

SPEARMAN CORRELATION ANALYSIS OF AIR AND BILLET TEMPERATURE IN ALUMINUM HOMOGENIZATION USING IoT-BASED REAL-TIME DATA COLLECTION

Filzah Amanina Afiqah^{*1}, Murman Dwi Prasetyo², Teddy Sjafrizal³

^{1,2,3} School of Industrial Engineering, Telkom University, Indonesia
Email: ¹filzahamaninaafiqah@telkomuniversity.ac.id, ²murmandwi@telkomuniversity.ac.id,
³teddysjafrizal@telkomuniversity.ac.id

(Article received: September 11, 2024; Revision: September 25, 2024; published: October 30, 2024)

Abstract

Understanding the correlation between the parameters involved in the homogenization process of aluminum billets contributes to better process control. As a critical step in the production of aluminum billets, failure to control the homogenization temperature can lead to variations in product quality and a negative effect on mechanical strength. To address this issue, this study aims to understand the correlation between air and billet temperature of homogenization using temperature data obtained from thermocouple sensors placed at different points in the oven and billet. The temperature data was collected in real time through an Internet of Things (IoT) network. Spearman correlation analysis was performed on the collected data to determine the relationship between temperatures at different measurement points. The analysis results show that the air temperature at the Z2 right point had a strong correlation with the billet temperature, with a correlation value of 0.90. In contrast, the correlation between air temperature and billet temperature at Z1 Left was lower, indicating a weaker correlation and resulting in uneven heat distribution. These results highlight the importance of controlling the air temperature at Z2 Right to improve the temperature distribution during heat treatment. In addition, this study provides a real case in the implementation of real-time monitoring technology for better understanding on industrial process, especially heat treatment process.

Keywords: Aluminum alloy, Spearman correlation, Heat treatment, IoT

ANALISIS KORELASI SPEARMAN TERHADAP SUHU UDARA DAN BILLET DALAM PROSES HOMOGENISASI ALUMINIUM MENGGUNAKAN PENGUMPULAN DATA REAL-TIME BERBASIS IoT

Abstrak

Memahami korelasi antara parameter yang terlibat dalam proses homogenisasi billet aluminium berkontribusi pada pengendalian proses yang lebih baik. Sebagai langkah krusial dalam produksi billet aluminium, kegagalan dalam mengontrol suhu homogenisasi dapat menyebabkan variasi kualitas produk dan berdampak negatif pada kekuatan mekanis. Untuk mengatasi masalah ini, studi ini bertujuan untuk memahami korelasi antara suhu udara dan suhu billet dalam proses homogenisasi dengan menggunakan data suhu yang diperoleh dari sensor *thermocouple* yang ditempatkan di berbagai titik di oven dan billet. Data suhu dikumpulkan secara *real-time* melalui jaringan Internet of Things (*IoT*). Analisis korelasi Spearman dilakukan pada data yang dikumpulkan untuk menentukan hubungan antara suhu di berbagai titik pengukuran. Hasil analisis menunjukkan bahwa suhu udara di titik Z2 kanan memiliki korelasi yang kuat dengan suhu billet, dengan nilai korelasi sebesar 0,90. Sebaliknya, korelasi antara suhu udara dan suhu billet di Z1 kiri lebih rendah, menunjukkan korelasi yang lebih lemah dan mengakibatkan distribusi panas yang tidak merata. Hasil ini menekankan pentingnya pengendalian suhu udara di Z2 kanan untuk memperbaiki distribusi suhu selama perlakuan panas. Selain itu, studi ini memberikan kasus nyata dalam penerapan teknologi pemantauan *real-time* untuk pemahaman yang lebih baik tentang proses industri, terutama proses perlakuan panas.

Kata kunci: Aluminium alloy, Korelasi Spearman, Perlakuan panas, IoT

1. PENDAHULUAN

Perlakuan panas bertujuan untuk mengoptimalkan sifat-sifat campuran logam,

termasuk pada paduan aluminium. Paduan ini membutuhkan proses homogenisasi untuk mereduksi segregasi unsur pada area fasa yang terbentuk. Perlakuan ini memastikan unsur pencampur paduan aluminium seperti tembaga, magnesium, dan silikon tersebar secara merata sesuai dengan fasanya, sehingga mampu memaksimalkan sifat mekanik, fisik, atau kimia dari logam dasar [1], [2]. Tipikal homogenisasi dilakukan dengan memanaskan aluminium billet pada suhu antara 450 °C hingga 550 °C. Suhu tersebut dipertahankan selama 2 hingga 4 jam, diikuti dengan pendinginan terkendali [3].

