

*Diterbitkan Oleh Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Pelita Harapan*



UPH

UNIVERSITAS PELITA HARAPAN



sinta

Science and Technology Index



9 772598 959008

EDITORIAL TEAM

Pimpinan Redaksi [*Editor in Chief*]

1. Prof. Dr. Ir. Melanie Cornelia, M.T.
2. Prof. Dr. Henri P. Uranus
3. Dr. Ing-. Ihan Martoyo

Dewan Redaksi [*Editorial Board*]

1. Prof. Dr. Ir. Wiryanto Dewobroto, M.T.
2. Prof. Dr. Ir. Adolf Parhusip, M.Si
3. Prof. Dr. A'azokhi Waruwu, S.T., M.T.
4. Eric Jobiliong, Ph.D.
5. Dr. Nuri Arum Anugrahati, S.Si., M.P.
6. Prof. Dr. Hardoko
7. Prof. Dr.-Ing. Aziz Boing Sitanggang, S.TP, M.Sc.
8. Dr. Satya Nugroho
9. Prof. Dr.-Ing. Amalia Suzianti, S.T., M.Sc.
10. Dr. Ir. Lukas, MAI., CISA., IPM.

Staff Redaksi [*Editorial Staff*]

1. Priskila Christine Rahayu, S.Si., M.T.
2. Julinda Pangaribuan, S.Si., M.T.
3. Gracio A. Rhizma, M.T.
4. Verel Salomo Ulyano Simatupang, S.T.

Administrasi dan Keuangan [*Administration and Finance*]

1. Adelia Lorenza Br. Peranginangin, S.Pd., B.Ed.

DAFTAR ISI

1. Memanfaatkan R untuk Preprocessing Data yang Efisien dalam Analisis Prediktif [Leveraging R for Efficient Data Preprocessing in Predictive Analytics]. Oleh: I Gusti Agung Anom Yudistira..... 128-142
2. Rancang Bangun Alat Pengiris Singkong dengan Metode Quality Function Deployment (QFD) [Design and Development of a Cassava Slicing Tool using Quality Function Deployment (QFD) Method]. Oleh: Jessica Theresia, Agustina Christiani 143-156
3. Karakteristik Fermentasi Kitin dari Kulit Udang Windu (*Penaeus monodon*) dengan Kapang *Trichoderma virens* [Characteristics of Chitin Fermentation from Black Tiger Shrimp (*Penaeus monodon*) using *Trichoderma virens*]. Oleh: Gerardo Kevin Liguna, Ratna Handayani..... 157-165
4. Perancangan dan Implementasi Electronic TPM (E-TPM) Berbasis Website dengan QR Code pada Mesin Tire Final Inspection di PT XYZ [Design and Implementation of a Website-Based Electronic TPM (E-TPM) with QR Codes on The Tire Final Inspection Machine at PT XYZ]. Oleh: Rahardyan Rachman, Rudy Vernando Silalahi 166-174
5. Fermentation Using *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica* to Produce N-Acetylglucosamine from Shrimp Shells' Chitin. Oleh: Yuniwaty Halim, Nabilah binti Chanan Din, Lucia C. Soedirga. 175-189
6. The Role of Geopolymer Concrete in Achieving Sustainable Development Goals. Oleh: Kevin Aprilio Wibowo, Jack Widjajakusuma 190-198
7. Optimasi Formula Balsam Stik Minyak Atsiri Lengkuas (*Alpinia galanga* (L.) Willd.) [Optimization of Galangal (*Alpinia galanga* (L.) Willd.) Essential Oil Stick Balsam Formula]. Oleh: Ernestine Arianditha Pranasti, Nurista Dida Ayuningtyas, Anastasia S. Pramitaningastuti, Gabriella Lisye Cahaya... 199-208
8. Pengaruh Penambahan Ekstrak Kulit Buah Naga terhadap Karakteristik Fisikokimia, Aktivitas Antioksidan, dan Sensori Permen Jeli Glukomanan Konjak [The Impact of Dragon Fruit Peel Extract Addition on The Physicochemical Properties, Antioxidant Activity, and Sensory Attributes of Konjac Glucomannan Jelly Candy]. Oleh: Wiwit Amrinola, Hanandhiya Sekarningrum 209-225
9. Rancang Bangun Prototipe Sistem Keamanan Rumah Berbasis Internet Of Things (IoT) dengan Integrasi Sensor Pintar [Design and Construction of an Internet of Things (IoT)-Based Home Security System Prototype with Smart Sensor Integration]. Oleh: Zainal Abidin, Affan Bachri, Rizky Ananda Nugraha 226-235
10. Analisis Keamanan Kunci-Pintu Nirkabel Mobil dengan Software Defined Radio (SDR) [Analysis of Wireless Car-Key Security with Software Defined Radio (SDR)]. Oleh: Hadipranowo Hartanto, Ihan Martoyo..... 236-244
11. High-Reliability Teams at Sea: The Role of Psychological Safety, Human–System Interaction, and Workload in Error Reporting Behavior among Offshore Workers. Oleh: Chrysan Gomargana, Kevin Aprilio Wibowo, Jack Widjajakusuma 245-260
12. Analisis dan Pengendalian Produk Cacat pada Produk Rubber Clutch Damper dengan Pendekatan DMAIC [DMAIC Based Approach for Analyzing and Controlling Defective Product in Rubber Clutch Damper Product]. Oleh: Tegar Tandika, Christopher Nata, Priskila Christine Rahayu 261-274

