

Pengembangan Perangkat *IoT* Berbiaya Rendah yang Berfokus pada Perlindungan dan Pemantauan Kompresor *Refrigeration*

Rachmat Iskandar¹, Reni Listiana², Agus Saleh³

¹ Program Studi Teknik Komputer- Politeknik TEDC Bandung

² Program Studi Otomasi - Politeknik TEDC Bandung

³ Program Studi Teknik Mesin - Politeknik TEDC Bandung

Jl. Politeknik-Pesantren KM2 Cibabat Cimahi Utara – Cimahi Jawa Barat - Indonesia

rachmat@poltektedc.ac.id, renilistiana@poltektedc.ac.id, abahagus@poltektedc.ac.id

Abstrak— Proyek ini mengatasi masalah diagnosis kompresor yang benar untuk sistem pendingin udara dan pendingin. Tujuannya adalah menggunakan instrumentasi yang tersedia di pasar global untuk menciptakan solusi diagnostik berbiaya rendah, mudah diakses, dan mudah dirakit untuk semua jenis pengguna. Dalam artikel ini, kami mengusulkan penggunaan mikrokontroler ESP32 yang kompatibel dengan bahasa Arduino, yang terhubung ke Microsoft Azure. Selain itu, kami memperkenalkan algoritme berdasarkan tren yang memberikan pengetahuan real-time kepada pengguna tingkat dasar dan lanjutan tentang variabel yang relevan dan mendeteksi kegagalan dalam proses *refrigeration*. Hal ini memungkinkan pengguna untuk mengantisipasi dan mencegah kegagalan melalui skema pemeliharaan berbasis kondisi yang ditingkatkan. Solusi yang diusulkan bertujuan untuk mengurangi kesalahan diagnosis, meminimalkan waktu henti sistem, dan meningkatkan kemampuan pemecahan masalah, kontrol suku cadang, dan pelestarian produk. Selain itu, untuk memperluas jangkauan solusi ini, perangkat ini dapat digunakan sebagai input data sistem guna menghasilkan informasi berharga untuk *neural network* berulang. Jaringan ini tidak hanya dapat mendiagnosis kompresor tetapi juga keseluruhan sistem, dengan mempertimbangkan dua variabel penting: koefisien kinerja dan aliran massa.

Kata Kunci— Mikrokontroler ESP32, Microsoft Azure, Neural Network, Refrigeration .

I. PENDAHULUAN

Sistem pendingin dan pendingin udara memainkan peran penting dalam berbagai sektor, termasuk penyimpanan makanan, transportasi, dan proses industri. Sistem ini boros energi dan memerlukan pengoperasian yang andal dan efisien untuk mengurangi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca. Namun, perangkat tersebut rumit dan dapat mengalami berbagai kesalahan dan malfungsi yang menyebabkan penurunan efisiensi, peningkatan konsumsi energi, dan waktu henti yang mahal.

Untuk mengatasi tantangan ini, terdapat penekanan yang semakin besar pada pengembangan solusi berkelanjutan dan hemat energi untuk sistem pendingin dan pendingin udara. Inisiatif internasional, seperti Protokol Montreal yang

ditandatangani pada tahun 1987[1] dan Amandemen Kigali yang mulai berlaku pada tahun 2019[2], bertujuan untuk menghentikan atau mengurangi penggunaan zat pendingin berbahaya yang memiliki potensi pemanasan global yang tinggi dan potensi penipisan ozon.

Sebagai hasil dari inisiatif ini, solusi pendingin alami seperti karbon dioksida dan hidrokarbon semakin populer. Namun, penggunaan bahan pendingin alami menimbulkan tantangan tersendiri, termasuk masalah keselamatan dan kebutuhan akan peralatan dan pelatihan khusus. Penting juga untuk mengidentifikasi bahwa tidak semua sistem mampu melakukan praktik retrofit, oleh karena itu, meningkatkan kepercayaan terhadap sistem sebenarnya yang menggunakan zat pendingin umum seperti HFC (hydrofluorocarbon) dan HCFC (hydrochlorofluorocarbon) merupakan aspek yang sangat penting. Pengembangan ini juga dilakukan dengan pendekatan khusus, yang mencakup pengukuran CO₂ dan getaran.

Dengan instrumentasi khusus untuk mengukur dan mengkorelasikan variabel, penting untuk meninjau pendekatan dan tren masa lalu yang masih diterapkan oleh beberapa perusahaan. Pendekatan ini cenderung memiliki pendekatan pemeliharaan yang lebih reaktif (pemeliharaan korektif), dimana kegagalan suatu peralatan mempengaruhi seluruh proses, mengakibatkan biaya yang lebih tinggi tidak hanya untuk peralatan itu sendiri tetapi juga untuk kerugian dan limbah yang dihasilkan oleh waktu henti dan proses peralatan. Pendekatan ini kemudian berkembang menjadi pemeliharaan terjadwal (pemeliharaan preventif), di mana rutinitas ditetapkan yang secara acak dapat bertepatan dengan kegagalan atau kejadian sebelumnya untuk mengurangi biaya terkait. Karena tidak semua kegagalan peralatan berakibat fatal, maka dimungkinkan (berdasarkan jadwal) untuk memilih waktu pengoperasian yang optimal. Terakhir, trennya beralih ke pemeliharaan berbasis kondisi (CBM+)[3], yang memanfaatkan instrumentasi lapangan tertentu untuk melakukan serangkaian pengukuran guna memprediksi perilaku alat berat dan menghasilkan tren yang membantu

menentukan waktu terbaik untuk melakukan intervensi berdasarkan kinerja operasional.