Kemampuan untuk mengendalikan suhu mempengaruhi hasil homogenisasi [4]. Ketidakstabilan suhu menyebabkan pembentukan struktur dan fasa yang tidak diinginkan yang berdampak negatif pada kekuatan dan sifat mekanik billet serta menurunkan kualitas produk akhir [5]. Fluktuasi suhu yang berlebihan selama proses perlakuan panas dapat menyebabkan penurunan kekerasan material hingga sekitar 10% [6]. Perlakuan panas berlebih (*overheat treatment*), terjadi ketika suhu yang diterapkan pada billet melebihi tingkat yang diperlukan untuk mencapai homogenisasi optimal [7]. *Overheat treatment* dapat menyebabkan penurunan kekuatan mekanik dari 69 hingga 72 kg/mm² menjadi 58 hingga 60 kg/mm², yang menunjukkan penurunan sekitar 10–15% [6].

Di sisi operasional, suhu pada pengaturan oven sangat berkemungkinan untuk berbeda dengan aktual suhu yang dialami oleh logam ketika perlakuan panas. Suhu pada panel pengaturan oven dipilih jauh lebih tinggi dibandingkan dengan actual suhu di dalam oven. Perbedaan tersebut menjadi lebih kentara ketika oven mendapatkan beban penuh, mengakibatkan distribusi panas sangat bergantung kepada lokasi. Dengan keadaan ini, memodelkan sebaran suhu pada oven diperlukan sebagai langkah untuk bisa menentukan pengaturan suhu oven.

Pemodelan suhu internal oven homogenisasi yang akurat memerlukan data aktual. Data tersebut merupakan hasil pembacaan suhu oleh *thermocouple* yang diletakkan di berbagai titik di dalam oven. Pembacaan *thermocouple* tersebut dapat dipantau secara *real-time* dan ditransmisikan dengan memanfaatkan teknologi *internet-of-things (IoT)* [8]. Sistem ini menghasilkan dataset yang reliable serta dapat memberikan gambaran fluktuasi suhu *real-time* [9]. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk memadukan kemampuan *IoT* dalam mengumpulkan data suhu oven homogenisasi yang sehingga mampu menghasilkan korelasi antara suhu udara di dalam oven suhu di permukaan aluminium billet. Sehingga dapat digunakan untuk penentuan keadaan loading aluminium billet di oven.

Mengetahui hubungan antara suhu udara di dalam oven dan suhu billet di berbagai titik dapat memberikan wawasan mengenai distribusi panas selama proses perlakuan panas. Pemahaman ini

memungkinkan penyesuaian parameter proses secara *real-time* untuk menghindari ketidakstabilan suhu yang dapat mengakibatkan *overheat treatment* atau *underheat treatment*. Dengan demikian, kualitas akhir dari produk aluminium dapat lebih terjaga, dan proses produksi dapat berjalan dengan lebih efisien. Selain itu, dengan integrasi teknologi *IoT*, penelitian ini dapat menyediakan data *real-time* yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian proses secara lebih efisien. Data yang diperoleh dari berbagai titik pengukuran dalam oven memberikan pemahaman komprehensif tentang bagaimana suhu udara mempengaruhi suhu billet secara keseluruhan, yang pada akhirnya dapat digunakan untuk mengoptimalkan konfigurasi oven dan meningkatkan konsistensi serta kualitas produk akhir [10].

Meskipun studi ini terbatas pada analisis korelasi Spearman untuk memahami hubungan antara suhu udara di dalam oven dan suhu pada aluminium billet, integrasi teknologi *IoT* tetap memainkan peran penting dalam pengumpulan data *real-time* yang akurat dan andal. *IoT* memungkinkan pemantauan berkelanjutan terhadap kondisi suhu di berbagai titik dalam oven, yang kemudian dapat dianalisis untuk menemukan pola-pola tertentu yang mungkin mempengaruhi kualitas hasil homogenisasi [11]. Data *real-time* yang dikumpulkan melalui *IoT* memberikan gambaran yang lebih mendetail tentang fluktuasi suhu selama proses berlangsung [12], sehingga memungkinkan penyesuaian parameter yang lebih tepat waktu dan mengurangi risiko terjadinya *overheat treatment* atau *underheat treatment*. Hasil dari analisis korelasi dapat menjadi landasan bagi penelitian lebih lanjut yang berfokus pada optimasi proses homogenisasi paduan logam lain.

