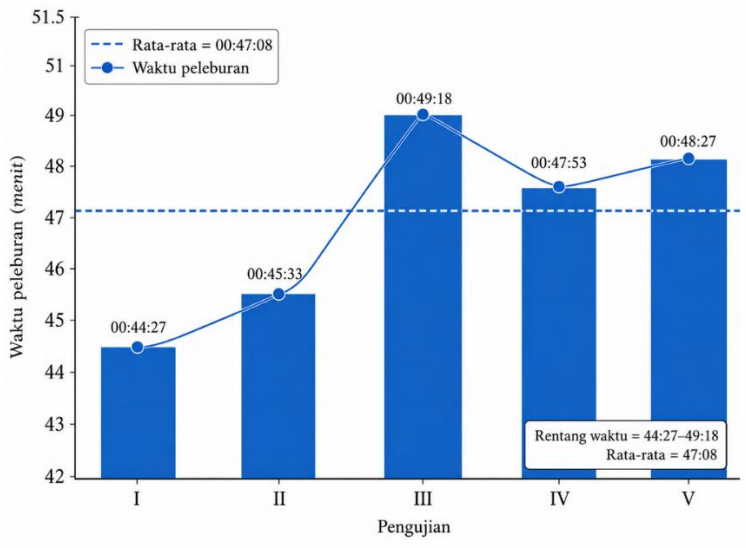
3.3 Hasil pengujian peleburan limbah aluminium

Pada Tabel 3 dan Gambar 6 dapat dilihat bahwa lima pengujian fungsional pada beban tetap 450 g menghasilkan waktu peleburan 44 menit 27 detik sampai 49 menit 18 detik. Rata-rata waktu adalah 47 menit 7,6 detik (dibulatkan menjadi 47 menit 8 detik), dengan simpangan baku 122,6 detik atau sekitar 2 menit 3 detik dan koefisien variasi 4,34%. Nilai tersebut menggambarkan variasi waktu proses pada kondisi pengujian yang tersedia dan tidak digunakan untuk mengekstrapolasi performa pada kapasitas krusibel 5 kg.

Tabel 3: Hasil lima pengujian fungsional peleburan 450 g limbah aluminium

Pengujian	T awal sensor (°C)	T awal IR (°C)	T akhir sensor (°C)	T akhir IR (°C)	Waktu
I	33,50	33,2	700,25	702,0	00:44:27
II	33,25	32,9	700,75	701,1	00:45:33
III	31,50	31,2	700,50	702,3	00:49:18
IV	32,25	32,1	700,25	701,3	00:47:53
V	32,50	32,0	700,25	702,7	00:48:27
Rata-rata	32,60	32,28	700,40	701,88	00:47:08

Sumber: data eksperimen 2026



Gambar 6: Variasi waktu peleburan pada lima pengujian fungsional menggunakan 450 g limbah aluminium.

Dibandingkan penelitian tungku LPG, waktu peleburan pada prototipe ini tidak dapat digunakan sebagai indikator superioritas karena massa beban, sumber energi, daya termal, geometri tungku, insulasi, dan prosedur operasi berbeda (Pancarana & Suherman, 2023; Hariningsih dkk., 2026). Fokus analisis karena itu diarahkan pada keterulangan lima pengujian internal. Percobaan III mempunyai temperatur awal sensor terendah (31,50 °C) sekaligus waktu terlama (49 menit 18 detik), tetapi jumlah data yang terbatas dan tidak tersedianya *log* temperatur-waktu tidak memungkinkan hubungan sebab-akibat ditetapkan.

Beban 450 g digunakan sebagai beban tetap pada desain pengujian fungsional yang tersedia. Nilai tersebut setara sekitar 9% dari kapasitas nominal krusibel 5 kg, tetapi kapasitas krusibel tidak identik dengan kapasitas operasi tungku. Karena tidak dilakukan variasi massa, hasil hanya berlaku untuk kondisi uji 450 g dan tidak digunakan untuk menyatakan kapasitas maksimum, produktivitas, atau kelayakan operasi mendekati 5 kg.