Memanfaatkan R untuk Preprocessing Data yang Efisien dalam Analisis Prediktif

[Leveraging R for Efficient Data Preprocessing in Predictive Analytics]

I Gusti Agung Anom Yudistira^{1*}

¹Departemen Statistika, Universitas Bina Nusantara, Jl. K H. Syahdan No. 9, Kelurahan Kemanggisan, Kecamatan Palmerah, Jakarta Barat 11480

*Korespondensi penulis: i.yudistira@binus.ac.id

ABSTRACT

The digital era has triggered a data explosion that demands efficient preprocessing capabilities. The R programming language, supported by a wide array of packages, offers effective solutions for data preprocessing, particularly in handling missing values. This study aims to demonstrate the use of R to improve the quality of predictive models and provide practical guidance for academics and practitioners. A descriptive-exploratory methodology is employed through a case study involving data preprocessing in R. The workflow includes data collection, cleaning and transformation, result visualization, and step-by-step documentation as a practical guide. In this study, simulated data were constructed by taking clean big data and then artificially injecting missing values using the R package messy. The imputation process begins with analyzing variable correlations and distributions using scatter plot matrices and histograms, followed by selecting appropriate imputation methods such as linear regression, mean, or median. R facilitates this process through comprehensive functions and visualizations. Evaluation is conducted by comparing the distribution patterns of the original data and the cleaned simulated data. The results indicate that both datasets exhibit statistically similar distribution shapes, suggesting that the imputation methods preserve the original data characteristics effectively..

Keywords : Data mining; Data preprocessing; Predictive analysis; R programming.

ABSTRAK

Era digital menghasilkan ledakan data yang menuntut kemampuan preprocessing data yang efisien. Bahasa R, dengan berbagai paket pendukungnya, menawarkan solusi efektif untuk preprocessing, khususnya dalam penanganan missing values. Penelitian ini bertujuan mendemonstrasikan pemanfaatan R untuk meningkatkan kualitas model prediktif dan memberikan panduan praktis bagi akademisi serta praktisi. Metodologi yang digunakan dalam penelitian adalah metode deskriptif eksploratif dengan studi kasus menggunakan R untuk preprocessing data. Tahapannya meliputi pengumpulan data, pembersihan dan transformasi data, visualisasi hasil, serta dokumentasi langkah-langkah sebagai panduan praktis. Pada penelitian ini dilakukan percobaan dengan membangun data simulasi, yang dihasilkan dari data besar yang sudah bersih, kemudian dibuat menjadi data yang tidak lengkap dengan memanfaatkan paket R **messy**. Proses imputasi data dengan R dimulai dari analisis korelasi dan distribusi variabel menggunakan *scatter plot matrix* dan histogram, memilih metode imputasi yang sesuai seperti regresi linear, rata-rata, atau median. R memudahkan proses ini lewat fungsi dan visualisasi yang lengkap. Hasil evaluasi dilakukan dengan membandingkan bentuk sebaran data asli, dengan data simulasi yang telah dibersihkan. Hasil yang diberikan menunjukkan bahwa kedua data memberikan bentuk sebaran yang tidak signifikan.

Kata kunci : Analisis prediktif; Data mining; Data praprocessing.; R programming

PENDAHULUAN

Dalam era digital yang ditandai dengan maraknya transaksi melalui internet dan menjamurnya konten-konten sosial media, menimbulkan ledakan data (Rahmah et al. 2025). Sehingga kemampuan untuk mengolah dan meng-analisis data secara efisien menjadi semakin penting (Reyhan et al., 2024). Salah satu tahapan krusial dalam analisis data adalah prapemrosesan data, yaitu proses pembersihan, transformasi, dan penyiapan data sebelum digunakan dalam model prediktif (Daniswara & Nuryana, 2023). Tahapan ini sangat menentukan kualitas hasil analisis, terutama dalam konteks *machine learning* dan *data mining*.

Bahasa pemrograman R dikenal luas di kalangan akademisi dan praktisi data karena kemampuannya yang kuat dalam manipulasi data, visualisasi, dan analisis statistik (Pavlenko et al., 2022). Dengan dukungan berbagai paket seperti *dplyr*, *tidyr*, dan *caret*, R menyediakan pendekatan yang fleksibel dan efisien untuk melakukan prapemrosesan data. Namun, masih banyak pengguna yang belum memanfaatkan potensi R secara optimal dalam tahap ini (Hirsch, 2023). Penanganan data hilang (*missing value*), merupakan masalah penting dalam prapemrosesan data.

Masalah yang ingin diangkat dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut: Bagaimana efektivitas metode imputasi berbasis R dalam mempertahankan karakteristik distribusi data setelah proses pembersihan dibandingkan dengan data asli?

