

Optimalisasi Sistem *Monitoring* Temperatur Logam Cair pada Proses Pengecoran menggunakan *Pyrometer* Berbasis Internet of Things (IoT)

Muhammad Fathurrohman^{*}, Anugrah Erick Eryantono, Robby Debriand Rumbara

Balai Besar Logam dan Mesin, Kementerian Perindustrian,
Jl. Sangkuriang No. 12, Bandung, Indonesia 40135

Abstrak

Perkembangan teknologi berbasis internet yang pesat menyebabkan terjadinya perubahan pada sektor industri yang dikenal dengan Revolusi Industri 4.0. Industri manufaktur pengecoran merupakan salah satu sektor industri yang harus beradaptasi dengan perkembangan industri 4.0 agar dapat bersaing dalam meningkatkan kualitas produk coran. Beberapa parameter yang mempengaruhi kualitas produk coran adalah temperatur saat penuangan (*pouring*) dan laju penuangan. Penentuan temperatur penuangan harus memperhitungkan faktor kehilangan panas yang disebabkan oleh waktu pemindahan logam cair dan kondisi lingkungan sekitar. Penentuan temperatur tuang yang kurang tepat dapat menyebabkan terbentuknya porositas (*rongga*) pada produk hasil pengecoran. Karena pentingnya penentuan temperatur tersebut, maka pada penelitian ini dibangun sistem monitoring berbasis internet of things (IoT) untuk memantau temperatur logam cair saat proses pengecoran secara real-time. Sistem yang dibangun terdiri atas tiga bagian, yaitu: sensor temperatur, gateway dan server. Perangkat *pyrometer* digunakan untuk mengukur temperatur logam cair dan mengirimkannya ke gateway. Perangkat gateway kemudian mengirimkan data tersebut ke server. Pengguna dapat mengamati temperatur logam cair secara real-time melalui website. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan sistem monitoring berbasis IoT ini, dapat diperoleh database pengukuran temperatur logam cair yang optimal. Tingkat keakuratan pengukuran data temperatur tersebut mencapai 99,5%.

Kata kunci: *Internet of Things; monitoring; logam cair; pyrometer; gateway*

Abstract

[Title: Optimization of Metal Pouring Monitoring System using Pyrometer based on IoT] The rapid development of internet-based technology has led to system changes in the industrial sector, known as the Industrial Revolution 4.0. The casting manufacturing industry is one of the industrial sectors that must accompany technology development. Some parameters that affect the casting product are pouring temperature and pouring rate. Determination of pouring temperature should consider the heat loss factor caused by the molten metal's transfer time and the surrounding environmental conditions. Improper pouring temperature determination can cause unwanted porosity in casting products. In this study, we implemented a real-time monitoring system based on the Internet of Things (IoT) in a casting workshop to monitor the molten metal temperature during the casting process. The temperature of molten metal is measured by the *pyrometer* device and transmitted to the gateway device. Then, the gateway device sends the data to the server to be stored and processed. Users can observe the temperature in real-time through the website. The results show that this IoT-based monitoring system can obtain an optimal temperature database. The accuracy of the measurement of temperature data reaches 99.5%.

Keywords: *Internet of Things; monitoring; molten metal; pyrometer; gateway*

^{*)} Penulis Korespondensi.
E-mail: rohmanfathur26@gmail.com

1. Pendahuluan

Proses pengecoran logam merupakan proses pendinginan logam dari cairan logam yang dimasukkan pada suatu cetakan tertentu hingga menjadi produk logam padatan yang sesuai dengan bentuk cetakannya. Kualitas

produk hasil proses pengecoran dipengaruhi oleh beberapa parameter, diantaranya adalah temperatur saat penuangan (*pouring*) dan laju penuangan logam cair. Penentuan temperatur tuang yang kurang tepat dapat menyebabkan terjadinya cacat rongga (porositas) pada produk. Penentuan temperatur tuang ini harus memperhitungkan laju kehilangan panas saat rentang waktu pemindahan cairan logam dari tungku ke cetakan (Kassie, 2013).

Sistem pemantauan temperatur tuang pada proses pengecoran logam menjadi hal yang penting untuk mengontrol kualitas hasil produk coran di industri pengecoran. Pada dasarnya terdapat dua jenis sensor temperatur, yaitu: sensor kontak dan tidak kontak (*non-kontak*). Sensor temperatur yang umum digunakan untuk mengukur temperatur logam cair pada proses pengecoran adalah termokopel yang termasuk dalam kategori sensor kontak. Proses pengukuran dilakukan dengan cara merendam ujung bagian sensor ke logam cair ke dalam *furnace* sampai pembacaan temperatur yang ditunjukkan stabil. Metode pengukuran menggunakan termokopel ini memiliki beberapa kelemahan, antara lain: terdapat jeda waktu pengukuran sampai pembacaan stabil. Ujung termokopel hanya bisa dipakai beberapa kali, sehingga tidak bisa dilakukan secara terus-menerus (*continue*) dan menimbulkan biaya operasional tambahan. Selain itu, metode pengukuran ini cukup berbahaya karena memerlukan operator yang melakukan pengukuran cukup dekat dengan logam cair bersuhu di atas 1000°C (Usamentiaga et al., 2012).

Jika dibandingkan dengan sensor temperatur tipe kontak, sensor temperatur tipe *non-kontak* memiliki beberapa keunggulan, yaitu: dapat mengukur secara akurat temperatur objek tanpa adanya kontak fisik, dapat memantau temperatur objek yang sulit diakses atau objek bergerak, serta rentang pengukuran temperatur yang lebih tinggi. Keunggulan yang lain adalah interval waktu pengukuran yang rapat dan *continue*, sehingga sesuai untuk kebutuhan *monitoring* temperatur dengan rentang waktu tertentu (Boughton, 2013).

Pyrometer merupakan jenis sensor temperatur *non-kontak* yang dapat memenuhi kriteria yang dibutuhkan untuk *monitoring* temperatur objek pada suhu yang tinggi. Berkaitan dengan kebutuhan *monitoring* temperatur logam cair pada proses pengecoran, jenis *pyrometer* yang cocok adalah tipe *two-color*. Hal ini karena *pyrometer* tipe *two-color* memiliki keunggulan dalam mengukur temperatur absolut permukaan tanpa diperlukan data emisivitas dari permukaan objek tersebut, serta dapat mengkompensasi kondisi lingkungan berdebu yang dapat memengaruhi akurasi hasil pengukuran (Müller & Renz, 2001; Tapetado et al., 2016).