Di sinilah sistem pakar menjadi semakin relevan, karena memungkinkan analisis sejumlah besar data oleh sistem atau subsistem lain untuk menentukan parameter operasi secara real time. Tentukan batas pengoperasian, atau tentukan kondisi pengoperasian optimal berdasarkan data historis atau deret waktu[4]. Namun, hal ini tidak selalu terjadi di negara-negara terbelakang karena tingginya biaya impor dan kurangnya pengetahuan teknis di kalangan personel. Konsekuensinya, sistem harus terus berfungsi dengan zat-zat yang menguras dan merusak lapisan ozon dan beroperasi dalam kondisi yang berbahaya dan tidak dapat diandalkan, menimbulkan risiko terhadap keamanan pangan karena hilangnya atau terbuangnya bahan-bahan yang didinginkan (makanan atau vaksin) dan meningkatkan biaya yang terkait dengan energi.

Pengawetan input yang tepat berarti menghindari terputusnya rantai dingin di berbagai titik atau tahapan dalam proses produksi. Penting untuk dicatat bahwa setiap input memerlukan kondisi suhu dan kelembaban tertentu, dan pengendalian yang salah terhadap kondisi ini dapat menyebabkan masalah kesehatan bagi konsumen atau potensi hilangnya barang karena penyimpanan yang buruk[5]. Dari sudut pandang sosial, kehilangan dan pemborosan makanan akibat kegagalan peralatan pendingin berkaitan erat dengan masalah keamanan pangan. Tujuan dari proses pendinginan adalah untuk mencegah atau mengurangi laju pertumbuhan bakteri dengan menghilangkan panas, sehingga menciptakan kondisi yang tidak menguntungkan. Sebagai statistik yang signifikan (lihat Gambar 1), 1,3 miliar ton makanan hilang atau terbuang di seluruh dunia setiap tahunnya[6]. Hal ini tidak hanya melibatkan sumber daya yang terkait dengan rantai dingin tetapi juga sumber daya tak terbarukan seperti lahan pertanian (1400 juta hektar) dan sumber daya alam lainnya. dampak langsung terhadap penggunaan air (250 km³) [6][7].

II. METODE PENELITIAN

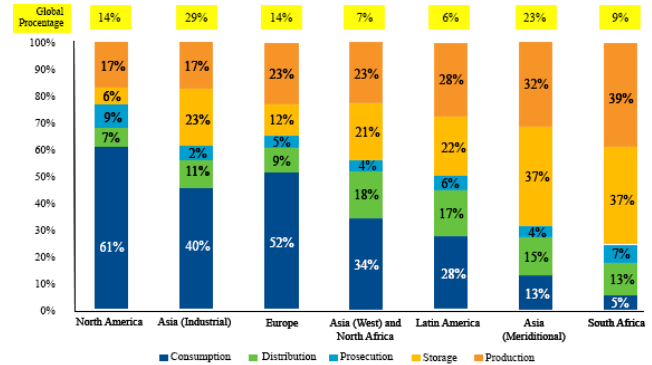
Setelah melakukan penelitian tentang teknik perawatan pada sistem pendingin (*refrigeration*), variabel-variabel penting yang mempengaruhi kinerja optimal pada komponen utama, khususnya kompresor, dapat diidentifikasi.

Berikut ini adalah variabel dan parameter penting yang perlu dipantau:

- **Nilai kelistrikan:** Sistem kompresi digabungkan dengan motor listrik yang sering didinginkan oleh zat pendingin. Parameter berikut harus dipantau:
 - Parameter catu daya, seperti tegangan.
 - Parameter konsumsi, seperti arus.
 - Pengukuran efisiensi, termasuk Daya dan faktor daya.
- **Nilai termodinamika:** Kompresor meningkatkan tekanan gas refrigeran dengan mengurangi volumenya dan mengangkutnya melalui pipa. Variabel berikut ini sangat penting:

- Pengukuran superheat untuk memastikan penurunan tekanan/suhu pada katup ekspansi termostatik atau elektronik (TXV/EXV).
- Pencegahan kembalinya cairan atau migrasi ke kompresor.
- Efisiensi kompresor berdasarkan COP/EER (Coefisien Kinerja/Energy Efficiency Ratio).

- **Tingkat getaran dan CO₂:** Memantau tingkat getaran dan CO₂ yang berlebihan dapat membantu mendeteksi potensi kebocoran zat pendingin di kompresor atau sistem di sekitarnya.



Gbr. 1 Grafik Kehilangan dan pembusukan pangan

A. Pengembangan Modul Operasional

Setiap modul yang didefinisikan di bawah ini membahas masalah tertentu dan memberikan solusi. Setiap modul dibagi lagi menjadi sub-modul dengan input, output, dan rutinitas tertentu. Sub-modul ini didukung oleh fungsi dan prosedur yang dideklarasikan, memastikan keterbacaan dan kejelasan yang lebih tinggi.

