

Pengembangan Alat Monitoring Infus Berbasis Arduino: Fondasi Awal untuk Integrasi Industri Material Plastik Biomedis Masa Depan

Yustinus Engelbertus¹⁾, Irawadi Buyung²⁾, Latifah Listyalina³⁾

*Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Respati Yogyakarta, Indonesia
Jalan Laksda Adisucipto KM.6,3, Ambarukmo, Caturtunggal, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman,
Yogyakarta 55281^{1,2)}*

*Program Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik, Politeknik ATK Yogyakarta, Indonesia
Tarudan, Bangunharjo, Sewon, Bantul Regency, Special Region of Yogyakarta 55188³⁾
E-Mail : latifah.listyalina@atk.ac.id³⁾**

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan perangkat *monitoring* volume infus berbasis mikrokontroler Arduino dengan kemampuan mendeteksi aliran cairan secara *real-time*. Perangkat ini ditujukan untuk meningkatkan efisiensi pemantauan infus oleh tenaga medis serta meminimalkan risiko keterlambatan pergantian cairan yang berpotensi memengaruhi kondisi pasien. Sistem yang dirancang menggunakan sensor *load cell* untuk mendeteksi aliran cairan infus dan menampilkan data volume cairan pada layar LCD, serta dilengkapi dengan mekanisme peringatan ketika aliran terhenti atau volume cairan berada pada ambang batas minimum. Sensor tersebut mendeteksi *flow rate* secara tidak langsung melalui perubahan berat yang diukur oleh *load cell*. Sebagai bentuk arah pengembangan lanjutan, penelitian ini merekomendasikan pengembangan melalui integrasi material plastik biomedis, seperti plastik transparan biokompatibel, plastik tahan suhu tinggi, maupun plastik *biodegradable*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi dan respons yang baik, dengan tingkat kesalahan relatif kecil sebesar 3,07%, yang masih berada dalam batas toleransi untuk aplikasi monitoring nonkritis. Dengan demikian, prototipe ini berpotensi menjadi dasar pengembangan perangkat monitoring infus cerdas yang tidak hanya efisien, tetapi juga adaptif terhadap penerapan teknologi material plastik medis modern.

Kata kunci: volume, infus, aliran, Arduino

ABSTRACT

This study aims to design and develop an infusion volume-monitoring device based on an Arduino microcontroller that provides real-time fluid-flow detection. The device is intended to improve the efficiency of infusion monitoring by medical personnel and minimize the risk of delayed fluid replacement, which could potentially affect patient conditions. The proposed system utilizes a load cell sensor to detect the infusion fluid flow and display volume data on an LCD screen, and it is also equipped with a warning mechanism when the flow stops or when the fluid volume reaches the minimum threshold, where the flow rate is indirectly measured through variations in weight using a load cell-based sensing mechanism. However, as a future direction, this research recommends integrating biomedical plastics, such as transparent, biocompatible, heat-resistant, or biodegradable materials. Experimental results demonstrate that the system achieves high accuracy and responsiveness, with a relatively low error rate of 3.07%, which remains within acceptable tolerance limits for non-critical monitoring applications. Therefore, this prototype has the potential to serve as the foundation for developing smart infusion monitoring devices that are not only efficient but also adaptable to modern biomedical plastic technologies.

Keywords: volume, infusion, flow, Arduino

*Corresponding author

1. Pendahuluan

Infus merupakan salah satu terapi medis yang paling sering digunakan dalam pelayanan kesehatan, baik untuk hidrasi, pemberian obat-obatan, maupun nutrisi parenteral. Menurut data World Health Organization (WHO), terapi infus merupakan bagian penting dari praktik klinis yang digunakan secara luas di seluruh dunia, terutama dalam penanganan pasien rawat inap dan kasus gawat darurat (WHO, 2022). Namun, di banyak fasilitas kesehatan, pemantauan volume dan aliran infus masih dilakukan secara manual, yang rentan terhadap keterlambatan penggantian cairan dan berisiko menimbulkan emboli udara jika dibiarkan kosong terlalu lama (Patidar, R. K., Tiwari, R., & Sharma, 2016).

Kondisi tersebut menjadi perhatian serius, khususnya di lingkungan rumah sakit dengan beban kerja tinggi atau dalam perawatan pasien dengan pengawasan yang terbatas. Di sinilah peran teknologi menjadi sangat krusial. Sistem otomatis berbasis mikrokontroler seperti Arduino telah banyak digunakan dalam prototipe alat medis karena sifatnya yang ekonomis, fleksibel, dan mudah diprogram (Kaur, A., & Kaur, 2018). Melalui integrasi sensor aliran cairan dan tampilan volume *real-time*, sistem ini memungkinkan pemantauan infus secara otomatis, meningkatkan efisiensi kerja tenaga medis, serta mengurangi risiko kesalahan manusia (*human error*).

Namun ada kalanya aliran cairan infus (Effendy et al., 2024) dapat terganggu oleh pasien itu sendiri yakni penjepit pada selang infus tidak tertutup ketika sedang melakukan aktivitas yang melibatkan pergerakan yang cukup banyak di daerah terpasangnya infus. Hal ini dapat menyebabkan selang infus tergulung atau terlipat dan membuat aliran cairan infus terlalu lambat, sehingga dapat menimbulkan *clot* atau sumbatan.

Untuk mengurangi masalah-masalah tersebut penulis merancang Alat *Monitoring Volume Infus dengan Pendeteksian Aliran Cairan Berbasis Arduino*. Sensor *load cell* pada umumnya digunakan sebagai komponen utama pada sistem timbangan digital yang

mana pada alat ini sensor *load cell* digunakan untuk mengukur berat cairan infus (Ilham et al., 2025; Lestariningsih et al., 2021; Tampubolon et al., 2021). (Ratnaningsih et al., 2024) Penggunaan *load cell* sebagai metode pengukuran volume dipilih karena *load cell* mampu mengukur massa secara langsung dengan akurasi dan stabilitas yang tinggi, yang selanjutnya dapat dikonversi menjadi volume berdasarkan densitas material. Metode berbasis massa ini banyak digunakan dalam aplikasi industri karena tidak dipengaruhi oleh bentuk wadah maupun fluktuasi aliran, serta relatif mudah diintegrasikan dengan sistem mikrokontroler (Omega Engineering., 2018). Meskipun terdapat sensor lain yang dapat mengukur volume atau laju aliran secara langsung, seperti turbine flow sensor, ultrasonic flow sensor, dan level sensor, sensor-sensor tersebut memiliki keterbatasan, antara lain sensitivitas terhadap turbulensi aliran, gelembung udara, viskositas fluida, ketergantungan pada geometri wadah, serta biaya implementasi yang lebih tinggi (Pallás-Areny, R., & Webster, 2012). Oleh karena itu, *load cell* dinilai lebih sesuai untuk sistem prototipe dan simulasi, serta aplikatif pada proses pengolahan plastik yang melibatkan material cair maupun granular dengan karakteristik aliran yang bervariasi (Johnson, 2011).

Sebagai dasar perancangan sistem, penelitian ini diawali dengan studi pendahuluan kualitatif berupa observasi terbatas di lingkungan klinis serta kajian literatur, untuk mengidentifikasi kebutuhan nyata dalam pemantauan infus. Observasi dan masukan umum dari tenaga medis menunjukkan bahwa pemantauan infus masih banyak dilakukan secara manual melalui inspeksi visual, yang berpotensi kurang optimal pada kondisi beban kerja tinggi atau situasi darurat. Kebutuhan utama yang teridentifikasi meliputi sistem yang sederhana, mudah digunakan, responsif, memiliki peringatan lokal, serta tidak bergantung pada koneksi internet. Temuan ini menjadi dasar dalam penentuan spesifikasi

sistem, yaitu pemilihan sensor *load cell* untuk pemantauan volume berbasis perubahan berat, penggunaan LCD sebagai media informasi lokal, serta penerapan alarm saat aliran terhenti atau volume mencapai ambang minimum.

Dalam rancangan ini, *Arduino* merupakan mikrokontroler utama. Input alat berasal dari pendeteksian sensor *load cell* terhadap berat cairan infus. Sensor *load cell* akan diletakkan pada tiang infus yang sudah dimodifikasi, yang berfungsi untuk mengukur berat infus sehingga perawat dapat mengetahui apakah cairan infus tidak mengalir atau akan habis. Adapun keluaran dari sistem ini berupa pemberitahuan status cairan infus yang akan muncul pada LCD dan dua *buzzer* yang berbunyi dengan nada yang berbeda, yang pertama untuk mengetahui apakah cairan infus mampet dan yang kedua untuk mengetahui apakah cairan infus akan habis. Sistem pada penelitian ini tidak menggunakan teknologi IoT karena dirancang dengan fokus pada kesederhanaan, keandalan, dan pemantauan lokal secara *real-time*. Penggunaan tampilan LCD dinilai sudah mencukupi untuk menampilkan volume cairan infus tanpa bergantung pada koneksi jaringan. Implementasi IoT memerlukan perangkat tambahan, infrastruktur jaringan, serta mekanisme keamanan data, yang dapat meningkatkan kompleksitas, konsumsi daya, dan biaya sistem (Pallás-Areny, R., & Webster, 2012) (Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, n.d.). Selain itu, sistem non-IoT lebih stabil dan andal karena tidak terpengaruh oleh gangguan konektivitas, sehingga cocok untuk prototipe dan aplikasi dasar. Meskipun demikian, integrasi IoT memiliki potensi untuk pengembangan selanjutnya, khususnya untuk pemantauan jarak jauh dan notifikasi otomatis (Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, 2013).

Sebagai bentuk arah pengembangan lanjutan, penelitian ini merekomendasikan pengembangan lanjutan melalui integrasi material plastik biomedis, seperti plastik transparan biokompatibel, plastik tahan suhu tinggi, maupun plastik biodegradable (Pan, Y.,

& Zhong, 2019) (Fu, Y., Li, P., & Wang, 2020). Potensi penggunaan plastik medis canggih ini dapat mendukung pengembangan alat kesehatan yang lebih ergonomis, steril, dan ramah lingkungan di masa mendatang.

Pendekatan rekayasa sistem berbasis eksperimental, dengan tujuan merancang perangkat pemantauan infus otomatis yang terhubung ke internet (IoT) (Hamzah, 2025). Sistem ini memanfaatkan sensor *load cell* untuk mendeteksi perubahan berat pada botol infus, serta mikrokontroler ESP8266 sebagai pusat kendali sekaligus pengirim data ke platform daring. Pengujian sistem dilakukan dengan infus yang diisi dengan volume berbeda, dan sistem diuji untuk melihat konsistensi pembacaan serta ketepatan waktu pengiriman data. Pengujian dilakukan di lingkungan laboratorium untuk memastikan sistem berjalan stabil dan mampu memberikan informasi secara berkelanjutan tanpa intervensi manual. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang berfungsi secara efektif dalam memantau volume infus melalui deteksi berat. Data yang ditangkap oleh *load cell* berhasil ditampilkan secara *real-time* pada platform ThingSpeak, sehingga memungkinkan pemantauan jarak jauh melalui perangkat seluler atau komputer. Akurasi pembacaan berat infus cukup baik, dengan tren grafik pada ThingSpeak yang mengikuti perubahan berat secara logis seiring berkurangnya cairan. Sistem mampu mengirim data setiap 15 detik, sesuai interval yang diprogram, sehingga menunjukkan kestabilan koneksi dan sinkronisasi antara ESP8266 dan platform ThingSpeak. Respons sensor cepat dan andal, bahkan ketika berat berubah secara tiba-tiba akibat perpindahan cairan. Meskipun sistem ini belum dilengkapi dengan alarm otomatis atau sistem notifikasi ke perangkat *Android*, fungsi utamanya sebagai alat pemantauan jarak jauh telah terpenuhi. Hal ini memberikan kontribusi nyata bagi efisiensi tenaga medis, terutama di rumah sakit dengan jumlah pasien tinggi atau dalam kondisi darurat yang memerlukan pemantauan cepat dan akurat.

Penelitian lain memanfaatkan *Arduino Nano* sebagai unit pemrosesan utama, dengan dukungan sensor untuk mendeteksi kondisi volume cairan infus dan aliran tetesan, serta menggunakan aplikasi Blynk berbasis Android untuk memantau kondisi infus secara *real-time* dari jarak jauh (Putung et al., 2023). Setelah perakitan dan pemrograman sistem selesai, dilakukan serangkaian uji coba untuk mengevaluasi kinerja alat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berhasil, yaitu mendeteksi perubahan berat cairan infus dengan akurasi yang cukup baik, mendeteksi aliran tetesan cairan dengan cepat menggunakan sensor inframerah, serta mengirimkan data secara *real-time* ke aplikasi Blynk yang menampilkan informasi volume infus dan status aliran pada ponsel Android. Sistem juga telah diatur untuk memberikan peringatan saat infus hampir habis atau aliran berhenti. Alarm buzzer aktif saat cairan mencapai ambang batas minimal atau tetesan tidak terdeteksi. Indikator LED menyala sebagai isyarat visual tambahan. Dari segi fungsionalitas, sistem ini dinilai berhasil memenuhi tujuan penelitian, yaitu menghadirkan alat monitoring infus yang praktis, murah, dan mudah dipantau dari jarak jauh. Pengujian menunjukkan sistem mampu mengurangi ketergantungan pada pemantauan manual, yang umumnya menyita waktu tenaga medis.

Penelitian selanjutnya menggunakan pendekatan eksperimental dengan fokus pada pengembangan sistem *monitoring* infus otomatis berbasis Internet of Things (IoT) (Pardosi & Sembiring, 2025). Tujuan dari sistem ini adalah mempermudah tenaga medis dalam memantau volume cairan infus secara *real-time* melalui koneksi internet, sehingga dapat meningkatkan keselamatan dan kenyamanan pasien. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem monitoring bekerja sesuai dengan ekspektasi. Setiap perubahan berat pada botol infus dapat terdeteksi oleh sensor *load cell* dan ditampilkan secara *real-time* pada dashboard ThingSpeak. Grafik ThingSpeak berhasil menampilkan tren penurunan berat cairan

infus secara bertahap, sesuai dengan berkurangnya volume cairan yang digunakan oleh pasien. Data terkirim dengan interval stabil (15 detik) dan memperlihatkan sistem memiliki koneksi internet dan proses pemrograman yang berjalan dengan baik. Akurasi pembacaan berat cukup tinggi untuk konteks aplikasi klinis nonkritis, meskipun belum dibandingkan dengan timbangan laboratorium sebagai alat pembanding. Tabel 1 menunjukkan penelitian-penelitian yang terkait dengan *monitoring* infus.

Tabel 1. Simpulan Penelitian Terkait

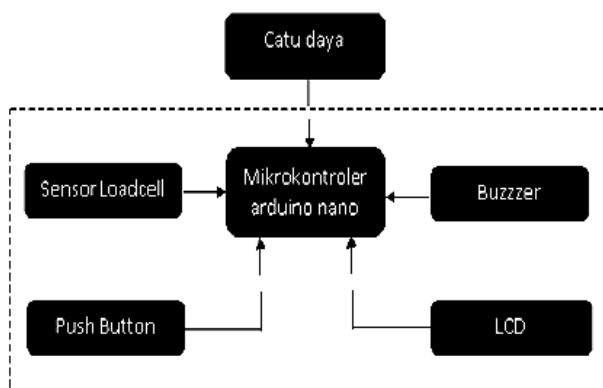
No	Peneliti & Tahun	Kontribusi terhadap Penelitian Ini
1	Hamzah (2025)	Menjadi rujukan sistem monitoring infus berbasis IoT dan validasi keandalan load cell untuk pemantauan volume
2	Putung et al. (2023)	Menjadi referensi integrasi alarm dan multi-sensor pada monitoring infus
3	Pardosi & Sembiring (2025)	Menguatkan validitas metode load cell untuk monitoring infus berbasis berat
4	Penelitian ini	Kontribusi utama: sistem non-IoT yang sederhana, akurat (error 3,07%), responsif, serta rekomendasi integrasi material plastik biomedis sebagai arah pengembangan lanjutan

Sistem ini menawarkan manfaat praktis dalam mempermudah tenaga kesehatan memantau infus pasien dari jarak jauh tanpa harus memeriksa infus secara manual. Hal ini sangat relevan di rumah sakit (Sunardi, Buyung Irawadi, 2024) dengan rasio tenaga medis dan pasien yang tidak seimbang, atau dalam situasi darurat yang memerlukan efisiensi waktu. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menyajikan rancangan awal alat monitoring infus berbasis *Arduino* (Irawadi et al., 2024) (Kusriyanto et al., 2021;

Sumarjono, 2018), tetapi juga membuka diskusi menuju integrasi teknologi plastik medis sebagai inovasi berkelanjutan. Inisiatif ini diharapkan dapat mendukung transformasi layanan kesehatan agar lebih adaptif terhadap teknologi dan material baru yang aman, efisien, serta ramah lingkungan.

2. Metodologi

Perangkat ini memanfaatkan sensor berat (*load cell*) untuk mengukur volume cairan infus secara tidak langsung melalui perubahan massa. Data hasil pengukuran serta status cairan ditampilkan pada *Liquid Crystal Display* (LCD) berukuran 2x16 karakter yang mampu menampilkan informasi dalam dua baris, masing-masing 16 karakter. Dokumen perancangan juga memaparkan secara rinci spesifikasi teknis perangkat, diagram blok sistem, perancangan perangkat keras, serta perancangan perangkat lunak yang direpresentasikan dalam bentuk *flowchart* dan baris kode program yang digunakan untuk mengoperasikan perangkat. Secara konseptual, hubungan antarbagian dalam sistem digambarkan melalui diagram blok yang berfungsi untuk memperjelas alur kerja dan integrasi tiap komponen, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok diagram alat

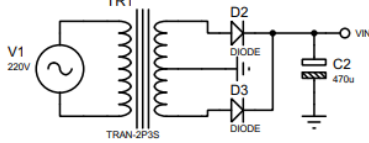
Perancangan perangkat *monitoring* volum infus diawali dengan identifikasi komponen yang diperlukan agar kebutuhan sistem dapat terpenuhi dan realisasi rancangan dapat dilakukan secara optimal. Perangkat utama yang digunakan meliputi

mikrokontroler Arduino sebagai pusat kendali sistem, sensor *load cell* beserta modul penguat HX711 sebagai pendeteksi berat cairan infus, *buzzer* sebagai media notifikasi, serta catu daya bertegangan 12 V dan 6 V dengan arus maksimum 1 A sebagai sumber energi. Selain itu, digunakan *Liquid Crystal Display* (LCD) untuk menampilkan informasi hasil deteksi, perangkat lunak Arduino IDE sebagai sarana pemrograman dan pengunggahan kode ke modul Arduino, serta seperangkat cairan dan selang infus sebagai objek uji.

Setiap komponen dalam sistem memiliki fungsi yang terintegrasi dalam blok diagram perancangan. Sumber daya berupa trafo 6 V dan 12 V berperan sebagai penyedia tegangan operasi untuk seluruh rangkaian. Sensor *load cell* bersama modul penguat HX711 bertugas mendeteksi berat cairan infus dan mengubahnya menjadi sinyal listrik yang kemudian dibaca oleh Arduino melalui komunikasi digital I2C. Mikrokontroler Arduino memproses data hasil pengukuran untuk menentukan status cairan infus dan mengirimkan logika pemicu ke komponen lain. *Buzzer* digunakan sebagai indikator suara yang berfungsi memberikan tanda proses awal maupun peringatan saat cairan infus hampir habis, atau ketika tidak terdeteksi penurunan cairan dalam kurun waktu tertentu akibat kemungkinan kebocoran atau sumbatan pada selang. Sementara itu, LCD berperan menampilkan informasi berupa nilai berat cairan terdeteksi serta status cairan secara *real-time*. Sistem dilengkapi dengan dua buah push button, di mana tombol pertama digunakan untuk proses kalibrasi awal sensor *load cell* (*tare*) saat pemasangan kantong infus, sedangkan tombol kedua digunakan untuk mengatur batas minimum volume cairan infus sekaligus mengonfirmasi notifikasi alarm.

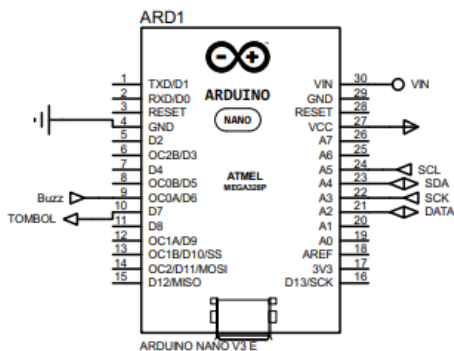
Salah satu rangkaian yang berfungsi memberikan suplai tegangan DC ke rangkaian lainnya ialah rangkaian *power supply*. Karena rangkaian menggunakan daya dalam bentuk DC, sedangkan daya yang tersedia dalam bentuk AC, maka perlu dilakukan penyearahan dan filter untuk mengubah

tegangan AC menjadi DC seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



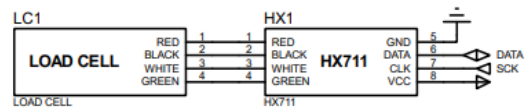
Gambar 2. Rangkaian catu daya.

Alat yang dirancang digunakan untuk mengetahui volume cairan infus dengan menggunakan sensor *load cell* sebagai pembaca berat cairan dan *buzzer* untuk menandakan status cairan. Arduino menerima data pendeteksi berat melalui komunikasi I2C. Namun, hubungan kaki I2C pada modul HX711 dapat dilewatkan pada kaki non-I2C. Dalam hal ini, hubungan dengan HX711 dilewatkan melalui kaki A2 dan A3 untuk *load cell* dan picu untuk membunyikan *buzzer* yang diumpun dari kaki D6 dan D7. Modul Arduino menerima tegangan ± 6 VDC pada kaki V_{in} dari rangkaian penyearah. Tegangan ini dilewatkan melalui regulator tegangan 5 V dalam modul Arduino. Tegangan 5V inilah yang digunakan untuk seluruh rangkaian. Gambar 3 menunjukkan rangkaian *Arduino Nano* yang digunakan.