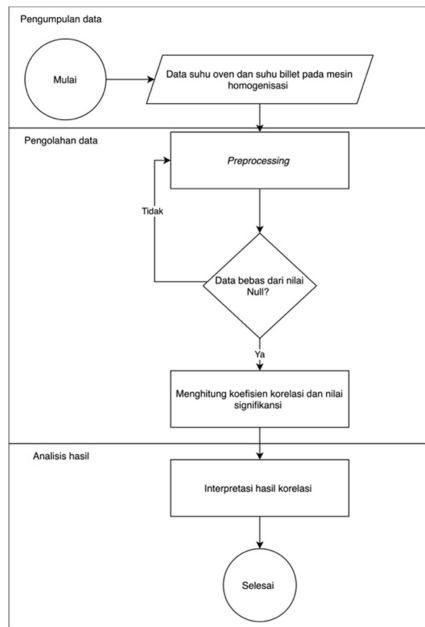
Studi ini menawarkan pendekatan yang berbeda dari penelitian sebelumnya. Jika pada penelitian sebelumnya, seperti pada linearisasi sensor suhu *thermocouple* tipe-K, polinomial regresi digunakan untuk mengatasi non-linearitas sensor [13], penelitian ini lebih berfokus pada analisis korelasi Spearman untuk menggambarkan hubungan antara suhu udara dan suhu billet tanpa memerlukan proses linearisasi yang rumit. Pendekatan ini memungkinkan penyesuaian dan pengendalian suhu secara efisien dengan memanfaatkan data *real-time* dari sistem *IoT*. Selain itu, *IoT* memberikan solusi yang lebih efektif dalam memantau suhu di berbagai titik oven, serta mempercepat pengambilan keputusan untuk mengoptimalkan proses homogenisasi aluminium [13].

Dengan menggunakan analisis korelasi Spearman, studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan kualitas proses homogenisasi. Selain itu, penelitian ini membuka jalan bagi aplikasi teknologi *IoT* yang lebih luas di berbagai sektor industri, khususnya dalam optimalisasi proses yang

melibatkan kontrol suhu berbasis data real-time. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk memahami korelasi antara suhu udara di dalam oven dengan suhu billet selama proses homogenisasi aluminium menggunakan teknologi IoT untuk pemantauan suhu secara real-time, serta melakukan analisis korelasi Spearman untuk menentukan hubungan antar titik pengukuran suhu di dalam oven.

2. METODE PENELITIAN

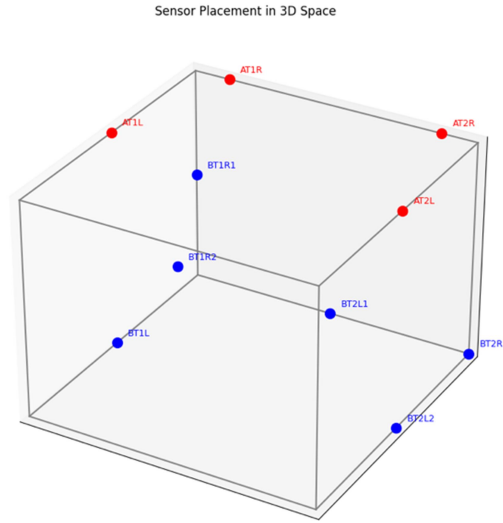
Proses penelitian ini melibatkan beberapa tahapan mulai dari pengumpulan data suhu secara real-time, pengolahan data, hingga analisis korelasi untuk memodelkan hubungan suhu oven dan aluminium billet selama proses homogenisasi. Diagram alir pada Gambar 1 menggambarkan keseluruhan alur proses, dari pengambilan data menggunakan sensor suhu, pembersihan data, hingga analisis menggunakan metode Spearman.