Pengembangan *Internet of Things* (IoT) pada berbagai bidang juga menyebabkan terjadinya perubahan

sistem pada sektor industri yang ditandai dengan digitalisasi sistem produksi dan proses industri yang kemudian dikenal dengan visi Industri 4.0 atau revolusi industri keempat. Digitalisasi proses produksi ketika diterapkan dapat memiliki dampak positif untuk menghasilkan produk yang berkualitas (Resende et al., 2018).

Proses *monitoring* merupakan bagian dari sistem yang melakukan penilaian sistematis terhadap suatu objek. Sistem ini bermanfaat dalam pemantauan kondisi suatu objek secara tepat waktu atau *real-time* (Mudjahidin & Putra, 2012). Sistem *monitoring* berbasis IoT secara umum menggunakan sistem akuisisi dan transmisi data khusus yang kemudian disimpan dalam *cloud server*. Pemanfaatan IoT dalam interaksi dan sensor memungkinkan komunikasi setiap peralatan elektronik ataupun data yang terbaca oleh peralatan tersebut ditampilkan dan disimpan di suatu sistem *display* dan *storage* tertentu. Sistem tersebut juga dapat memberikan *feedback* terhadap peralatan elektronik atau sensor pengirim data awal ataupun kepada peralatan elektronik lainnya (Patel & Patel, 2016).

Implementasi IoT untuk sistem *monitoring* temperatur dibangun berdasarkan referensi arsitektur yang terdiri dari 3 perspektif, yaitu: aspek *semantic* untuk interpretasi data dan informasi, aspek *internet* yang berhubungan dengan *gateway*, manajemen data (server), dan *networking*, serta aspek *things* yang berfokus pada *device* seperti sensor dan aktuator (Weyrich & Ebert, 2016).

Penelitian terkait pengaplikasian IoT pada sektor industri pengecoran logam telah dilakukan oleh Thillai Rani & Sivakumar. Sistem *monitoring* berbasis IoT digunakan untuk menganalisis tingkat konsumsi energi pada *workshop* pengecoran logam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan memanfaatkan teknologi IoT, kontrol tingkat konsumsi energi dan pengambilan keputusan terkait manajemen energi di industri pengecoran logam dapat dilakukan dengan mudah. Sehingga, ongkos produksi dapat dikurangi secara signifikan (Rani & Sivakumar, 2021).

Sanjith et al. telah melakukan penelitian terkait pemanfaatan teknologi IoT untuk *monitoring* temperatur logam cair pada proses pengelasan. *Monitoring* dilakukan untuk mengontrol kenaikan temperatur logam cair tersebut. Kenaikan temperatur yang terlalu tinggi dapat menyebabkan perubahan struktur mikro. Sistem yang dibangun terdiri dari sensor temperatur LM-35, transmisi *wireless*, mikrokontroler, serta server. Data hasil pengukuran temperatur kemudian dievaluasi menggunakan metode taguchi untuk menentukan temperatur optimal yang terjadi pada zona pengelasan (Sanjith et al., 2021). Perangkat yang digunakan pada sistem *monitoring* berbasis IoT pada penelitian tersebut

masih sebatas skala lab, sehingga belum cukup kuat (*robust*) jika diaplikasikan pada skala industri.

Sampai saat ini, penggunaan teknologi IoT pada sistem *monitoring* temperatur logam cair di *workshop* pengecoran masih belum banyak diaplikasikan. Oleh karena itu, pada penelitian ini sistem *monitoring* pengukuran temperatur logam cair berbasis IoT dibangun pada *workshop* pengecoran. Sistem *monitoring* dirancang berdasarkan pada referensi arsitektur yang terdiri dari sensor temperatur, *gateway Industrial Internet of Things* (IIoT), dan perangkat server. Penentuan jenis dan spesifikasi perangkat-perangkat tersebut disesuaikan dengan kebutuhan industri. Hasil pengukuran temperatur tersebut dimanfaatkan sebagai data analisis untuk menentukan temperatur proses pengecoran yang sesuai. Pengukuran temperatur menggunakan sensor tipe kontak yang selama ini dilakukan hanya sebatas pengukuran temperatur untuk memutuskan logam cair siap dituangkan ke dalam cetakan. Pemantauan dan pengumpulan data secara *real-time* tidak bisa dilakukan menggunakan sensor temperatur tipe kontak. Oleh karena itu, pada sistem *monitoring* berbasis IoT yang dibangun, sensor yang digunakan adalah sensor temperatur tipe non-kontak, yaitu *pyrometer*.

Justifikasi hasil pengukuran temperatur logam cair pada sistem *monitoring* berbasis IoT diperlukan untuk mengetahui kualitas data hasil pengukuran berdasarkan tingkat akurasi dan presisi sesuai dengan batas toleransi yang diizinkan. Tingkat akurasi dan presisi dapat diketahui dengan cara membandingkan data hasil pengukuran temperatur yang diperoleh dari sistem *monitoring* berbasis IoT dengan pengukuran secara langsung menggunakan sensor temperatur kontak atau termokopel. Tingkat akurasi dan presisi ditentukan dengan analisis pengolahan data statistik, yaitu: *bias* dan *variance*. *Bias* menggambarkan perbedaan antara rata-rata hasil pengukuran dengan nilai target. Sedangkan *variance* menunjukkan tingkat persebaran data hasil

pengukuran pada sistem *monitoring* (Khandelwal, 2018). Nilai *bias* dan *variance* pada suatu model pengukuran diilustrasikan pada Gambar 1 (Domingos, 2012).

Pada Gambar 1 ditunjukkan bahwa kualitas data yang baik akan menghasilkan *bias* dan *variance* yang rendah. Sedangkan *bias* dan *variance* yang tinggi memperlihatkan hasil pengukuran pada sistem *monitoring* yang belum mumpuni. Salah satu cara untuk meningkatkan kualitas hasil pengukuran tersebut adalah dengan melakukan kalibrasi alat.