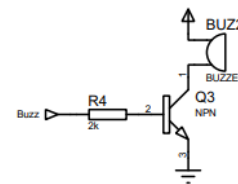
Gambar 3. Rangkaian *Arduino Nano*

Untuk melakukan pengukuran volume infus digunakan sensor *load cell* di mana mempunyai keluaran tegangan yang kecil sehingga perlu dikuatkan. Proses ini dilakukan oleh modul HX711. HX711 juga mendeteksi perbedaan tegangan pada kaki-kaki *load cell*. Keluaran dari modul HX711 berupa data 24-bit dalam format serial I2C. Rangkaian *load cell* dan modul HX711 ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian *Load cell*

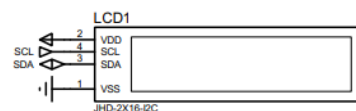
Untuk memperbesar arus dari Arduino, digunakan rangkaian *buzzer* yang bertujuan untuk membunyikan *buzzer*. Rangkaian menggunakan transistor sebagai saklar yang mentransformasikan arus Arduino yang kecil menjadi arus yang cukup besar untuk menggerakkan *buzzer*. Rangkaian *buzzer* dipaparkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian *buzzer*

Ketika pin Arduino diberi logika 0, maka basis transistor tidak mendapat arus basis, sehingga transistor berada dalam kondisi *off* (*cut off*). Hal ini menyebabkan *buzzer* tidak berbunyi. Ketika pin Arduino diberi logika 1, basis transistor mendapat arus, sehingga transistor dalam keadaan on (saturasi). Hal ini menyebabkan *buzzer* berbunyi.

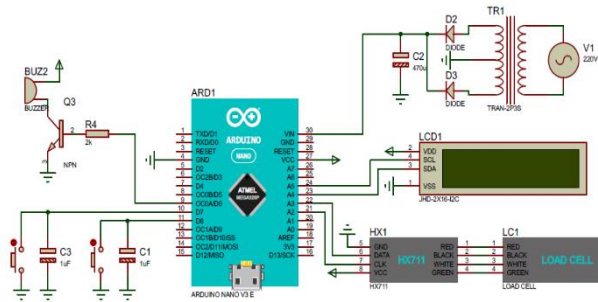
Perancangan ini membutuhkan LCD dengan spesifikasi 2x16, yaitu LCD dengan 2 baris dan 16 kolom karakter. Antarmuka LCD dengan Arduino menggunakan jalur I2C, sehingga pada LCD perlu ditambahkan modul I2C. Rangkaian LCD ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Rangkaian LCD

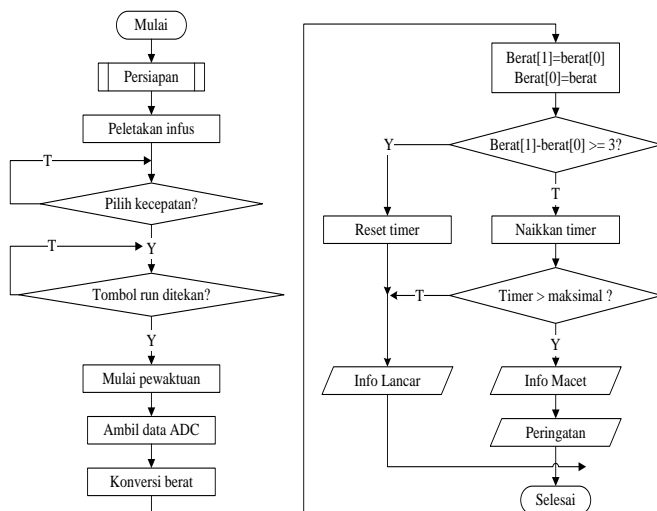
Dari beberapa rangkaian di atas, dibuat rangkaian keseluruhan untuk memberikan gambaran keseluruhan hubungan rangkaian yang digunakan. Rangkaian dipisahkan menjadi bagian-bagian untuk mempermudah mengetahui batas masing-masing bagian.

Antarbagian dihubungkan dengan label yang unik. Skematik rangkaian ditunjukkan Gambar 7.



Gambar 7. Rangkaian keseluruhan

Bahasa pemrograman Arduino pada dasarnya menggunakan bahasa pemrograman C. Bahasa C sendiri merupakan bahasa tingkat tinggi yang sangat populer dan banyak digunakan oleh para programmer. Program diedit, dikompilasi dan diunggah menggunakan compiler bawaan Arduino IDE. Alur proses program (*flowchart*) dibuat berdasarkan logika proses yang mengerti manusia, kemudian diturunkan menjadi bahasa program yang dipahami oleh pemroses Arduino. Alur proses pada Arduino ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Alur proses (*Flowchart*)

Perancangan perangkat lunak sistem monitoring infus disusun berdasarkan urutan proses yang direpresentasikan dalam diagram alir. Proses dimulai dengan tahap inialisasi, yaitu pengaturan fasilitas yang akan digunakan mikrokontroler untuk menjalankan program.

Selanjutnya, mikrokontroler melakukan pembacaan data *Analog-to-Digital Converter* (ADC) dari pin input yang terhubung ke modul sensor. Data hasil pembacaan ADC kemudian dikonversi menjadi nilai berat cairan infus.

Nilai berat yang diperoleh disimpan dalam variabel *array* dengan mekanisme pergeseran, di mana nilai berat sebelumnya dipindahkan ke indeks [1], nilai berat saat ini ditempatkan pada indeks [0], sedangkan nilai terbaru diisi dengan hasil pengukuran terkini. Program kemudian menghitung selisih antara nilai berat [1] dan berat [0]. Apabila selisih yang diperoleh lebih besar dari 3 gram, proses *timer* akan diulang dari awal. Sebaliknya, jika selisihnya kurang dari atau sama dengan 3 gram, program akan meningkatkan nilai *timer*.

Deteksi kondisi cairan infus macet dan habis dilakukan dengan memantau perubahan berat cairan infus terhadap waktu. Apabila tidak terjadi perubahan berat dalam interval waktu tertentu, sistem akan meningkatkan nilai *timer*. Jika *timer* mencapai batas maksimum, sistem menyimpulkan bahwa aliran infus mengalami kemacetan. Sementara itu, apabila kondisi tersebut terjadi saat berat cairan telah mencapai ambang minimum, sistem menyimpulkan bahwa cairan infus telah habis dan memberikan peringatan kepada pengguna.”

Tahap berikutnya adalah pemeriksaan nilai *timer*. Apabila nilai *timer* belum mencapai batas maksimum, status sistem tetap dinyatakan normal atau lancar. Namun, apabila *timer* telah mencapai nilai maksimum, sistem mengklasifikasikan status infus sebagai macet. Pada kondisi ini, perangkat lunak memberikan peringatan melalui mekanisme alarm yang telah diprogram, sehingga pengguna atau tenaga medis dapat segera mengambil tindakan.

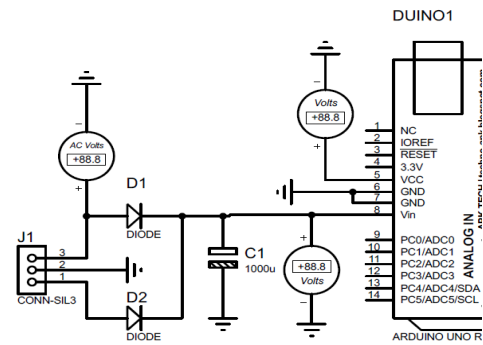
3. Hasil dan Pembahasan

Perangkat yang dirancang terdiri atas beberapa komponen yang saling terintegrasi sehingga membentuk satu sistem kerja yang

utuh. Adapun spesifikasi alat ini adalah sebagai berikut.

1. Sumber catu daya yang digunakan adalah 12 V dan 6 V dengan kemampuan arus 1 A.
2. Alat monitoring volume infus dirancang dalam bentuk sistem kompak yang terdiri dari unit kendali berbasis Arduino berukuran sekitar 14 cm × 10 cm × 6 cm, modul sensor load cell berukuran sekitar 10 cm × 1,2 cm × 1,2 cm yang dilengkapi dudukan infus berukuran sekitar 12 cm × 8 cm × 4 cm sebagai pendeteksi berat cairan infus, serta penampil LCD 16×2 dan buzzer sebagai media informasi proses dan notifikasi kepada pengguna.
3. Berdasarkan karakteristik sensor *load cell* dan modul HX711 yang digunakan, sistem mampu mendeteksi laju aliran cairan infus pada rentang sekitar 5–1000 mL/jam, dengan rentang kerja optimal pada kisaran 10–600 mL/jam.
4. Konsumsi daya sistem yang relatif rendah, yaitu sekitar 0,6–0,8 W, diperoleh dari penggunaan mikrokontroler Arduino, sensor *load cell* dengan modul HX711, LCD, dan *buzzer* yang masing-masing memiliki kebutuhan arus yang kecil. Sementara itu, waktu respons sistem berkisar antara 0,5–1,5 detik dan dipengaruhi oleh kecepatan sampling HX711 hingga 80 SPS serta proses pengolahan data, pembaruan tampilan, dan notifikasi pada Arduino.

Setiap komponen perlu melalui tahap pengujian untuk memastikan kinerjanya sesuai dengan rancangan yang telah ditetapkan. Salah satu tahap pengujian yang dilakukan adalah pengujian tegangan yang bertujuan untuk memastikan bahwa tegangan kerja pada perangkat tidak melebihi batas ketentuan yang telah ditentukan. Proses pengujian dilakukan dengan mengukur tegangan pada titik-titik tertentu dalam rangkaian, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Pengujian tegangan alat

Hasil pengujian tegangan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian tegangan kerja alat

No.	Titik pengujian	Tegangan pada pengujian			Rata-rata
		1	2	3	
1.	Sebelum dioda	5,95	5,95	5,96	6,46
	(keluaran trafo)	VAC	VAC	VAC	VAC
		5,95	5,97	5,97	6,37
2.	Setelah dioda	7,62	7,71	7,72	7,23
		VDC	VDC	VDC	VDC

Pada titik pengukuran sebelum dioda, tegangan yang terdeteksi masih berupa arus bolak-balik (AC) yang merupakan keluaran dari transformator. Perangkat menggunakan transformator *center-tap* (CT) dengan dua keluaran tegangan. Hasil pengukuran terhadap *ground* menunjukkan dua nilai tegangan yang relatif sama dan sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan nilai nominal yang tercantum pada badan trafo, yaitu 6 volt.

Setelah melewati dioda penyearah, tegangan berubah menjadi arus searah (DC). Nilai tegangan pada titik ini meningkat, yaitu sebesar 7,23 volt, dibandingkan dengan tegangan sebelumnya sebesar 6,46 volt. Peningkatan ini disebabkan oleh penggabungan dua keluaran tegangan hasil proses penyearahan. Keberadaan kapasitor dalam rangkaian berfungsi untuk menjaga kestabilan tegangan agar tidak mengalami penurunan yang signifikan.

Tahap pengujian berikutnya dilakukan pada titik setelah tegangan melalui rangkaian regulator. Pengukuran dilakukan pada beberapa bagian rangkaian utama, yaitu

rangkainan Arduino, sensor, dan LCD. Hasil pengujian tegangan secara rinci ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian tegangan kerja alat

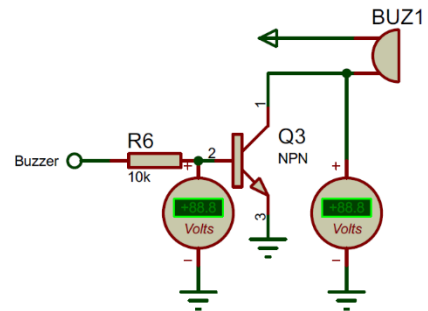
No.	Titik pengujian rangkaian	Tegangan (Volt DC) pada pengujian		
		1	2	3
1.	Arduino	5,21	5,22	5,22
2.	Sensor	5,0	5,0	5,0
3.	LCD	4,98	4,98	5,99

Hasil pengujian menunjukkan bahwa rangkaian regulator tegangan pada modul Arduino berfungsi dengan baik, ditandai dengan keluaran tegangan sebesar 5,06 volt. Tegangan ini kemudian didistribusikan ke seluruh bagian rangkaian sebagai sumber daya utama. Pada saat rangkaian sensor dihubungkan ke tegangan keluaran sebesar 5 volt, hasil pengukuran menunjukkan bahwa tidak terjadi penurunan tegangan yang signifikan. Kondisi serupa juga ditemukan ketika modul LCD disambungkan pada tegangan yang sama. Berdasarkan temuan tersebut, dapat disimpulkan bahwa regulator tegangan pada modul Arduino mampu menyediakan daya yang stabil dan mencukupi untuk mendukung kebutuhan seluruh rangkaian.

Rangkaian *buzzer* berfungsi sebagai pemberi peringatan dalam bentuk suara dengung. Pengujian *buzzer* ini dilakukan dengan mengukur tegangan yang menunjukkan aktivitas *buzzer* saat berbunyi dan saat tidak berbunyi. Titik pengujian rangkaian *buzzer* ditunjukkan Gambar 10.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa rangkaian aktivasi bekerja sesuai dengan prinsip logika masukan. Ketika diberikan masukan logika 0, arus tidak mengalir ke basis sehingga transistor berada dalam kondisi *off*. Pada keadaan ini, tegangan kolektor bernilai tinggi yang menandakan tidak adanya aliran arus dari kolektor ke emitor. Sebaliknya, ketika diberikan masukan logika 1, arus mengalir ke basis sehingga transistor berada dalam kondisi *on*, yang menyebabkan arus dapat mengalir dari kolektor ke emitor. Kondisi ini ditandai dengan tegangan kolektor

yang rendah. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa rangkaian *buzzer* berfungsi dengan baik sesuai dengan rancangan.

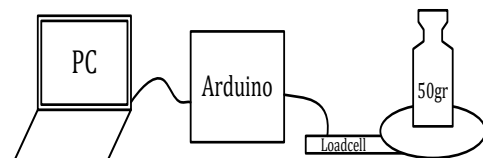


Gambar 10. Cara pengujian *buzzer*.

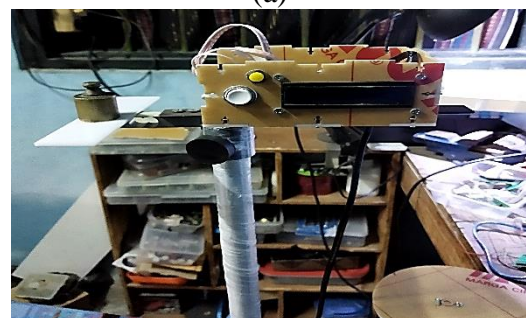
Hasil pengujian *buzzer* ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian *buzzer*

Masukan logika	Tegangan (Volt)			Kondisi
	Masukan	Basis	Kolektor	
0	0,9 mV	0,1 mV	4,66 V	Tidak berbunyi
1	4,9 V	0,75 V	42,9 mV	Berbunyi



(a)



(b)

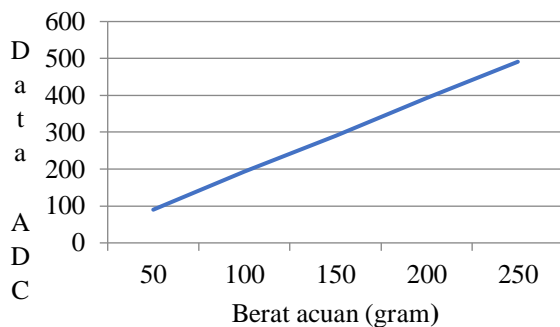
Gambar 11. Cara pengujian sensor (a) skematik dan (b) realisasi

Selanjutnya dilakukan pengujian sensor untuk mengevaluasi kemampuannya dalam mendeteksi berat benda dengan massa tertentu. Proses pengujian dilakukan dengan memberikan beban berupa anak timbangan dengan skala massa dalam satuan gram. Nilai hasil pendeteksian sensor diamati melalui

Serial Monitor pada perangkat lunak Arduino IDE. Metode pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 11. Hasil pendeteksian berupa nilai analog ADC yang ditunjukkan pada Tabel 4. Bentuk grafik data pendeteksian sensor ditunjukkan pada Gambar 12.

Tabel 4. Data ADC terhadap berat

No	Berat acuan (gram)	Data ADC	Kenaikan data setiap 50 gram
1	50	90	90
2	100	193	103
3	150	290	97
4	200	393	103
5	250	491	98



Gambar 12. Grafik hasil pengujian berat

Hasil pengujian menunjukkan nilai pendeteksian sensor (data ADC) yang linier terhadap berat beban buah timbangan. Kenaikan data rata-rata setiap 50 gram adalah 84,3. Nilai analog nantinya dikonversi menjadi nilai berat melalui kode program. Kode program yang diperlukan ditunjukkan oleh Persamaan (1):

$$\text{berat} = (\text{reading} * 50) / 84,3 \dots \dots \dots (1)$$

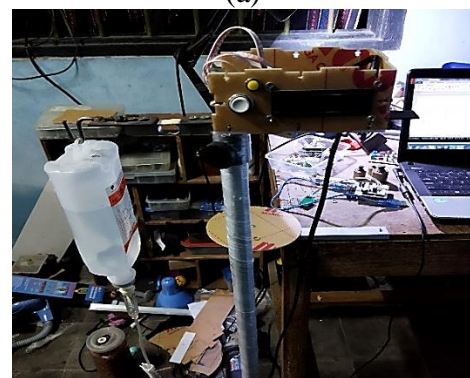
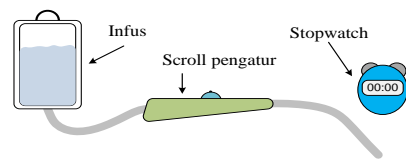
Setelah program konversi, penunjukan LCD menunjukkan nilai berat. Pengujian selanjutnya adalah menguji alat dalam mendeteksi nilai berat. Hasil pengujian berat terhadap berat acuan ditunjukkan pada Tabel 5. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perangkat mampu mendeteksi berat dengan baik, yang ditunjukkan oleh rata-rata selisih pengukuran kurang dari 2,8 gram dan persentase kesalahan sebesar 3,07%. Nilai berat terukur tersebut selanjutnya digunakan

sebagai acuan untuk mendeteksi kondisi aliran infus.

Tabel 5. Pengujian berat terhadap berat acuan

No	Berat (gram)		Selisih (gram)	Kesalahan (%)
	Acuan	Terukur		
1	50	45	5	10
2	100	98	2	2
3	150	149	1	0,67
4	200	203	3	1,5
5	250	253	3	1,2
Rata-rata			2,8	3,07

Pengujian aliran infus dilakukan untuk mengetahui waktu aliran pada lima tingkat kecepatan yang telah ditetapkan. Informasi mengenai waktu aliran ini penting sebagai parameter pembandingan untuk menentukan apakah aliran infus dalam kondisi lancar atau mengalami hambatan. Variasi kecepatan aliran diatur dengan mengubah posisi scroll pengatur aliran, yang tersedia dalam lima tingkatan, mulai dari posisi paling lambat hingga paling cepat. Metode pengujian aliran ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Pengujian volume berat (a) skematik dan (b) realisasi

Tabel 6 menunjukkan pengujian waktu aliran. Pengujian menghasilkan nilai waktu yang diperlukan untuk setiap penurunan berat 1 g. Dari nilai ini dapat ditentukan perubahan

berat per detik. Pengukuran pada kecepatan rendah, yaitu pada kecepatan 1 dan 2, lebih mudah dilakukan. Sementara pada kecepatan tinggi lebih sulit untuk mendapatkan nilai yang sebenarnya, karena harus berkejaran dengan kecepatan aliran air dan tekanan pada *stopwatch*.

Tabel 6. Hasil pengujian waktu aliran

Kecepatan aliran	Berat (gram)		Waktu (detik)	Berat /detik (gr/detik)
	Awal	Akhir		
1	227	226	166	0,006
2	224	223	22,7	0,04
3	202	201	2,3	0,4
4	173	172	1,2	0,8
5	90	89	0,5	2

Selanjutnya, alat ini menjadikan hasil pengujian perubahan berat terhadap waktu sebagai acuan untuk menentukan status aliran. Program menetapkan waktu yang sedikit lebih lama agar cukup bagi program untuk mendeteksi perubahan berat. Tetapan waktu deteksi ditunjukkan pada Tabel 7. Tabel 8 menunjukkan kejadian dalam penentuan tetapan waktu deteksi.

Tabel 7. Tetapan waktu deteksi

Kecepatan	Waktu (detik)
1	180
2	50
3	9
4	6
5	3

Pengujian deteksi aliran dilakukan untuk memastikan kemampuan perangkat dalam mengidentifikasi kondisi aliran infus yang mengalami hambatan atau kemacetan. Mekanisme pendeteksian ini diimplementasikan melalui program pada mikrokontroler yang memantau status aliran berdasarkan perubahan berat pada interval waktu tertentu. Apabila dalam rentang waktu yang telah ditetapkan tidak terdeteksi adanya perubahan berat, maka sistem menyatakan bahwa aliran infus dalam kondisi macet. Proses pengujian dilakukan dengan memilih salah satu mode kecepatan aliran, kemudian mengamati respons perangkat saat cairan dibiarkan mengalir secara normal dan saat aliran sengaja dihentikan. Respons sistem dievaluasi melalui informasi yang ditampilkan pada LCD serta keluaran bunyi dari *buzzer* sebagai indikator peringatan. Hasil

Tabel 8. Kejadian dalam penentuan tetapan waktu deteksi

Kecepatan	Kejadian
1	<ul style="list-style-type: none"> • Infus dibiarkan mengalir lebih dari 3 menit. Infus terus menetes dan terjadi penurunan berat. • Pengecekan kondisi aliran dilakukan saat terdengar bunyi <i>buzzer</i> dan informasi di LCD memberitahukan bahwa aliran dalam kondisi lancar. • Roll infus ditutup. Selama 3 menit alat tidak menginformasikan penurunan berat. • Pada proses pengecekan berikutnya, alat menginformasikan bahwa aliran dalam kondisi macet.
2	<ul style="list-style-type: none"> • Seperti pada pengujian 1. Perbedaannya, pengecekan kondisi aliran dilakukan setiap 50 detik. • 50 detik pertama, alat menginformasikan aliran dalam kondisi lancar. • Saat aliran ditutup, dalam 50 detik berikutnya alat akan menginformasikan bahwa aliran dalam kondisi macet.
3	<ul style="list-style-type: none"> • Seperti pada pengujian 1. Perbedaannya, pengecekan kondisi aliran dilakukan setiap 9 detik. • 9 detik pertama, alat menginformasikan bahwa aliran dalam kondisi lancar. • Saat aliran ditutup, pada 9 detik berikutnya alat menginformasikan bahwa aliran dalam kondisi macet.
4	<ul style="list-style-type: none"> • Seperti pada pengujian 1. Perbedaannya, pengecekan kondisi aliran dilakukan setiap 6 detik. • 6 detik pertama, alat menginformasikan aliran dalam kondisi lancar. • Saat aliran ditutup, dalam 6 detik berikutnya alat akan menginformasikan bahwa aliran sedang macet.
5	<ul style="list-style-type: none"> • Seperti pada pengujian 1. Perbedaannya, pengecekan kondisi aliran dilakukan setiap 3 detik. • 3 detik pertama, alat menginformasikan aliran dalam kondisi lancar. • Saat aliran ditutup, dalam 3 detik berikutnya alat akan menginformasikan bahwa aliran sedang macet.

pengujian secara rinci ditunjukkan pada Tabel 9.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada semua mode kecepatan, alat mampu mendeteksi kemacetan aliran. Waktu terdeteksi aliran kurang lebih sama dengan waktu yang ditetapkan sebagai pembanding. Hal ini karena waktu pada program tidak cukup akurat.