Modul masukan sensor menawarkan konfigurasi yang telah ditentukan pengguna, seperti preferensi unit untuk suhu dan tekanan. Teknologi kompresor memungkinkan terjadinya serangkaian kegagalan tertentu berdasarkan tenaga kuda nominal, parameter kelistrikan, dan penerapan suhu, yang menyesuaikan parameter regresi linier untuk pemantauan dan perlindungan kelistrikan.

Semua kode yang diimplementasikan dalam proyek ini telah dikembangkan di Arduino IDE dan untuk perangkat mikrokontroler Espressif ESP32. Oleh karena itu, pekerjaan pengembangan dan pekerjaan di masa depan “*Arduino Compatible.*”

1. Modul Superheat

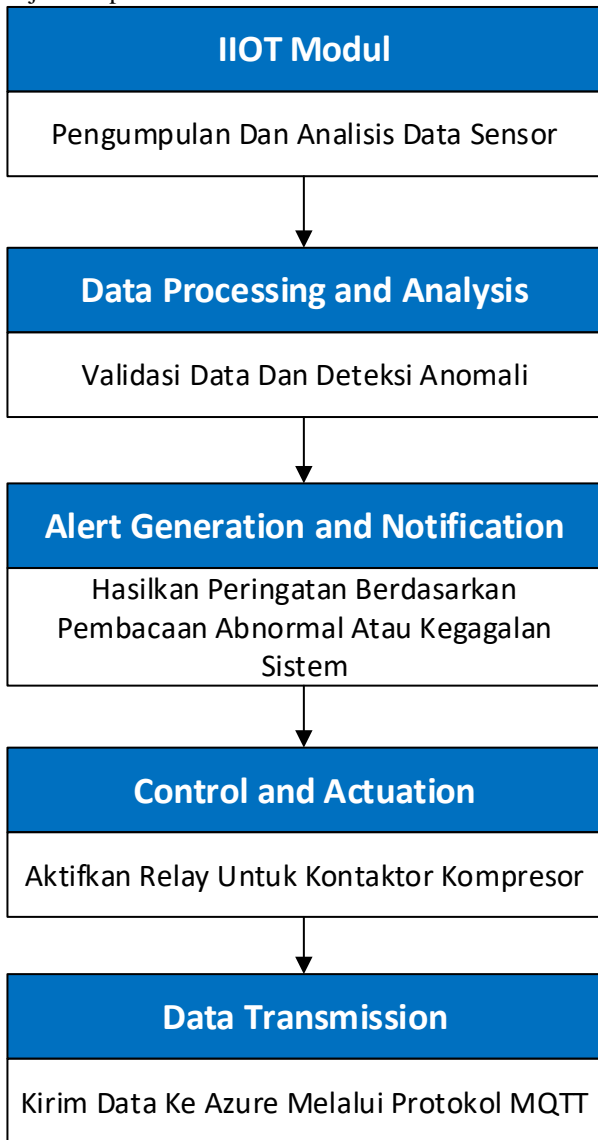
Superheat (SH) adalah variabel penting dalam sistem pendingin kompresi uap karena sistem memerlukan keadaan masukan dalam bentuk gas untuk mencegah zat pendingin cair memasuki kompresor.

Hubungan matematis diberikan oleh:

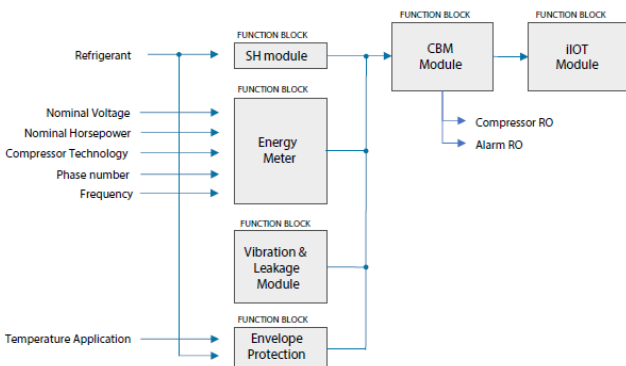
$$SH = T_{mea} - T_{sat}$$

Persamaan ini menghubungkan suhu T_{mea} terukur pada saluran masuk kompresor dengan suhu T_{sat} jenuh yang diperoleh dari tekanan. Karena nilai superheat bervariasi sebagai efek normal dari sistem pendingin (akibat beban, input, penyesuaian mekanisme ekspansi, dll.), penerapan pengontrol ON/OFF dengan histeresis tidak akan memadai.

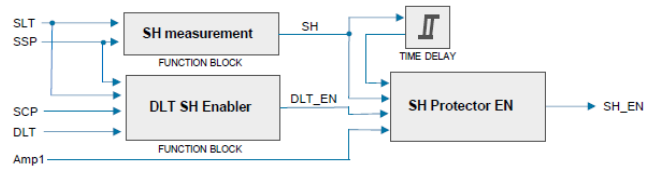
Sebaliknya, modul ini menggunakan blok-blok yang saling berhubungan yang menentukan keluaran berdasarkan variabel masukan yang diketahui. Modul dan hubungannya ditunjukkan pada Gambar 4.