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, tujuan penelitian adalah sebagai berikut: 1) Mendokumentasikan kode R, yang dapat dimanfaatkan secara praktis dan efisien dalam prapemrosesan data khususnya untuk melakukan pembersihan data, dalam hal ini menangani *missing values*. 2) Mendemonstrasikan langkah-langkah prapemrosesan data menggunakan R untuk meningkatkan akurasi model prediktif.

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

- a) Menyediakan panduan praktis bagi akademisi dan praktisi dalam menggunakan R untuk preprocessing data.
- b) Meningkatkan efisiensi dan kualitas proses analisis prediktif melalui penerapan teknik prapemrosesan yang tepat.
- c) Mendorong pemanfaatan R sebagai alat bantu utama dalam pengolahan data di berbagai bidang aplikasi, khususnya pendidikan dan riset.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Penelitian ini menggunakan perangkat lunak dan data sebagai bahan utama dalam pengolahan prapemrosesan dan analisis prediktif. Adapun bahan dan alat yang digunakan adalah sebagai berikut:

Perangkat Lunak:

- a) R versi: 4.5.1
- b) RStudio sebagai lingkungan pengembangan
- c) Paket R yang digunakan: `tidyverse` dan `messy`.

Data

- a) Dataset publik yang tersedia secara bebas untuk keperluan pembelajaran dan eksperimen analisis data. Sumber data diperoleh dari sumber publik yaitu, *Kaggle*: platform berbagi dataset dan kompetisi data science. <https://www.kaggle.com/>
- b) Dataset yang digunakan bersifat tabular, mencakup variabel numerik dan kategorikal, serta dipilih berdasarkan kesesuaian dengan tujuan analisis prediktif dan kebutuhan prapemrosesan.

Perangkat Keras:

- a) Laptop / PC dengan spesifikasi minimum: prosesor Intel i5, RAM 8 GB, dan sistem operasi Windows 11.

Metode Penelitian

Penelitian ini bersifat deskriptif-eksploratif dengan pendekatan studi kasus. Tujuannya adalah untuk mengevaluasi efektivitas metode imputasi berbasis R dalam mempertahankan karakteristik distribusi data asli setelah proses pembersihan.

Eksplorasi dilakukan untuk mengukur:

- a) Efisiensi: seberapa cepat dan praktis metode dapat diterapkan.
- b) Akurasi: sejauh mana hasil imputasi mendekati data asli.
- c) Stabilitas: konsistensi hasil terhadap variasi data yang hilang.

Langkah-langkah Penelitian:

1. Pengumpulan Data: Dataset publik dari Kaggle digunakan sebagai data bersih awal / asli.
2. Simulasi *Missing Values*: Data bersih diubah menjadi tidak lengkap menggunakan paket `messy`.
3. Imputasi Data: Dilakukan dengan tiga pendekatan yaitu *mean*, *median*, regresi linear, sesuai karakteristik variabel.
4. Evaluasi Hasil: Dibandingkan distribusi dan statistik deskriptif antara data asli dan data hasil imputasi.
5. Visualisasi: Histogram dan scatter plot digunakan untuk menunjukkan perubahan distribusi dan hubungan antar variabel.

Setiap langkah dicatat dan dijelaskan secara sistematis untuk membentuk panduan praktis bagi pengguna R dalam prapemrosesan data, khususnya imputasi data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pendekatan R dalam prapemrosesan data dinilai lebih efisien dan fleksibel dibandingkan perangkat lunak lain seperti SPSS, Excel, dan Python, terutama untuk kebutuhan akademik dan pembelajaran. Dengan ekosistem paket terbuka seperti tidyverse, caret, dan messy, R mendukung manipulasi data, visualisasi, dan imputasi secara terintegrasi. Keunggulan sintaks statistik yang ringkas dan visualisasi berbasis ggplot2 menjadikan R pilihan ideal untuk studi eksploratif, replikatif, dan pedagogis di lingkungan pendidikan tinggi dan riset terbuka. Berikut ini adalah tahapan-tahapan imputasi data dengan menggunakan R (Hirsch, 2023).

Penyiapan Data

Dataset “Student Performance.csv” diunduh pada link [Student Performance Dataset](#), yang tersedia pada laman kaggle.com yang di bagikan oleh Ghulam Muhammad Nabeel, dan diperbarui terakhir bulan Agustus 2025. Penelitian yang juga berkaitan dengan dataset “student performance” dilakukan oleh Hasan, R., et al. (2021). Dataset ini berisi 1.000.000 baris data kinerja siswa yang

realistis, dirancang khusus untuk pemula dalam bidang Machine Learning untuk berlatih regresi linear, pelatihan model, dan teknik evaluasi. Variabel-variabel data tersebut adalah: 1) `student_id`; 2) `weekly_self_study_hours`; 3) `attendance_percentage`; 4) `class_participation`; 5) `total_score`; dan 6) `grade`. Data ini terstruktur dan sudah bersih, tetapi untuk tujuan penelitian, data tersebut dibuat menjadi tidak lengkap (mengandung data hilang), yaitu dengan menggunakan paket `messy` (Rennie & Davison, 2025).