Pengujian keseluruhan dimaksudkan untuk mendapatkan kejelasan hasil proses kerja yang telah direalisasikan. Kejelasan ini diperoleh melalui perbandingan proses kerja alat pada tahap perancangan. Pengujian dilakukan secara visual dengan memberikan kondisi-kondisi yang akan direspons oleh alat.

Hasil pengujian menunjukkan pada semua mode kecepatan, alat dapat melakukan semua proses yang direncanakan. Waktu

terdeteksi aliran kurang lebih sama dengan waktu yang ditetapkan sebagai pembanding. Hal ini karena waktu pada program tidak cukup akurat.

Setelah melalui tahap perencanaan dan proses perancangan, sebuah perangkat untuk memonitor aliran infus berhasil direalisasikan. Keberhasilan perancangan ditunjukkan oleh kemampuan perangkat dalam mendeteksi berat cairan infus, melakukan proses pewaktu pendeteksian, serta menentukan status aliran berdasarkan data hasil pengukuran.

Secara struktural, tiang infus yang pada umumnya hanya berfungsi sebagai media untuk menggantung cairan infus dimodifikasi agar memiliki fungsi tambahan, yaitu sebagai penempatan perangkat *monitoring* dan sensor *load cell*. Dengan demikian, tiang infus tidak

Tabel 9. Hasil Pengujian Keseluruhan

Tampilan program	Respon Alat	Keterangan
Persiapan	<ul style="list-style-type: none"> Alat melakukan proses persiapan dengan mengukur berat awal yang terdeteksi, nantinya nilai berat ini ditetapkan sebagai berat awal. Proses ini membutuhkan waktu beberapa detik. Selesai persiapan diakhir dengan bunyi tit. 	
Siapkan infus	<ul style="list-style-type: none"> Alat menampilkan penanda proses tunggu untuk menunggu peletakan tabung infus pada cantolan. 	
berat infus: 359 gr	<ul style="list-style-type: none"> Alat mendeteksi adanya infus pada cantolan dan menampilkan nilai berat infus. Selanjutnya alat menunggu penekanan tombol pilih untuk menentukan mode kecepatan. 	
Pilih mode: 1	<ul style="list-style-type: none"> Alat menampilkan pilihan mode 1. Penekanan tombol pilih selanjutnya menaikkan pilihan mode. Selanjutnya alat menunggu penekanan tombol start untuk memulai proses pendeteksian. 	
Pilih mode: 2		
Jalan mode: 2 359 gr	<ul style="list-style-type: none"> Alat menginformasikan bahwa sedang dijalankan mode 2 dengan status belum terdeteksi. Indikasi jalannya proses dapat dilihat dari tampilan berat dan indikator karakter bintang yang berkedip. 	
Jalan mode: 2 * 359 gr		
Jalan mode: 2 359 gr lancar	<ul style="list-style-type: none"> Setelah lebih dari 50 detik alat menampilkan status aliran. 	
Jalan mode: 2 359 gr macet	<ul style="list-style-type: none"> Beberapa detik kemudian alat mendeteksi aliran tidak lancar. Alat menginformasikan status melalui tampilan dan bunyi buzzer. Alat dapat mendeteksi aliran lancar atau macet. Alat dapat menginformasikan status melalui tampilan dan bunyi buzzer. Perbedaannya dari mode sebelumnya pada kecepatan deteksi. 	

hanya berperan sebagai penyangga mekanis, tetapi juga sebagai bagian integral dari sistem deteksi.

Selain itu, perangkat dilengkapi dengan lima mode laju cairan infus yang dapat dijadikan acuan dalam proses pemberian cairan kepada pasien. Pemilihan mode dilakukan melalui tombol pengatur yang memungkinkan pengguna memilih salah satu dari lima tingkat laju aliran cairan yang tersedia. Setelah mode laju cairan ditentukan, proses monitoring dapat dimulai dengan menekan tombol *start*, sehingga perangkat segera bekerja memantau laju aliran cairan infus secara otomatis.

4. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan uraian dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa:

1. Terapi infus (intravena) merupakan prosedur penting dalam dunia medis, di mana cairan, elektrolit, obat, atau nutrisi diberikan langsung ke dalam tubuh melalui pembuluh darah vena. Jika aliran cairan terhambat, terutama akibat penyumbatan pada selang infus, kondisi ini dapat menimbulkan risiko serius hingga mengancam jiwa. Dalam konteks ini, sistem monitoring volume infus berbasis Arduino Nano yang dirancang dalam penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemantauan otomatis terhadap volume cairan infus. Dengan menggunakan sensor *load cell*, sistem mampu mendeteksi berat infus secara *real-time*, mengelola data melalui Arduino Nano, dan menampilkan informasi pada layar LCD, sehingga tenaga medis dapat lebih cepat mengetahui potensi gangguan pada aliran infus.
2. Sensor *load cell* yang dikombinasikan dengan modul HX711 terbukti memberikan hasil pengukuran berat yang cukup akurat, dengan karakteristik linier terhadap penurunan volume cairan infus. Berdasarkan hasil pengujian, sistem memiliki tingkat kesalahan relatif kecil, yaitu sebesar 3,07%, yang masih berada dalam batas toleransi untuk aplikasi *monitoring* non-kritis.

Sebagai bagian dari pengembangan lebih lanjut, beberapa saran berikut diajukan:

1. Penambahan fitur deteksi kondisi ekstrem sangat disarankan. Misalnya, ketika terjadi perubahan berat yang terlalu cepat akibat gerakan mendadak pada selang infus, sistem perlu memiliki algoritma penyesuaian agar tidak memberikan alarm palsu (*false alarm*). Mekanisme ini akan meningkatkan keandalan sistem dalam kondisi dinamis di ruang perawatan.
2. Penguatan fisik dan penyesuaian desain sensor perlu dipertimbangkan, khususnya untuk mengantisipasi pergerakan atau tarikan mendadak pada selang infus yang dapat memengaruhi pembacaan sensor secara tidak wajar. Dengan demikian, akurasi pembacaan dan stabilitas sistem dapat tetap terjaga dalam kondisi penggunaan yang lebih bervariasi.

Daftar Pustaka

- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (n.d.). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376.
- Effendy, C. A., Paramarta, V., & Purwanda, E. (2024). Teknologi Dalam Meningkatkan Kinerja Rumah Sakit (Kajian Literatur). *Jurnal Review Pendidikan Dan Pengajaran*, 7, 13479–13489.
<http://journal.universitaspahlawan.ac.id/index.php/jrpp>
- Fu, Y., Li, P., & Wang, L. (2020). Biocompatible and biodegradable plastics for medical applications. *Materials Today: Proceedings*, 598–604.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660.
- Hamzah, M. F. (2025). Sistem Monitoring Cairan Infus Berbasis Internet of Things.

- Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 13(1).
<https://doi.org/10.23960/jitet.v13i1.5488>
- Ilham, M. A., Harsoyo, I. T., Olla, P. K., Maulana, I., Elektromedik, P. T., Tinggi, S., & Semarang, I. K. (2025). Rancang Bangun Alat Monitoring Volume dan Kontrol Tetesan Infus Berbasis Internet Of Things (IoT). 8(2), 127–137.
<http://journal.ummat.ac.id/index.php/justek>
- Irawadi, B., Nandito, F. H., Latifah, L., & Dhimas, A. D. (2024). Designing a GPS-based Vehicle Tracking and Monitoring Device with Cellular Communication Support. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 17(1), 15–20.
- Kaur, A., & Kaur, R. (2018). Arduino based intelligent IV drip monitoring and control system. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 9(2), 583–586.
- Kusriyanto, M., Utama, H. S., & Effendi, I. (2021). Prototype of Automatic Frequency Control in Microhydro Power Plant with Dummy Load Based on Arduino Uno and Labview. *Teknoin*, 27(1), 1–8.
<https://doi.org/10.20885/teknoin.vol27.is1.art1>
- Lestariningsih, D., Pranjoto, H., Agustine, L., Werdani, Y. D. W., & Teja, B. (2021). Aplikasi Load Cell Untuk Sistem Monitoring Volume Cairan Infus. *Jurnal Penelitian Saintek*, 26(2), 165–177.
<https://doi.org/10.21831/jps.v26i1.34441>
- Omega Engineering. (2018). *Load cell fundamentals*. Omega Engineering Inc.
- Pallás-Areny, R., & Webster, J. G. (2012). Sensors and signal conditioning (3rd ed.). In *John Wiley & Sons*.
- Pan, Y., & Zhong, L. (2019). Development and applications of medical-grade plastics in healthcare. *Journal of Materials Science and Engineering B*, 9(4), 107–112.
- Pardosi, K., & Sembiring, D. H. (2025). JUTEK – JURNAL TEKNOLOGI Perancangan Monitoring Botol Infus Pasien Berbasis Arduino Uno Dan Alarm. 1(2), 74–82.
- Patidar, R. K., Tiwari, R., & Sharma, S. (2016). Design and development of IV fluid monitoring system. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 5(3), 153–156.
- Putung, Y. R., Noya, D., Aror, V., Sundah, J., & Patabo, M. (2023). Rancang Bangun Pemantauan Cairan Infus Dengan Arduino Nano Berbasis Android. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 5(1), 01–06.
<https://doi.org/10.37905/jjee.v5i1.15352>
- Ratnaningsih, W., Wibowo, M. D., Bagus, R., Wulung, S., Saputra, A., Satwikantya, P., Sarisky, M., & Elianto, D. (2024). Household Economy Improvement Through Liquid Soap Production From Used Cooking Oil. *ETAM: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 4(2), 80–92.
- Sumarjono, A. (2018). Perancangan Prototype Lampu Rumah Tangga Via Wireless Bluetooth 2,4 Ghz Berbasis Arduino. *Jurnal Teknoin*, 1(1), 9–20.
- Sunardi, Buyung Irawadi, L. L. (2024). Perancangan Automatic Tissue Processor Pada Tahap Infiltrasi Paraffin Jaringan Untuk Pembuatan Sediaan Preparat Histologi. *Jurnal Fokus Elektroda*, 9(1), 47–52.
- Tampubolon, L. T. Y., Gunawan, I., Nasution, Z. M., Sumarno, S., & Tambunan, H. S. (2021). Rancang Bangun Alat Pemantau Infus Menggunakan Modul 433 Mhz dan Sensor Load Cell Berbasis Arduino Uno. *Jurnal Penelitian Inovatif*, 1(2), 107–118.
<https://doi.org/10.54082/jupin.16>
- WHO. (2022). *Safe infusion practices and infection prevention*. World Health Organization. <https://www.who.int>

Integrasi FMEA, RCA+, dan TRIZ untuk Menurunkan Tingkat Cacat pada Produksi Tempe UMKM

Hanifah Nur Fadhillah¹⁾, Faishal Arham Pratikno²⁾, Amanda Dwi Wantira³⁾

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Rekayasa dan Teknologi Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Jl. Soekarno Hatta KM 15, Karang Joang, Kota Balikpapan, 76127, Indonesia¹⁾

Program Studi Teknik Logistik, Fakultas Rekayasa dan Teknologi Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Jl. Soekarno Hatta KM 15, Karang Joang, Kota Balikpapan, 76127, Indonesia^{2), 3)}

*E-Mail : faishal.arham@lecturer.itk.ac.id²⁾**

ABSTRAK

Usaha Mikro Kecil dan Menengah (UMKM) produsen tempe, menghadapi masalah produksi yaitu tingkat cacat produk hingga 50% dari produksi harian. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi cacat kritis, menganalisis penyebab utama, dan merancang solusi inovatif untuk menurunkan tingkat kecacatan. Metode yang digunakan meliputi integrasi *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), *Root Conflict Analysis* (RCA+), dan *Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadach* (TRIZ). FMEA menunjukkan bahwa bau tidak sedap merupakan cacat utama dengan nilai RPN tertinggi (75). RCA+ mengidentifikasi beberapa akar masalah seperti kemasan tanpa ventilasi, takaran ragi yang tidak konsisten, pencucian kedelai yang tidak optimal, dan perendaman yang terlalu lama. Berdasarkan hasil tersebut, TRIZ digunakan untuk menghasilkan solusi teknis seperti ventilasi kemasan, penggunaan ragi sekali pakai, pencucian bersuhu stabil, dan sistem perendaman otomatis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi ketiga metode ini efektif dalam memberikan rekomendasi pengurangan angka cacat dan dapat diterapkan untuk meningkatkan mutu di industri pangan.

Kata kunci: Produksi Tempe, Cacat, FMEA, RCA+, TRIZ.

ABSTRACT

Micro, Small, and Medium Enterprises (MSMEs) producing tempeh face production problems, with product defect rates reaching up to 50% of daily production. This study aims to identify critical defects, analyze root causes, and design innovative solutions to reduce defect rates. The methods used include the integration of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), Root Conflict Analysis (RCA+), and TRIZ. FMEA indicates that unpleasant odor is the main defect with the highest RPN value (75). RCA+ identifies several root causes, including unventilated packaging, inconsistent yeast dosage, suboptimal soybean washing, and prolonged soaking. Based on these results, TRIZ is used to generate technical solutions, such as packaging ventilation, the use of disposable yeast, stable-temperature washing, and an automatic soaking system. The results show that the synergy of these three methods provides an effective framework for recommending defect reduction and offers a scalable approach to improving quality in food production sectors.

Keywords: Tempeh Production, Defect, FMEA, RCA+, TRIZ.

1. Pendahuluan

Usaha Mikro Kecil dan Menengah (UMKM) memiliki kontribusi besar terhadap pertumbuhan ekonomi Indonesia, terutama di

sektor pangan. Salah satu produk unggulan adalah tempe, yang tidak hanya menjadi bagian dari ketahanan pangan nasional tetapi

*Corresponding author

juga sumber penghidupan bagi puluhan ribu pelaku usaha (Limanseto, 2023; Ferry, 2024). Namun, proses produksi tempe yang masih bersifat tradisional seringkali menghadapi tantangan dalam menjaga mutu. Di Sentra Industri Kecil Sumber (SIKS), misalnya, tingkat cacat produk mencapai 34,3% dari total produksi harian, mencakup masalah seperti tempe berwarna kehitaman, tekstur tidak padat, dan bau tidak sedap. Tabel 1 menunjukkan persyaratan tempe kedelai dianggap bermutu.

Tabel 1. Syarat Mutu Tempe Kedelai

No	Kriteria Uji	Persyaratan
1	Tekstur	Kompak, jika diiris tetap utuh (tidak mudah rontok)
2	Warna	Putih merata pada seluruh permukaan
3	Bau	Bau khas tempe tanpa adanya bau amoniak

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pengendalian kualitas di industri pangan skala kecil masih kurang optimal. Rebecca & Damayanti (2019) menekankan efektivitas metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dalam mengidentifikasi dan memprioritaskan potensi kegagalan produk. Di sisi lain, Vaneker & Laoh (2021) merekomendasikan penggunaan *Root Conflict Analysis* (RCA+) dan TRIZ untuk menggali akar penyebab masalah dan merumuskan solusi teknis inovatif yang dapat diterapkan secara praktis di lapangan.

Namun demikian, penerapan metode-metode tersebut secara terpisah seringkali meninggalkan celah antara identifikasi risiko dan eksekusi teknis yang aplikatif di lapangan. Selain itu, terdapat keterbatasan literatur yang mengeksplorasi integrasi ketiga metode ini dalam konteks industri pangan skala kecil yang menghadapi tantangan variabilitas proses produksi tempe. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis jenis cacat produk tempe yang paling dominan di SIKS, mengidentifikasi akar penyebabnya secara sistematis, serta mengembangkan solusi perbaikan melalui

integrasi metode FMEA, RCA+, dan TRIZ.

Artikel ini memberikan kontribusi praktis bagi pelaku industri kecil dalam meningkatkan kualitas produk secara berkelanjutan. Selain itu, pendekatan terintegrasi yang digunakan juga memberikan landasan metodologis yang dapat direplikasi pada sektor pangan serupa yang menghadapi tantangan mutu dan efisiensi proses produksi. Fokus utama diarahkan pada upaya pengurangan cacat dengan pendekatan yang tidak hanya preventif tetapi juga inovatif.

2. Metodologi

Penelitian ini dilakukan di Sentra Industri Kecil Sumber (SIKS) melalui observasi langsung terhadap proses produksi tempe serta wawancara dengan pelaku usaha. Data primer diperoleh dari hasil observasi, kuesioner, dan wawancara mengenai jenis dan jumlah cacat produk, tahapan proses produksi, serta frekuensi dan dampak kecacatan. Penelitian difokuskan pada tiga jenis cacat utama, yaitu tempe berwarna kehitaman, tekstur tidak padat, dan bau tidak sedap, yang tidak memenuhi standar mutu tempe menurut SNI 3144:2015.

Peneliti menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk menentukan cacat prioritas berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN), yang dihitung dari skor *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*. Setelah diperoleh cacat dengan nilai RPN tertinggi, akar penyebabnya dianalisis menggunakan *Root Conflict Analysis* (RCA+), yang sekaligus mengidentifikasi kontradiksi teknis dalam proses produksi. Tahap akhir dilakukan dengan menerapkan prinsip-prinsip inovasi TRIZ guna merumuskan solusi yang tepat dan aplikatif untuk menyelesaikan permasalahan utama tersebut.

Variabel utama yang diamati meliputi jenis cacat produk, tingkat keparahan, frekuensi kejadian, kemampuan deteksi, serta nilai RPN. Variabel tambahan meliputi akar penyebab cacat, jenis kontradiksi teknis, prinsip TRIZ yang digunakan, dan solusi inovatif yang dihasilkan. Hasil pengolahan

data disusun dalam bentuk deskriptif dan kuantitatif untuk mendukung analisis serta penyusunan rekomendasi perbaikan.

3. Hasil dan Pembahasan

Sentra Industri Kecil Sumber (SIKS) yang berlokasi di Muara Rapak, Balikpapan Utara, merupakan kawasan terpadu produksi tempe dan tahu yang difasilitasi oleh pemerintah daerah untuk memusatkan pelaku industri kecil di wilayah tersebut. Meskipun berfungsi sebagai pusat industri, mayoritas operasional di kawasan ini masih didominasi oleh metode tradisional yang mengandalkan alat sederhana seperti drum, kayu bakar, dan alat saring manual. Secara khusus, penelitian ini berfokus pada salah satu unit rumah produksi tempe di lingkungan SIKS yang memiliki kapasitas operasional mencapai 100 hingga 200 unit produk per hari. Skala produksi ini dikelola sepenuhnya oleh tenaga kerja lokal dari warga sekitar, dengan karakteristik kerja yang masih sangat bergantung pada kebiasaan individu dan pengalaman praktis, mengingat belum adanya Standar Operasional Prosedur (SOP) yang baku di tingkat rumah produksi tersebut.

Alur produksi pada unit usaha ini terdiri dari rangkaian tahapan yang meliputi perendaman, penggilingan, pencucian, perebusan, pendinginan, penambahan ragi, pengemasan, hingga fermentasi. Dalam implementasinya, modernisasi alat hanya terlihat pada proses penggilingan yang telah menggunakan mesin giling, sementara tahapan lainnya tetap dikerjakan secara manual. Kondisi ini menciptakan batasan operasional berupa keterbatasan kapasitas, minimnya standardisasi, serta kontrol proses yang masih bersifat intuitif, sehingga menyebabkan fluktuasi kualitas yang signifikan.

3.1. Pengumpulan Data

Melalui pengamatan langsung serta komunikasi dengan pelaku produksi, data diperoleh secara objektif dan sesuai dengan waktu kejadian. Data yang dibutuhkan untuk

mendukung penyusunan penelitian ini meliputi tanggal produksi tempe untuk setiap batch yang diamati, jumlah total tempe yang diproduksi (pcs) per hari sebagai acuan pembandingan, serta jumlah produk cacat berdasarkan jenis cacat tempe sesuai dengan syarat mutu tempe kedelai pada kriteria uji keadaan SNI 3144-3:2015. Meskipun periode observasi dilakukan dalam rentang waktu tertentu, pemilihan durasi tersebut telah disesuaikan dengan siklus produksi rutin untuk memastikan bahwa data yang diambil mampu merepresentasikan kondisi operasional harian serta pola cacat yang umum terjadi.

Tabel 2 menunjukkan jenis cacat tempe di Sentra Industri Kecil Sumber (SIKS) selama periode observasi tanggal 17 hingga 21 April 2025. Dari total 720 unit tempe yang diproduksi dalam lima hari, sebanyak 360 unit atau 50% di antaranya mengalami cacat. Cacat yang paling sering ditemukan adalah tempe dengan bau tidak sedap sebanyak 214 unit, diikuti oleh tempe berwarna kehitaman sebanyak 113 unit, dan tempe bertekstur tidak padat sebanyak 33 unit. Meskipun tidak setiap jenis cacat muncul setiap hari, data menunjukkan bahwa keberadaan cacat cukup signifikan dan menandakan adanya kelemahan dalam pengendalian proses produksi. Temuan ini menjadi pijakan penting untuk analisis lanjutan dalam menentukan cacat yang paling kritis, menggali akar penyebabnya, serta menyusun solusi perbaikan melalui pendekatan integratif dengan metode FMEA, RCA+, dan TRIZ.

3.2. FMEA

Langkah awal dalam pengolahan data dilakukan dengan mengidentifikasi berbagai jenis cacat tempe yang ditemukan selama kegiatan survei. Tujuan identifikasi ini adalah untuk mengetahui cacat mana yang paling sering terjadi dan memiliki dampak paling signifikan terhadap mutu produk, sehingga dapat dijadikan fokus utama dalam analisis lanjutan. Untuk menentukan prioritas permasalahan, digunakan metode *FMEA* yang

Tabel 2. Jenis Cacat Tempe di SIKS

Tanggal	Jenis Cacat			Jumlah Produksi (pcs)
	Tempe berwarna kehitaman (pcs)	Tekstur tempe tidak padat (pcs)	Tempe mengeluarkan bau tidak sedap (pcs)	
17 April 2025	-	10	10	180
18 April 2025	93	-	87	180
19 April 2025	-	-	79	120
20 April 2025	-	23	23	120
21 April 2025	20	-	15	120
Total (pcs)	113	33	214	720
Total Akhir		360 (50%)		

mengacu pada tiga indikator utama: tingkat keparahan (*severity*), frekuensi kejadian (*occurrence*), dan tingkat kemudahan pendeteksian (*detection*).