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan sistem *monitoring* temperatur logam cair pada saat proses pengecoran logam menggunakan *pyrometer* berbasis IoT agar memiliki tingkat keakuratan yang tinggi.

2. Bahan dan Metode

Sistem *monitoring* temperatur yang akan dikembangkan terdiri atas 3 komponen utama, yaitu: Sensor temperatur, *Gateway Industrial Internet of Things* (IIoT), dan Server. Pemilihan komponen-komponen utama dalam pengembangan sistem *monitoring* temperatur logam cair pada proses pengecoran ini didasarkan pada kebutuhan saat proses pengecoran dan ketersediaan teknologi digital yang telah teruji di dunia industri.

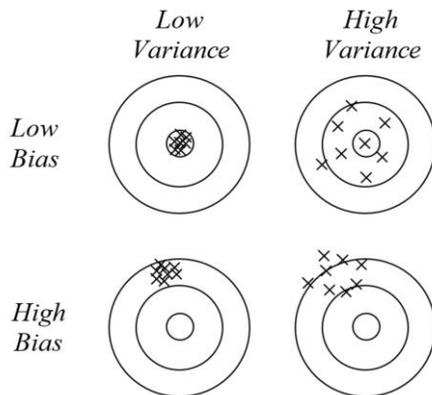
2.1 Sensor Temperatur

Proses pengecoran logam di dunia industri biasa dilakukan di ruangan terbuka sehingga toleransi hasil pengukuran logam cair saat proses pengecoran ditetapkan pada angka 20-30°C (temperatur ruang rata-rata di Kota Bandung). Kondisi lingkungan yang berdebu dan berasap menjadi tantangan tersendiri dalam proses pengukuran temperatur logam cair tersebut. Oleh karena itu, harus digunakan sensor temperatur jenis non-kontak yaitu *pyrometer* yang memiliki tingkat kepresisian pengukuran yang tinggi, dapat mengeliminasi kondisi lingkungan yang berasap dan berdebu, dan data hasil pengukurannya dapat disimpan dalam sistem *database* khusus agar dapat dievaluasi.

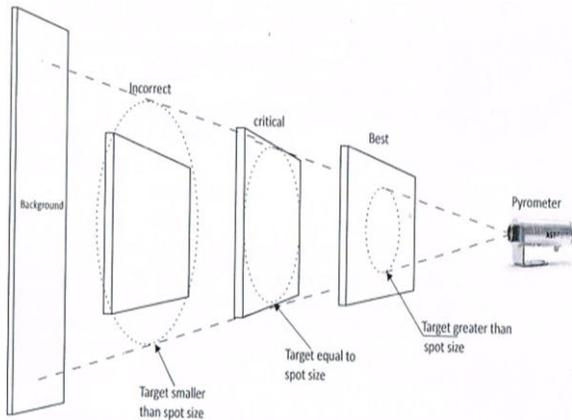
Pyrometer merupakan perangkat instrumen sensor temperatur yang dapat menangkap radiasi panas dari sumber (Jack et al., 2016). Pada penelitian ini, *pyrometer* yang dipilih adalah tipe *two-color*. Temperatur yang ditangkap oleh *pyrometer* berupa sinyal radiasi spektrum. Pada *pyrometer* tipe *two-color*, fenomena tersebut dijelaskan pada persamaan (1).

$$T_R = \left(\frac{1}{T} + \frac{\ln(\epsilon_1/\epsilon_2)}{c_2 \cdot (\lambda_2^{-1} - \lambda_1^{-1})} \right) \quad (1)$$

T_R atau temperatur rasio merupakan temperatur yang terukur oleh *two-color pyrometer*. Sedangkan T adalah temperatur sesungguhnya dari objek yang diukur.



Gambar 1. Ilustrasi *bias* dan *variance*



Gambar 2. Ilustrasi spot size pyrometer

Dari persamaan (1) terlihat bahwa untuk objek ukur yang emisivitasnya terbaca sama oleh kedua sensor ($\epsilon_1 = \epsilon_2$) atau biasa disebut *gray body* maka bagian kedua dari bagian sebelah kanan di persamaan tersebut bernilai nol sehingga T_R sama dengan T (Müller & Renz, 2001).

Faktor geometri merupakan salah satu faktor penting yang dapat mempengaruhi nilai koefisien pengukuran temperatur *pyrometer* (K). Pada dasarnya semakin dekat jarak *pyrometer* terhadap objek, semakin kecil daerah ukur dari permukaan objek (*spot size*) sehingga semakin presisi hasil pengukurannya. Ilustrasi *spot size* ditampilkan pada Gambar 2.

Posisi terbaik adalah posisi dimana *spot size pyrometer* lebih kecil dari ukuran objek (ilustrasi pada gambar paling kanan). *Spot size* juga dipengaruhi oleh sudut ukur *pyrometer*. Semakin landai sudut ukurnya, maka semakin besar *spot size* sehingga semakin berkurang tingkat presisi hasil pengukuran.

Berdasarkan hasil telaah dan pertimbangan yang telah dijelaskan sebelumnya, maka pada kegiatan penelitian ini digunakan *pyrometer* dengan spesifikasi yang dijelaskan pada Tabel 1. *Pyrometer* ini diaplikasikan pada pengukuran temperatur logam cair, khususnya logam *ferro* dengan ketentuan jarak *pyrometer* ke permukaan logam cair kurang lebih 1 m horizontal ke samping dan 1 m vertikal ke atas dengan sudut ukur $30-45^\circ$. Jarak tersebut merupakan jarak aman bagi operator untuk mengukur temperatur dan untuk menjaga temperatur di dalam *pyrometer*. Dengan jarak ukur *pyrometer* dan objek sekitar 1-1,5 m artinya daerah ukur (*spot size*) adalah sebesar 3-5 mm. Nilai ini sudah memenuhi kriteria pengukuran karena lebih kecil dari area/ ukuran objek yang diukur, yaitu logam cair.