Pertama-tama data asli dibaca dan dimuat ke R. Kode R untuk membaca data asli diberikan oleh Gambar 1 berikut ini:

```
> student <- read.csv("student_performance.csv")  
> dim(student)  
[1] 1000000      6
```

Gambar 1. Penyiapan data

Gambar 1 memperlihatkan perintah R dibedakan dengan luarannya berdasarkan warna. Warna biru adalah perintah R dan luarannya berwarna hitam. File data dengan format .csv yang diunduh dari *kaggle.com*. File ini dibaca dengan fungsi `read.csv`, kemudian disimpan pada objek dengan nama `student`. Fungsi `dim()` memberikan ukuran baris dan kolom dari dataset `student`, yaitu 1000000 x 6. Dataset `student` adalah data yang sudah bersih, akan tetapi untuk tujuan penelitian ini, data tersebut kemudian dibuat menjadi

tidak lengkap. Data ini dinamakan dengan data simulasi. Berbasis data simulasi ini kemudian dilakukan berbagai percobaan pembersihan data, dengan berbagai teknik yang ada. Kemudian kode R dibuat dan didokumentasikan, yang berguna untuk panduan pada pekerjaan serupa kedepannya. Data yang telah dibersihkan ini akan dibandingkan dengan data `student` yang asli. Gambar 2 berikut adalah kode R untuk proses pembangkitan data simulasi dengan menggunakan paket `messy`.

```
> library(messy)
> stud_dirt <- student |>
+ make_missing(cols= c("attendance_percentage"), messiness = 0.1) |>
+ make_missing(cols= c("class_participation"), messiness = 0.07) |>
+ make_missing(cols= c("weekly_self_study_hours"), messiness = 0.02)
```

Gambar 2. Penambahan nilai NA pada dataset `student`

Pembersihan Data – Mengatasi *Missing Value*

Gambar 2 adalah kode R untuk menghasilkan dataset baru dengan nama `stud_dirt`. Data set ini mengandung nilai NA pada tiga variabelnya, yaitu `weekly_self_study_hours`, nilai NA muncul secara acak sebanyak 0.2% dari keseluruhan datanya, `attendance_percentage` sebanyak 10% dan `class_participation`, sebanyak 0.7%. Proses ini dibangkitkan dengan menggunakan fungsi `make_missing`, yang disediakan oleh paket `messy`.

```
> summary(stud_dirt)
 student_id      weekly_self_study_hours  attendance_percentage
Min.   : 1      Min.   : 0.00             Min.   : 50.00
1st Qu.: 250001  1st Qu.:10.30             1st Qu.: 78.30
Median : 500001  Median :15.00             Median : 85.00
Mean   : 500001  Mean   :15.03             Mean   : 84.71
3rd Qu.: 750000  3rd Qu.:19.70             3rd Qu.: 91.80
Max.   :1000000  Max.   :40.00             Max.   :100.00
        NA's :19993 ✓      NA's :100219 ✓
class_participation  total_score      grade
Min.   : 0.000      Min.   : 9.40             Length:1000000
1st Qu.: 4.700      1st Qu.: 73.90           Class :character
Median : 6.000      Median : 87.50           Mode  :character
Mean   : 5.985      Mean   : 84.28
3rd Qu.: 7.300      3rd Qu.:100.00
Max.   :10.000     Max.   :100.00
NA's   :69662 ✓
```

Gambar3. Ringkasan Statistik untuk dataset `stud_dirt`.

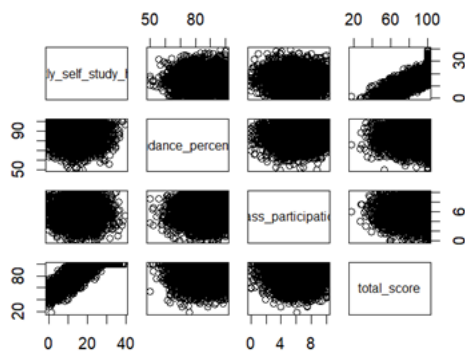
Sebelum penanganan *missing value* dilakukan, maka proses identifikasi terhadap nilai NA tersebut dilakukan dengan menggunakan perintah `summary()` (Hudiburgh & Garbinsky, 2020). Hasil luarannya diperlihatkan oleh Gambar 3 (tanda centang merah). Selanjutnya diperiksa hubungan korelasi diantara variabel-variabel pada dataset `stud_dirt`. Hal ini ditampilkan dengan *scatter plot matrix*, menggunakan fungsi `pairs` (Emerson et al., 2013). Oleh karena ukuran dataset yang cukup besar (1.000.000 x 6). Proses yang dilakukan fungsi `pairs` secara langsung, bisa memakan waktu yang lama. Untuk mengatasi hal itu, Sebaiknya dilakukan pengambilan sampel acak sebesar 5.000 baris saja, tanpa kehilangan informasi mengenai trend hubungan korelasional diantara variabel-variabel tersebut. Prosesnya adalah sebagai berikut,

```
> set.seed(123) # agar hasil sampling konsisten
> id <- sample(stud_dirt$student_id, size = 5000)
> student_smp <- stud_dirt[sort(id),]
> dim(student_smp)
[1] 5000 6
```