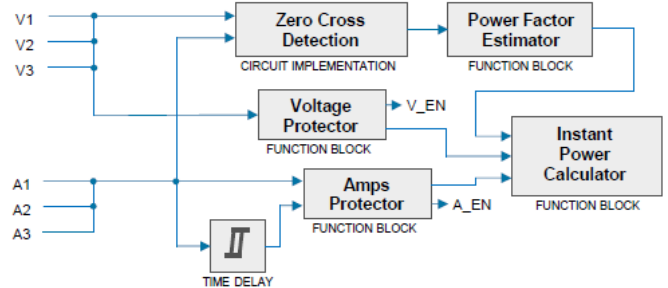
Gbr. 2 Diagram Alur Perangkat



Gbr. 3 Input Pengguna



Gbr. 4 Modul Super Panas



Gbr. 5 Modul Listrik

Refrigeran dipilih melalui menu, dan setiap refrigeran yang dipilih akan memuat serangkaian koefisien tertentu yang disimpan dalam EEPROM perangkat. Panas berlebih yang dihitung disimpan dan ditunda pada waktunya untuk mengamati tren dan perilaku untuk perlindungan yang lebih akurat. Modul pengaktif DLT SH memperkirakan suhu pelepasan isentropik kompresi per kompresor (DLT) berdasarkan rasio kompresi absolut dan suhu isap, dan membandingkannya dengan DLT sebenarnya.

Setiap produsen kompresor[10] menentukan tingkat superheat minimum untuk kompresor RAC mereka. Nilai ini digunakan sebagai batas bawah untuk pengontrol histeresis ON/OFF, yang mencakup penundaan waktu keluaran yang diimplementasikan melalui kode.

Setelah mengkonfirmasi semua tindakan yang diperlukan yang disebutkan di atas, modul global mengaktifkan output relai dan penghitung kesalahan.

2. Modul Proteksi Listrik

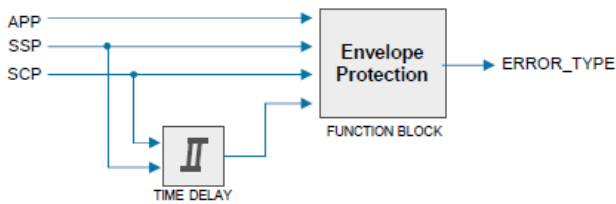
Akuisisi data yang dilakukan oleh Modul Listrik (lihat Gambar 5) berhubungan langsung dengan tegangan dan arus. Namun, karena motor listrik digabungkan dengan sistem kompresi uap, nilai nominalnya berbeda dengan nilai nominal motor listrik standar. Bagian ini memberikan penjelasan untuk menentukan apakah peralatan beroperasi pada kondisi nominal atau apakah perilakunya berkontribusi signifikan terhadap peningkatan laju keausan.

Arus kerja diperkirakan berdasarkan daya nominal motor listrik kompresor. Estimasi ini menggunakan model regresi linier yang dikembangkan menggunakan data yang dipublikasikan oleh pabrikan berbeda dalam berbagai kondisi kerja nominal[10]. Garis dasar yang ditetapkan melalui model ini memberikan mikrokontroler landasan yang kuat untuk melakukan perhitungan guna mengidentifikasi arus rata-rata atau arus yang diharapkan yang ditarik oleh motor listrik berbasis pada teknologi, aplikasi, dan tenaga kuda nominal.

3. Modul Amplop/Suhu

Selubung pengoperasian kompresor memungkinkan personel pemeliharaan mengidentifikasi kegagalan pada

komponen sistem yang mungkin memengaruhi kinerja peralatan selama pengoperasian atau menyebabkan kerugian produksi yang terkait dengan ruangan dingin. Modul Amplop (lihat Gambar 6) memungkinkan identifikasi empat kondisi utama, dan interaksi antara kondisi ini dapat memberikan informasi lebih lanjut kepada personel pemeliharaan.



Gbr. 6 Modul *Envelope Protection*

Kode menentukan vektor yang akan dimuat berdasarkan suhu aplikasi dan zat pendingin. Kemudian, ia membandingkan titik operasi dengan batas (titik setel dan histeresis) untuk evaporasi dan kondensasi. Kode tersebut memberikan nilai +1 jika titik operasi lebih tinggi dari batas, -1 jika lebih rendah, dan 0 jika berada dalam batas.

Kondisi optimal (batas) ditentukan dengan melakukan pencarian ekstensif di database manufaktur publik dan melakukan referensi silang informasi tersebut untuk menetapkan zona perlindungan rata-rata.

4. Modul Getaran dan Kebocoran

Analisis getaran dikenal luas karena mendiagnosis komponen berputar secara akurat dan memberikan nilai penerimaan berdasarkan pedoman operasional. Tujuan utama dari alarm ini adalah untuk membuat keputusan tepat waktu mengenai alat berat. Dengan menganalisis data historis, waktu henti mesin dapat dikurangi, sehingga meminimalkan dampaknya terhadap keseluruhan proses. Nilai referensi untuk analisis getaran didasarkan pada data yang disediakan oleh standar ISO 20816-8, yang secara khusus berkaitan dengan mesin bolak-balik.

Meskipun analisis Fourier (FFT) umumnya digunakan dalam analisis getaran, kompleksitas implementasinya dan jumlah operasi yang diperlukan oleh mikrokontroler saat memperoleh variabel lain dan mengaktifkan keluaran membuatnya kurang cocok untuk aplikasi ini. Sebagai gantinya, analisis histogram digunakan[11]. Analisis ini memperkirakan distribusi probabilitas besaran percepatan berdasarkan lokasi fisik di mana modul dipasang[12].