Gambar 1. Diagram alir proses penelitian

Kajian untuk memodelkan suhu ruang oven dengan aluminium billet pada proses homogenisasi dilakukan dengan memanfaatkan data sebaran suhu yang ditangkap oleh *thermocouple*. Sensor suhu tersebut tersebar di berbagai posisi di dalam oven dan pada beberapa bagian billet (Gambar 1). Data dari empat titik suhu oven dan enam titik suhu billet direkam secara *real-time* dan ditransmisikan dengan menggunakan jaringan *IoT*. Dataset yang terkumpul merupakan rekaman suhu yang diambil secara

otomatis setiap 24 jam sekali. Pengambilan data ini dilakukan dari tanggal 22 Februari 2024 sampai dengan 6 Juni 2024.



(a)

Variabel	Simbol
<i>Air Temperature Z1 Left</i>	AT1L
<i>Air Temperature Z1 Right</i>	AT1R
<i>Air Temperature Z2 Left</i>	AT2L
<i>Air Temperature Z2 Right</i>	AT2R
<i>Billet Temperature Z1 Left</i>	BT1L
<i>Billet Temperature Z1 Right 1</i>	BT1R1
<i>Billet Temperature Z1 Right 2</i>	BT1R2
<i>Billet Temperature Z2 Left 1</i>	BT2L1
<i>Billet Temperature Z2 Left 2</i>	BT2L2
<i>Billet Temperature Z2 Right</i>	BT2R

(b)

Gambar 2. (a) Ilustrasi penempatan sensor suhu (*thermocouple*), (b) Definisi simbol pada penamaan sensor suhu terpasang.

Data yang terkumpul diproses lanjut dengan menggunakan rentetan proses pemodelan yang dimulai dengan melakukan preprocessing. Langkah ini bertujuan untuk memastikan data yang akan digunakan memiliki keadaan yang baik, bebas dari data *null*.

Proses selanjutnya adalah melakukan analisis Korelasi Spearman yang dimulai dengan melakukan perhitungan Koefisien Korelasi Rank Spearman. Formula untuk menghitung koefisien tersebut adalah [13], [14],

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \tag{1}$$

dengan ρ = Koefisien Korelasi Rank Spearman, d_i^2 = perbedaan peringkat x dan y yang telah dikuadratkan, N_d = jumlah angka pasangan diskonkordan, n = jumlah sampel.

Korelasi Spearman adalah metode statistik non-parametrik yang sering digunakan untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan antara dua variabel ordinal [15]. Dalam konteks industri, terutama di bidang teknik dan produksi, metode ini telah banyak digunakan untuk menganalisis data yang tidak memenuhi asumsi distribusi normal atau ketika data bersifat ordinal. Misalnya, dalam produksi biofuel, korelasi Spearman digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antara berbagai parameter proses seperti suhu dan waktu reaksi, yang pada akhirnya meningkatkan hasil dan efisiensi produksi [16]. Selain itu, dalam proses pengelasan, korelasi Spearman membantu menganalisis dampak parameter seperti *friction stir welding* dan kecepatan rotasi terhadap kualitas sambungan [17]. Python digunakan untuk menganalisis data karena kemampuannya dalam mengelola data berukuran besar serta dukungan library yang mumpuni dalam perhitungan statistik, seperti Pandas untuk manipulasi data dan SciPy untuk menghitung korelasi Spearman. Metode Spearman dipilih karena lebih sesuai untuk jenis asumsi distribusi normal. Analisis ini diharapkan memberikan wawasan lebih mendalam mengenai distribusi suhu selama proses homogenisasi dan membantu mengidentifikasi parameter kritis yang mempengaruhi kualitas akhir produk aluminium. Dalam penelitian ini, data suhu yang diperoleh secara real-time dari sensor thermocouple dianalisis menggunakan metode Korelasi Spearman untuk mengevaluasi hubungan antara suhu udara di dalam oven dan suhu di berbagai titik aluminium billet selama proses homogenisasi. Melalui pendekatan ini, peneliti berharap dapat memahami lebih jauh distribusi suhu di dalam oven serta faktor-faktor yang berpotensi memengaruhi homogenisasi dan kualitas akhir aluminium secara keseluruhan. Syntax untuk perhitungan koefisien korelasi *rank* Spearman menggunakan Python adalah sebagai berikut:

```
# Mengimpor pustaka yang diperlukan
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import spearmanr
# Langkah 1: Memuat data dari Excel
data =
pd.read_excel('juni_homo_clean_with_mean.xlsx
')
# Langkah 2: Memilih kolom yang relevan untuk
analisis korelasi
columns_to_check = ['AT1L', 'AT1R', 'AT2L',
'AT2R', 'BT1L ', 'BT1R1', 'BT1R2', 'BT2L1',
'BT2L2', 'BT2R']
data_subset = data[columns_to_check]
# Langkah 3: Menghitung korelasi Spearman
spearman_corr =
data_subset.corr(method='spearman')
# Langkah 4: Menyaring korelasi antara suhu
```

```
udara dan suhu billet
at_columns = ['AT1L', 'AT1R', 'AT2L', 'AT2R']
bt_columns = ['BT1L ', 'BT1R1', 'BT1R2',
'BT2L1', 'BT2L2', 'BT2R']
filtered_corr =
pd.DataFrame(index=at_columns,
columns=bt_columns)
for at in at_columns:
    for bt in bt_columns:
        filtered_corr.loc[at, bt] =
spearman_corr.loc[at, bt]
filtered_corr = filtered_corr.astype(float)
# Langkah 5: Memvisualisasikan korelasi yang
disaring
plt.figure(figsize=(10, 8))
sns.heatmap(filtered_corr, annot=True,
cmap='coolwarm', center=0, linewidths=1,
linecolor='black', cbar_kws={'label':
'Spearman Correlation'}, vmin=-1, vmax=1)
plt.show()
```