Gambar 4. Kode R pengambilan sampel berukuran 5000 baris dari dataset `stud_dirt`

Gambar 4 menunjukkan proses pengambilan sampel acak, dengan menggunakan fungsi `sample()`. Dataset hasil pengambilan sampel ini disimpan di objek R dengan nama `student_smp`. Dimensi sampel yang diperoleh diberikan oleh fungsi `dim()`. Selanjutnya berbasis data `student_smp` ini dibangun *scatter plot matrix*. Kode R dan grafiknya diberikan oleh Gambar 5.

```
> pairs(student_smp[, -c(1,6)]
```



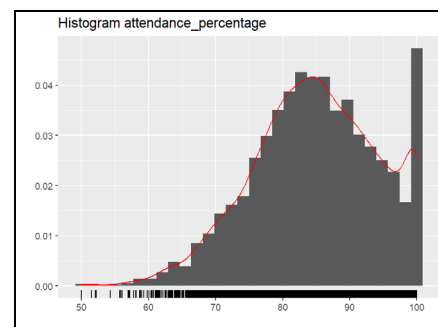
Gambar 5. *Scatter Plot Matrix*, diperoleh dengan menggunakan fungsi `pairs()`

Gambar 5 mengindikasikan bahwa ketiga variabel `weekly_self_study_hours`, `attendance_percentage` dan `class_participation`, tidak saling berkorelasi. Variabel `total_score` dan `weekly_self_study_hours`, nampaknya berkorelasi cukup kuat dan positif. Jadi bisa diindikasikan bahwa *missing value* pada variabel `weekly_self_study_hours` dapat diduga nilainya dengan menggunakan variabel `total_score`. Variabel-variabel `attendance_percentage` dan

`class_participation`, nilai *missing value* nya dapat diduga dengan nilai sentralnya (media atau rata-rata) (Lin & Tsai, 2020). Sebelum itu semua diputuskan, dilakukan pemeriksaan bentuk sebarannya terlebih dahulu, melalui histogram kedua variabel, apakah simetrik normal atau menjulur (Ochieng'Odhiambo, 2020).

```
> library(tidyverse)
> ggplot(student_smp, aes(x=attendance_percentage)) +
+ geom_histogram(aes(y=..density..)) +
+ geom_density(color="red") + geom_rug() +
+ ggtitle("Histogram attendance_percentage") +
+ xlab("") + ylab("")
+ stat_bin() using `bins = 30`. Pick better value `binwidth`.
```

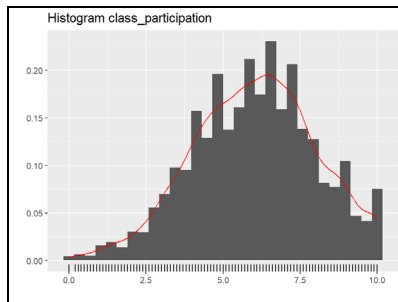
Gambar 6. Kode R untuk menampilkan histogram variabel `attendance_percentage`



Gambar 7. Histogram variabel `attendance_percentage`

Histogram yang ditampilkan oleh Gambar 7, adalah luaran dari kode R yang ada pada Gambar 6. Histogram dari kode R Gambar 6, menggunakan paket `ggplot2` yang digabungkan oleh paket `tidyverse`, dengan paket-paket lain. Untuk menampilkan histogram variabel `class_participation`, menggunakan kode R yang sama (Gambar 6), tetapi dengan mengganti variabelnya dengan

class_participation. Histogramnya ditunjukkan oleh Gambar 8 berikut ini.



Gambar 8. Histogram variabel class_participation

Histogram untuk variabel attendance_percentage, nampak menjulur ke kiri (Gambar 7). Oleh karena itu lebih tepat melakukan imputasi nilai NA pada variabel ini, dengan menggunakan nilai mediannya. Histogram variabel class_participation (Gambar 9) lebih simetrik dan berbentuk lonceng. Jadi untuk variabel class_participation dapat menggunakan rata-rata (*mean*) atau median sebagai pilihan dalam imputasi *missing value*. Dataset stud_dirt memiliki empat variabel reguler, sehingga apabila terdapat baris dengan minimal 2 variabel dengan *missing value* (lebih dari 20%), maka sebaiknya baris tersebut dihilangkan saja. Akan tetapi harus dilakukan dengan hati-hati, dengan tetap memperhatikan berapa besar (persentase) observasi (baris) yang dihilangkan (sebaiknya kurang dari 5%). Perhatikan kode R Gambar 9 di bawah ini, yaitu untuk melakukan tahapan-tahapan tersebut.

```
> sumNA <- apply(stud_dirt, 1, function(x) sum(is.na(x)))
> sum(sumNA >= 2)/nrow(stud_dirt) * 100
[1] 1.0125
```

Gambar 9. Kode R untuk menghitung jumlah *missing value* setiap baris persentasenya