Pada penelitian kali ini, digunakan alat ukur temperatur pembanding yang biasa digunakan di industri pengecoran, yaitu termokopel tipe R. Sensor termokopel tipe R merupakan sensor temperatur jenis kontak yang memiliki akurasi, ketahanan panas ($\pm 1600^\circ\text{C}$), serta

Tabel 1. Spesifikasi *pyrometer*

Kriteria	Spesifikasi
Tipe	Two-color
Jangkauan ukur	800-2500°C
Perbandingan jarak ke spot size	300:1
Rasio Emisivitas	0,7-1,25
Akurasi	$\pm 0,5\%$ tiap 1°C
Analog output	4-20mA
Digital output	RS-485
Daya	Max 2,5 Watt
Berat	1200 gram
Ukuran	$\varnothing 56 \times 185,5\text{mm}$
Pengarah	Laser

stabilitas pengukuran yang baik. Untuk menjaga kualitas hasil pengukuran, termokopel tipe R tersebut dikalibrasi secara berkala.

Penyimpangan hasil pengukuran temperatur menggunakan *pyrometer* dapat dihitung dengan persamaan (2) dan (3).

$$D_p = T_p - T_T \quad (2)$$

$$\%D_p = \frac{D_p}{T_T} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana D_p adalah deviasi pengukuran *pyrometer*, T_p adalah temperatur hasil pengukuran *pyrometer*, dan T_T adalah temperatur hasil pengukuran termokopel.

Tingkat akurasi dan presisi pada sistem pengukuran menggunakan *pyrometer* dapat diketahui melalui perhitungan tingkat *bias* dan *variance*. *Bias* diungkapkan dalam bentuk nilai mutlak yang merupakan selisih antara nilai rata-rata temperatur hasil pengukuran *pyrometer* dengan hasil pengukuran termokopel. Nilai *bias* yang semakin rendah menunjukkan akurasi pengukuran *pyrometer* yang semakin baik. Persamaan matematika untuk menentukan tingkat *bias* ditunjukkan pada persamaan (4) dan (5).

$$Bias = |\bar{T}_p - T_T| \quad (4)$$

$$\%Bias = \frac{|\bar{T}_p - T_T|}{T_T} \times 100\% \quad (5)$$

Dimana \bar{T}_p adalah temperatur rata-rata pengukuran *pyrometer* dan T_T adalah temperatur hasil pengukuran termokopel. Sedangkan *variance* merupakan ukuran persebaran data temperatur hasil pengukuran *pyrometer*. Ukuran persebaran data tersebut diungkapkan pada persamaan (6).



Gambar 3. Gateway IIoT (Bawah) dan Power Supply (Kanan Atas)

$$s^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n T_{p_i}^2 - (\sum_{i=1}^n T_{p_i})^2}{n(n-1)} \quad (6)$$

Dimana s^2 adalah *variance*, T_{p_i} adalah Nilai T_p ke i , dan n adalah ukuran sampel.

2.2 Gateway Industrial Internet of Things (IIoT)

Perkembangan teknologi komunikasi dan IoT menyebabkan perubahan metode komunikasi pada sistem manajemen data di industri. Komunikasi antar *device* di lapangan yang awalnya tidak bisa dilakukan secara langsung kini bisa dimungkinkan dengan cara menghubungkannya langsung dengan *cloud server*. *Industrial modular router* dan data *gateway* merupakan sebuah perangkat yang dirancang sebagai sistem integrator dan media komunikasi pada sistem industri. Fleksibilitas perangkat ini dapat mengakomodasi berbagai jenis tipe komunikasi dan protokol yang digunakan untuk berbagai jenis *device*.

Industrial router dan data *gateway* berfungsi sebagai media komunikasi antara *device* di lapangan

Tabel 2. Spesifikasi Gateway IIoT eWon Flexy 202

Perangkat	Spesifikasi
Key features	Flexible WAN & Field
Processor	ARM9
LAN Port	Ethernet port, UTP5, RJ45
Serial Port	RS232, RS422, RS485
Connection	2 DI's, 1 DO
Additional slot	4 slot fillers
Mounting	DIN rail
Power	24 VDC
Extension	FLX3401, I/O

dengan *cloud server* maupun pengguna. Prinsip kerjanya, data yang didapatkan oleh *device* di lapangan akan

dikirimkan ke sistem integrator melalui protokol komunikasi yang disesuaikan dengan protokol yang dimiliki oleh *device* (misalnya Modbus). *Gateway IIoT* akan mengolah data tersebut dan mengirimkannya ke server atau *cloud* melalui protokol komunikasi yang disesuaikan juga (misalnya HTTP), sehingga data dapat terkirim dan terbaca di server (eWon, 2020).

Gateway IIoT yang digunakan pada sistem ini adalah eWon Flexy 202 dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 2. *Gateway IIoT* terpasang pada DIN rail di dalam sebuah industrial box. *Gateway IIoT* terhubung dengan *power supply/* adaptor di atasnya. Data temperatur dari *pyrometer* masuk ke *gateway IIoT* melalui *extension card* yang berwarna hijau. Data tersebut dikirim ke server (*hardware*) melalui LAN port RJ45 menggunakan kabel LAN UTP CAT 6. Rangkaian *Gateway IIoT* yang telah terpasang ditampilkan pada Gambar 3.

2.3 Server, Aplikasi Backend dan Frontend

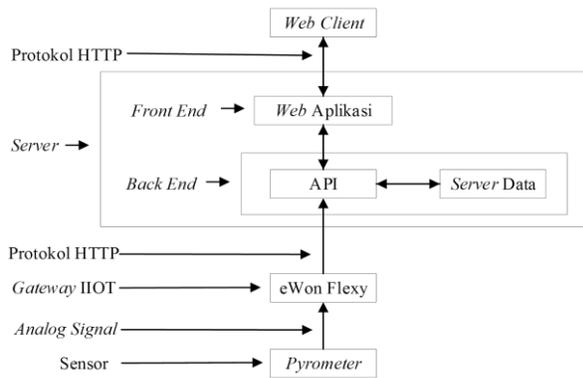
Perangkat server (*hardware*) pada sistem *monitoring* temperatur ini dipersiapkan sebagai media penyimpanan berbasis *cloud*. Spesifikasi PC server yang digunakan dijelaskan pada Tabel 3.