Ketiga parameter tersebut menjadi acuan dalam penyusunan kuesioner FMEA yang diberikan kepada pihak terkait di lingkungan produksi SIKS. Pengisian kuesioner FMEA dilakukan dengan oleh seorang pemilik (*owner*) rumah produksi tempe, yang sekaligus juga berperan langsung sebagai pekerja dalam proses pembuatan tempe, karena di rumah produksi ini pihak yang paling memahami mulai dari tahap awal persiapan bahan baku hingga pengemasan produk akhir.

Tabel 3. Hasil Kuesioner FMEA

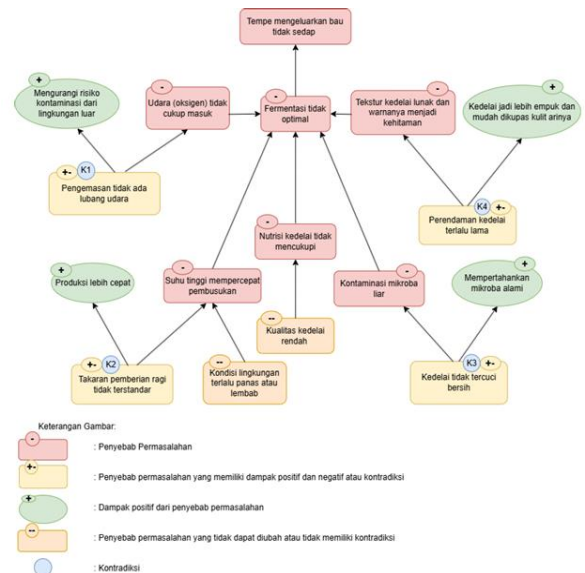
Jenis Cacat	S	O	D	RPN
Tempe berwarna kehitaman	3	4	4	48
Tekstur tempe tidak padat	4	2	2	16
Tempe mengeluarkan bau tidak sedap	5	5	3	75

Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan RPN terhadap ketiga jenis cacat, tempe yang mengeluarkan bau tidak sedap memperoleh skor tertinggi, yaitu 75. Nilai ini menunjukkan bahwa jenis cacat tersebut merupakan yang paling kritis dan membawa dampak paling besar terhadap kualitas produk. Oleh karena itu, masalah ini menjadi prioritas utama untuk dianalisis lebih mendalam menggunakan metode RCA+ dan TRIZ. Dengan menjadikan nilai RPN sebagai dasar pengambilan keputusan, upaya perbaikan dapat diarahkan

secara tepat guna menekan risiko yang paling merugikan baik bagi produsen maupun konsumen.

3.3. RCA+

Tahapan ini bertujuan untuk mengidentifikasi akar permasalahan secara menyeluruh dan sistematis, serta mengungkap kontradiksi-kontradiksi yang terjadi dalam proses, sehingga dapat ditemukan arah perbaikan yang tepat dan efektif.



Gambar 1. Analisis Akar Konflik (RCA+) untuk Cacat Tempe Mengeluarkan Bau Tidak Sedap

Gambar 1 menunjukkan analisis akar konflik (RCA+) untuk cacat tempe yang mengeluarkan bau tidak sedap. Analisis kontradiksi pada diagram RCA+ dilakukan melalui proses penalaran sistematis yang

Tabel 4. Kondisi Perbaikan (Dampak Positif dan Negatif)

No	Kontradiksi	Dampak Positif	Dampak Negatif
1	Pengemasan tidak ada lubang udara	Mengurangi risiko kontaminasi dari lingkungan luar	Udara (oksigen) tidak cukup masuk
2	Takaran pemberian ragi tidak terstandar	Produksi lebih cepat	Suhu tinggi mempercepat pembusukan
3	Kedelai tidak tercuci bersih	Mempertahankan mikroba alami	Kontaminasi mikroba liar
4	Perendaman kedelai terlalu lama	Kedelai jadi lebih empuk dan mudah dikupas kulit arinya	Tekstur kedelai lunak dan warnanya menjadi kehitaman

menghubungkan temuan empiris di lapangan dengan justifikasi teknis dari para praktisi produksi. Kontradiksi pertama (K1) pada tahap pengemasan muncul dari observasi terhadap produk yang mengeluarkan aroma masam; masukan dari praktisi menunjukkan bahwa pengemasan rapat dilakukan untuk menjamin sterilitas dari debu dan lalat, namun secara teknis hal ini justru menghambat pasokan oksigen yang krusial bagi respirasi kapang. Selanjutnya, pada tahap peragian (K2), ditemukan ketidaksertaan waktu panen akibat penggunaan dosis ragi yang bersifat intuitif. Praktisi cenderung meningkatkan takaran ragi untuk mengejar efisiensi waktu distribusi, yang secara sistematis memicu risiko pembusukan dini akibat aktivitas fermentasi yang berlebihan.

Analisis juga terlihat pada proses pencucian (K3), di mana pengamatan menunjukkan adanya sisa kulit ari yang sengaja dibiarkan. Berdasarkan masukan praktisi, pencucian yang tidak terlalu ekstrem bertujuan untuk mempertahankan mikroflora alami yang mendukung cita rasa, meskipun secara bersamaan meningkatkan risiko kontaminasi mikroba liar. Terakhir, kontradiksi pada proses perendaman (K4) dirumuskan berdasarkan pengamatan terhadap kedelai yang berwarna kusam akibat durasi perendaman yang terlalu panjang. Praktisi memberikan justifikasi bahwa durasi tersebut diperlukan untuk memberikan keuntungan mekanis berupa kemudahan pengupasan kulit, walaupun secara kualitas sensoris hal ini menurunkan standar mutu tekstur dan warna kedelai.

3.4. TRIZ

Setelah melakukan analisis akar konflik menggunakan metode RCA+ dan ditemukan empat titik kontradiksi, tahap selanjutnya adalah penerapan metode TRIZ untuk merumuskan solusi inovatif. Metode TRIZ digunakan untuk mengatasi kontradiksi teknis yang muncul dari akar penyebab permasalahan, khususnya pada cacat tempe yang mengeluarkan bau tidak sedap. Pendekatan ini bertujuan menghasilkan solusi yang tidak hanya menyelesaikan masalah, tetapi juga meminimalkan dampak negatif serta meningkatkan kualitas produk secara menyeluruh.

3.4.1. Kondisi yang Perlu Ditingkatkan

Kontradiksi teknis muncul ketika suatu tindakan menghasilkan manfaat positif namun sekaligus menimbulkan dampak negatif. Memahami kondisi ini merupakan langkah awal penting dalam penerapan metode TRIZ untuk merancang solusi inovatif.

Tabel 4 menunjukkan kondisi perbaikan pada dampak positif dan negatif. Dari Tabel 4, kemasan tanpa lubang memang efektif mencegah kontaminasi dari luar, tetapi sekaligus menghambat suplai oksigen yang dibutuhkan dalam fermentasi (Jaelani et al., 2025). Penggunaan takaran ragi yang tidak terstandarisasi menjadi faktor tambahan penyebab fermentasi kurang optimal. Meskipun penambahan dosis ragi dapat mengakselerasi proses produksi, inkonsistensi ini berisiko memicu reaksi suhu fermentasi yang tidak terkendali hingga menyebabkan pembusukan (Wahyuningsih et al., 2023).

Tabel 5. Kondisi Perbaikan (*Improve dan Worsening Feature*)

No	Kontradiksi	<i>Improve Feature</i>	<i>Worsening Feature</i>
1	Pengemasan tidak ada lubang udara	<i>External harm affects the object (30)</i> Perlindungan tempe dari kontaminasi mikroorganisme atau zat asing yang bisa merusak proses fermentasi atau kualitas produk	<i>Quantity of substance/the matter (26)</i> Kurangnya jumlah oksigen yang tersedia untuk proses fermentasi yang optimal dalam kemasan tempe
2	Takaran pemberian ragi tidak terstandar	<i>Ease of operation (33)</i> Kemudahan bagi pekerja dalam mengatur atau mengelola proses produksi sehingga produksi lebih cepat	<i>Temperature (17)</i> Kenaikan suhu bisa mempercepat proses fermentasi berlebihan hingga ke arah pembusukan.
3	Kedelai tidak tercuci bersih	<i>Use of energy by moving object (19)</i> Mikroba merupakan objek hidup mikroskopis yang bergerak menggunakan energi untuk berfermentasi	<i>External harm affects the object (30)</i> Mikroorganisme liar adalah faktor eksternal yang masuk dan mengganggu proses fermentasi alami
4	Perendaman kedelai terlalu lama	<i>Ease of operation (33)</i> Memberikan kemudahan dalam proses kerja atau operasional terutama secara manual	<i>Shape (12)</i> Kerusakan bentuk fisik (tekstur dan warna) yang menjadi dampak utama perendaman kedelai lama

Fenomena inilah yang melandasi munculnya kontradiksi kedua. Hal serupa terjadi pada kondisi kedelai yang tidak tercuci bersih, di mana terciptanya kontaminasi mikroba liar menurunkan kualitas fermentasi. Namun, proses pencucian yang tidak menyeluruh juga memiliki efek positif, yaitu mempertahankan mikroba alami (pengasaman) yang penting dalam fermentasi (Barus et al., 2021). Meskipun durasi perendaman yang lama mempermudah pengelupasan kulit karena tekstur kedelai menjadi lebih empuk, hal ini berisiko menurunkan kualitas bahan. Kondisi kedelai yang terlalu lunak dan mengalami perubahan warna menjadi kehitaman dapat

menghambat efektivitas proses fermentasi (Hasibuan et al., 2024). Dengan mengenali kontradiksi seperti ini, solusi dapat dirancang untuk menghilangkan sisi negatif tanpa menghilangkan manfaat positif, sejalan dengan prinsip dasar TRIZ.

3.4.2. Klasifikasi Permasalahan ke dalam 39 Parameter TRIZ

Tabel 5 menggambarkan proses klasifikasi kontradiksi teknis yang terjadi dalam proses produksi tempe ke dalam parameter-parameter standar TRIZ sebanyak 39. Tujuan dari klasifikasi ini adalah untuk memetakan fitur yang ingin ditingkatkan

Tabel 6. Matriks Kontradiksi (Prinsip Inovatif)

Kontradiksi	<i>Improve Feature</i>	<i>Worsening Feature</i>			
		<i>Quantity of substance/ the matter (26)</i>	<i>Temperature (17)</i>	<i>External harm affects the object (30)</i>	<i>Shape (12)</i>
K1	<i>External harm affects the object (30)</i>	29, 31, 33, 35			
K2	<i>Ease of operation (33)</i>		13, 26, 27		
K3	<i>Use of energy by moving object (19)</i>			1, 6, 27, 35	
K4	<i>Ease of operation (33)</i>				15, 28, 29, 34

(*improve feature*) dan fitur yang memburuk (*worsening feature*) akibat peningkatan tersebut, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam pencarian solusi melalui matriks kontradiksi TRIZ.

3.4.3. Matriks Kontradiksi TRIZ

Tabel 6 menunjukkan matriks kontradiksi antara *improving feature* dan *worsening feature* dari masing-masing kontradiksi yang menghasilkan prinsip inovatif (*inventive principle*), yaitu konsep atau strategi pemecahan masalah yang digunakan dalam metode TRIZ untuk mengatasi kontradiksi teknis dalam suatu sistem atau proses.

3.4.4. Solusi dari Prinsip TRIZ Terpilih

Tabel 7 merupakan matriks kontradiksi yang merangkum solusi atas cacat produk tempe menggunakan pendekatan TRIZ, yang berfokus pada penyelesaian kontradiksi teknis secara sistematis melalui parameter yang bertentangan. Misalnya, masalah pengemasan tanpa ventilasi ditangani dengan prinsip *parameter changes* melalui modifikasi desain

lubang udara. Solusi ini dinilai sangat layak (*feasible*) bagi UMKM karena tidak membutuhkan investasi besar; biaya hanya dialokasikan untuk penambahan alat pembolong manual atau modifikasi plastik kemasan yang ekonomis. Ketidakkonsistenan takaran ragi diselesaikan dengan prinsip *cheap short-living objects* melalui penggunaan sachet ragi dan alat ukur sederhana. Implementasi solusi ini sangat praktis karena tidak memerlukan keahlian teknis tingkat tinggi dari pekerja, sehingga kendala operasional di lapangan dapat diminimalisir.

Untuk pencucian kedelai yang kurang bersih, diterapkan penggunaan air hangat bersuhu stabil guna menjaga mikroba baik tanpa meninggalkan kontaminan (*parameter changes*). Sementara itu, perendaman yang terlalu lama ditangani dengan prinsip *dynamics* melalui penggunaan *timer* otomatis. Meskipun penggunaan sensor atau *timer* memiliki implikasi biaya awal, solusi ini diproyeksikan memberikan keuntungan jangka panjang dalam menekan angka produk gagal yang selama ini membebani biaya

Tabel 7. Matriks Kontradiksi (Solusi)

Penyebab	<i>Inventive Principle</i> Dipilih	Solusi Ideal
Pengemasan tidak ada lubang udara	<i>Parameter changes</i>	Mengubah ukuran dan posisi lubang ventilasi dalam kemasan agar cukup oksigen masuk tapi tidak terlalu banyak, Selain itu, sesuaikan suhu penyimpanan karena oksigen dan pembusukan sangat dipengaruhi oleh suhu dimana jika suhu tinggi bisa meningkatkan kebutuhan oksigen.
Takaran pemberian ragi tidak terstandar	<i>Cheap short-living objects</i>	Menggunakan sachet ragi sekali pakai yang memiliki takaran pasti, dilengkapi alat ukur sederhana seperti sendok dosis khusus, serta penerapan label warna atau barcode sementara untuk membedakan batch berdasarkan takaran dan suhu fermentasi guna memudahkan pelacakan dan evaluasi proses.
Kedelai tidak tercuci bersih	<i>Parameter changes</i>	Menggunakan air pencuci hangat di bawah 40°C dengan waktu pencucian yang telah disesuaikan atau diatur dengan tepat (dikalibrasi) sampai cukup untuk menghilangkan lendir/kotoran tapi tidak mematikan mikroba baik.
Perendaman kedelai terlalu lama	<i>Dynamics</i>	mengatur durasi perendaman secara adaptif berdasarkan suhu air atau kualitas kedelai, dilengkapi sensor suhu atau timer untuk otomatisasi waktu perendaman, serta menerapkan perendaman metode bertahap mulai dari air dingin ke hangat guna mengontrol pelunakan dan mencegah perubahan warna kehitaman.

produksi. Penting untuk dicatat bahwa solusi-solusi yang diusulkan dalam penelitian ini saat ini berada pada tahap rekomendasi strategis yang telah divalidasi melalui diskusi bersama pemilik industri. Meskipun belum diimplementasikan secara menyeluruh di seluruh lini produksi, simulasi awal pada skala kecil menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu menurunkan potensi cacat serta meningkatkan konsistensi mutu produk tempe secara berkelanjutan di lingkungan UMKM.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengintegrasikan metode FMEA, RCA+, dan TRIZ sebagai kerangka kerja sistematis untuk mengatasi degradasi mutu pada industri tempe skala kecil. Temuan utama menunjukkan bahwa cacat "bau tidak sedap" merupakan prioritas kegagalan tertinggi yang berakar pada anomali proses fermentasi. Kontribusi penting dari studi ini terletak pada kemampuannya menyelaraskan identifikasi risiko (FMEA) dengan pemecahan masalah kreatif (TRIZ) yang selama ini jarang diterapkan secara terpadu di sektor UMKM. Melalui pendekatan ini, solusi yang dihasilkan—seperti modifikasi ventilasi kemasan dan sistem perendaman bertahap—tidak hanya bersifat korektif, tetapi juga preventif terhadap munculnya kontradiksi teknis baru.

Meskipun memberikan kerangka perbaikan yang solutif, penelitian ini memiliki keterbatasan metodologis, terutama pada periode observasi yang relatif singkat dan cakupan data yang terbatas pada satu unit rumah produksi di SIKS. Hal ini menyebabkan fluktuasi variabel lingkungan jangka panjang belum sepenuhnya terpetakan. Selain itu, solusi yang diusulkan masih berada pada tahap rekomendasi strategis dan validasi konseptual bersama praktisi.

Sebagai arah penelitian mendatang, diperlukan uji implementasi langsung di lapangan untuk memverifikasi efektivitas solusi TRIZ terhadap volume produksi nyata. Pengembangan sistem monitoring kualitas berbasis digital yang sederhana atau pelatihan berbasis Standar Operasional Prosedur (SOP) yang mengacu pada SNI 3144-3:2015 juga

menjadi agenda krusial untuk memastikan keberlanjutan mutu produk secara mandiri bagi para pelaku industri kecil.

Daftar Pustaka

- Adzima, F., Asmal, S., & Setiawan, I. (2023). Implementasi metode TRIZ terhadap peningkatan kualitas proses roasting kopi pada UMKM di Makassar. *Jurnal Teknik Industri*, 9(2), 655–662.
- Barus, T., Wicaksono, W. A., & Prasasty, V. D. (2021). Identifikasi Bakteri yang Berperan dalam Pengasaman Kedelai dalam Fermentasi Tempe Berdasarkan Sekuen 16S rDNA. *Biota: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 6(2), 71–77. <https://doi.org/10.24002/biota.v6i2.4029>
- Dewangga, A., & Suseno, S. (2022). Analisa pengendalian kualitas produksi plywood menggunakan metode Seven Tools, Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), dan TRIZ. *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan*, 1(3), 243–253. <https://doi.org/10.55826/tmit.v1i3i.42>
- Gani, M., Histiari, A. R., Ahistasari, A., & Wariori, R. Y. (2023). Analisis resiko kebakaran di bandara RR menggunakan metode FMEA. *Jurnal Teknik Industri*, 9(1), 22–33.
- Hanif, R., Rukmi, S. H., & Susanty, S. (2015). Perbaikan kualitas produk Keraton Luxury di PT. X dengan menggunakan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA). *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 3(3), 137–147.
- Hasibuan, S. O., Fitrah, H., Ritongga, J., Simbolon, A., & Daulay, R. A. (2024). Sosialisasi Proses Pembuatan Tahu yang Sehat untuk Masyarakat di Pasar 4 Medan Marelan. *At-Tadris : Journal of Islamic Education*, 3(1), 240–251. <https://doi.org/10.56672/attadris.v3i1.90>
- Jaelani, S. A., Alfintawati, A., Fathi, N., & Hafiyya, I. (2025). Literature Review dari Randomized Controlled Trials (

- RCTs): Efektivitas Pengemasan Vakum Plastik terhadap Umur Simpan dan Kualitas Kue Lapis Legit Tradisional. *Karimah Tauhid*, 4(5), 3101–3109.
- Jakti, N. J. K., & Al Faritsy, A. Z. (2024). Analisis pengendalian kualitas produk dengan metode Six Sigma dan TRIZ untuk mengurangi jumlah kecacatan produk di UD Cantenan. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri dan Inovasi*, 2(2), 26–38.
<https://doi.org/10.59024/jisi.v2i2.642>
- Kristiadi, O. H., & Lunggani, A. T. (2022). Tempe kacang kedelai sebagai pangan fermentasi unggulan khas Indonesia: Literature review. *Jurnal Andaliman – Jurnal Gizi Pangan, Klinik dan Masyarakat*, 2(2), 48–56.
<https://jurnal.unimed.ac.id/2012/index.php/jgpkm/article/view/40334/pdf>
- Neyland, J. S. C., Mende, J., & Rembet, M. E. (2022). Aplikasi metode SERVQUAL dan TRIZ untuk peningkatan kualitas layanan di salah satu bengkel otomotif di Kota Manado. *JMBI UNSRAT: Jurnal Ilmiah Manajemen Bisnis dan Universitas Sam Ratulangi*, 9(1), 42–53.
<https://doi.org/10.35794/jmbi.v9i1.36703>
- Nugraha, R. C., & Haryono, K. (2022). Metode TRIZ untuk meningkatkan kreativitas dan inovasi pada bidang bisnis dan manajemen melalui aplikasi berbasis mobile. *Automata*, 3(2).
<https://journal.uui.ac.id/AUTOMATA/article/view/24190>
- Pragita, T. E., Rahayuningsih, M., & Muslich, M. (2018). Evaluasi penyimpangan dan perbaikan mutu tempe sesuai SNI 3144:2015 di UMKM. *Jurnal Standardisasi*, 19(2), 113.
<https://doi.org/10.31153/js.v19i2.502>
- Pratikno, F. A., Zamzani, M. I., & Setiowati, N. O. (2023). Application of Root Conflict Analysis (RCA+) to identify contradiction in manufacturing process. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 7(2), 722–729.
<https://doi.org/10.33379/gtech.v7i2.2448>
- Revita, I., Suharto, A., & Izzudin, A. (2021). Studi empiris pengendalian kualitas produk pada Vieyuri Konveksi. *Bisnis-Net Jurnal Ekonomi dan Bisnis*, 4(2), 39–49.
<https://doi.org/10.46576/bn.v4i2.1695>
- Robecca, J., & Damayanti, M. V. (2019). Metode Failure Mode and Effect Analysis untuk mengurangi cacat produk. *INAQUE: Journal of Industrial & Quality Engineering*, 7(2), 117–125.
<https://doi.org/10.34010/iqe.v7i2.1857>
- Safira, S. D., & Damayanti, R. W. (2022). Analisis defect produk dengan menggunakan metode FMEA dan FTA untuk mengurangi defect produk (Studi Kasus: Garment 2 dan Garment 3 PT Sri Rejeki Isman Tbk). *Seminar dan Konferensi Nasional IDEC 2022*, D03.1–D03.10.
- Said, A., Dahniar, T., & Feblidiyanti, N. (2022). Analisis pengendalian kualitas produk untuk meminimasi defect pada produk sabun batang kosmetik menggunakan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Root Cause Analysis (RCA) pada PT. Adev Natural Indonesia. *Teknologi*, 5.
- Wahyuningsih, E. A., Irmanda, L., Wisnu, Y., & Aji, K. (2023). Pengaruh lama fermentasi, penambahan ragi dan konsentrasi gula pada tape ketan. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas ‘Aisyiyah Yogyakarta*, 1, 96–101.
- Yulistria, R., Rosento, R., Handayani, E. P., Susilowati, I. H., & Aulia, S. (2023). Pengaruh kualitas produk terhadap kepuasan pelanggan pada PT Mitra Bangun Perwira. *Swabumi*, 11(1), 13–22.
<https://doi.org/10.31294/swabumi.v11i1.13980>

Application of Exponential Smoothing Models for Coal Demand Forecasting in Cement Plants

Rizky Indra Maulana¹⁾, Irwan Iftadi²⁾

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret,

Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta, 57126, Indonesia¹⁾²⁾

*E-Mail: rizkyjeki123@gmail.com¹⁾, irwaniftadi@staff.uns.ac.id²⁾**

ABSTRACT

Energy forecasting plays an important role in maintaining operational stability and inventory efficiency in the cement manufacturing industry, where coal remains the primary source of thermal energy. This study aims to develop an accurate forecasting model to predict coal demand in the procurement and warehouse division of a cement manufacturing plant in West Java, Indonesia. A quantitative approach was applied using three time-series forecasting methods, namely Moving Average (MA), Single Exponential Smoothing (SES), and Holt's Double Exponential Smoothing (DES). Monthly coal consumption data from 2022 to 2024 were analyzed and divided into training and testing datasets to evaluate out-of-sample forecasting performance. Several parameter combinations were tested to obtain the optimal forecasting configuration for each model. Forecasting accuracy was assessed using Mean Absolute Deviation (MAD), Mean Squared Error (MSE), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). The results show that Holt's DES achieved the best forecasting performance, with a MAPE of 6.21%, outperforming SES and MA, which had MAPE values of 9.84% and 11.47%, respectively. The selected model also reduced the average deviation between forecasted and actual coal demand to below 500 tons per month, thereby minimizing the risk of overstocking and stockouts. These findings demonstrate that quantitative forecasting can support more effective procurement planning, improve inventory control, and enhance energy management practices in cement manufacturing operations. Nevertheless, this study is limited to a three-year observation period and focuses on a single industrial case, which may limit the generalizability of the results.