5. Modul Navigasi:

Untuk meningkatkan navigasi yang mudah digunakan, input parameter, dan tampilan parameter di lapangan, antarmuka input fisik telah diterapkan.

Untuk memudahkan pemasukan data, telah disusun empat input parameter utama sebagai berikut:

- Menu mekanis [A]: Menu ini memungkinkan pengaturan daya kompresor sebagai nilai integer untuk memprediksi konsumsi saat ini. Hal ini juga memungkinkan pemilihan teknologi kompresi untuk memperhitungkan kesalahan model tertentu.
- Menu kelistrikan [B]: Menu ini memungkinkan untuk memasukkan parameter nominal kelistrikan. Karena penghitungan didasarkan pada 460V/3Ph/60Hz, maka

perlu dilakukan koreksi yang sesuai untuk prediksi yang akurat.

- Menu Refrigeran [C]: Menu ini memungkinkan pemilihan zat pendingin. Setelah dipilih, sistem secara otomatis mengonfigurasi probe dan menyesuaikan aplikasi dengan batas perlindungan kerangka operasi kompresor.
- Menu proteksi [D]: Menu ini memungkinkan untuk mengaktifkan output relai kompresor berdasarkan tegangan, arus, dan suhu (tiga input).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Prosedur berikut adalah modifikasi dari yang diterbitkan oleh Microsoft Corporation di Azure SDK Development untuk Arduino[13].

Modul IIoT (*Industrial Internet of Things*) didasarkan pada protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), yang merupakan protokol perpesanan ringan berbasis publikasi-langgan. Perangkat ESP32 mengirimkan data berformat JSON (*JavaScript Object Notation*), termasuk voltase, arus, tekanan, suhu, panas berlebih, getaran, tingkat CO2, dan penghitung kegagalan, ke Microsoft Azure.

Untuk meningkatkan komunikasi dengan pengguna melalui media sosial, bot umpan balik real-time telah dikembangkan pada perangkat menggunakan Twilio dan ThingESP[14].

A. Validasi Data

Setelah mendefinisikan dan mengkarakterisasi metode akuisisi data, pemantauan, dan modul perlindungan, penting untuk mengevaluasi relevansi perangkat di lapangan.

Ketika sistem menjadi lebih kompleks dan melibatkan lebih banyak perangkat elektronik untuk kontrol, pemantauan, dan pengukuran parameter utama, penting bagi tenaga kerja untuk menyadari serangkaian keterampilan baru yang diperlukan untuk memanfaatkan sistem cerdas dalam mendiagnosis sistem dan subsistem secara efisien. Penting juga untuk memahami tingginya ketergantungan pada berbagai variabel dalam siklus pendinginan[15].

B. Perakitan dan pengujian prototipe

Meskipun render memberikan representasi desain akhir yang cukup akurat, penting untuk dicatat bahwa tahap pembuatan tidak memperhitungkan beberapa gerakan alami operator saat membuat sambungan perangkat.

Selama tahap desain prototipe, diperkirakan investasi sebesar 260 jam kerja. Ini termasuk pekerjaan pemrograman, desain PCB, perakitan, dan pengujian. Bagi pengguna akhir, diperkirakan diperlukan waktu sekitar 4 hingga 5 jam untuk merakit dan mengkalibrasi perangkat.



Gbr. 7 Perangkat Interface

Setelah mengimplementasikan logika pengukuran dan kode kesalahan pada perangkat, kini dimungkinkan untuk memberikan rekomendasi berdasarkan pengukuran yang diperoleh dari perangkat.

A. Pengukuran dan Perlindungan

Diagram alur proteksi adalah alat yang berharga untuk memastikan pengoperasian dan keamanan sistem diagnostik kompresor pendingin yang benar. Sistem ini, pada gilirannya, berfungsi sebagai masukan untuk Recurrent Neural Network (RNN) dalam diagnosis sistem kompresor pendingin.

1) *Nilai Listrik*: Mekanisme perlindungan ini memungkinkan perlindungan tingkat perangkat internal serta transmisi dan penyimpanan data dengan persentase kesalahan (€). Analisisnya berdasarkan kriteria NEMA (*National Electrical Manufactures Association*)[16].

Ketidakseimbangan nilai listrik dapat menimbulkan berbagai efek samping, antara lain[17]:

- Berkurangnya performa motorik
- Tegangan yang tidak merata pada belitan motor
- Peningkatan konsumsi energi
- Panas berlebih dan tekanan termal
- Mengurangi faktor daya

Nilai-nilai ini akan didokumentasikan sebagai referensi penggunaan perangkat. Selain itu, mereka akan berfungsi sebagai masukan untuk RNN terpisah yang berfokus pada penyediaan pemahaman yang lebih komprehensif kepada pengguna tentang cara kerja internal sistem.

B. Data Perangkat sebagai Input untuk RNN

Untuk mengusulkan sistem otomatis dan mendapatkan serangkaian karakteristik yang lebih komprehensif dari variabel yang diperoleh, disarankan menggunakan Recurrent Neural Network (RNN). RNN memiliki karakteristik khusus yang membuatnya cocok untuk masalah 18 ini:

1) *Rangkaian Waktu*: Sistem pendingin adalah proses dinamis, dan variabelnya, seperti suhu dan tekanan, berubah seiring waktu. RNN dirancang khusus untuk menangani urutan temporal dan menangkap hubungan dari waktu ke waktu.