Material uji berasal dari kaleng minuman aluminium bekas. *Packaging scrap* dapat mengandung *coating* dan kontaminan yang memengaruhi *dross* serta *metal recovery* (Vallejo-Olivares dkk., 2024). Penelitian tidak mengukur massa *dross*, *metal yield*, komposisi kimia, porositas, atau sifat hasil cor. Oleh karena itu, istilah peleburan limbah aluminium pada artikel ini merujuk pada objek proses pemanasan dan pencairan, bukan evaluasi kualitas metalurgi hasil daur ulang.

3.4 Evaluasi pemantauan berbasis Android

Selama pengujian fungsional, aplikasi Android digunakan sebagai antarmuka tambahan untuk memberikan perintah kontrol dan menampilkan parameter proses. Fungsi yang tersedia meliputi perubahan *setpoint*, *start*/*stop* pemanasan, reset waktu proses, pemantauan temperatur aktual, waktu proses, status tungku, dan penerusan data menuju *Google Spreadsheet* melalui *smartphone*. Implementasi fungsi tersebut sesuai dengan arsitektur *firmware* yang mengirimkan *setpoint*, temperatur, waktu, dan status melalui kanal serial *Bluetooth.*

Kontribusi bagian ini bukan penggunaan Android pertama pada *furnace*. Sistem iOS/Android untuk *furnace* industri telah dilaporkan), sedangkan sistem monitoring berbasis Internet juga telah dikembangkan pada *furnace* lain (Prayoga & Risfendra, 2025). Perbedaan sistem penelitian ini adalah integrasi Android melalui HC-05 pada prototipe tungku elektrik yang digunakan dalam pengujian peleburan limbah aluminium.

Penelitian tidak menyimpan data kuantitatif mengenai *latency*, *packet loss*, jarak efektif, jumlah keberhasilan/gagal perintah, atau kehilangan data pada *Google Spreadsheet*. Karena itu, hasil tidak digunakan untuk menyimpulkan reliabilitas komunikasi maupun performa waktu nyata. Evaluasi tersebut diperlukan apabila sistem dikembangkan menuju operasi lapangan.

3.5 Posisi penelitian dan keterbatasan

Posisi penelitian ini adalah evaluasi fungsional prototipe sistem kontrol dan pemantauan, bukan evaluasi performa tungku industri atau proses daur ulang secara menyeluruh. Integrasi kontrol *on–off*, pengukuran temperatur, antarmuka Android, dan pencatatan data dapat direalisasikan pada lima pengujian beban 450 g. Nilai praktis sistem berada pada kesederhanaan arsitektur dan integrasi fungsi, bukan pada kompleksitas algoritma atau klaim superioritas kuantitatif terhadap pengendali lain.

Dataset yang tersedia memungkinkan analisis kesesuaian pembacaan temperatur dan variasi waktu peleburan, tetapi tidak memungkinkan karakterisasi *rise time*, *settling time*, *overshoot*, osilasi temperatur, frekuensi *switching*, *duty cycle*, maupun respons gangguan karena *log* temperatur-waktu belum tersedia. Demikian pula, konsumsi energi aktual tidak diukur sehingga efisiensi termal dan energi spesifik belum dihitung pada pengujian ini.

Keterbatasan lain meliputi: penggunaan termometer inframerah belum ada dokumentasi ketertelusuran dan parameter emisivitas lengkap; beban peleburan tetap 450 g tanpa variasi hingga kapasitas nominal krusibel; pada penelitian ini juga belum dilakukan pengukuran *metal yield*, *dross*, komposisi, dan kualitas hasil cor; *endpoint* peleburan yang bersifat operasional; belum adanya evaluasi kuantitatif reliabilitas komunikasi; serta belum tersedianya validasi keselamatan independen untuk proteksi arus, pembumian, *over-temperature*, kegagalan sensor, maupun kegagalan SSR. Penelitian lanjutan perlu memprioritaskan validasi temperatur dengan sensor referensi kontak tertelusur, perekaman kurva temperatur-waktu, pengukuran energi aktual, variasi beban, dan evaluasi keselamatan sebelum pengujian lapangan.