Keywords: coal demand forecasting, cement industry, exponential smoothing, inventory management, energy efficiency

1. Introduction

The cement industry plays a strategic role in supporting infrastructure development and economic growth, particularly in developing countries where the demand for construction materials continues to increase. Alongside its economic contribution, the industry is recognized as one of the most energy-intensive manufacturing sectors due to its reliance on large-scale thermal processes in clinker and cement production. Previous studies have reported that energy consumption accounts for approximately 40–60% of total cement production costs, with coal remaining the dominant fuel due to its high calorific value, stable supply, and lower operational costs than alternative fuels (Bramantiyo, Lestianingrum, & Cahyono, 2024). Nevertheless, the extensive use of coal also raises concerns about

operational efficiency, fuel management, and environmental sustainability, particularly regarding greenhouse gas emissions and industrial decarbonization efforts (Wali, Qayum, Algarni, Malik, & Jan, 2025; Liu, Zhao, Wang, & Li, 2024).

Within cement manufacturing operations, the procurement and warehouse divisions play an important role in maintaining fuel availability to support uninterrupted kiln activity. In practice, inaccurate forecasting often creates discrepancies between projected and actual coal consumption. These discrepancies may lead to overstock conditions that increase storage costs and inventory holding, or stockout conditions that disrupt production continuity and reduce operational reliability. Similar issues were identified at a cement manufacturing plant in West Java,

**Corresponding author*

Indonesia, where coal demand was still estimated manually using historical averages and operational judgment, without a structured forecasting model. As a result, significant deviations between forecasted and actual coal consumption frequently occurred, affecting procurement planning, warehouse utilization, and fuel distribution efficiency.

The importance of forecasting accuracy in industrial energy management has been discussed in various previous studies. Febriani and Fatichah (2024) found that conventional forecasting methods often struggle to capture fluctuations in coal demand within thermal power plant operations, particularly when consumption patterns change dynamically over time. In response to these limitations, several studies have explored more advanced forecasting approaches. Alvin et al. (2024), for example, developed a hybrid forecasting framework that combined statistical and machine-learning techniques to improve the accuracy of coal price predictions in Indonesia. Their study highlighted that data-driven forecasting models can significantly improve prediction performance compared with conventional estimation approaches.

Forecasting studies have also been integrated with inventory and supply chain management. Kurniyawan and Febryanto (2025) applied the ARIMA model together with the Economic Order Quantity (EOQ) concept to optimize coal procurement decisions and reduce inventory costs. Hasan and Pulansari (2023) demonstrated that inventory control methods, such as Min-Max Stock, were effective in reducing raw material imbalances in cement manufacturing operations. At a broader scale, Kurniadi et al. (2024) showed that coal demand across the Asia Pacific region is expected to remain substantial despite ongoing energy transition policies, indicating that industrial energy management will continue to depend heavily on forecasting reliability in the coming years. Xu, Gong, and Yan (2023) further emphasized that accurate forecasting systems are essential for supporting low-carbon transformation strategies in the cement industry.

In addition to forecasting and inventory management, operational optimization has increasingly become part of industrial energy efficiency initiatives. Gusman et al. (2022) reported that integrating artificial intelligence into process optimization systems could significantly reduce electricity consumption in cement plants. These findings indicate that operational efficiency in energy-intensive industries is determined not only by production technology but also by the quality of planning and decision-making within the supply chain, including fuel procurement and inventory management.

Despite the growing body of literature on energy forecasting and industrial optimization, studies specifically on coal demand forecasting in Indonesia's cement industry remain limited. Most previous studies concentrated on sectors such as mining, aviation, or power generation, while practical forecasting applications in process-based manufacturing industries have received less attention. As a consequence, many industrial decision-making processes related to fuel procurement still rely on manual estimation and historical judgment rather than systematic quantitative analysis.

Therefore, this study aims to develop and evaluate coal demand forecasting models for the procurement and warehouse division of a cement manufacturing plant in West Java, Indonesia. Three time-series forecasting techniques, namely Moving Average (MA), Single Exponential Smoothing (SES), and Holt's Double Exponential Smoothing (DES), are compared to determine the most suitable forecasting model based on forecasting accuracy indicators, including Mean Absolute Deviation (MAD), Mean Squared Error (MSE), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE).

This study contributes both practically and academically. From a practical perspective, the proposed forecasting framework can support more accurate procurement planning, improve inventory control, reduce operational uncertainty, and enhance energy management efficiency within cement manufacturing

operations. From an academic perspective, the study contributes to the discussion on forecasting implementation in energy-intensive industries, particularly by demonstrating that classical forecasting methods can remain reliable decision-support tools when properly calibrated and evaluated in real industrial contexts.

2. Methodology

This study employed a quantitative approach to develop a forecasting model to predict coal demand in the procurement and warehouse division of a cement manufacturing plant in West Java, Indonesia. The research focused on improving forecasting accuracy to support procurement planning and maintain the continuity of kiln operations, which heavily depend on stable coal availability. Historical operational data were obtained from the company’s internal records for the period January 2022 to December 2024. The dataset consisted of monthly coal consumption, procurement quantities, inventory levels, and production-related information. Before the analysis was conducted, the data were examined to ensure consistency and completeness. Incomplete records were verified using operational reports and production logs to minimize potential discrepancies during the forecasting process.

Three classical time-series forecasting methods were evaluated in this study, namely Moving Average (MA), Single Exponential Smoothing (SES), and Holt’s Double Exponential Smoothing (DES). These methods were selected because they are widely applied in industrial forecasting, relatively easy to implement in operational environments, and capable of producing reliable short-term demand predictions using limited historical data.

The Moving Average method forecasts future demand by averaging several previous observations. In this study, three trailing-average periods were tested, namely 3-, 6-, and 12-month windows, to identify the most suitable forecasting horizon. The forecasting

equation for the Moving Average model is expressed by Equation (1).

$$F_{t+1} = \frac{A_t + A_{t-1} + \dots + A_{t-n+1}}{n} \dots \dots \dots (1)$$

where F_{t+1} represents the forecast for the next period, A_t denotes the actual demand at period t , and n is the number of periods used in the averaging process. The optimal period length was determined by the lowest forecasting error in model evaluation.

The Single Exponential Smoothing method was used to assign greater weight to more recent observations, enabling the model to respond more effectively to short-term fluctuations in coal consumption. Several smoothing constants (α) values were tested, namely 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, and 0.9. The initial smoothing value (S_0) was determined using the first actual observation in the dataset. The SES forecasting equation is described by Equation (2).

$$F_{t+1} = \alpha A_t + (1 - \alpha)F_t \dots \dots \dots (2)$$

where α is the smoothing constant, ranging from 0 to 1. The optimal α value was selected based on the smallest Mean Absolute Percentage Error (MAPE) produced during model evaluation.

To accommodate the presence of trend patterns in coal consumption data, Holt’s Double Exponential Smoothing method was also applied. Unlike SES, this method incorporates both level and trend components, allowing the model to capture gradual increases or decreases in demand over time. The DES model uses two smoothing parameters, namely the level parameter (α) and the trend parameter (β). Parameter combinations ranging from 0.1 to 0.9 were tested using an iterative grid-search approach to identify the optimal forecasting configuration. The initial level (L_0) was defined using the first actual observation, while the initial trend (T_0) was calculated based on the difference between the first two observations. The DES equations are expressed as follows:

$$L_t = \alpha A_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \dots (3)$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \dots (4)$$

$$F_{t+m} = L_t + mT_t \dots (5)$$

where L_t represents the smoothed level component, T_t denotes the trend component, and F_{t+m} is the forecast value for the next m periods.

The forecasting process was conducted using Microsoft Excel and cross-validated using Jamovi version 2.6.44 to ensure computational consistency. The dataset was divided into two groups: 80% of the observations were used for training, and the remaining 20% for out-of-sample testing. This validation approach was intended to evaluate each forecasting model's predictive capability on unseen data.

Forecasting performance was evaluated using three statistical indicators: Mean Absolute Deviation (MAD), Mean Squared Error (MSE), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). MAD was used to measure the average magnitude of forecasting deviation; MSE emphasized larger forecasting errors by squaring deviations; and MAPE expressed forecasting accuracy as a percentage of actual demand, allowing comparison across forecasting models. The model with the lowest MAPE value was considered the most appropriate for operational implementation.

To strengthen the reliability of the analysis, the forecasting results were also reviewed through expert validation involving practitioners and academics familiar with industrial forecasting and inventory management. In addition, the selected forecasting model was compared with actual coal procurement data from the subsequent operational period, January to March 2025, to assess the consistency of its forecasting performance under real operational conditions.

3. Results and Discussion

The forecasting analysis was conducted using three time-series methods, namely Moving Average (MA), Single Exponential Smoothing (SES), and Holt's Double Exponential Smoothing (DES), to predict monthly coal demand within the procurement

and warehouse division of the cement manufacturing plant. The evaluation focused on identifying the forecasting model that produces the most accurate and operationally reliable predictions to support procurement planning and inventory management.

The comparison between actual coal consumption and the forecasts produced by each model is shown in Figure 1. Figure 1 shows that the DES model more closely followed the actual consumption pattern than the MA and SES models, particularly during periods of increasing production activity. While the MA model produced relatively rigid forecasts and SES responded moderately to changes in consumption, the DES model captured both the level and trend movements of the data more effectively. This indicates that coal demand during the observation period did not fluctuate randomly, but instead exhibited a gradual upward trend associated with changes in production intensity and operational demand.

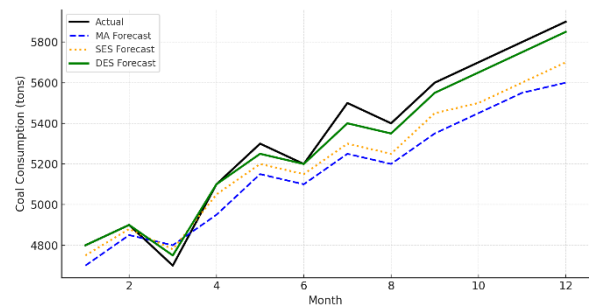


Figure 1. Comparison of actual coal consumption and model-based forecasts using MA, SES, and DES methods

To strengthen the evaluation of forecasting, several parameter configurations were tested for each model. In the Moving Average method, 3-month, 6-month, and 12-month trailing windows were evaluated. For SES, smoothing constants (α) ranging from 0.1 to 0.9 were tested, while Holt's DES used combinations of level (α) and trend (β) parameters optimized through an iterative grid-search process. The parameter configuration producing the lowest forecasting error was selected as the final model for each method. The optimization results are

Table 1. The optimization results

Model	Parameter Configuration	Selected Parameter	MAPE
Moving Average (MA)	3, 6, and 12-month windows	6-month trailing average	11.47%
Single Exponential Smoothing (SES)	$\alpha=0.1-0.9$	$\alpha = 0.3$	9.84%
Holt's Double Exponential Smoothing (DES)	$\alpha=0.1-0.9$ $\beta=0.1-0.9$	$\alpha = 0.3$ $\beta = 0.2$	6.21%

summarized in Table 1. The quantitative comparison of forecasting accuracy is presented in Figure 2. Among the evaluated models, Holt's DES achieved the lowest forecasting error, with a MAPE of 6.21%, outperforming SES and MA, which had MAPE values of 9.84% and 11.47%, respectively. The DES model also yielded the lowest MAD and MSE values, indicating smaller deviations between forecast and actual coal consumption throughout the observation period. These findings confirm that incorporating both level and trend components significantly improves forecasting performance when demand patterns exhibit gradual directional movement over time.

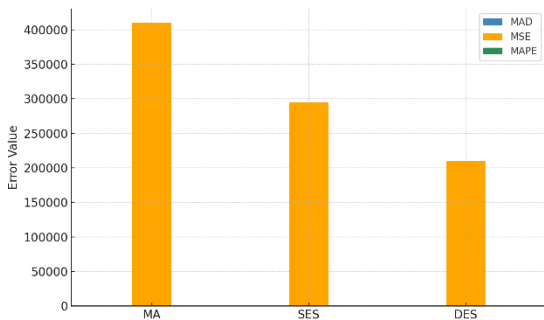


Figure 2. Comparison of forecast accuracy metrics (MAD, MSE, MAPE) among the three time-series models.

Compared with the company's previous manual estimation approach, implementing the DES model substantially reduced forecasting deviation. Historical operational records showed that manual forecasting often produced monthly deviations exceeding 1,200 tons, particularly during periods of increased production activity. After applying the DES forecasting framework, the average deviation decreased to below 500 tons per month. From

an operational perspective, this improvement provides significant benefits for procurement scheduling, warehouse utilization, and fuel allocation planning. More accurate forecasting enables procurement activities to be planned proactively rather than reactively, thereby reducing the likelihood of emergency purchasing and minimizing unnecessary inventory accumulation.

The findings also demonstrate that forecasting accuracy directly affects supply chain stability within energy-intensive manufacturing operations. Improved synchronization between projected coal demand, procurement lead time, and warehouse capacity allows the company to maintain more stable fuel availability for kiln operations. This is particularly important in cement manufacturing, where interruptions in fuel supply may affect production continuity and operational efficiency. The results are consistent with Hasan and Pulansari (2023), who reported that systematic inventory control approaches can significantly reduce material imbalance within cement production systems.

The superior performance of Holt's DES in this study also supports previous research emphasizing the importance of trend-sensitive forecasting methods in industrial energy management. Febriani and Fatichah (2024) similarly found that exponential smoothing approaches yielded more reliable forecasting performance than conventional averaging methods for predicting coal consumption in thermal power plants. The comparable forecasting accuracy obtained in the present study suggests that classical forecasting models remain highly relevant for industrial applications when properly calibrated and evaluated using operational data.

In addition to operational efficiency, the forecasting framework developed in this study contributes to broader energy management and sustainability objectives. Accurate forecasting reduces excessive procurement and unnecessary storage cycles, both of which contribute to inefficient energy utilization and higher operational costs. By aligning procurement quantities more closely with actual production requirements, the company can improve inventory turnover while reducing the risk of inefficient fuel handling practices. This finding aligns with Xu, Gong, and Yan (2023), who emphasized that data-driven forecasting systems are essential for supporting sustainable industrial transformation and long-term energy efficiency in the cement sector.

From a broader industrial perspective, the study also highlights the practical contribution of quantitative forecasting in Indonesia's manufacturing sector, where many operational decisions remain heavily dependent on manual estimates and managerial judgment. The results demonstrate that relatively simple forecasting models, such as Holt's DES, can deliver meaningful operational improvements without requiring highly complex computational systems. This practical applicability becomes particularly important for manufacturing companies seeking to improve operational resilience and cost efficiency while working within existing industrial infrastructure.

Overall, the results confirm that Holt's Double Exponential Smoothing provides the most reliable forecasting performance for predicting coal demand in the observed cement manufacturing environment. The integration of quantitative forecasting into procurement and warehouse operations not only improves forecasting accuracy but also strengthens inventory stability, operational planning, and energy-management performance. These findings indicate that forecasting should be viewed not merely as a statistical activity but as an important decision-support mechanism for achieving efficient and sustainable industrial operations.

4. Conclusion

This study evaluated the performance of three time-series forecasting methods: Moving Average (MA), Single Exponential Smoothing (SES), and Holt's Double Exponential Smoothing (DES) for predicting coal demand within the procurement and warehouse division of a cement manufacturing plant in West Java, Indonesia. Based on the forecasting evaluation results, Holt's DES achieved the highest accuracy and the lowest forecasting error among the tested models, with a MAPE of 6.21%. The model captured both the level and trend patterns of coal consumption more effectively than MA and SES, resulting in forecasts that were more consistent with actual operational demand.

The implementation of the DES model significantly reduced the deviation between forecasted and actual coal consumption, lowering the average monthly deviation from more than 1,000 tons to below 500 tons. From an operational perspective, this improvement supports more accurate procurement planning, better inventory control, and more stable warehouse operations. More reliable forecasting also reduces the risk of overstocking and stockouts, enabling procurement activities to be conducted more proactively and efficiently in accordance with production requirements.

The findings of this study indicate that quantitative forecasting can provide meaningful operational benefits for energy-intensive manufacturing industries, particularly in environments where procurement decisions remain heavily dependent on manual estimates and historical judgment. In addition to improving operational efficiency, more accurate coal demand forecasting can contribute to better energy management by reducing unnecessary inventory accumulation and improving the alignment between fuel supply and production demand.

This study contributes to the discussion on the application of classical forecasting methods in industrial energy management. The results demonstrate that relatively simple

statistical approaches, such as Holt's Double Exponential Smoothing, can still provide reliable decision support tools when properly calibrated and evaluated using real operational data. This finding is particularly relevant for manufacturing companies seeking practical forecasting solutions without relying on highly complex computational systems.

Nevertheless, this study has several limitations. The analysis was conducted using a three-year observation period and focused on a single cement manufacturing facility, which may limit the generalization of the findings to other industrial contexts. Future studies are therefore encouraged to incorporate longer historical datasets, compare forecasting performance across multiple manufacturing plants, and explore integrating machine learning approaches to further improve forecasting robustness and adaptability.

Bibliography

- Alvin, M. A. Y., Hamdi, R., Zamzani, M. I., Hertadi, C. D. P., & Nabiha, H. D. P. (2024). *A hybrid traditional and machine learning-based stacking ensemble forecasting approach for coal price prediction*. *Indonesian Journal of Artificial Intelligence and Data Mining (IJAIMD)*, 7(2), 85–94. <http://dx.doi.org/10.24014/ijaidm.v7i2.30547>
- Bramantiyo, R., Lestianingrum, E., & Cahyono, R. B. (2024). *Utilization of plastic waste as an alternative fuel in cement industry for improved energy sustainability*. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 24(3), 321–327. <https://doi.org/10.22146/ajche.13829>
- Febriani, K., & Fatichah, C. (2024). *Prediksi permintaan batu bara menggunakan machine learning (studi kasus PLTU Balikpapan)*. *JUTI: Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi*, 22(1), 12–20.
- Gusman, M. P., Rubia, B. N., Peris, P. M., & Alfalla-Luque, R. (2022). *Methodological development for the optimisation of electricity cost in cement factories: The use of artificial intelligence in process variables*. *Electrical Engineering*, 104, 897–913.
- Hasan, I. A., & Pulansari, F. (2023). *Application of the min–max stock method in the inventory control of the raw materials for the cement production at PT XYZ*. *Indonesian Journal of Industrial Engineering & Management (IJIEM)*, 4(3), 303–309. <https://doi.org/10.22441/ijiem.v4i3.20953>
- Kurniadi, A. P., Aimon, H., Salim, Z., Ragimun, A., Sonjaya, A., Setiawan, S., Siagian, V., Nasution, L. Z., Nurhidajat, R., Mutaqin, & Sabtohadji, J. (2024). *Analysis of existing and forecasting for coal and solar energy consumption on climate change in Asia Pacific: New evidence for sustainable development goals*. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(4), 123–135.
- Kurniyawan, A., & Febryanto, I. D. (2025). *Analisis peramalan persediaan batu bara dengan pendekatan time series: Studi kasus pada PT X*. *JUTIN: Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, 8(3), 220–230.
- Liu, J., Zhao, K., Wang, M., & Li, H. (2024). *Carbon emission analysis and reduction pathways in the cement industry: Evidence from China's provincial data*. *Journal of Cleaner Production*, 418, 139814. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139814>
- Wali, T., Qayum, A., Algarni, F., Malik, F., & Jan, S. U. (2025). *Evaluating the use of alternative fuels in cement production for environmental sustainability*. *Sustainability*, 17(5924), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su17135924>
- Xu, C., Gong, Y., & Yan, G. (2023). *Research on cement demand forecast and low-carbon development strategy in Shandong Province*. *Atmosphere*, 14(267), 1–18. <https://doi.org/10.3390/atmos14020267>

Job Safety Analysis for Hazard Identification in A Cement Company Warehouse Operations

Novita Arilfa¹⁾, Irwan Iftadi²⁾

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta, 57126, Indonesia¹⁾²⁾

*E-Mail: novitarilfa@student.uns.ac.id¹⁾, irwaniftadi@staff.uns.ac.id²⁾**

ABSTRACT

Occupational safety in warehouse environments remains a major challenge due to complex material-handling activities that involve both mechanical and ergonomic risks. This study aimed to identify and analyze potential hazards in the Procurement and Warehouse Department of PT XYZ using the Job Safety Analysis (JSA) method and to propose effective control measures based on the Hierarchy of Control. The research employed a descriptive observational approach, including field observations, interviews, and risk evaluation using the Likelihood × Severity Scoring system. The analysis identified thirteen potential hazards across seven job activities, with 43% categorized as high risk, 43% as medium, and 14% as low. The most significant risks were identified in forklift operation and manual material handling, contributing to mechanical and musculoskeletal hazards. The study concludes that the JSA method effectively provides a structured framework for risk identification and prioritization. The implementation of engineering, administrative, and ergonomic controls is essential to enhance safety performance and support sustainable workplace health, in alignment with ISO 45001:2018 and SDG 3 – Good Health and Well-Being.