2) *Memori Jangka Pendek dan Panjang*: Varian RNN, seperti LSTM (Long Short-Term Memory) dan GRU (Gated Recurrent Unit), memiliki kemampuan untuk mengingat informasi dari peristiwa masa lalu dan memanfaatkannya untuk meningkatkan prediksi peristiwa di masa depan.

Kemampuan ini sangat berguna untuk menganalisis sistem yang kompleks seperti sistem pendingin.

3) *Fleksibilitas dalam Struktur Input*: RNN dapat menangani rangkaian dengan panjang yang bervariasi, sehingga cocok untuk bekerja dengan data dari sistem pendingin, yang durasi dan frekuensinya dapat bervariasi.

4) *Generalisasi*: RNN dapat menggeneralisasi lebih baik dari data yang terbatas dan seringkali lebih tahan terhadap gangguan dan perubahan lingkungan pengoperasian dibandingkan dengan jenis jaringan saraf lainnya, seperti Jaringan Syaraf Tiruan (JST).

Dengan memanfaatkan RNN, analisis dan interpretasi data yang diperoleh dapat dilakukan dengan cara yang lebih canggih, sehingga memungkinkan peningkatan diagnosis dan prediksi perilaku sistem.

Nilai COP dan Aliran Massa, Seperti disebutkan sebelumnya, perangkat ini mampu menghasilkan pengukuran secara mandiri. Namun, untuk menyediakan data ke sistem cerdas yang dapat menganalisis variabel di luar batasan fisik mikrokontroler (seperti memori dan aktivasi keluaran), diusulkan dua keluaran tambahan. Output ini dapat dihitung oleh sistem komputer eksternal menggunakan analisis data historis.

- *COP (Koefisien Kinerja)*: Ini adalah metrik penting yang digunakan untuk menilai efisiensi sistem pendingin. Ini mewakili rasio efek pendinginan yang berguna yang dicapai oleh sistem dengan jumlah energi yang dikonsumsi (biasanya energi listrik) untuk mengoperasikan sistem. Pada dasarnya, COP menunjukkan berapa banyak pendinginan yang dicapai per unit masukan energi.
- *Aliran massa*: Mengacu pada jumlah zat pendingin yang melewati sistem per satuan waktu. Aliran massa merupakan parameter penting yang secara langsung mempengaruhi kinerja dan efisiensi sistem pendingin.

Dengan menggabungkan nilai-nilai COP dan aliran massa ke dalam sistem cerdas, wawasan lebih lanjut dapat diperoleh dan pengambilan keputusan yang lebih tepat mengenai kinerja dan optimalisasi sistem dapat dilakukan.

Koefisien Kinerja, Untuk menentukan Koefisien Kinerja (COP) dengan akurasi yang lebih baik, disarankan untuk menghasilkan persentase kesalahan antara kondisi “ideal” dan kondisi nyata. Pendekatan ini memungkinkan sistem cerdas untuk menyimpulkan hasil yang lebih baik dengan mempertimbangkan energi yang diinvestasikan dan keluarannya dalam hal kapasitas kompresor dan efek refrigeran bersih (kapasitas evaporator)[19].

Untuk menghitung COP secara akurat, ada gunanya menghitung nilai entalpi pada empat titik tertentu dalam siklus pendinginan. Poin-poin tersebut antara lain:

- 1) Nilai *Enthalpy* pada suhu garis cair sebelum memasuki katup ekspansi termostatik (TXV), pada tekanan pelepasan.
- 2) Nilai *Enthalpy* pada saluran keluar evaporator, yang ditentukan dengan mengukur suhu isap jenuh ditambah fraksi panas berlebih yang berguna pada tekanan isap.
- 3) Nilai *Enthalpy* pada saluran masuk kompresor, diperoleh dengan mengukur suhu gas balik kompresor pada tekanan isap.

4) Nilai *Enthalpy* pada saluran keluar kompresor, ditentukan dengan mengukur suhu saluran keluar kompresor pada tekanan isap.

Kondisi “*ideal*” dapat dihitung berdasarkan nilai yang diketahui, seperti efisiensi isentropik kompresor dan titik setel untuk kontrol, serta suhu dari saluran cairan dan saluran keluar *evaporator*.

Dengan membandingkan nilai entalpi dalam kondisi nyata dengan nilai yang dihitung dalam kondisi “*ideal*”, penghitungan COP dapat dilakukan dengan lebih akurat, sehingga memberikan wawasan berharga mengenai kinerja dan efisiensi sistem.

Aliran massa : Untuk aliran massa, akan berguna untuk menggunakan data publik untuk kompresor yang tersedia di perangkat lunak dan halaman web teknis dan menghitung aliran massa sesuai dengan standar AHRI-540[10] dan AHRI-571[20].

Hal ini memberikan algoritma titik untuk mengevaluasi pendekatan yang baik terhadap kondisi nyata aliran massa tanpa memasang instrumentasi lagi seperti pengukur aliran. Aliran massa oleh kelompok kompresi (dibentuk oleh k kompresor) dihitung berdasarkan produk dari fraksi daya dan sinyal aktivasi yang diperoleh dari keadaan kompresor (*ON/OFF*). Untuk memperkirakan nilai sebenarnya dalam sistem, digunakan pemodelan sederhana dari evaporator[21]. Aliran massa yang dibutuhkan oleh evaporator pada kelompok hisap dihitung berdasarkan produk fraksi beban, rasio panas masuk akal (*SHR*) dan sinyal aktivasi diperoleh dari keadaan solenoid (*ON/OFF*).