4 KESIMPULAN

Prototipe sistem kontrol dan pemantauan tungku elektrik berbasis Arduino Uno, termokopel tipe K/MAX6675, SSR-40DA, dan Android dapat dioperasikan secara fungsional pada pengujian peleburan limbah aluminium dengan beban 450 g. Perhitungan ulang 35 pasangan pembacaan temperatur menghasilkan bias rata-rata −1,05 °C terhadap instrumen inframerah pembanding, MAE 1,05 °C, RMSE 1,34 °C, dan galat persentase absolut rata-rata 0,25%; nilai korelasi yang tinggi diperlakukan sebagai indikator linearitas, bukan akurasi absolut.

Lima pengujian fungsional pada *setpoint* 700 °C menghasilkan waktu rata-rata sekitar 47 menit 8 detik dengan simpangan baku sekitar 2 menit 3 detik dan koefisien variasi 4,34%. Antarmuka Android menyediakan fungsi pengaturan *setpoint*, *start*/*stop*, pemantauan temperatur dan waktu, serta pencatatan data melalui *smartphone* sebagai *gateway*.

Kontribusi penelitian terletak pada integrasi dan evaluasi fungsional kontrol *on–off*, pengukuran temperatur, dan pemantauan Android dalam satu prototipe tungku elektrik. Hasil tidak memvalidasi kapasitas 5 kg, efisiensi energi, dinamika kontrol, reliabilitas komunikasi, kualitas metalurgi hasil peleburan, keselamatan operasi, atau kesiapan lapangan. Pengembangan berikutnya perlu memprioritaskan pengukuran temperatur tertelusur, perekaman respons temperatur terhadap waktu, pengukuran energi, variasi massa beban, dan evaluasi keselamatan sistem.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih atas dukungan Program Penelitian Dosen Pemula (PDP) melalui BIMA Tahun 2026 pada penelitian berjudul “Pengembangan Teknologi Alat Pelebur Logam Elektrik Hemat Energi Skala UMKM Berbasis Mikrokontroler dan IoT untuk Pengolahan Sampah Aluminium” (Nomor Kontrak Induk: 289/C3/DT.05.00/PL-BARU/2026, Nomor Kontrak Turunan: 01.21/PDP/LPPM-UNIDHA/V/2026).

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat dianggap memengaruhi hasil atau pembahasan dalam artikel ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan. Seluruh penulis juga bertanggung jawab atas integritas, keakuratan, dan keabsahan isi artikel ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Aisha Hafiza Saptomo : Konseptualisasi, Metodologi, Investigasi, Kurasi Data, Analisis Formal, Visualisasi, Penulisan - Draf Awal.

Meiki Eru Putra : Metodologi, Validasi, Penyediaan Sumber Daya, Supervisi, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan.

Islahuddin : Supervisi, Administrasi, Validasi, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan, Perolehan Pendanaan.

Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan

DAFTAR PUSTAKA

Al-Alimi, S., Yusuf, N. K., Ghaleb, A. M., Lajis, M. A., Shamsudin, S., Zhou, W., Altharan, Y. M., Abdulwahab, H. S., Saif, Y., Didane, D. H., Ikhwan, S. T. T., & Adam, A. (2024). Recycling Aluminium for Sustainable Development: A Review of Different Processing Technologies in Green Manufacturing. Results in Engineering, 23, 102566.

Altharan, Y. M., Shamsudin, S., Al-Alimi, S., Saif, Y., & Zhou, W. (2024). A Review on Solid-State Recycling of Aluminum Machining Chips and Their Morphology Effect on Recycled Part Quality. Heliyon, 10(14), e34433.

Chen, X., Dai, J., & Luo, Y. (2022). Temperature Prediction Model for a Regenerative Aluminum Smelting Furnace by a Just-in-Time Learning-Based Triple-Weighted Regularized Extreme Learning Machine. Processes, 10(10), 1972.