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi ini menganalisis hubungan antara suhu udara di berbagai titik pengukuran di dalam oven homogenisasi dan suhu billet yang dihasilkan. Analisis menggunakan Korelasi Spearman untuk mengevaluasi kekuatan dan arah hubungan antara variabel-variabel tersebut. Hasil analisis disajikan dalam bentuk *heatmap* yang menunjukkan nilai korelasi dan *heatmap* p-value untuk menentukan signifikansi statistik dari korelasi yang diamati.

Berdasarkan hasil analisis korelasi yang ditampilkan pada Gambar 3 (a), rentang koefisien korelasi Spearman berkisar antara 0 hingga 1 untuk hubungan positif, dan 0 hingga -1 untuk hubungan negatif. Nilai koefisien mendekati 1 menunjukkan adanya korelasi positif yang kuat, di mana peningkatan suhu udara disatu titik menyebabkan peningkatan suhu billet di titik lainnya. Sebaliknya, jika nilai koefisien mendekati -1 menunjukkan korelasi negatif yang kuat, di mana peningkatan suhu udara di satu titik diikuti dengan penurunan suhu billet.

Pada Gambar 3 (b), tingkat signifikansi ditunjukkan melalui nilai p-value ($< 0,05$), yang mengindikasikan bahwa korelasi yang diamati signifikan secara statistik. Artinya, hubungan antara suhu udara dan suhu billet yang terdeteksi dalam penelitian ini bukanlah hasil dari kebetulan, melainkan mencerminkan hubungan yang nyata dan dapat diandalkan dalam proses homogenisasi aluminium

	BT1L	BT1R1	BT1R2	BT1L1	BT1L2	BT2R
AT1L	0.23	0.71	0.50	0.67	0.69	0.68
AT1R	0.07	0.76	0.57	0.77	0.75	0.76
AT2L	-0.04	0.74	0.53	0.76	0.74	0.75
AT2R	0.10	0.90	0.69	0.90	0.90	0.90

(a)

	BT1L	BT1R1	BT1R2	BT1L1	BT1L2	BT2R
AT1L	1.90E-01	3.50E-06	2.70E-03	1.80E-05	7.60E-06	1.50E-05
AT1R	7.10E-01	3.00E-07	4.70E-04	2.00E-07	4.80E-07	2.50E-07
AT2L	8.20E-01	8.50E-07	1.40E-03	2.30E-07	1.10E-06	6.30E-07
AT2R	5.70E-01	1.30E-12	7.80E-06	7.60E-13	1.00E-12	8.00E-13

(b)

Gambar 3. (a) *Heatmap* sebaran koefisien korelasi spearman antara air dan billet temperature. (b) Tingkat signifikansi antara air dan billet temperature. Korelasi positif dan signifikan antara suhu udara dan suhu billet teridentifikasi di semua titik pengukuran kecuali titik BT1L.