Kode R pada Gambar 9, memperlihatkan penggunaan fungsi *apply* untuk menghitung jumlah *missing value* pada setiap baris. Ternyata jumlah baris dengan dua atau lebih NA adalah 1,0125%. Oleh karena persentase baris dengan nilai NA kurang dari 20%, maka bisa dihilangkan dari dataset, tanpa mengganggu sebaran data secara keseluruhan. Proses selanjutnya adalah memangkas dataset stud_dirt tersebut, sehingga yang tinggal adalah baris-baris dengan maksimal satu nilai NA. Gambar 10 berikut ini memberikan kode R untuk melakukan hal tersebut.

```
> nax <- which(sumNA >= 2)
> stud_dirt1 <- stud_dirt[-nax,]; dim(stud_dirt1)
[1] 989875 6
> summary(stud_dirt1)
 student_id weekly_self_study_hours attendance_percentage
Min. : 1 Min. : 0.00 Min. : 50.00
1st Qu.: 250006 1st Qu.:10.30 1st Qu.: 78.30
Median : 499993 Median :15.00 Median : 85.00
Mean : 499994 Mean :15.03 Mean : 84.71
3rd Qu.: 750023 3rd Qu.:19.70 3rd Qu.: 91.70
Max. :1000000 Max. :40.00 Max. :100.00
NA's :16786 NA's :90961
 class_participation total_score grade
Min. : 0.000 Min. : 9.40 Length:989875
1st Qu.: 4.700 1st Qu.: 73.90 Class :character
Median : 6.000 Median : 87.50 Mode :character
Mean : 5.985 Mean : 84.28
3rd Qu.: 7.300 3rd Qu.:100.00
Max. :10.000 Max. :100.00
NA's :61936
```

Gambar 10. Kode R untuk memangkas baris-baris dengan jumlah nilai NA maksimal satu per baris.

Kode R pada Gambar 10 ini merupakan kelanjutan dari kode R Gambar 9. Fungsi *which(sumNA >= 2)*, akan memberikan nomor-nomor baris, dengan jumlah NA lebih atau sama dengan 2, dan disimpan pada objek *nax*. Perintah

`stud_dirt[-nax,]` akan menghilangkan baris-baris dengan nilai NA lebih atau sama dengan 2. Dataset yang baru ini, disimpan pada objek `stud_dirt1`. Terlihat juga pada Gambar 10 bahwa dimensi dari dataset `stud_dirt1` adalah 989.875×6 . Jadi ukuran baris berkurang sebesar $1.000.000 - 989.875 = 10125$. Langkah selanjutnya adalah mengisi nilai-nilai NA untuk variabel-variabel `attendance_percentage` dan `class_participation`. Langkah-langkah Kode R ditunjukkan oleh Gambar 11 berikut ini:

```
> stud_dirt1[is.na(stud_dirt1$attendance_percentage),
+ "attendance_percentage"] <- median(stud_dirt1$attendance_percentage,
+ na.rm=T)
> stud_dirt1[is.na(stud_dirt1$class_participation),
+ "class_participation"] <- mean(stud_dirt1$class_participation,
+ na.rm=T)
> summary(stud_dirt1)
  student_id weekly_self_study_hours attendance_percentage
Min. : 1 Min. : 0.00 Min. : 50.00
1st Qu.: 250006 1st Qu.:10.30 1st Qu.: 79.00
Median : 499993 Median :15.00 Median : 85.00
Mean : 499994 Mean :15.03 Mean : 84.74
3rd Qu.: 750023 3rd Qu.:19.70 3rd Qu.: 91.00
Max. :1000000 Max. :40.00 Max. :100.00
NA's :16786
 class_participation total_score grade
Min. : 0.000 Min. : 9.40 Length:989875
1st Qu.: 4.800 1st Qu.: 73.90 Class :character
Median : 5.985 Median : 87.50 Mode :character
Mean : 5.985 Mean : 84.28
3rd Qu.: 7.200 3rd Qu.:100.00
Max. :10.000 Max. :100.00
```

Gambar 11. Pendugaan nilai NA pada variabel `attendance_percentage` dan `class_participation`.

Gambar 11 menunjukkan langkah-langkah kode R untuk mengisi nilai NA, dengan menggunakan nilai tengahnya yaitu median untuk variabel `attendance_percentage` dan `mean` untuk variabel `class_participation`. Sehingga variabel yang belum terisi nilai NA adalah `weekly_self_study_hours`. Variabel terakhir ini, sebagaimana ditunjukkan oleh

grafik *scatter plot matrix* (Gambar 5), memiliki hubungan korelasional yang kuat dengan variabel `total_score`. Nilai korelasi kedua variabel ini diperoleh melalui kode R berikut:

```
> ind <- which(!is.na(stud_dirt1$weekly_self_study_hours))
> cor(stud_dirt1$weekly_self_study_hours[ind],
+ stud_dirt1$total_score[ind])
[1] 0.8121923
```

Gambar 12. Koefisien korelasi antara variabel `weekly_self_study_hours` dan `total_score`.