Chen, X., Saada, M. Ben, Lavisse, B., & Ammar, A. (2025). Recent Advances in the Remelting Process for Recycling Aluminium Alloy Chips: A Critical Review. International Journal of Material Forming, 18, 42.

Dai, J., Ling, P., Shi, H., & Liu, H. (2024). A Multi-Step Furnace Temperature Prediction Model for Regenerative Aluminum Smelting Based on Reversible Instance Normalization-Convolutional Neural Network-Transformer. Processes, 12(11), 2438.

Ekinci, S., Izci, D., Gider, V., Abualigah, L., Bajaj, M., & Zaitsev, I. (2025). Efficient Control Strategy for Electric Furnace Temperature Regulation Using Quadratic Interpolation Optimization. Scientific Reports, 15, 154.

Hariningsih, Syamsudin, A., & Darmawan, B. R. (2026). Performance Evaluation of a Small-Scale LPG Aluminium Melting Furnace Using Four-Layer Refractory Insulation. Media Mesin, 27(2).

Hussein, M. M., Alkhalaf, S., Mohamed, T. H., Osheba, D. S., Ahmed, M., Hemeida, A., & Hassan, A. M. (2022). Modern Temperature Control of Electric Furnace in Industrial Applications Based on Modified Optimization Technique. Energies, 15(22), 8474.

Krall, P., Weißensteiner, I., & Pogatscher, S. (2024). Recycling Aluminum Alloys for the Automotive Industry: Breaking the Source-Sink Paradigm. Resources, Conservation and Recycling, 202, 107370.

Pancarana, I. D. M., & Suherman, I. K. (2023). Design, Manufacturing, and Evaluation of Mini Scale Aluminum Melting Furnace Fueled by LPG Gas to Support Practicum Activities. International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology, 7(7), 134–141.

Pratama, B. E., Pauzi, G. A., Suciyati, S. W., & Supriyanto, A. (2023). Heating Rate Control in Electric Furnace with SSR and K-Type Thermocouple Using Arduino Uno Atmega 328P. Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology, 4(1), 10–18.

Prayoga, N., & Risfendra. (2025). Implementation of IoT for Temperature Monitoring System on Combustion Furnace. Journal of Industrial Automation and Electrical Engineering, 2(2), 91–97.

Putra, M. E., & Pratama, A. (2023). Perancangan Sistem Kontrol Tungku Heat Treatment Elektrik Berbasis Mikrokontroler. Jurnal Penelitian Dan Pengkajian Ilmiah Eksakta, 2(2), 168–176.

Raabe, D., Ponge, D., Uggowitzer, P. J., Roscher, M., Paolantonio, M., Liu, C., Antrekowitsch, H., Kozeschnik, E., Seidmann, D., Gault, B., Geuser, F. De, Deschamps, A., Hutchinson, C., Li, Z., Prangnell, P., Robson, J., Shanthraj, P., Vakili, S., & Pogatscher, S. (2022). Making Sustainable Aluminum by Recycling Scrap: The Science of "Dirty" Alloys. Progress in Materials Science, 128, 100947.

Shah, M. B. N., Zailan, N., Abidin, A. F. Z., Halim, M. F., Annuar, K. A., Azahar, A. H., Harun, M. H., & Yaakub, M. F. (2019). PID-Based Temperature Control Device for Electric Kettle. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 9(3), 1683–1693.

Vallejo-Olivares, A., Gertjegerdes, T., Høgåsen, S., Friedrich, B., & Tranell, G. (2024). Effects of Compaction and Thermal Pre-Treatments on Generation of Dross and Off-Gases in Aluminium Recycling. Journal of Sustainable Metallurgy, 10, 69–82.

Yılmaz, C., Yılmaz, E. N., Işık, M. F., Usalan, M. A. S., Sönmez, Y., & Özdemir, V. (2018). Design and Implementation of Real-Time Monitoring and Control System Supported with IOS/Android Application for Industrial Furnaces. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 13(9), 1236–1244.