Suhu udara pada titik AT2R secara signifikan mempengaruhi suhu billet di berbagai titik lainnya, seperti yang ditunjukkan oleh nilai korelasi Spearman yang kuat. Fenomena tersebut berarti bahwa ada hubungan yang kuat antara suhu di titik AT2R dan suhu di titik-titik lain pada billet, yang ditunjukkan oleh nilai korelasi Spearman yang tinggi, sehingga suhu di AT2R memiliki pengaruh penting terhadap suhu billet, korelasi antara AT2R dan BT1R mencapai 0,90, menandakan hubungan yang sangat kuat. Korelasi serupa juga ditemukan antara AT2R dengan BT2L1 (0,90), BT2L2 (0,90), dan BT2R (0,90). Hasil ini menunjukkan bahwa fluktuasi suhu di AT2R secara langsung memengaruhi suhu billet di titik-titik tersebut, menjadikannya area yang sangat krusial untuk pengendalian suhu selama proses homogenisasi. Sebaliknya, ditemukan bahwa korelasi antara suhu udara di titik AT1L dan suhu billet pada titik BT1L cenderung lebih rendah. Kondisi ini mengindikasikan adanya distribusi panas yang tidak merata, yang mungkin diakibatkan oleh metode pemanasan yang tidak seragam, atau ketidakakuratan dalam penempatan *thermocouple* di titik BT1L. Rendahnya korelasi ini penting untuk diperhatikan karena dapat memberikan petunjuk tentang ketidakmerataan distribusi suhu yang dapat berdampak pada hasil akhir proses.

Visualisasi heatmap pada Gambar 3 memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai pola distribusi suhu yang tidak merata di dalam oven homogenisasi. Tampak bahwa zona dengan korelasi tinggi, seperti area di sekitar AT2R, cenderung menunjukkan distribusi suhu yang lebih konsisten di berbagai titik billet. Sebaliknya, area dengan korelasi rendah, seperti BT1L, menunjukkan fluktuasi suhu yang lebih besar. Variasi ini mungkin disebabkan oleh ketidaksempurnaan dalam penempatan sensor, konduktivitas termal material oven, atau metode pemanasan yang tidak seragam. Faktor-faktor tersebut berperan penting dalam menciptakan pola distribusi suhu yang tidak merata.

Distribusi suhu yang tidak merata memiliki implikasi langsung terhadap kualitas billet. Ketidakseimbangan ini menyebabkan bagian billet yang terpapar suhu lebih tinggi berisiko mengalami *overheat treatment*, yang dapat merusak sifat mekanik material seperti kekuatan dan kekerasan. Di sisi lain, suhu yang lebih rendah dapat menyebabkan *underheat treatment*, yang menghambat proses homogenisasi sempurna dan menurunkan kualitas produk akhir. Oleh karena itu, penting untuk mengidentifikasi dan mengatasi area dengan ketidakmerataan suhu ini untuk memastikan kualitas produk yang lebih baik.

4. DISKUSI

Studi ini telah berhasil memperlihatkan suhu di titik AT2R memiliki pengaruh terbesar terhadap suhu billet di berbagai titik lainnya dengan menggunakan Korelasi Spearman. Hal tersebut dikarenakan suhu di AT2R memiliki korelasi yang sangat kuat dengan suhu di BT1R, BT2L1, BT2L2, dan BT2R. Pengendalian suhu di titik AT2R layak menjadi prioritas utama dalam pola sebaran suhu di proses homogenisasi. Stabilitas suhu di AT2R sangat krusial karena fluktuasi suhu di titik ini langsung memengaruhi suhu billet di seluruh oven. Penyesuaian yang dilakukan pada suhu di AT2R akan memiliki dampak yang signifikan terhadap konsistensi suhu di seluruh area oven.