Perangkat server berjalan menggunakan sistem operasi CentOS berbasis Linux yang diinstall menggunakan *Virtual Machine*. Pada sistem operasi Linux ini, platform perangkat lunak Node.js berjalan pada sisi peladen dan aplikasi jaringan. Selain itu sistem manajemen basis data SQL yaitu MySQL juga digunakan pada sistem operasi Linux ini. Node.js digunakan untuk membangun aplikasi web dan juga API (*Application Programming Interface*), sedangkan MySQL digunakan sebagai *database* untuk menyimpan data hasil pengukuran temperatur pada *pyrometer*.

Sistem arsitektur IoT yang dijalankan pada server terbagi dalam dua bagian, yaitu: bagian *backend* dan bagian *frontend*. Bagian *frontend* dari sebuah website adalah bagian yang dapat dilihat secara langsung oleh pengguna (*user interface*), serta berkaitan dengan pengalaman pengguna (*user experience*) (Prawastiyo & Hermawan, 2020). Bahasa *script* yang digunakan untuk pengembangan bagian *frontend* server sistem *monitoring* ini berbasis JavaScript.

Backend adalah bagian belakang layar dari sebuah website. Pada bagian ini juga dibangun aplikasi yang menghubungkan antar mesin/ perangkat. Performa aplikasi server menjadi hal yang utama, semakin banyak penanganan *request* terhadap *client* dengan konsumsi sumber daya komputer minimal akan dapat menekan biaya operasional.

Terdapat beberapa bahasa pemrograman aplikasi web, yaitu: PHP, node.js dan phyton. Dari ketiga bahasa tersebut, node.js memiliki keunggulan dalam hal melaksanakan perintah tanpa perhitungan kriptografi intensif khususnya dalam hal respon terhadap *request*



Gambar 5. Topologi Logical



Gambar 4. Tampilan awal aplikasi monitoring BBLM

yang masuk serta lebih cepat saat mengakses hardware. Node.js memiliki pustaka server HTTP sendiri sehingga memungkinkan untuk menjalankan server web tanpa menggunakan program server web seperti Apache atau Nginx (Rompis & Aji, 2018).

Bahasa pemrograman JavaScript pada awalnya digunakan untuk membuat HTML dan CSS dalam web browser yang dijalankan pada bagian *frontend*. Kemudian pada Tahun 2009 bahasa pemrograman ini digunakan juga untuk membuat aplikasi pada server sehingga disebut juga sebagai Node.js (node JavaScript) (Shah & Soomro, 2017). Penggunaan bahasa yang sama pada sisi *frontend* dan *backend* ini menyebabkan komunikasi antara keduanya menjadi lebih efisien.

Pengembangan aplikasi *backend* dan *frontend* pada sistem *monitoring* temperatur ini dibangun menggunakan perangkat lunak node.js. Gambar 4 berikut menjelaskan topologi *logical* yang dibangun (Eryantono et al., 2020). Diagram yang ditunjukkan pada Gambar 4 merepresentasikan rancangan dan desain sistem *monitoring* temperatur di *workshop* pengecoran. Berdasarkan gambar tersebut dapat dijelaskan bahwa

Web Aplikasi adalah bagian *frontend* yang berinteraksi langsung dengan *Web Client/ User*. Sedangkan pada sisi *backend* terdapat API dan Server Data. Aplikasi berbasis web menggunakan *database* mysql sebagai *backend*. Akses ke *database* tidak dapat dilakukan secara langsung, melainkan melalui perantara *Application Programming Interface* (API). Fungsi API adalah untuk menjembatani antara web aplikasi dengan server data, artinya setiap data pada server data yang akan ditampilkan pada Web Aplikasi harus diatur oleh API terlebih dahulu. API digunakan sebagai standar komunikasi agar aplikasi dan perangkat yang berbeda dapat berkomunikasi, serta untuk membatasi akses langsung ke server data. API yang digunakan berbasis HTTP.

Data pengukuran temperatur dari *pyrometer* yang diperoleh berupa sinyal analog 4-20 mA. Data yang berupa sinyal analog dikirimkan ke IIoT Gateway eWon untuk diterjemahkan menjadi data digital. Gateway eWon kemudian mengirimkan data tersebut ke server data dengan interval pengiriman (*sample time*) 5 detik menggunakan protokol HTTP.

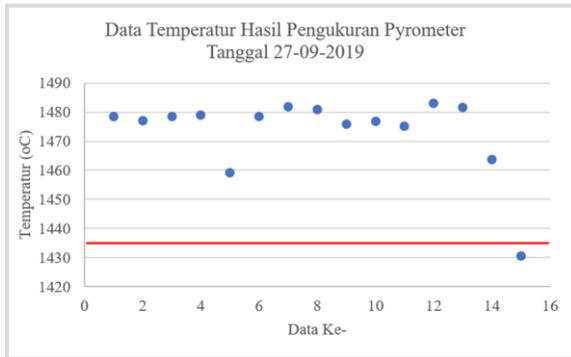
3. Hasil dan Pembahasan

Sistem *monitoring* temperatur logam cair pada proses pengecoran di BBLM dengan konfigurasi peralatan utama, yaitu: *pyrometer two-color*, *gateway IIoT* dan server beserta aplikasinya ini telah berhasil mendapatkan *database* temperatur penuangan logam yang bermanfaat untuk penelitian di bidang pengecoran logam. Selain itu, konfigurasi sistem *monitoring* ini juga dapat diterapkan pada berbagai sektor industri, khususnya industri pengecoran logam.

Pengambilan sampel data temperatur hasil pengukuran menggunakan *pyrometer* pada sistem *monitoring* temperatur dilakukan sebanyak tiga kali ketika proses pengecoran sedang dilaksanakan di *workshop* pengecoran BBLM. Data hasil pengukuran dapat diakses melalui web server BBLM. Tampilan awal web server ditunjukkan pada Gambar 5.

Tabel 3. Spesifikasi perangkat server

Perangkat	Spesifikasi
PC Server	HPE ProLiant DL20 Gen9; Intel Xeon E3-1220v6 Quad Core; ROM 16 GB
HDD	Harddisk HPE 1.2 TB SAS 10K
RAM	HPE DL20 8GB (1x8GB) Dual Rank x8 DDR
Routerboard	IU rackmount, 12x Gigabit
CCR 1036-12G-4S	Ethernet, 4xSFP cages, LCD 36 cores x 1.2 GHz CPU, 4GB RAM
Module	Konverter fiber (optic-RJ45)
Tranceiver	untuk Mikrobits SFP
Fiber Optic SFP	Transceiver (RJ45)



Gambar 7. Sebaran data temperatur pada proses pengecoran pertama



Gambar 6. Proses Pengukuran Temperatur Tuang Logam cair

Pengambilan sampel data pertama dilakukan pada tanggal 27 September 2019. Data *monitoring* temperatur yang telah tersimpan di server kemudian diolah untuk diamati sebaran data dan deviasinya. Sebaran data dan deviasi pengukuran ditampilkan pada Gambar 6 dan Tabel 4.