Gambar 12 memperlihatkan bahwa nilai korelasi antara variabel `weekly_self_study_hours` dan `total_score`, adalah 0.8121923. Nilai korelasi yang sangat kuat ini, mengindikasikan bahwa, nilai-nilai NA pada variabel `weekly_self_study_hours` dapat diduga dari variabel `total_score`, dengan menggunakan model regresi linear (Ochieng'Odhiambo, 2020). Kode R untuk mendapatkan model regresi linear dugaan, diberikan oleh Gambar 13 di bawah ini:

```
> model <- lm(weekly_self_study_hours[ind] ~ total_score[ind],
+ data = stud_dirt1)
> summary(model)

Call:
lm(formula = weekly_self_study_hours[ind] ~ total_score[ind],
    data = stud_dirt1)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-16.9739  -2.7186  -0.1496   2.4903  19.2642

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -1.557e+01  2.265e-02  -687.4  <2e-16 ***
total_score[ind]  3.631e-01  2.644e-04  1373.3  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 4.025 on 973087 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6597,    Adjusted R-squared:  0.6597
F-statistic: 1.886e+06 on 1 and 973087 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Gambar 13. Model regresi linear dugaan antara variabel

weekly_self_study_hours dan total_score.

Gambar 13 memberikan hubungan regresi antara weekly_self_study_hours, yang bertindak sebagai variabel tidak bebas dan total_score yang bertindak sebagai variabel bebas (Cook & Weisberg, 2009). Variabel weekly_self_study_hours, bertindak sebagai variabel tidak bebas, karena merupakan variabel yang akan diduga nilainya. Objek ind merujuk pada nomor-nomor baris, dimana nilai-nilai variabel weekly_self_study_hours tidak mengandung NA. Selanjutnya Gambar 14 berikut, adalah proses pendugaan nilai NA untuk variabel weekly_self_study_hours. Pertama-tama dicari nilai dugaan untuk *intercept* dan *slope* model regresi tersebut.

```
> intercept <- coef(model)[1]; slope <- coef(model)[2]
> c(intercept, slope)
      (Intercept) total_score[ind]
      -15.5734113      0.3630923
```

Gambar 14. *Intercept* dan *Slope* untuk garis regresi dugaan.

Pada Gambar 14 diperoleh *intercept*=-15.5734113 dan *slope*=0.3630923. Sehingga persamaan garis lurus yang dipakai untuk menduga variabel $y = \text{weekly_self_study_hours}$, adalah sebagai berikut.

$$\hat{y} = -15.5734 + 0.3631 \text{ total_score} \dots (1)$$

Persamaan (1) merupakan persamaan garis lurus yang menghubungkan antara

weekly_self_study_ hours dan total score.

Langkah selanjutnya adalah menduga nilai-nilai NA pada variabel weekly_self_study_hours, dengan menggunakan garis lurus persamaan (1).