Meskipun pengendalian suhu di AT2R sangat penting, area dengan korelasi rendah seperti BT1L juga memerlukan perhatian khusus. Korelasi rendah ini mengindikasikan adanya distribusi suhu yang tidak merata, yang dapat mengakibatkan beberapa billet mendapatkan suhu yang tidak memadai atau berlebihan. Distribusi yang tidak merata ini mungkin dipengaruhi oleh faktor seperti ketidakakuratan penempatan sensor *thermocouple*, kualitas isolasi oven, atau aliran udara yang tidak optimal di dalam oven homogenisasi. Penambahan *thermocouple* di area dengan korelasi rendah atau penyesuaian pengaturan suhu dapat membantu memperbaiki distribusi panas dan meningkatkan kualitas produk akhir.

Visualisasi heatmap yang menunjukkan fluktuasi suhu lebih besar di area dengan korelasi rendah

menekankan pentingnya mempertahankan keadaan *thermocouple* untuk mendukung pengumpulan data yang berkualitas. Ketidakefektifan dalam distribusi suhu dapat berdampak negatif pada proses homogenisasi, menyebabkan *overheat* atau *underheat*, yang pada gilirannya dapat menurunkan kualitas dari proses ini. Oleh karena itu, strategi kontrol suhu yang

lebih tepat diperlukan untuk mengatasi ketidakmerataan ini.

Penggunaan teknologi IoT dalam pemantauan suhu secara real-time menawarkan solusi potensial untuk meningkatkan kontrol suhu. Dengan penerapan sistem IoT ini, distribusi panas dapat dioptimalkan, risiko *overheat treatment* dapat dikurangi, dan kualitas proses homogenisasi dapat ditingkatkan secara keseluruhan. Studi sebelumnya mengenai pemantauan suhu tungku muffle berbasis IoT juga mendukung temuan ini, dengan menunjukkan bahwa penggunaan IoT dapat meningkatkan efisiensi dan memberikan peringatan dini terhadap anomali suhu, yang pada gilirannya meningkatkan keandalan operasional [19].

Secara keseluruhan, analisis menunjukkan bahwa pengendalian suhu di titik AT2R adalah faktor kunci untuk memastikan kualitas proses homogenisasi. Selain itu, perhatian terhadap area dengan korelasi rendah seperti BT1L juga penting untuk mencapai distribusi suhu yang lebih merata dan optimal. Dengan mengimplementasikan strategi kontrol suhu yang berbasis pada data *real-time* dan pemodelan suhu yang akurat, proses homogenisasi dapat dilakukan dengan lebih efektif dan efisien, meminimalkan dampak negatif fluktuasi suhu pada kualitas billet.

Untuk penelitian lebih lanjut, disarankan agar dilakukan eksperimen dengan memperbanyak jumlah sensor di berbagai titik untuk meningkatkan akurasi pengumpulan data suhu. Selain itu, pengembangan algoritma prediktif berbasis machine learning dengan integrasi IoT dapat digunakan untuk memberikan peringatan dini jika terjadi ketidaksesuaian suhu, sehingga tindakan korektif dapat dilakukan lebih cepat dan tepat. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi serta keandalan dalam pengendalian proses.

5. KESIMPULAN

Hasil kajian ini berhasil memperlihatkan bahwa dataset yang dikumpulkan melalui sistem IoT dan dianalisis dengan metode Spearman memberikan wawasan mengenai pengaruh suhu udara terhadap suhu billet selama proses homogenisasi. Secara khusus, pengaruh tersebut menunjukkan keterkaitan suhu oven pada suatu titik terhadap suhu billet aluminium. Kajian ini menemukan bahwa suhu di titik AT2R memiliki dampak signifikan pada suhu billet, dengan korelasi yang sangat kuat. Penggunaan teknologi *IoT* membantu dalam mengumpulkan data akurat dan mendetail,

mendukung kebutuhan kontrol suhu yang ketat di AT2R untuk mencapai homogenisasi optimal. Sebaliknya, suhu di titik BT1L menunjukkan korelasi yang tidak signifikan, yang menyoroti perlunya evaluasi lebih lanjut terkait distribusi panas yang tidak merata atau masalah penempatan sensor di area tersebut. Data dari *IoT* juga mengungkapkan korelasi moderat pada titik AT1L, AT2L, dan AT1R, yang meskipun tidak sebesar AT2R, tetap memerlukan perhatian dalam pengelolaan suhu.