Keywords: Job Safety Analysis, occupational safety, warehouse, risk assessment, ergonomic hazard.

1. Introduction

Occupational Health and Safety (OHS) play a crucial role in maintaining workers well-being while ensuring the continuity of industrial operations. A safe workplace not only aims to prevent accidents but also contributes to increased productivity and long-term organizational sustainability (Mahendra & Iftadi, 2025). In Indonesia, Workplace accidents remain a persistent issue, particularly within the manufacturing, logistics and warehousing sectors, which collectively account for more than one-third of industrial accidents nationwide (Samma et al., 2021). This condition highlights the importance of systematic hazard identification and risk control across all industrial functions, including supporting divisions such as procurement and warehouse operations.

Previous studies indicate that occupational hazards are inherently multifactorial, encompassing mechanical, physical, ergonomic, and chemical risks. These hazards are often intensified by

inadequate safety procedures and inconsistent adherence to safe work behaviors. For example, identified 27 potential hazards in a mechanical industry, with half of them classified as high or very high risk (Philippus et al., 2023). Their findings suggest that even organizations with established OHS systems may still experience substantial residual risks due to operational complexity and human error. In warehouse settings, similarly reported frequent near-miss incidents related to hoist operations, primarily driven by unsafe actions and insufficient ergonomic awareness (Rahmawati & Hakim, 2022).

To address these risks, various structured analytical tools have been widely implemented in industrial safety management, including Job Safety Analysis (JSA), Hazard Identification, Risk Assessment and Determining Control (HIRADC), and Hazard and Operability Studies (HAZOP). Mahendra & Iftadi (2025) demonstrated that the HIRARC framework effectively reduces hazard exposure in

**Corresponding author*

manufacturing environments by integrating systematic risk assessment with the Hierarchy of Control. Likewise, Nurhayati & Purnomo (2023) applied HIRADC in the seafood processing industry and identified 40 potential hazards, eight of which were categorized as high risk, indicating the adaptability of this method across different industrial contexts.

Among these approaches, JSA offers a practical and task-oriented method by breaking down work activities into discrete steps, enabling the identification of specific hazards, associated risk levels, and appropriate control measures. This method has been shown to be particularly effective in work environments dominated by manual handling and repetitive physical activities (Kurnia et al., 2025). In addition to supporting risk prioritization, JSA enhances communication between management and workers regarding safe work practices. Reported that the integration of HIRA and JSA in building-material retail operations significantly improved hazard recognition related to manual lifting, awkward postures, and dust exposure, which are common contributors to musculoskeletal disorders (MSDs).

Ergonomic risk factors are widely recognized as major contributors to occupational injuries, particularly in manual material handling activities (Rajendran et al., 2021). Zhao et al. (2022) found that approximately 33% of warehouse workers experienced lower back pain, while more than half reported musculoskeletal discomfort associated with awkward postures during high- and low-level binning tasks. These findings are consistent with Rajendran et al. (2021), who emphasized that improper lifting techniques, repetitive motions, and prolonged static postures significantly increase the prevalence of MSDs across industrial sectors. In response to these challenges, recent studies have begun to incorporate motion analysis and digital ergonomics to quantify body posture and movement, thereby improving the precision of ergonomic risk assessments (Zhao et al., 2022).

Despite the growing availability of safety assessment frameworks, many organizations continue to face difficulties in ensuring consistent hazard identification and control, particularly in non-production areas such as warehouses and logistics units (Rahmawati & Hakim, 2022). These areas often receive less attention within safety management systems, even though they play a critical role in supporting overall operational performance. As noted by Sławińska et al. (2024), the integration of digital risk management tools and simulation-based modeling can strengthen workplace sustainability by enabling real-time monitoring of occupational risks and ergonomic loads in the warehouse and logistics activities.

However, most existing studies on warehouse safety adopt a generalized industrial perspective and rarely address the specific operational characteristics of warehouses within heavy manufacturing sectors, such as the cement industry. Warehouse operations in the cement industry typically involve handling heavy and bulky materials, cement bags, spare parts, and palletized loads, often under conditions of repetitive manual handling and exposure to dust. These characteristics may intensify ergonomic strain and unsafe behaviors, indicating that conclusions drawn from general warehouse studies may not fully reflect the risk profile of the cement industry warehouses.

PT XYZ is a manufacturing company operating in Central Java, Indonesia, whose warehouse division plays a vital role in supporting production continuity through material storage, handling, and internal distribution. Warehouse activities at PT XYZ include manual lifting and carrying, pallet stacking, material inspection, and coordination with logistics operations, all of which present potential mechanical, ergonomic and environmental hazards. Despite the strategic importance of these activities, systematic identification and analysis of workplace hazards in the warehouse division remains limited.

Therefore, this study aims to address this gap by identifying and analyzing potential workplace hazards in the warehouse division of PT XYZ using the Job Safety Analysis (JSA) method. This study aims to compile an updated Job Safety Analysis (JSA) to support the identification and control of potential hazards (Mindandi & Iftadi, 2023). By systematically mapping job steps, assessing risks based on likelihood and severity, and proposing control measures aligned with the Hierarchy of Control, this study provides context-specific insights into occupational risk management within the cement industry warehouse operations. The findings are expected to contribute to improved safety performance and support the implementation of sustainable occupational health management practices in non-production areas (ILO, 2024).

2. Methodology

This study employed a descriptive observational approach using the Job Safety Analysis (JSA) method to systematically identify potential hazards, assess associated risk levels, and propose appropriate control measures. The JSA framework was selected because it allows each job process to be analyzed step by step, facilitating the recognition of unsafe conditions and unsafe actions that could lead to accidents. Similar methodological approaches have been applied in manufacturing, warehousing, and construction settings to enhance safety performance through structured risk evaluation (Mahendra & Iftadi, 2025).

The research was conducted at the Procurement and Warehouse Department of PT XYZ, a manufacturing company located in Central Java, Indonesia. The department’s activities include the receipt, storage, and distribution of materials and equipment, which involve repetitive physical handling, operation of lifting tools, such as forklifts and hoists, and manual transfer of goods. These operations carry multiple risks, particularly mechanical, ergonomic, and physical hazards, which are comparable to those reported in previous studies of industrial

warehouse environments (Rahmawati & Hakim, 2022).

Data collection involved field observation, documentation, and semi-structured interviews with workers and supervisors to gain insight into daily operational routines and safety practices. Each identified task was systematically decomposed into specific job steps following The Job Safety Analysis (JSA) procedure. For each job step, potential hazards were identified based on observed unsafe conditions and unsafe actions, while the frequency of exposure was assessed by considering task repetition, duration of exposure, and the number of workers involved. The level of risk was then analyzed by evaluating the potential severity of the consequences should an incident occur. The risk analysis referred to the qualitative criteria of likelihood and severity, adapted from the Australian/New Zealand Standard AS/NZS 4360:2004, where the overall risk value (R) was calculated by using Equation (1) with L being the likelihood level and S being the severity level.

$$R = L \times S \dots\dots\dots (1)$$

Table 1 shows the Qualitative Likelihood Assessment Scale, and Table 2 shows the severity criteria. Based on the resulting risk value, each hazard was classified into low, medium, high, or extreme risk categories using a modified risk matrix (Nurhayati & Purnomo, 2023).

Table 1. Qualitative Likelihood Assessment Scale

Likelihood Level	Category	Description
5	Almost Certain	will definitely happen under all conditions
4	Likely	often occurs in almost all conditions
3	Moderate	rarely occurs under certain conditions
2	Unlikely	may occur under certain conditions, but the probability of occurrence is low
1	Rare	almost never happens

Based on the identified hazards and their corresponding risk levels, control measures were developed by applying the Hierarchy of Control approach. This hierarchy prioritizes risk reduction strategies starting from the most effective level, namely elimination, followed by substitution, engineering controls, administrative controls, and finally, the use of personal protective equipment (PPE) as the least effective measure.

Table 2. Severity (S) Criteria Based on AS/NZS 4360:2004

Severity Level	Category	Description
1	Insignificant	no injuries, very minor material damage
2	Minor	requires first aid treatment, moderate material damage
3	Moderate	requires medical treatment and results in temporary loss of limb function
4	Major	injuries resulting in total disability/loss of bodily function, disruption of production processes, significant material losses
5	Catastrophe	resulting in death, significant material loss

In this study, hazards classified as high and extreme risk were first evaluated for the possibility of elimination or substitution. If these options were not feasible, engineering controls were proposed to reduce exposure, followed by administrative measures such as work procedures, training, and warning signs. PPE was recommended only when residual risks remained after other control measures had been applied.

This structured application of the hierarchy ensures that preventive controls are prioritized over reactive measures, in line with previous studies emphasizing proactive Safety management (Mahendra & Iftadi, 2025). The proposed control measures were further discussed with the company’s safety officers to ensure their practicality and

alignment with the existing Occupational Health and Safety Management System (OHSMS).

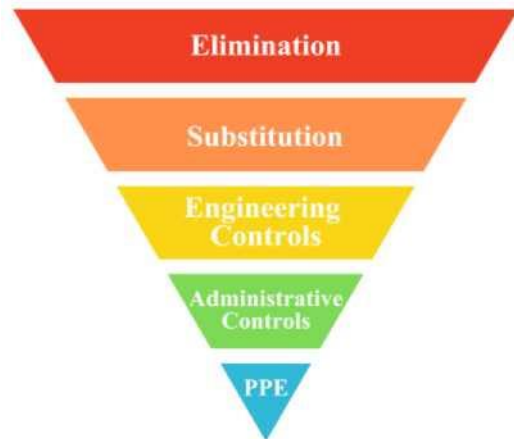


Figure 1. Hierarchy of Control Applied in Risk Control Analysis

Figure 1 illustrates the Hierarchy of Control framework used in this study to develop risk control recommendations, prioritizing elimination and substitution over engineering, administrative controls, and personal protective equipment (PPE). The likelihood and severity ratings were determined jointly by the researcher, warehouse supervisors, and safety personnel based on field observations and interviews findings to ensure consistency and practicality relevance.








All collected data were analyzed descriptively and presented in tabular form to illustrate the relationship between job steps, potential hazards, risk ratings, and control measures. This analytical process followed the practice of earlier JSA-based studies that aimed to transform qualitative observations into actionable safety strategies (Kurnia et al., 2025). The final output of the analysis provided an overview of the warehouse’s dominant hazards and suggested preventive actions to enhance overall safety performance, supporting the organization’s alignment with ISO 45001:2018 standards and the broader goals of sustainable occupational health.

3. Results and Discussion

Following the observation, interviews, and risk scoring procedures described in the methodology, the Job Safety Analysis (JSA) was carried out for each major work activity in the Procurement and Warehouse Department of PT XYZ. A total of seven key work steps were analyzed, covering the

processes of receiving materials, transporting goods using forklifts or hoists, stacking and storage, packaging, and labeling, housekeeping, documentation, and loading operations. Each job stage was assessed based on its potential hazards, possible consequences, existing controls, and risk rating calculated through the Likelihood

Table 3. Job Safety Analysis of Warehouse Activities at PT XYZ

Figure	Job Step / Activity	Potential Hazard	Possible Consequence	Existing Control	Risk Level (L×S)	Recommended Control (Hierarchy of Control)
	Receiving materials from supplier	Manual lifting and improper posture	Muscle strain, lower back pain	Basic training, use of gloves	3×4 = 12 (High)	Use mechanical aids (hand pallet), provide lifting training, and apply for a job rotation
	Moving materials using forklift	Collision, falling load, limited visibility	Injury, fracture, fatality	Forklift license, warning signs	4×4 = 16 (High)	Install mirrors at intersections, define traffic lanes, enforce PPE, and speed limits
	Stacking materials on racks	Overreaching and unstable stacking	Falling objects, head injury	Racking inspection	3×4 = 12 (High)	Set maximum stacking height, use a step ladder, provide supervision
	Packaging and labeling	Repetitive motion, awkward posture	Wrist and shoulder pain	Workbench and PPE available	3×3 = 9 (Medium)	Redesign workstation height, schedule micro breaks
	Cleaning and housekeeping	Slippery floor, sharp objects	Slip, fall, cuts	Floor mopping schedule	2×3 = 6 (Medium)	Improve drainage, provide non-slip shoes
	Documentation and data entry	Prolonged sitting, screen glare	Eye strain, neck stiffness	None	2×2 = 4 (Low)	Provide ergonomic chair and lighting adjustment
	Hoist operation during loading	Rope or hook failure, operator inattention	Crushed objects, hand injury	Operator license	3×3 = 9 (Medium)	Conduct pre-use inspection, apply lockout-tagout (LOTO) procedure

Notes:

Likelihood (L) and Severity (S) were assessed on a 1–5 scale in accordance with AS/NZS 4360:2004. Risk levels were categorized as Low (1–4), Medium (5–9), High (10–16), and Extreme (≥17).

Severity formula as outlined in the methodological framework. The summarized results of this analysis are presented in the Table 3.

The likelihood and severity scores assigned to each hazard in Table 3 were determined based on field observations, task characteristics, and interview findings. For example, in the activity of receiving materials from suppliers, the likelihood was rated as “possible” ($L = 3$) because manual lifting tasks were performed repeatedly on a daily basis based on the work of multiple workers without consistent use of mechanical aids, increasing the probability of exposure to ergonomic strain. The severity was rated as “major” ($S = 4$) since improper lifting posture has the potential to cause musculoskeletal disorders, particularly lower back injuries, which may result in lost workdays or long-term health effects. This scoring approach was consistently applied to other activities by considering task frequency, duration of exposure, load characteristics, and the potential consequences of an incident occurred. Table 3 also indicates the specific level of the Hierarchy of Control applied in each recommended action. Engineering controls were prioritized for high-risk activities, such as the use of mechanical aids, installation of mirrors and a workstation redesign, as these measures directly reduce exposure to hazards. Administrative controls, including training, supervision, and work procedures were proposed to support engineering interventions, while PPE was recommended as a complementary measure when residual risks remained.

Forklift operation emerged as the highest-risk activity not merely due to its high severity score, but because of the interaction between confined warehouse layouts, limited visibility, and frequent material movement. In cement industry warehouses, forklifts routinely transport heavy and bulky loads, which increases stopping distance and reduces maneuverability. These conditions amplify the consequences of operator error or delayed reaction, explaining why forklift-related hazards consistently receive high-risk ratings.

This finding highlights the need for traffic management and spatial design improvements as a priority in warehouse safety management for cement manufacturing environments.

Unlike general warehouse operations, cement industry warehouses handle materials with higher weight density and dust exposure, which intensifies both mechanical and ergonomic risks. The dominance of manual handling and stacking-related hazards in this study suggests that conventional training-based controls alone are insufficient. Without engineering interventions, such as mechanical lifting aids and optimized rack design, the likelihood of musculoskeletal disorders will remain high despite administrative measures.

To provide a clearer visual representation of the overall risk distribution, the percentage of hazards in each risk category is shown in Figure 1. The diagram illustrates that medium-risk activities constitute the majority of hazards identified, followed by high-risk and low-risk categories.

Although the proposed control measures are technically feasible, their implementation may face practical challenges, particularly related to cost, operational disruption, and worker adaptation. Engineering controls, such as installing mirrors or redesigning storage racks, require initial capital investment and may temporarily affect workflow. Administrative measures depend heavily on worker compliance and supervision consistency, while reliance on PPE alone may be limited by discomfort and improper use. Therefore, prioritizing controls based on risk level and integrating them gradually into existing operations is essential to ensure sustainable implementation.

Figure 2 shows the distribution of risk levels identified in the Warehouse Department of PT XYZ. As shown in Figure 2, 43% of the identified hazards were high risk, 43% were medium risk, and 14% were medium risk. The highest risk scores were found in moving materials using a forklift ($R=16$), receiving materials from the supplier ($R=12$), and stacking

materials on racks ($R=12$). These activities involve physical handling of large or unstable loads, consistent with findings in other industrial studies where material-handling operations contribute most to occupational injury rates (Kurnia et al., 2025; Mahendra & Iftadi, 2025).

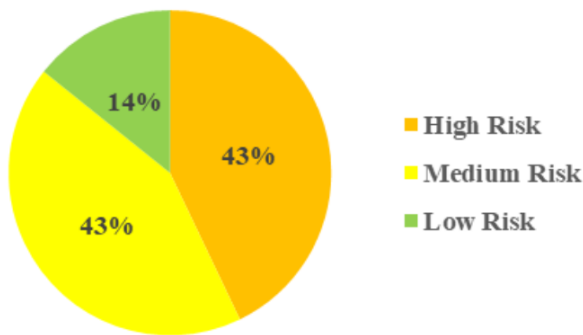


Figure 2. Distribution of risk levels identified in the Warehouse Department of PT XYZ

The most dominant hazards observed in PT XYZ's warehouse was mechanical and ergonomic in nature. Workers frequently performed lifting and carrying tasks without mechanical assistance, resulting in repetitive bending and overexertion. Observations also recorded postures involving trunk flexion beyond 60° , which, according to Rajendran et al. (2021) increases musculoskeletal load and the risk of lower back disorders. Interviews revealed that 60% of employees experienced occasional lower back pain, while 35% complained of shoulder or neck strain. These ergonomic symptoms closely align with the findings of Zhao et al. (2022), who reported that warehouse workers performing high- and low-shelf binning tasks had a 33% prevalence of back pain due to awkward postures.

The mechanical hazards were primarily associated with forklift movement in confined aisles, hoist operations, and falling materials from improperly stacked pallets. The JSA recorded that some pallets were stacked beyond safe height limits, and that safety cones were inconsistently used during material movement. These findings support previous literature that links insufficient spatial design and supervision to increase incident probability in logistics environments

(Rahmawati & Hakim, 2022). Noise exposure in the warehouse averaged between 82 and 86 dBA, remaining within acceptable limits, but indicating the need for monitoring and periodic hearing checks, consistent with the control standards recommended by Nurhayati & Purnomo (2023).

From a control perspective, engineering and administrative measures were prioritized. Engineering interventions included improving lighting at loading zones, repairing uneven floor surfaces, and installing convex mirrors at intersections, and optimizing rack height to minimize overreaching. Administrative measures included stricter supervision, revised Standard Operating Procedures (SOPs) for stacking, and refresher training on forklift and hoist operations. Workers were also advised to consistently use PPE helmets, gloves, and safety shoes, especially during loading activities. These recommendations align with the Hierarchy of Control approach widely used in industrial risk management (Mahendra & Iftadi, 2025), which prioritizes elimination and engineering measures over reliance on PPE.

Another important finding was the lack of near-miss reporting and limited documentation of minor incidents. Although PT XYZ had implemented a safety management system, the analysis showed that it was more reactive than preventive. Similar organizational behavior was reported by Rahmawati & Hakim (2022), who emphasized that underreporting of near-miss events weakens the effectiveness of safety programs and hinders learning processes. Encouraging worker participation in hazard reporting and integrating JSA results into monthly safety reviews would improve feedback mechanisms and foster a proactive safety culture.

The overall results demonstrate that applying the JSA method at PT XYZ provided a structured foundation for identifying, assessing, and controlling workplace hazards. It helped transform qualitative field observations into quantitative risk levels and targeted action

plans. When integrated with ergonomic assessment (Zhao et al., 2022). JSA can serve as a baseline for digitalized safety monitoring systems that enable real-time risk evaluation. Such integration would further support PT XYZ alignment with ISO 45001:2018 standards and the Sustainable Development Goal (SDG) 3 Good Health and Well-being.

In summary, the results confirm that the Procurement and Warehouse Department still exhibits several medium-to-high risks, primarily associated with manual handling activities and mechanical operations. The implementation of JSA-based interventions, including ergonomic redesign, strengthened administrative controls, and preventive monitoring, can substantially mitigate these hazards, although such measures may require additional resources, such as investment in engineering improvements, training activities, and continuous supervision. These implications should be regarded as preventive efforts rather than operational burdens, as effective hazard control can reduce accident-related costs, work interruptions, and long-term occupational health impacts. Overall, the findings reinforce existing evidence that structured job analysis not only lowers the probability of workplace accidents, but also improves worker awareness and supports the development of a resilient safety culture, in line with global OHS research trends (Kurnia et al., 2025; Mahendra & Iftadi, 2025; Zhao et al., 2022).

4. Conclusion

This study aimed to identify and analyze potential workplace hazards in the Procurement and Warehouse Department of PT XYZ using the Job Safety Analysis (JSA) method and to propose control measures based on the Hierarchy of Control. The findings revealed that the warehouse environment was dominated by mechanical and ergonomic hazards, primarily arising from manual lifting, forklift operation, and stacking activities. From the seven main job steps, thirteen hazards were identified, with 43% classified as high risk, 43% as medium, and 14% as low. The highest risks occurred during forklift movement and manual

handling, where poor posture and inadequate supervision increased the likelihood of accidents and musculoskeletal disorders.

The implementation of the JSA method provided a structured framework to quantify risk levels and guide effective control priorities. Engineering improvements, ergonomic adjustments, and administrative reinforcement were identified as key actions to mitigate hazards and enhance operational safety. The study concludes that adopting JSA, as a continuous monitoring tool, can strengthen PT XYZ's occupational health and safety performance, align its practices with ISO 45001:2018, and support the Sustainable Development Goal (SDG) 3 – Good Health and Well-Being by fostering a proactive and sustainable safety culture within the organization.

Future studies may focus on implementing selected control measures and evaluating their impact on safety performance to complement the hazard identification findings of this study.