Hasil pengukuran temperatur logam cair menggunakan termokopel (T_T) sebagai temperatur pembanding ditunjukkan oleh garis merah pada Gambar 7, yaitu: 1435°C. Sedangkan titik-titik warna biru adalah hasil pengukuran menggunakan *pyrometer* yang datanya dikirim ke server setiap lima detik sekali. Dari 15 data sampel pengukuran temperatur yang dilakukan selama kurang lebih 1 menit 15 detik tersebut, terdapat 1 data yang nilainya mendekati temperatur target, yaitu data ke-15 yang bernilai 1430°C (lihat Tabel 4). Sedangkan mayoritas sebaran data pengukuran temperatur menunjukkan deviasi pengukuran di atas 40°C. Hasil perhitungan menunjukkan nilai *bias* sebesar 3%, sedangkan *variance* sebesar 184,3.

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan tingkat

Tabel 5. Sebaran data temperatur dan deviasinya pada proses pengecoran pertama

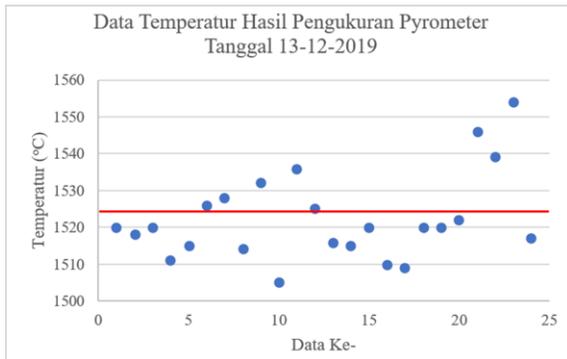
No	T_P (°C)	D_P (°C)	% D_P	No	T_P (°C)	D_P (°C)	% D_P	
1	1479	44	0,26	9	1476	41	0,52	
2	1477	42	0,39	10	1477	42	0,59	
3	1479	44	0,26	11	1475	40	0,26	
4	1479	44	0,85	12	1483	48	0,91	
5	1459	24	0,59	13	1482	47	0,98	
6	1479	44	0,13	14	1464	29	0,26	
7	1482	47	0,26	15	1430	-5	0,26	
8	1481	46	0,65					
				T_T (°C)				1435
				Rata-rata T_P (°C)				1473
				<i>Bias</i>				3%
				<i>Variance</i>				184,3

bias dan *variance* yang cukup besar, sehingga akurasi dan presisi pada sistem *monitoring* belum cukup baik. Hal itu sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa semakin besar nilai *bias* dan *variance*, maka semakin rendah akurasi dan presisi hasil pengukuran (Khandelwal, 2018). Penyimpangan yang terjadi pada pengukuran ini disebabkan oleh penentuan rasio emisivitas *pyrometer* yang kurang tepat ataupun pengaturan parameter pada *gateway* IIoT eWon Flexy yang belum sesuai. Untuk meminimalkan tingkat *bias* dan *variance* tersebut, perlu dilakukan kalibrasi pada *pyrometer* dengan cara menyesuaikan kembali rasio emisivitas *pyrometer*.

Pengambilan sampel data kedua dilakukan tanggal

Tabel 4. Hasil pengukuran temperatur pada proses pengecoran kedua

No.	T_P (°C)	No.	T_P (°C)
1	1520	17	1525
2	1518	18	1516
3	1520	19	1515
4	1511	20	1520
5	1515	21	1510
6	1526	22	1509
7	1528	23	1520
8	1514	24	1520
9	1532	25	1522
10	1505	26	1546
11	800	27	1539
12	800	28	1554
13	800	29	800
14	800	30	800
15	1536	31	1517
16	800		
T_T (°C)		1524	
Rata-rata T_P (°C)		1359	
<i>Bias</i>		11%	
<i>Variance</i>		94383,61	



Gambar 9. Sebaran data temperatur pada proses pengecoran kedua

13 Desember 2019. Waktu pengambilan data diperpanjang menjadi 2 menit dan interval pengiriman data diperpendek menjadi 4 detik. Data hasil pengukuran tersebut ditampilkan pada Tabel 5. Pada Tabel 5 diperlihatkan hasil tingkat *bias* dan *variance* yang tinggi, yaitu: 11% *bias* dan *variance* sebesar 94383,61. Hal itu dikarenakan terdapat 7 data (22,6%) yang memiliki nilai pengukuran 800°C yang merupakan batas minimum pengukuran pyrometer (800-2500°C). Hal ini terjadi karena *spot size pyrometer* tidak mengenai area logam cair dikarenakan posisi *pyrometer* yang tidak stabil. Ketidakstabilan ini terjadi akibat tenaga operator yang memegang *pyrometer* sudah berkurang mengingat berat total *pyrometer* beserta dudukannya mencapai 3 kg.

Kesalahan pengukuran tersebut merupakan kesalahan acak yang menyebabkan *variance* bernilai

Tabel 6. Sebaran data temperatur dan deviasinya pada proses pengecoran kedua

No	T _P (°C)	D _P (°C)	%D _P	No	T _P (°C)	D _P (°C)	%D _P
1	1520	-4	0,26	13	1516	-8	0,52
2	1518	-6	0,39	14	1515	-9	0,59
3	1520	-4	0,26	15	1520	-4	0,26
4	1511	-13	0,85	16	1510	-14	0,91
5	1515	-9	0,59	17	1509	-15	0,98
6	1526	2	0,13	18	1520	-4	0,26
7	1528	4	0,26	19	1520	-4	0,26
8	1514	-10	0,65	20	1522	-2	0,13
9	1532	8	0,52	21	1546	22	1,44
10	1505	-19	1,24	22	1539	15	0,98
11	1536	12	0,78	23	1554	30	1,96
12	1525	1	0,06	24	1517	-7	0,45
					T _T (°C)	1524	
					Rata-rata T _P (°C)	1522	
					Bias	0,1%	
					Variance	140,2	