Efek samping dari kesalahan aliran massa, sistem akan menghadapi[22]:

- Perubahan kapasitas pendinginan: Laju aliran massa yang tinggi umumnya menghasilkan kapasitas pendinginan yang lebih tinggi, namun tanpa sistem yang baik untuk menangani aliran balik cairan di saluran masuk kompresor, laju keausan perangkat kompresi akan meningkat. Namun, laju aliran massa yang rendah dapat mengakibatkan berkurangnya kapasitas pendinginan, karena lebih sedikit zat pendingin yang bersirkulasi melalui sistem, sehingga membatasi penyerapan dan perpindahan panas.
- Risiko pembekuan: Dalam beberapa kasus, laju aliran massa yang rendah dapat menyebabkan risiko pembekuan koil evaporator, karena zat pendingin mungkin tidak cukup menyerap panas dari udara atau proses yang didinginkan.

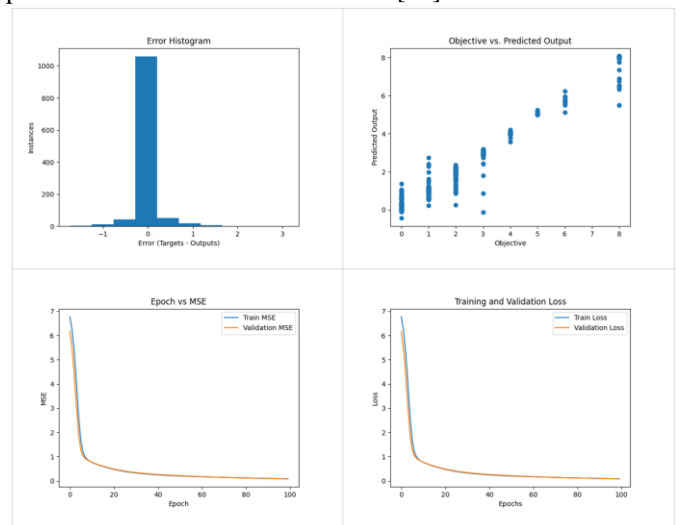
C. Hasil RNNs

Dengan kumpulan data yang terdiri lebih dari 28.000 catatan dari sistem nyata dan nilai simulasi, sistem cerdas berdasarkan *Recurrent Neural Networks (RNNs)* menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam hal kemampuan prediktif. Hasil ini menunjukkan potensi menggabungkan solusi ini dengan perangkat yang dihasilkan untuk meningkatkan akurasi diagnostik.

Dengan menghitung frekuensi relatif kejadian kegagalan dalam suatu sistem, dimungkinkan untuk memperkirakan kemungkinan terjadinya kejadian tertentu dibandingkan

dengan kejadian lain. Informasi ini dapat membantu dalam mengidentifikasi kejadian yang paling mungkin terjadi dan menerapkan strategi mitigasi risiko yang tepat. Namun, penting untuk diingat bahwa frekuensi relatif didasarkan pada data historis dan dapat berfluktuasi karena perubahan kondisi sistem atau faktor eksternal.

Hasil RNN, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8, menunjukkan histogram kesalahan, kesalahan prediksi, kesalahan kuadrat median sepanjang zaman, serta kerugian pelatihan dan validasi. Koefisien determinasi model RNN sebesar 0,7039 menunjukkan bahwa model tersebut mampu menjelaskan sekitar 70,39% variasi data observasi. Meskipun hal ini menunjukkan performa yang baik, penting untuk mempertimbangkan bahwa model tersebut mungkin masih melewatkan atau salah mendiagnosis masalah tertentu. Oleh karena itu, sangat penting untuk memasukkan sumber informasi tambahan dan pengetahuan ahli ketika mengambil keputusan berdasarkan keluaran model[23].



Gbr. 7 Hasil RNNs. (a) *Error-Histogram* (b) *Prediction Error* (c) *Median Square Error across epochs* (d) *Training and Validation Loss*

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Integrasi berbagai sensor pada perangkat dan pemanfaatan aplikasi Microsoft Azure memungkinkan akses real-time terhadap data terkini dari sistem pendingin. Kemampuan pemantauan yang komprehensif ini memfasilitasi pengambilan keputusan yang akurat dan tepat waktu, memungkinkan tindakan prediktif dan mencegah *downtime* sistem yang dapat berdampak pada produksi dan keamanan pangan.

Perangkat yang dijelaskan ini terbukti menjadi alat yang hemat biaya dan serbaguna untuk memantau sistem pendingin. Dengan harga sekitar 200 USD, kinerjanya mengungguli alternatif mahal yang tersedia di pasar. Tidak seperti perangkat khusus merek, perangkat ini dapat digunakan di berbagai sistem pendingin, apa pun ukuran atau merek kompresornya. Selain mengukur variabel seperti tegangan, arus listrik, suhu, dan tekanan, alat ini juga memantau getaran, ppm CO₂, dan memperkirakan konsumsi daya, faktor daya, persentase kebocoran, panas berlebih, serta suhu hisap dan

pelepasan. Dengan kemampuan ini, ia memberikan analisis komprehensif terhadap kondisi sistem pendingin, memastikan perlindungannya.