Bibliography

- Kurnia, R. D., Septiyandi, M. A., & Cahyo, W. N. (2025). Improving Occupational Safety in Building Material Retail Through HIRA and JSAN. *Journal of Industrial Engineering Management*, 10 (No. 1). <https://doi.org/https://garuda.kemdiktisaintek.go.id/documents/detail/4983280>
- Mahendra, A. S., & Iftadi, I. (2025). Designing Risk Control Strategies Using HIRARC-Based Risk Management to Comply Occupational Health and Safety Management System Standards in Manufacturing Activities. *Teknoin*, 30(1), 9–20.
- Mindandi, Z. H., & Iftadi, I. (2023). Work Accident Reduction Strategies with Job Safety Analysis at the Gum Rosin and Turpentine Factory. *Teknoin*, 28(01), 20–29. <https://doi.org/10.20885/teknoin.vol28.iss1.art3>
- Nurhayati, R., & Purnomo, Y. S. (2023). Analisis Risiko K3 dengan Metode

- IRADC pada Industri Pengolahan Makanan Laut di Jawa Timur *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, 2(3), 450–461.
<https://doi.org/10.55123/insologi.v2i3.1883>
- Philipus, A., Miswari, N., & Wahyudi, R. (2023). Analisis Potensi Bahaya Dan Pengendalian Risiko Kecelakaan Kerja Dengan Metode Hazard and Operability Pada PT XYZ. *Jurnal INVASI: Industri Dan Inovasi*, 1(1), 40–47.
<http://jurnal.utu.ac.id/invasi/issue/view/533>
- Rahmawati, N., & Hakim, M. H. (2022). Analisis Bahaya dan Upaya Pencegahan Keadaan Nearmiss Pesawat Angkat-Angkut Hoist pada Area Warehouse di PT. XYZ. *Journal of Manufacturing in Industrial Engineering & Technology*, 1(2), 10–19.
<https://doi.org/10.30651/mine-tech.v1i2.16789>
- Rajendran, M., Sajeev, A., Shanmugavel, R., & Rajpradeesh, T. (2021). Ergonomic evaluation of workers during manual material handling. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7770–7776.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.283>
- Samma, M. Y., Jayadipraja, E. A., & Harun, A. (2021). The Application of Job Safety Analysis (JSA) Method in Identifying The Risk of Work Accident in Charged Manpower in Bungkutoko Port, Kendari City. *Indonesian Journal of Health Sciences Research and Development (IJHSRD)*, 3(1), 8–17.
<https://doi.org/10.36566/ijhsrd/vol3.iss1/46>
- Sławińska, M., Pawlewski, P., Kudelska, I., & Kańduła, D. (2024). Occupational Risk Management for a Sustainable Workplace Using Simulation. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio H – Oeconomia*, 58(4), 187–203.
<https://doi.org/10.17951/h.2024.58.4.187-203>
- Zhao, Y. S., Jaafar, M. H., Azlan Mohamed, A. S., Azraai, N. Z., & Amil, N. (2022). Ergonomics Risk Assessment for Manual Material Handling of Warehouse Activities Involving High Shelf and Low Shelf Binning Processes: Application of Marker-Based Motion Capture. *Sustainability (Switzerland)*, 14(10).
<https://doi.org/10.3390/su14105767>

Analisis Numerik Geometri Inlet dan Parameter Udara pada Pengereng *Rotary Drum* Limbah Kepala Ikan

Mustaza Ma'a¹⁾, Jupri Yanda Zaira²⁾, Ayu Mustika³⁾, Muhammad Rifki⁴⁾, Rizky Fahreza⁵⁾, Rahmat Olvaries⁶⁾

*Program Studi D4 Teknik Mesin, Jurusan Teknologi Industri, Politeknik Caltex Riau,
Jalan Umban Sari, No 1, Pekanbaru 28265, Indonesia^{1),2),3),4),5),6)}
E-Mail : mustaza@pcr.ac.id^{1)*}*

ABSTRAK

Peningkatan volume limbah kepala ikan di Indonesia yang mencapai 30-40% dari total berat tangkapan memerlukan penanganan yang efektif untuk mencegah pembusukan akibat kadar air yang tinggi. Namun, efisiensi mesin pengereng *rotary drum* sering terkendala oleh distribusi panas yang tidak merata dan aliran udara yang kurang optimal. Penelitian ini mengevaluasi kinerja aerodinamika dan termal mesin menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan membandingkan variasi temperatur (80°C, 100°C, 120°C), diameter pipa (100 mm, 125 mm, 150 mm), dan kecepatan aliran (2 m/s, 5 m/s, 8 m/s). Hasil simulasi menunjukkan bahwa diameter pipa 125 mm menghasilkan aliran yang paling stabil, temperatur 120°C menghasilkan panas yang paling homogen, serta kecepatan 5 m/s menjadi parameter operasional yang optimal untuk menjaga *residence time* ideal. Secara keseluruhan, kombinasi parameter tersebut merupakan konfigurasi desain terbaik untuk meningkatkan efisiensi energi dan kualitas pengerengan dalam industri pengolahan limbah perikanan.

Kata kunci: CFD, Pengereng *Rotary Drum*, Limbah Ikan, Analisis Termal, Dinamika Fluida.

ABSTRACT

The increasing volume of fish head waste in Indonesia, which accounts for 30-40% of the total catch weight, necessitates effective handling to prevent decomposition due to high moisture content. However, the efficiency of rotary drum dryers is often hindered by uneven heat distribution and suboptimal airflow. This study evaluates the aerodynamic and thermal performance of the machine using Computational Fluid Dynamics (CFD) by comparing variations in temperature (80°C, 100°C, 120°C), pipe diameters (100 mm, 125 mm, 150 mm), and inlet velocities (2 m/s, 5 m/s, 8 m/s). Simulation results indicate that a 125 mm pipe diameter provides the most stable flow, a temperature of 120°C yields the most homogeneous heat distribution, and a velocity of 5 m/s is the optimal operating parameter for maintaining ideal residence time. Overall, this parameter combination represents the best design configuration to enhance energy efficiency and drying quality in the fish waste processing industry.

Keywords: CFD, Rotary Drum Dryer, Fish Head Waste, Thermal Analysis, Fluid Dynamics.

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara dengan potensi produksi perikanan yang sangat besar. Seiring dengan hal tersebut, volume limbah perikanan yang dihasilkan pun turut meningkat. Studi menunjukkan bahwa limbah perikanan, termasuk kepala, tulang, dan jeroan, dapat mencapai 30-40% dari total berat

ikan hasil tangkapan (Mahargiani, 2022). Limbah kepala ikan ini memiliki nilai ekonomis yang tinggi jika dimanfaatkan kembali karena masih mengandung nutrisi penting, seperti protein yang kadarnya dapat mencapai 62% jika diolah menjadi tepung ikan (Erlambang et al., 2022). Meskipun demikian, pemanfaatan limbah ini sering terkendala oleh karakteristik fisiknya yang

**Corresponding author*

memiliki kadar air tinggi, sehingga sangat rentan mengalami pembusukan jika tidak segera ditangani (Aisyah et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan proses pengeringan yang cepat dan efektif sebagai langkah krusial untuk menurunkan kadar air tersebut sebelum terjadi pembusukan.

Sebagai upaya mengatasi kendala kadar air tersebut, metode pengeringan konvensional dengan sinar matahari (*sun drying*) menjadi pilihan utama yang umum digunakan oleh masyarakat. Namun, metode ini memiliki berbagai kelemahan, antara lain ketergantungan penuh pada kondisi cuaca, waktu pengeringan yang lama, serta risiko kontaminasi debu dan serangga yang dapat menurunkan higienitas produk (Swastawati, 2020). Selain itu, pengeringan tradisional yang tidak terkontrol sering menyebabkan fenomena *case hardening*, di mana bagian luar bahan sudah kering, namun bagian dalamnya masih basah (Jurnal Perikanan Unram, 2023). Oleh karena itu, penerapan teknologi mesin pengering mekanis, seperti tipe rotary drum, menjadi solusi untuk menjamin kontinuitas produksi dan mutu produk (Yuliana & Hardi, 2023).

Meskipun mesin pengering *rotary drum* untuk limbah kepala ikan telah dirancang dan dibangun, efisiensi kinerjanya sangat bergantung pada parameter termal dan karakteristik aliran fluida di dalam ruang pengering. Permasalahan yang sering timbul pada alat pengering tipe ini adalah distribusi panas yang tidak merata dan aliran udara yang tidak optimal, yang dapat menyebabkan pemborosan energi atau pengeringan yang tidak merata. Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Herman (2025) berfokus pada rancang bangun fisik alat, tetapi belum menyertakan analisis numerik terkait karakteristik aliran fluida. Sementara itu, penelitian lain seperti Huda & Alexandro (2022) lebih menitikberatkan pada analisis getaran mekanis, sedangkan Syani & Hastuti (2021) berfokus pada sistem kontrol otomatis tanpa meninjau secara rinci aspek termodinamika fluida. Sebagian besar penelitian terdahulu belum memecahkan

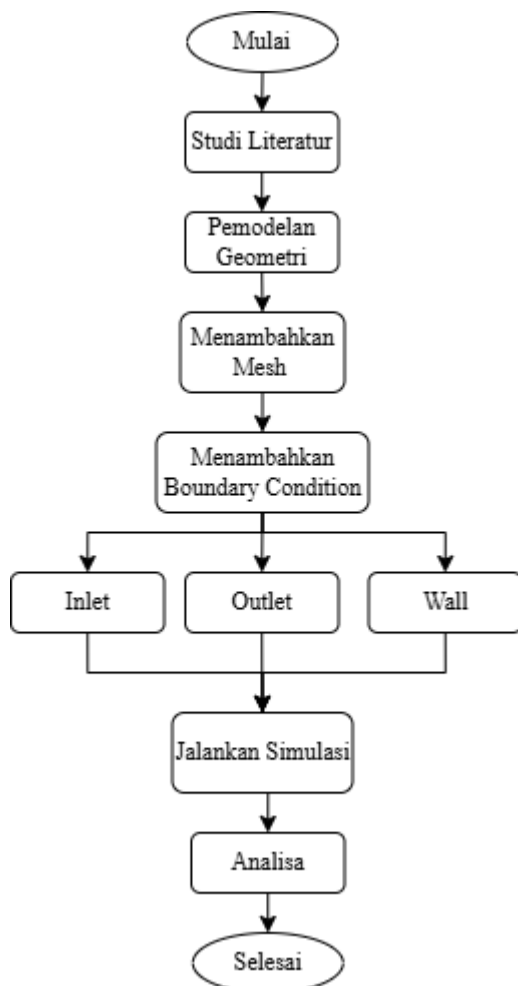
masalah terkait ketidakstabilan aliran udara peniup dan fluktuasi temperatur di dalam ruang pengering. Hal ini menunjukkan adanya celah penelitian (*gap*) mengenai optimasi aliran udara dan distribusi termal pada mesin pengering tersebut yang belum terjamah.

Oleh karena itu, diperlukan pendekatan analisis numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk mengevaluasi kinerja mesin tanpa perlu melakukan modifikasi fisik yang mahal secara berulang. Sebagaimana dibuktikan oleh Alkindi dkk. (2015), simulasi CFD efektif digunakan untuk memprediksi pola aliran udara panas guna meningkatkan efisiensi alat pengering. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh tiga variabel utama terhadap efisiensi distribusi panas di dalam tabung pengering, yaitu: (1) variasi temperatur fluida masuk dengan rentang simulasi 80°C, 100°C, dan 120°C; (2) variasi diameter pipa penyalur dengan ukuran 100 mm, 125 mm, dan 150 mm; serta (3) variasi kecepatan aliran fluida sebesar 3 m/s, 5 m/s, dan 8 m/s. Analisis komparatif ketiga variasi tersebut akan digunakan untuk menentukan konfigurasi desain yang paling optimal. Dalam menentukan konfigurasi optimal tersebut, parameter hasil yang dievaluasi meliputi waktu tinggal (*residence time*) udara panas di dalam drum dan efektivitas sirkulasi aliran. Kedua parameter ini krusial untuk dipahami karena secara langsung memengaruhi efisiensi perpindahan panas dan keseragaman pengeringan limbah kepala ikan.

Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada studi optimasi numerik yang spesifik untuk mesin pengering limbah kepala ikan dengan mengintegrasikan analisis geometri saluran masuk (*inlet*) dan parameter operasional termal. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah berupa rekomendasi parameter desain yang valid, sehingga mampu meningkatkan efisiensi energi dan keseragaman proses pengeringan di industri pengolahan limbah perikanan.

2. Metodologi

Metodologi penelitian ini menggunakan pendekatan studi numerik (*numerical study*) untuk menganalisis karakteristik aliran dan perpindahan panas pada mesin pengering. Guna memastikan proses penelitian berjalan secara terstruktur, rangkaian kegiatan yang meliputi tahap pemodelan geometri, diskretisasi (*meshing*), hingga analisis data disusun dalam alur kerja yang sistematis sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur penelitian (*Flowchart*)

Data geometri dan spesifikasi alat mengacu pada rancang bangun mesin pengering limbah kepala ikan yang dikembangkan oleh Herman (2025). Proses simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak. Tahap perancangan geometri 3D dilakukan menggunakan SolidWorks, sedangkan proses diskretisasi (*meshing*) dan penyelesaian persamaan fluida dilakukan

menggunakan *Computational Fluid Dynamics*. Geometri ruang pengering dimodelkan sebagai drum silinder dengan panjang 800 mm dan diameter 10 inci. Model kemudian dibagi menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*) menggunakan metode volume hingga (*Finite Volume Method*) untuk memperoleh akurasi perhitungan yang tinggi di area inlet dan dinding tabung.

Penelitian ini membandingkan kinerja mesin melalui tiga skenario simulasi utama. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini meliputi variasi temperatur fluida masuk, variasi ukuran pipa penyalur udara, serta variasi kecepatan fluida atau uap panas yang masuk. Simulasi variasi temperatur dilakukan pada temperatur udara inlet sebesar 80°C, 100°C, dan 120°C. Variasi ini bertujuan untuk melihat distribusi panas yang dihasilkan serta risiko *overheating* pada material. Lalu yang kedua, variasi diameter pipa penyalur. Ukuran diameter inlet disimulasikan pada 100 mm, 125 mm, dan 150 mm. Variasi ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh luas penampang masuk terhadap tekanan dan pola semburan aliran udara pengering di dalam drum. Terakhir, variasi kecepatan aliran fluida: Kecepatan udara masuk divariasikan pada 2 m/s, 5 m/s, dan 8 m/s. Variasi ini bertujuan untuk mengevaluasi waktu tinggal (*residence time*) udara panas dan efektivitas sirkulasi di seluruh ruang pengering.

Semua analisis dilakukan dengan menetapkan kondisi batas (*boundary conditions*) pada model CFD. Inlet ditetapkan sebagai *Velocity Inlet*. Nilai temperatur dan kecepatan disesuaikan dengan variabel penelitian di atas (misalnya pada skenario pertama diatur 80°C dengan kecepatan konstan). Dinding tabung diasumsikan adiabatik (tidak ada perpindahan panas keluar dari dinding) dengan kondisi tanpa slip (*no-slip condition*). Data hasil simulasi kemudian dianalisis untuk menentukan konfigurasi parameter terbaik yang memberikan efisiensi distribusi panas dan aliran fluida yang optimal.

3. Hasil dan Pembahasan

Bab ini memaparkan hasil simulasi numerik yang dilakukan untuk mengevaluasi kinerja mesin pengering limbah kepala ikan. Analisis dilakukan berdasarkan tiga variabel utama yang telah ditentukan dalam metodologi, yaitu variasi temperatur fluida, variasi diameter pipa penyalur, dan variasi kecepatan aliran fluida. Tujuan utama dari analisis ini adalah menentukan konfigurasi parameter desain yang paling optimal untuk menjamin efisiensi termal dan keseragaman proses pengeringan. Metode optimasi dalam penelitian ini dilakukan melalui pendekatan studi parametrik, yaitu dengan mensimulasikan beberapa skenario variasi parameter operasional dan geometri secara komparatif untuk mengidentifikasi kombinasi terbaik berdasarkan kestabilan aliran, homogenitas temperatur, dan *residence time* yang ideal.

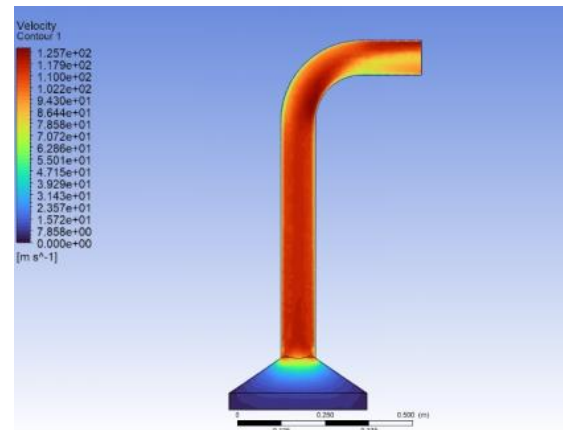
3.1. Analisis Pengaruh Variasi Diameter Pipa Penyalur

Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan untuk menganalisis distribusi kecepatan fluida pada pipa dengan variasi diameter 100 mm, 125 mm, dan 150 mm. Ketiga model memiliki geometri dan sudut belokan yang sama, tetapi berbeda dalam ukuran diameter jalur utama aliran. Hasil ditampilkan dalam bentuk kontur kecepatan sehingga pola aliran serta daerah percepatan maupun perlambatan dapat diamati secara visual.

Pada konfigurasi pertama dengan diameter pipa 100 mm, distribusi kecepatan menunjukkan peningkatan nilai kecepatan yang cukup tinggi di sepanjang jalur aliran. Nilai kecepatan maksimum mencapai sekitar 125 m/s, yang merupakan nilai tertinggi dibandingkan dengan kedua model lainnya. Fenomena ini terjadi karena luas penampang yang lebih kecil menyebabkan percepatan fluida meningkat sesuai dengan prinsip kontinuitas.

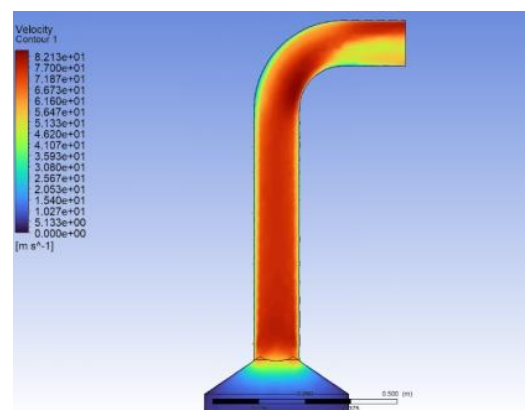
Optimasi geometri dalam penelitian ini difokuskan pada bagian pipa penyalur utama (*inlet pipe*) mesin pengering. Bagian ini

memegang peranan krusial karena geometri dan diameter pipa tersebut secara langsung menentukan karakteristik tekanan, kecepatan dan pola distribusi udara panas sebelum memasuki ruang drum utama pengeringan. Karakteristik aliran udara yang melewati pipa berdiameter 100 mm dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Kontur kecepatan pada *inlet* pipa berdiamater 100 mm

Bagian belokan menunjukkan gradien kecepatan yang sangat tajam. Pada sisi luar tikungan terbentuk zona percepatan, sedangkan pada sisi dalam tampak pola perlambatan fluida. Kondisi ini berpotensi menimbulkan turbulensi lokal atau *secondary flow* yang dapat meningkatkan rugi-rugi tekanan (*pressure loss*). Dari visualisasi kontur terlihat bahwa sebagian besar aliran bersifat turbulen, dengan area stagnasi yang relatif kecil hanya pada bagian inlet yang melebar.

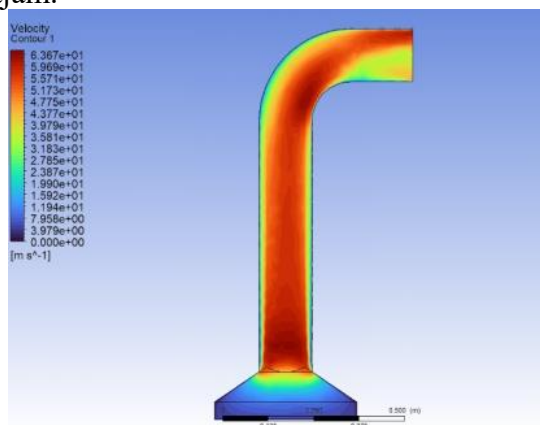


Gambar 3. Kontur kecepatan dengan inlet pipa berdiamater 125 mm

Simulasi kedua menggunakan diameter pipa 125 mm seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Pada variasi ini, kecepatan fluida menurun dibandingkan dengan model pertama, dengan nilai kecepatan tertinggi berada pada kisaran sekitar 82 m/s. Aliran terlihat lebih stabil dan distribusi kecepatan lebih merata di sepanjang pipa.

Walaupun pola percepatan di area tikungan masih terlihat, gradien kecepatan tidak sekuat pada diameter 100 mm. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan diameter dapat mengurangi efek turbulensi dan memperhalus pola aliran. Zona stagnasi pada inlet masih muncul, namun ukurannya lebih kecil dan aliran lebih cepat mencapai kestabilan. Secara keseluruhan, model ini menunjukkan keseimbangan yang lebih baik antara kecepatan aliran dan kestabilan fluida.

Pada konfigurasi ketiga dengan diameter 150 mm, kecepatan fluida mengalami penurunan signifikan, dengan nilai tertinggi sekitar 63 m/s, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Penyebaran kecepatan terlihat jauh lebih homogen dan aliran di tikungan lebih halus tanpa perubahan gradien yang terlalu tajam.



Gambar 4. Kontur kecepatan dengan inlet pipa berdiameter 150 mm

Dengan diameter yang besar, fluida memiliki ruang yang lebih luas untuk bergerak, sehingga energi kinetik aliran berkurang. Meskipun kondisi ini dapat mengurangi turbulensi dan rugi tekanan, kecepatan aliran menjadi lebih rendah dari target desain fluida bertekanan. Area stagnasi pada bagian inlet masih terlihat, tetapi

alirannya cepat menyebar secara merata tanpa pola pusaran yang berlebihan. Perbandingan kinerja ketiga variasi diameter ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi diameter

Diameter (mm)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Turbulensi di Tikungan	Stabilitas Aliran
100	~125	Tinggi	Rendah
125	~82	Sedang	Baik
150	~63	Rendah	Sangat Baik

Berdasarkan hasil komparasi studi parametrik, diameter 125 mm menunjukkan performa aliran yang paling optimal. Dimensi ini dipilih karena mampu menjaga kecepatan udara pengering pada 82 m/s yang merupakan titik keseimbangan terbaik untuk mencegah retensi kelembapan di dalam drum sekaligus mempertahankan distribusi aliran yang stabil tanpa turbulensi berlebihan. Diameter 100 mm menghasilkan kecepatan tertinggi, namun pola aliran cenderung tidak stabil dan berisiko mengalami *pressure drop* yang lebih besar. Sebaliknya, diameter 150 mm memberikan stabilitas yang lebih baik, tetapi kecepatan fluida menjadi terlalu rendah untuk sistem yang membutuhkan efisiensi aliran. Hasil analisis ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Dzul Imran Ismail (2025) yang menyatakan bahwa untuk aplikasi yang memerlukan aliran stabil dengan kerugian energi minimal dan turbulensi, pipa berdiameter lebih besar lebih disarankan. Namun, jika kecepatan aliran yang lebih tinggi diinginkan untuk dinamika fluida tertentu, pipa berdiameter lebih kecil mungkin lebih sesuai.