Implikasi dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan data *IoT* sangat penting untuk meningkatkan konsistensi dan efisiensi dalam proses homogenisasi, serta memastikan kualitas produk akhir. Dengan demikian, Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi praktik industri dan peningkatan efisiensi dalam proses homogenisasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Gianluca, "Analyzing variation in dispersoid formation in aluminum alloys by minor changes in homogenization temperature," *Michigan Technological University*, Houghton, Michigan, 2021. doi: 10.37099/mtu.dc.etr/1349.
- [2] M. F. Ijaz and F. H. Hashmi, "Revisiting alloy design of Al-base alloys for potential orthotics and prosthetics applications," *Crystals (Basel)*, vol. 12, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/cryst12121699.
- [3] M. Yeni, P. K. P. Zulaida, T. Partuti, and A. Pramono, "Homogenization process for aluminum as-cast from waste of beverage cans," *Materials Science Forum*, 2022.
- [4] D. Jiang, L. Zhang, and Y. Wang, "Control method for promoting homogenization treatment of continuous casting billet," 2020.
- [5] Y. Suo, L. Li, K. Sun, F. Cao, and X. Wang, "Effects of homogenization temperature on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of binary Zn-Mn alloys extruded at different temperatures," *Mater. Today Commun.*, 2024.
- [6] N. S. Wibowo and Nurato, "Analisis pengaruh ketidakstabilan temperature terhadap hasil kekerasan material dari proses heat treatment piston," *Jurnal Teknik Mesin Mercu Buana*, 2018.
- [7] R. K. Gupta, R. Panda, and V. A. Kumar, "Differential heat treatment response of cast plus homogenized and forged billets of aluminum alloy AA7075," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 30, no. 10, pp. 7863–7870, Oct. 2021, doi: 10.1007/s11665-021-05937-4.
- [8] F. Edler, "Reliable and traceable temperature measurements using thermocouples," *Johnson Matthey Technol. Rev.*, 2023.

- [9] M. S. Murthy, R. P. R. Kumar, B. Saikiran, I. Nagaraj, and T. Annavarapu, "Real time weather monitoring system using *IoT*," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Jun. 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202339101142.
- [10] F. Pask, P. Lake, A. Yang, H. Tokos, and J. Sadhukhan, "Industrial oven improvement for energy reduction and enhanced process performance," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 19, no. 1, pp. 215–224, 2017, doi: 10.1007/s10098-016-1206-z.
- [11] K. Brandon, J. Sai, J. Gram, and T. Bauernhansl, "Information-based preprocessing of PLC data for automatic behavior modeling," *Procedia CIRP*, 2023.
- [12] R. A. Atmoko, R. Riantini, and M. K. Hasin, "*IoT* real time data acquisition using MQTT protocol," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2017, doi: 10.1088/1742-6596/853/1/012003.
- [13] R. Anandanatarajan, U. Mangalanathan, and U. Gandhi, "Linearization of temperature sensors (K-type thermocouple) using polynomial non-linear regression technique and an *IoT*-based data logger interface," *Experimental Techniques*, vol. 47, no. 4, pp. 885-894, 2023
- [14] R. Vusvitasari, S. Nugroho, and D. S. Akbar, "Kajian hubungan koefisien korelasi Pearson (ρ), Spearman-Rho (r), Kendall-Tau (τ), Gamma (G), dan Somers (Dyx)," 2016.
- [15] P. Sedgwick, "Spearman's rank correlation coefficient," *BMJ*, 2014.
- [16] F. Ieva, M. Ronzulli, J. Romo, and A. M. Paganoni, "A Spearman dependence matrix for multivariate functional data," 2024.
- [17] U. Tyagi, N. Anand, and A. K. Jain, "Optimization of process variables during the production of biofuels," in *Clean Energy Production Technologies*, 2024, pp. 161–181.
- [18] T. Niranjana, B. Singaravel, B. Chakradhar, and S. S. Raju, "Process parameter optimization in friction stir welding process using Taguchi method," *Mater. Today, Proc.*, 2023.
- [19] J. Sulistyono, K. W. Wirakusuma, M. I. Rianto, and K. Kamaluddin, "Temperature Monitoring of Muffle Furnace based on Internet of Things," in *2021 IEEE 5th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE)*, pp. 150-153, Nov. 2021.