Penggunaan *Recurrent Neural Networks (RNNs)* dalam sistem pendingin terbukti menjadi metode yang efektif untuk dukungan diagnostik dan pemeliharaan prediktif. *RNNs* unggul dalam menganalisis data deret waktu, sehingga cocok untuk memeriksa data yang dikumpulkan dari sensor tambahan di sistem pendingin. Dengan mengidentifikasi pola dan hubungan yang kompleks, *RNNs* meningkatkan akurasi klasifikasi kesalahan dan dapat beradaptasi dengan data baru, serta terus meningkatkan kinerjanya seiring waktu. Namun, *RNNs* pelatihan memerlukan data dan sumber daya komputasi yang besar, dan kualitas data masukan dapat memengaruhi performanya. Selain itu, kemampuan interpretasi *RNNs* menghadirkan tantangan, yang dapat memengaruhi keyakinan dan kemampuan menjelaskan kesimpulan dan hasil model.

REFERENSI

- [1] T. Birmbili, "Montreal protocol at 30: The governance structure, the evolution, and the kigali amendment," *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 350, no. 7, pp. 425-431, 2018.
- [2] U. N. E. Programme, "The kigali amendment to the montreal protocol: Hfc phase-down," United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, Tech. Rep., 2016. [Online]. Available: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25495/Kigali_Amend_eng.pdf.
- [3] A. Koons-Stapf, "Condition based maintenance: Theory, methodology, application," 01 2015, pp. 1-35
- [4] D. L. Pinzón Niño, "Panorama de aplicación de internet de las cosas (iot)," 2016
- [5] A. A. Kader, "Increasing food availability by reducing postharvest losses of fresh produce," in *V International Postharvest Symposium* 682, 2004, pp. 2169-2176
- [6] T. Stuart, *Waste: Uncovering the global food scandal*. WW Norton & Company, 2009
- [7] R. S. Rolle, "Improving postharvest management and marketing in the asia-pacific region: issues and challenges," *Postharvest management of fruit and vegetables in the Asia-Pacific region*, vol. 1, no. 1, pp. 23-31, 2006
- [8] J. Gustavsson, C. Cederberg, U. Sonesson, R. Van Otterdijk, and A. Meybeck, "Global food losses and food waste," 2011
- [9] Nelson Sierra, "Symbionte UN," GitHub repository, 2022. [Online]. Available: {[https://github.com/nasierras/Symbionte UN](https://github.com/nasierras/Symbionte_UN)}
- [10] H. Air-Conditioning and R. Institute, "2020 standard for performance rating of positive displacement refrigerant compressors," in *AHRI Standard 540*, march 2020, pp. 6-23
- [11] J. Chaudhary and A. Mishra, "Detection of gas leakage and automatic alert system using arduino," *SSRN Electronic Journal*, 01 2019
- [12] "Mechanical vibration — measurement and evaluation of machine vibration — part 8: Reciprocating compressor systems," International Organization for Standardization, Geneva, CH, Standard, Mar. 2018
- [13] M. Corporation, "Arduino sdk cloud azure development for arduino," <https://github.com/Azure/azure-sdk-for-c-arduino>, 2013
- [14] S. Nan, "Thingesp cloud client library," Sep 2021. [Online]. Available: <https://github.com/SiddheshNan/ThingESP-Arduino-Library>.
- [15] N. Tudoroiu, M. Zaheeruddin, E.-R. Tudoroiu, and V. Jeflea, "Fault detection and diagnosis (fdd) in heating ventilation air conditioning systems (hvac) using an interactive multiple model augmented unscented kalman filter (immaukf)," 2008 Conference on Human System Interactions, pp. 334-339, 2008
- [16] National Electrical Manufacturers Association (NEMA), "Nema standards publication mg 1-2020: Motors and generators," NEMA, Rosslyn, VA, Technical Report MG 1, 2020. [Online]. Available: <https://www.nema.org/Standards/Pages/Motors-and-Generators.aspx>
- [17] J. Smith and M. Johnson, "Effects of voltage and current unbalance on the performance and efficiency of three-phase induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 2, pp. 987-996, 2015
- [18] Z. Soltani, K. K. Sorensen, J. Leth, and J. D. Bendtsen, "Fault detection and diagnosis in refrigeration systems using machine learning algorithms," *International Journal of Refrigeration*, vol. 144, pp. 34-45, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700722002997>
- [19] Y. Ust, "Performance analysis and optimization of irreversible air refrigeration cycles based on ecological coefficient of performance criterion," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 47-55, 2009
- [20] H. Air-Conditioning and R. Institute, "2012 standard for performance rating of positive displacement carbon dioxide refrigerant compressors and compressor units," in *AHRI Standard 571*, march 2012, pp. 6-23
- [21] Y. Cengel and M. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, ser. Cengel series in engineering thermal-fluid sciences. McGraw-Hill, 2011
- [22] E. Winandy, C. Saavedra, and J. Lebrun, "Experimental analysis and simplified modelling of a hermetic scroll refrigeration compressor," *Applied thermal engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 107-120, 2002
- [23] D. Adelekan, O. Ohunakin, and B. Paul, "Artificial intelligence models for refrigeration, air conditioning and heat pump systems," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 8451-8466, 2022