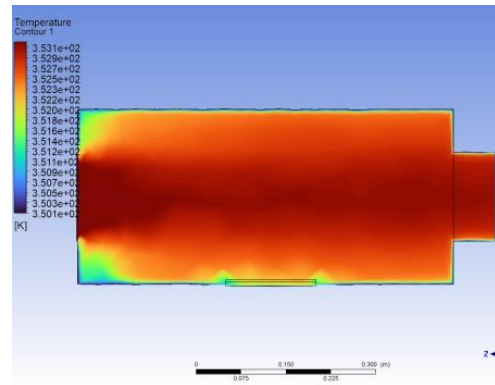
Dengan demikian, diameter 125 mm dipilih sebagai opsi paling ideal karena memberikan keseimbangan terbaik antara kecepatan aliran, efisiensi sistem, dan kestabilan fluida di dalam pipa.

3.2. Analisis Pengaruh Variasi Temperatur

Simulasi menganalisis distribusi temperatur udara panas dalam ruang

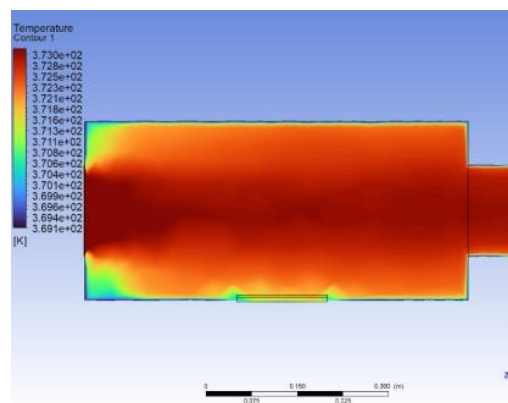
pengering pada tiga variasi temperatur inlet: 80 °C, 100 °C, dan 120 °C. Berbeda dengan analisis sebelumnya yang berfokus pada komponen pipa penyalur, domain komputasi yang ditampilkan pada subbab ini adalah ruang interior tabung pengering (*main drum cylinder*) yang bergerak secara aksial menuju saluran keluar (outlet) di sisi kanan. Fokus pengujian pada domain ini adalah untuk mengamati sebaran panas, uniformitas kontur, serta implikasinya terhadap laju evaporasi. Temuan ini disejajarkan dengan dua jurnal akses terbuka yang relevan: studi CFD–eksperimental pada pengeringan pisang (Mutabilwa & Nwaigwe, 2020) dan pemodelan distribusi temperatur–kadar air pada pengeringan jagung dengan uap panas super (Kimwa et al., 2023). Keduanya menegaskan bahwa peningkatan temperatur udara pengering memperbesar driving force termal, memperluas zona bertemperatur tinggi, dan mempercepat penurunan kadar air, dengan syarat kontrol proses untuk menjaga mutu produk

Pada variasi pertama dengan temperatur udara panas 80 °C (350,1–353,1 K), distribusi temperatur menunjukkan sebaran panas yang terbatas. Panas cenderung terkonsentrasi di bagian tengah ruang pengering, sementara sisi tabung relatif lebih dingin. Laju perpindahan panas (*heat transfer rate*) dalam analisis ini ditinjau berdasarkan perbedaan temperatur antara aliran udara pengering dan asumsi temperatur awal. Berdasarkan hukum pendinginan Newton, selisih temperatur yang kecil pada temperatur *inlet* 80 °C menghasilkan *driving force* yang rendah, sehingga perpindahan panas konvektif ke material berlangsung lambat. Kondisi ini menyebabkan proses evaporasi berlangsung lebih lambat dan tidak merata, sehingga waktu pengeringan menjadi lebih lama. Visualisasi distribusi kontur temperatur pada domain ruang pengering ini ditunjukkan pada Gambar 5. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Mutabilwa dan Nwaigwe (2020), yang melaporkan bahwa pada temperatur rendah, distribusi panas kurang homogen dan laju pengeringan menjadi tidak efisien.



Gambar 5. Kontur temperatur pada temperatur 80 °C

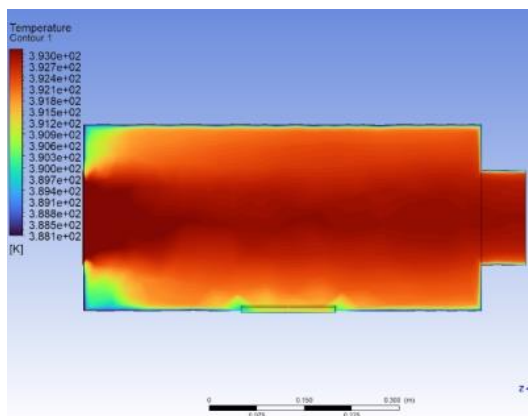
Pada konfigurasi kedua dengan temperatur udara panas 100 °C (369.1–373.0 K), distribusi temperatur mulai menunjukkan perbaikan dibandingkan dengan temperatur 80 °C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Warna kontur yang lebih hangat menyebar ke sisi tabung, menandakan bahwa panas menjangkau area yang lebih luas. Zona stagnasi berkurang dan gradien temperatur lebih halus, sehingga evaporasi air berlangsung lebih efisien dan kualitas pengeringan menjadi lebih konsisten. Hasil ini sesuai dengan penelitian Kimwa et al. (2023), yang menegaskan bahwa peningkatan temperatur pengering meningkatkan jangkauan panas dan mempercepat penurunan kadar air, sekaligus mengurangi ketidakteraturan distribusi temperatur.



Gambar 6. Temperature Contour pada temperatur 100 °C

Pada variasi ketiga dengan temperatur udara panas 120 °C (388.1–393.0 K), kontur temperatur menunjukkan performa termal

yang paling optimal, seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Warna merah mendominasi hampir seluruh volume ruang pengering, menandakan sebaran panas yang sangat merata. Zona dingin hampir tidak terlihat, sehingga evaporasi air berlangsung lebih cepat dan waktu pengeringan menjadi lebih singkat. Kondisi ini sangat ideal untuk sistem pengeringan intensif, meskipun kontrol temperatur tetap diperlukan agar tidak terjadi *over-drying* yang dapat menurunkan kualitas produk. Temuan ini konsisten dengan penelitian Mutabilwa dan Nwaigwe (2020) serta Kimwa et al. (2023), yang menekankan bahwa operasi pada temperatur lebih tinggi meningkatkan laju pengeringan dan keseragaman distribusi temperatur, namun harus diimbangi dengan pengendalian proses untuk menjaga mutu produk.



Gambar 7. Kontur temperatur pada temperatur 120 °C

Tabel 2 menunjukkan perbandingan kinerja tiga variasi temperatur. Berdasarkan hasil simulasi distribusi temperatur dari tiga variasi temperatur udara panas, dapat disimpulkan bahwa temperatur 120 °C merupakan pilihan yang paling optimal untuk proses pengeringan. Pada temperatur ini, kontur temperatur menunjukkan sebaran panas yang sangat merata dengan dominasi warna merah di hampir seluruh volume ruang pengering, menandakan bahwa energi termal mampu menjangkau setiap sisi tabung tanpa menyisakan zona dingin. Kondisi tersebut memungkinkan proses evaporasi air berlangsung lebih cepat dan seragam, sehingga

produk dapat mencapai kadar air yang diinginkan dalam waktu lebih singkat. Dibandingkan dengan temperatur 80 °C yang hanya menghasilkan distribusi panas terbatas di bagian tengah, serta temperatur 100 °C yang mulai menunjukkan perbaikan namun belum sepenuhnya merata, temperatur 120 °C jelas memberikan keunggulan dari sisi efisiensi termal dan kualitas distribusi panas. Temuan ini sejalan dengan penelitian Mutabilwa dan Nwaigwe (2020) serta Kimwa et al. (2023), yang menekankan bahwa peningkatan temperatur udara pengering mempercepat laju pengeringan dan meningkatkan keseragaman distribusi temperatur, meskipun tetap diperlukan pengendalian proses agar tidak terjadi *over-drying* yang dapat menurunkan mutu produk. Dengan demikian, temperatur 120 °C direkomendasikan sebagai konfigurasi terbaik karena mampu memberikan keseimbangan antara kecepatan pengeringan, efisiensi energi, dan kualitas hasil akhir, selama parameter operasi dijaga dengan baik.

Tabel 2. Perbandingan kinerja tiga variasi temperatur

Temperatur udara (°C)	Rentang temperatur (K)	Sebaran panas	Catatan mutu
80	350.1-353.1 K	Terbatas	<i>Thermal driving force</i> rendah (laju perpindahan panas lambat dan tidak merata)
100	369.1-373.0 K	Cukup merata	Baik untuk kontrol mutu
120	388.1-393.0 K	Sangat merata	Sangat Baik Perlu kontrol untuk hindari <i>over-drying</i>

3.3. Analisis Pengaruh Variasi Kecepatan Aliran Fluida

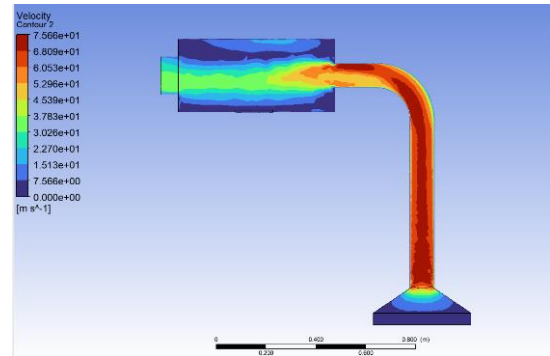
Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan untuk menganalisis distribusi kecepatan fluida di dalam ruang pengering dengan variasi kecepatan inlet sebesar 2 m/s, 5 m/s, dan 8 m/s. Ketiga model

simulasi ini menggunakan geometri ruang pengering dan diameter pipa yang sama, namun dibedakan berdasarkan besaran momentum udara yang disuplai. Variasi 2 m/s ditetapkan sebagai kondisi batas bawah (*baseline*) yang merepresentasikan kecepatan uap panas dari sumber panas konvensional seperti kompor gas atau burner atmosferik. Pengujian pada kecepatan ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas sirkulasi udara saat momentum fluida berada pada titik minimum, sebagaimana pendekatan Amanlou & Zomorodian (2010) dalam menganalisis distribusi udara pada kecepatan rendah di ruang tertutup. Lalu, variasi 5 m/s dan 8 m/s digunakan untuk melihat perbedaan hasil simulasi yang ditunjukkan. Pemilihan dua variasi di atas variasi baseline juga dikarenakan kemungkinan penambahan blower hisap pada mesin yang dapat meningkatkan kecepatan fluida. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk *kontur kecepatan* untuk memvisualisasikan pola aliran, zona percepatan, serta area stagnasi yang terbentuk akibat perbedaan kecepatan masuk.

Pada konfigurasi pertama dengan kecepatan inlet 2 m/s, distribusi aliran menunjukkan pola penyebaran yang relatif lambat saat memasuki ruang drum utama. Nilai kecepatan maksimum yang terukur pada area inlet berada pada kisaran 75 m/s. Karena momentum awal yang rendah, semburan udara (*jet*) mengalami penurunan kecepatan yang drastis begitu lepas dari pipa penyalur. Gambar 8 menunjukkan kontur kecepatan dengan kecepatan inlet sebesar 2 m/s.

Fenomena ini menyebabkan terbentuknya aliran yang kurang bertenaga untuk menjangkau seluruh volume ruang pengering. Sebagaimana prinsip mekanika fluida, kecepatan yang rendah menghasilkan bilangan Reynolds yang lebih kecil. Meskipun aliran bersifat turbulen, momentum fluida yang dihasilkan tidak cukup kuat untuk mempertahankan penetrasi aliran ke seluruh volume drum (Cengel & Ghajar, 2020). Akibatnya, pada sudut-sudut terjauh drum terlihat adanya potensi zona stagnasi (*dead zone*) yang cukup luas. Kondisi ini

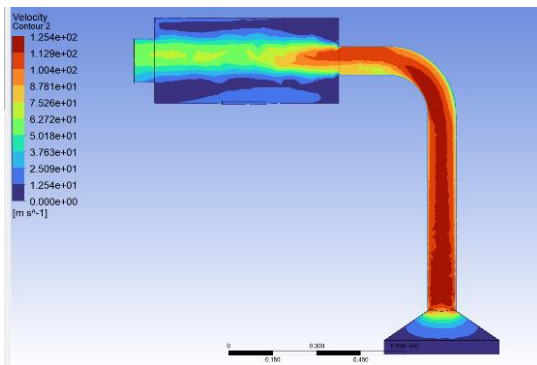
kurang menguntungkan karena dapat menyebabkan proses pengeringan menjadi tidak merata, di mana uap air dari limbah ikan tidak dapat terbawa keluar secara efektif akibat minimnya sirkulasi udara.



Gambar 8. Kontur kecepatan dengan kecepatan *inlet* sebesar 2 m/s

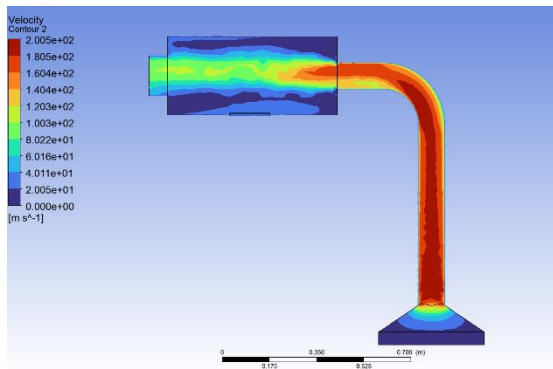
Simulasi kedua dilakukan dengan meningkatkan kecepatan inlet menjadi 5 m/s. Gambar 9 menunjukkan hasil simulasi kontur kecepatan untuk kecepatan inlet sebesar 5 m/s. Pada variasi ini, terlihat peningkatan penetrasi aliran yang signifikan dibandingkan dengan model pertama, dengan nilai kecepatan maksimum mencapai sekitar 125 m/s. Aliran udara terlihat lebih stabil, dengan profil aliran berkecepatan tinggi yang ditunjukkan oleh sebaran kontur berwarna hijau kekuningan pada kisaran 6,2 m/s hingga 7,5 m/s. Kecepatan tersebut konsisten memanjang di sepanjang koridor tengah drum sebelum menyebar secara seragam ke dinding tabung.

Pola aliran pada variasi ini menunjukkan keseimbangan yang baik. Momentum fluida cukup kuat untuk menciptakan turbulensi yang dibutuhkan guna memecah lapisan batas termal pada material, tetapi tidak terlalu ekstrem sehingga aliran udara masih memiliki waktu tinggal (*residence time*) yang cukup di dalam drum. Nilai estimasi waktu tinggal ini didapatkan melalui perhitungan rasio antara panjang ruang pengering dan kecepatan aksial rata-rata udara pengering yang dihasilkan simulasi. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan kecepatan pada level ini mampu meningkatkan efektivitas pencampuran (*mixing*) udara panas tanpa menimbulkan kekacauan aliran yang berlebihan.



Gambar 9. Kontur kecepatan dengan kecepatan inlet sebesar 5 m/s

Pada konfigurasi ketiga dengan kecepatan inlet 8 m/s, karakteristik aliran didominasi oleh efek jet berkecepatan tinggi seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Nilai kecepatan maksimum melonjak hingga kisaran 200 m/s, yang merupakan nilai tertinggi dibandingkan dengan dua variasi lainnya. Semburan udara bergerak lurus dengan kuat menuju dinding seberang drum, dengan penyebaran lateral yang minim pada bagian awal.



Gambar 10. Kontur kecepatan dengan kecepatan inlet sebesar 8 m/s

Meskipun energi kinetik aliran sangat tinggi, kondisi ini justru berpotensi menimbulkan fenomena *channeling* atau jalur pintas, di mana udara panas bergerak terlalu cepat menuju outlet tanpa sempat berinteraksi secara maksimal dengan keseluruhan tumpukan limbah ikan. Kecepatan yang terlalu tinggi ini menyebabkan waktu tinggal udara di dalam drum menjadi sangat singkat (Mujumdar, 2014). Selain itu, gradien kecepatan yang sangat tajam di sekitar dinding pipa berpotensi meningkatkan rugi-rugi

tekanan (*pressure loss*) yang akan membebani kinerja *blower*.

Tabel 3. Perbandingan kinerja tiga variasi kecepatan inlet

Kecepatan Inlet (m/s)	Pola Aliran & Turbulensi	Stabilitas & Waktu Tinggal (Residence Time)	Kesimpulan Kinerja
2 m/s	Lemah, banyak zona stagnasi	Waktu tinggal tinggi, sirkulasi udara (tidak merata)	Kurang Efektif
5 m/s	Stabil, penetrasi aliran seragam	Optimal	Seimbang stabilitas aliran dan waktu kontak termal
8 m/s	Sangat tinggi, efek jet kuat	Rendah, udara lewat terlalu cepat	Tidak Efisien

Tabel 3 menunjukkan perbandingan kinerja ketiga variasi kecepatan inlet. Berdasarkan studi parametrik komparatif pada Tabel 3, variasi kecepatan 5 m/s menunjukkan kinerja aliran yang paling optimal. Penentuan kondisi optimal ini didasarkan pada pertimbangan keseimbangan (*trade-off*) antara profil distribusi kecepatan dan waktu tinggal (*residence time*). Kecepatan 2 m/s dinilai tidak memenuhi kriteria karena memicu stagnasi aliran, sedangkan kecepatan 8 m/s dihindari karena menyebabkan aliran terpusat (*channelling*) yang memperpendek waktu kontak termal. Oleh karena itu, kecepatan 5 m/s dipilih karena mampu mendistribusikan udara panas secara merata ke seluruh ruang drum dengan *residence time* yang lebih memadai untuk proses evaporasi.

Variasi 2 m/s dinilai kurang efektif karena alirannya terlalu lemah untuk mencegah pembentukan zona mati, sedangkan variasi 8 m/s, meskipun memiliki turbulensi tinggi, cenderung kurang efisien karena waktu kontak antara udara panas dan material menjadi terlalu singkat. Dengan demikian, kecepatan 5 m/s dipilih sebagai parameter

desain yang paling ideal karena memberikan keseimbangan terbaik antara efisiensi perpindahan panas, distribusi aliran, dan waktu operasional pengeringan.

4. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan analisis numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada mesin pengering limbah kepala ikan, diperoleh bahwa geometri pipa penyalur, temperatur inlet, dan kecepatan aliran udara berpengaruh signifikan terhadap kinerja termal dan aliran fluida. Diameter pipa 125 mm menunjukkan performa aliran yang paling baik, temperatur inlet 120°C memberikan distribusi panas yang paling merata, dan kecepatan aliran 5 m/s menghasilkan keseimbangan optimal antara distribusi panas dan waktu tinggal aliran. Secara keseluruhan, kombinasi parameter tersebut direkomendasikan sebagai konfigurasi desain terbaik untuk meningkatkan efisiensi energi dan kualitas proses pengeringan.

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya dan penyempurnaan desain mesin pengering ini, disarankan untuk melakukan validasi eksperimental dengan membuat purwarupa (prototype) fisik berdasarkan parameter optimal yang ditemukan (diameter 125 mm, 120°C, 5 m/s) guna memverifikasi hasil simulasi numerik dengan data riil di lapangan. Lalu mengembangkan simulasi yang lebih kompleks dengan melibatkan pemodelan *multiphase* (fasa jamak) untuk menganalisis perpindahan massa (pengurangan kadar air) dari limbah ikan secara spesifik, bukan hanya aliran udara panasnya. Serta menerapkan sistem kontrol otomatis berbasis PID atau mikrokontroler untuk menjaga kestabilan temperatur pada 120°C, mengingat fluktuasi temperatur yang berlebihan dapat merusak kandungan protein dalam tepung ikan.

Daftar Pustaka

Alkindi, M., Setyawan, E. Y., & Sutjahjo, D. H. (2018). Analisis Laju Aliran Udara Pada Alat Pengering Kerupuk Kempang Tipe Rak Menggunakan *Computational*

Fluid Dynamics (CFD). *Jurnal Rekayasa Mesin*, 13(1), 1-8.

Amanlou, Y., & Zomorodian, A. (2010). Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. *Journal of Food Engineering*, 101(1), 8-15.

Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* (6th ed.). New York: McGraw-Hill Education.

Defraeye, T. (2014). Advanced computational modelling for drying processes – A review. *Applied Energy*, 131, 323-344.

Erlambang, V., Adeyani, N. P., Broto, R. T. W., & Arifan, F. (2022). Edukasi Pemanfaatan Limbah Perikanan Pada Pembuatan Tepung Ikan di Desa Karya Makmur. *Inisiatif: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(1), 67-70.

Herman. (2025). *Rancang Bangun Mesin Pengering Limbah Kepala Ikan Tipe Rotary Drum*. Laporan Tugas Akhir. Pekanbaru: Politeknik Caltex Riau.

Huda, F., & Alexandro, G. (2022). Analisis Getaran untuk Mendeteksi Kerusakan Bearing pada Drum Cylinder Dryer 1 Area Paper Machine-5. *Jurnal Teknik Mesin*, 1(1), 1-9.

Jangam, S. V., Law, C. L., & Mujumdar, A. S. (2010). *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*. Singapore: National University of Singapore.

Kimwa, S., et al. (2023). Computational modeling of spatial variation in moisture content and temperature distribution in corn at different superheated steam temperatures. *Cogent Engineering*, 10(1), 2216864.

Mahargiani, M., & Yulistiani, R. (2022). Pemanfaatan Limbah Tulang Ikan Tenggiri Sebagai Tepung Sumber Kalsium Dengan Metode Basa. *Jurnal Teknologi Pangan*, 14(1), 12-20.

Mujumdar, A. S. (Ed.). (2014). *Handbook of Industrial Drying* (4th ed.). Boca Raton: CRC Press.

Mutabilwa, P. X., & Nwaigwe, K. N. (2020). Experimental evaluation of drying of banana using a double-pass solar

collector (DPSC) and theoretical analysis using a CFD model. *Cogent Engineering*, 7(1), 1789363.

- Swastawati, F., Boesono, H., & Susanto, E. (2020). Penerapan Teknologi Asap Cair pada Pengolahan Ikan Asap di Sentra Pengasapan Ikan. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, 9(1), 1-6.
- Syani, I., & Hastuti, H. (2021). Rancang Bangun Alat Pengering Ikan Teri Mandiri Otomatis Berbasis Arduino Uno. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 2(2), 136-141.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2nd ed.). Pearson Education.
- Yuliana, P., & Hardi, S. (2023). Performansi Mesin Pengering Tipe Rotary Dryer pada Pengeringan Jagung. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 12(1), 45-54.