Gambar 8. Proses pengukuran temperatur logam cair menggunakan termokopel

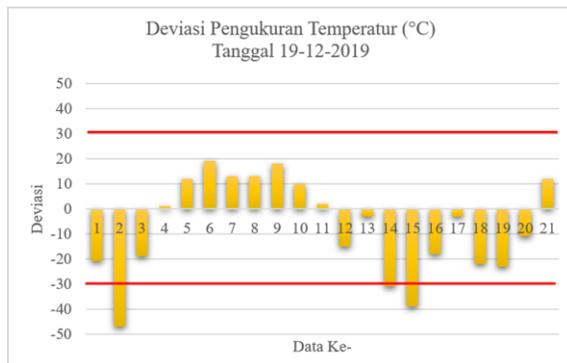
besar. Cukup sulit untuk menghilangkan kesalahan tersebut karena keterbatasan sistem yang sudah dibangun. Hal itu sebagaimana ditunjukkan pada proses pengukuran temperatur logam cair menggunakan *pyrometer* yang diperlihatkan pada Gambar 7.

Jika *error* pengukuran akibat faktor manusia tersebut diabaikan, maka sebaran data temperatur menjadi seperti yang ditampilkan pada Gambar 8. Garis merah pada Gambar 8 merupakan besaran temperatur hasil pengukuran dengan termokopel. Proses pengukuran temperatur logam cair menggunakan termokopel dapat dilihat pada Gambar 9. Pada pengambilan data sampel kedua ini nilai temperatur yang terukur menggunakan termokopel adalah 1524°C (Gambar 9, diperbesar).

Jika sebaran data temperatur yang diperlihatkan pada Gambar 8 dihitung masing-masing deviasi pengukurannya, maka besaran nilai deviasi tersebut

Tabel 7. Sebaran data temperatur dan deviasinya pada proses pengecoran ketiga

No	T _P (°C)	D _P (°C)	%D _P	No	T _P (°C)	D _P (°C)	%D _P
1	1481	-21	1,39	12	1487	-15	0,99
2	1455	-47	3,12	13	1499	-3	0,19
3	1483	-19	1,26	14	1471	-31	2,06
4	1503	1	0,06	15	1463	-39	2,59
5	1514	12	0,79	16	1484	-18	1,19
6	1521	19	1,26	17	1499	-3	0,19
7	1515	13	0,86	18	1480	-22	1,46
8	1515	13	0,86	19	1479	-23	1,53
9	1520	18	1,19	20	1491	-11	0,73
10	1512	10	0,66	21	1514	12	0,73
11	1504	2	0,13				
					T _T (°C)	1502	
					Rata-rata T _P (°C)	1495	
					Bias	0,5%	
					Variance	375,5	



Gambar 10. Deviasi pengukuran *pyrometer* pada proses pengecoran ketiga

menjadi sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 6. Dari Tabel 6 tersebut dapat diamati bahwa deviasi pengukuran terbesar adalah 30°C atau 1,96% kesalahan. Tingkat *bias* dan *variance* pada data pengambilan sampel kedua ini menunjukkan hasil yang lebih rendah jika dibandingkan pada data pengambilan sampel kedua, yaitu: 0,1% *bias* dan *variance* sebesar 140,2. Hal tersebut menunjukkan bahwa penentuan rasio emisivitas dan pengaturan parameter pada *gateway* IIoT eWon *Flexy* sudah tepat.

Sampel data pengukuran temperatur yang ketiga dilakukan pada proses pengecoran tanggal 19 Desember 2019. Data sampel diambil selama 1 menit untuk mengurangi kesalahan pengukuran akibat kelelahan operator seperti pada pengambilan sampel data kedua dengan interval pengiriman data yang diperpendek menjadi 3 detik. Sebaran data dan deviasi temperatur hasil pengukuran *pyrometer* ditampilkan pada Gambar 10 dan Tabel 7. Hasil pengukuran temperatur menggunakan termokopel didapat sebesar 1502°C.

Sebaran data dan deviasi hasil pengukuran *pyrometer* yang diperlihatkan pada Gambar 10 dan Tabel 7 menunjukkan terdapat 3 data dari 21 data (14,29%) berada di luar toleransi yang telah ditetapkan, yaitu: $\pm 30^\circ\text{C}$. Garis merah pada Gambar 10 mewakili batas toleransi yang diperbolehkan. Penyimpangan data yang melebihi batas toleransi tersebut disebabkan oleh ketidakstabilan operator saat mengoperasikan *pyrometer* pada proses pengukuran. Hal ini menyebabkan beberapa bagian *spot size pyrometer* tidak mengenai area logam cair, sehingga nilai pengukuran menjadi lebih rendah. Nilai data tersebut tidak langsung turun menjadi 800°C (batas bawah pengukuran *pyrometer*) karena *spot size* dari *pyrometer* masih mengenai logam cair, namun pada bagian yang lebih dingin, yaitu: pengotor dan zat aditif yang ditambahkan saat proses pengecoran.

Tingkat *bias* dan *variance* pada data pengambilan sampel ketiga sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 7 menunjukkan hasil yang cukup baik, yaitu: 0,5% *bias*

dan *variance* sebesar 375,5. Tingkat *bias* tersebut menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan data pada pengambilan sampel kedua, sedangkan *variance* menunjukkan hasil yang paling tinggi jika dibandingkan dengan data hasil pengambilan sampel pertama dan kedua.

Meskipun mayoritas data hasil pengukuran menunjukkan nilai yang masih dalam batas toleransi yang diizinkan, justifikasi pada sistem *monitoring* temperatur logam cair tersebut menunjukkan hasil yang cukup variatif. Tingkat *bias* pada data pengambilan sampel ketiga, yaitu 0,5% *bias* menunjukkan adanya peningkatan performa pada sistem *monitoring* temperatur. Hal itu menunjukkan bahwa akurasi pengukuran temperatur pada sistem *monitoring* temperatur sudah cukup mumpuni. Sedangkan, nilai *variance* sebesar 375,5 pada data pengambilan sampel ketiga menunjukkan bahwa tingkat presisi sistem *monitoring* temperatur masih cukup rendah. Tingkat *variance* yang tinggi ini berkaitan dengan faktor ketidakstabilan operator pada saat mengoperasikan *pyrometer* pada proses pengukuran, sehingga menyebabkan deviasi pada data hasil pengukuran temperatur yang melebihi batas toleransi yang diizinkan.

4. Kesimpulan

Sistem *monitoring* temperatur logam cair menggunakan *pyrometer* menunjukkan tingkat akurasi 99,5% dan tingkat *bias* mencapai 0,5%. Hasil yang berbeda ditunjukkan pada tingkat presisi sistem *monitoring* temperatur logam cair yang diindikasikan dengan tingkat *variance* yang tinggi. Tingkat *variance* pada data pengukuran temperatur mencapai 375,3. Nilai yang tinggi ini disebabkan oleh ketidakstabilan operator saat mengoperasikan *pyrometer*. Hal ini merupakan faktor kesalahan random yang sulit untuk dikendalikan karena keterbatasan sistem yang sudah dibangun. Tingkat presisi pengukuran temperatur logam cair pada sistem *monitoring* menggunakan *pyrometer* dapat ditingkatkan dengan mengembangkan metode pengukuran secara otomatis untuk mengurangi faktor kesalahan pengoperasian *pyrometer* oleh operator.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kami sampaikan kepada Moch. Iqbal Zaelana Muttahar, Sony Harbintoro, Alfa Anggawasita, Dimas, dan Muhammad Nauval Fauzi yang telah membantu dalam pengembangan sistem *monitoring pyrometer* berbasis IoT.

Daftar Pustaka

Boughton, P. (2013). *The proven advantages of non-*

- contact temperature measurement. Diakses pada Maret 10, 2020, dari <https://www.engineerlive.com/content/proven-advantages-non-contact-temperature-measurement>
- Domingos, P. (2012). A Few Useful Things to Know About Machine Learning. *Communications of the ACM*, 55(10), 9–48. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35289-8-3>
- Eryantono, A. E., Fauzi, M. N., & Fathurrohman, M. (2020). *Sistem Monitoring Temperatur Tuang Logam dan Penggunaan Energi Berbasis IoT di MIDC (Metal Pouring Temperature and Energy Usage Monitoring System with IoT in MIDC)*. 9(2), 123–131.
- eWon. (2020). *eWON - Industrial VPN Routers: Remote Access & Data Services*. Diakses pada Maret 23, 2020, dari <https://ewon.biz/products/ewon-flexy>
- Jack, K. E., Etu, I., & Ukanide, V. N. (2016). The design of a signal conditioning and acquisition elements of a chopped broadband radiation pyrometer. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2225(04), 338–344. <https://doi.org/10.15623/ijret.2015.0404082>
- Kassie, A. A. (2013). Minimization of Casting Defects. *IOSR Journal of Engineering*, 03(05), 31–38. <https://doi.org/10.9790/3021-03513138>
- Khandelwal, R. (2018). *Bias and Variance in Machine Learning - Data Driven Investor - Medium*. Diakses pada Mei 11, 2020, dari <https://medium.com/datadriveninvestor/bias-and-variance-in-machine-learning-51fdd38d1f86>
- Mudjahidin, M., & Putra, N. D. P. (2012). Rancang Bangun Sistem Informasi Monitoring Perkembangan Proyek Berbasis Web Studi Kasus di Dinas Bina Marga dan Pemantusan. *Jurnal Teknik Industri*, 11(1), 75. <https://doi.org/10.22219/JTIUMM.Vol11.No1.75-83>
- Müller, B., & Renz, U. (2001). Development of a fast fiber-optic two-color pyrometer for the temperature measurement of surfaces with varying emissivities. *Review of Scientific Instruments*, 72(8), 3366–3374. <https://doi.org/10.1063/1.1384448>
- Patel, K. K., & Patel, S. (2016). IOT Based Data Logger for Monitoring and Controlling Equipment Working Status and Environmental Conditions. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 4(4), 5103–5112. <https://doi.org/10.15680/IJIRCCE.2016.0404125>
- Prawastiyo, C. A., & Hermawan, I. (2020). Pengembangan Front-End Website Perpustakaan Politeknik Negeri Jakarta Menggunakan Metode User Centered Design. *Information Science and Library*, 1(2), 1–11.
- Rani, M. T., & Sivakumar, R. (2021). Iot-based energy analytic platform for foundry units. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1163, 701–711. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5029-4_58
- Resende, C., Monteiro, M., Oliveira, J., Moreira, W., Cavaleiro, A., Silva, R., & Carvalho, R. (2018). WGWIoT: Wireless Gateway for Industrial IoT. *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), 2018-June*, 01108–01113. <https://doi.org/10.1109/ISCC.2018.8538656>
- Rompis, A. C., & Aji, R. F. (2018). Perbandingan Performa Kinerja Node.js, PHP, dan Python dalam Aplikasi REST. *CogITO Smart Journal*, 4(1), 171. <https://doi.org/10.31154/cogito.v4i1.92.171-187>
- Sanjith, S., Balaji, N., Anand, L. D. V., Anne, W. R., Shanmugapriya, P., & Rani, S. S. (2021). IoT enabled temperature sensing system of molten metal in welding. *Materials Today: Proceedings*, 45(2), 2514–2517. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.124>
- Shah, H., & Soomro, T. R. (2017). Node. Js Challenges in Implementation. *Global Journals of Computer Science and Technology: E Network, Web & Security*, 17(2), 73–83.
- Tapetado, A., Diaz-Alvarez, J., Miguelez, M. H., & Vazquez, C. (2016). Two-color pyrometer for process temperature measurement during machining. *Journal of Lightwave Technology*, 34(4), 1380–1386. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2513158>
- Usamentiaga, R., Molleda, J., Garcia, D. F., Granda, J. C., & Rendueles, J. L. (2012). Temperature measurement of molten pig iron with slag characterization and detection using infrared computer vision. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(5), 1149–1159. <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2178675>
- Weyrich, M., & Ebert, C. (2016). Reference architectures for the internet of things. *IEEE Software*, 33(1), 112–116. <https://doi.org/10.1109/MS.2016.20>