```
> ind2 <- which(is.na(stud_dirt1$weekly_self_study_hours))
> stud_dirt1$weekly_self_study_hours[ind2] <-
+ intercept + slope * stud_dirt1$total_score[ind2]
> stud_dirt1$weekly_self_study_hours <- ifelse(stud_dirt1$weekly_self_study_
hours < 0, 0,
+ stud_dirt1$weekly_self_study_hours)
> summary(stud_dirt1)
 student_id weekly_self_study_hours attendance_percentage
Min. : 1 Min. : 0.00 Min. : 50.00
1st Qu.: 250006 1st Qu.:10.30 1st Qu.: 79.00
Median : 499993 Median :15.00 Median : 85.00
Mean : 499994 Mean :15.03 Mean : 84.74
3rd Qu.: 750023 3rd Qu.:19.70 3rd Qu.: 91.00
Max. :1000000 Max. :40.00 Max. :100.00
 class_participation total_score grade
Min. : 0.000 Min. : 9.40 Length:989875
1st Qu.: 4.800 1st Qu.: 73.90 Class :character
Median : 5.985 Median : 87.50 Mode :character
Mean : 5.985 Mean : 84.28
3rd Qu.: 7.200 3rd Qu.:100.00
Max. :10.000 Max. :100.00
```

Gambar 15. Proses pengisian nilai NA variabel weekly_self_study_hours, dengan menggunakan persamaan garis lurus

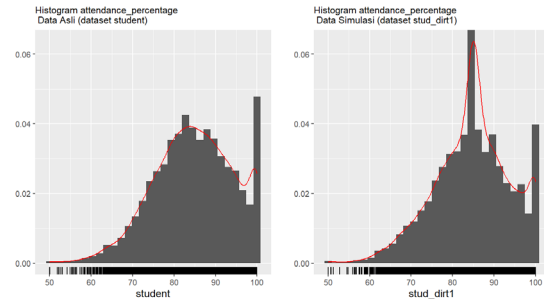
Gambar 15 menunjukkan proses pengisian nilai NA untuk variabel weekly_self_study_hours, dengan pertama-tama mengidentifikasi nomor-nomor baris yang mengandung NA. Nomor-nomor baris tersebut disimpan pada objek ind2. Kemudian proses pengisian tersebut mengikuti persamaan (1). Oleh karena *intercept* persamaan (1) adalah negatif, maka ada kemungkinan nilai variabel weekly_self_study_hours adalah negatif, sedangkan nilai negatif tidak mungkin terjadi untuk variabel ini. Jadi untuk mencegah hal ini terjadi, digunakan fungsi *ifelse*. Jika nilai dugaannya negatif, maka nilainya sama dengan nol, sedangkan jika tidak negatif, maka nilai

yang ada digunakan. Perintah `summary`, memberikan luaran berupa ringkasan statistik untuk semua variabel pada dataset `stud_dirt1`. Berdasarkan luaran tersebut, nampak sudah tidak dijumpai lagi nilai NA pada semua variabel (Haliduola et al., 2022).

Pembersihan Data – Verifikasi dan Evaluasi

Dataset asli yang digunakan adalah dataset `student`. Dataset ini adalah data yang sudah bersih, tetapi kemudian dibuat data tersimulasi, dengan membuat beberapa baris pada variabel-variabel `weekly_self_study_hours`, `attendance_percentage`, dan `class_participation` menjadi NA (missing value). Dataset ini dibersihkan kembali, dan diberi nama dataset `stud_dirt1`.

Variabel `attendance_percentage` diimputasi dengan mediannya. Perbandingan bentuk sebaran data asli (`student`) dengan dataset tersimulasinya (`stud_dirt1`), diperlihatkan oleh histogram berikut.



Gambar 16. Perbandingan histogram variabel `attendance_percentage` dataset `student` vs `stud_dirt1`

Pada Gambar 16, terlihat bahwa histogram untuk variabel `attendance_percentage`, untuk data tersimulasi ada lonjakan pada nilai mediannya. Hal ini terjadi karena imputasi pada variabel ini menggunakan median. Akan tetapi secara umum bentuk sebaran variabel tersebut pada kedua dataset, tidak terlalu berubah secara signifikan, kecuali lonjakan pada kelas yang mengandung median. Perbandingan ringkasan statistik variabel `attendance_percentage`, pada kedua data set adalah sebagai berikut:

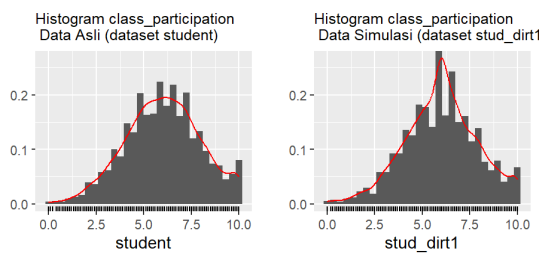
```
> summary(student$attendance_percentage)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
50.00  78.30   85.00  84.71  91.80 100.00
> summary(stud_dirt1$attendance_percentage)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
50.00  79.00   85.00  84.74  91.00 100.00
```

Gambar 17. Perbandingan ringkasan statistik variabel `attendance_percentage` pada dataset `student` dan `stud_dirt1`.

Gambar 17 memberikan hasil perbandingan ringkasan statistik variabel `attendance_percentage`, pada dataset `student` vs. `stud_dirt1`. Kedua

ringkasan secara umum tidak berbeda signifikan.

Gambar 18 berikut ini memberikan perbandingan histogram variabel `class_participation` untuk dataset `student` dan `stud_dirt1`.



Gambar 18. Perbandingan histogram variabel `class_participation` dataset `student` vs `stud_dirt1`.

Gambar 18 memperlihatkan bentuk sebaran kedua dataset tidak berubah secara signifikan. Hal ini diperkuat dengan perbandingan ringkasan statistik variabel `class_participation` pada kedua dataset. Sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 19 di bawah ini:

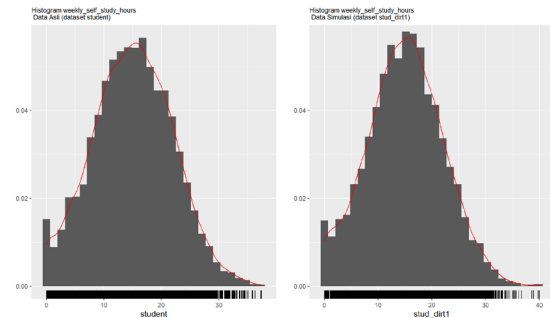
```
> summary(student$class_participation)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 0.000  4.700  6.000  5.985  7.300 10.000
> summary(stud_dirt1$class_participation)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 0.000  4.800  5.985  5.985  7.200 10.000
```

Gambar 19. Perbandingan ringkasan statistik variabel `class_participation` pada dataset `student` dan `stud_dirt1`.

Imputasi untuk variabel `class_participation`, menggunakan rata-rata (*mean*).

Variabel `weekly_self_study_hours` diimputasi menggunakan model

regresi linear. Gambar 20 memberikan perbandingan histogramnya, sedangkan Gambar 21 memberikan perbandingan ringkasan statistiknya.



Gambar 20. Perbandingan histogram variabel `weekly_self_study_hours` pada dataset `student` vs `stud_dirt1`.

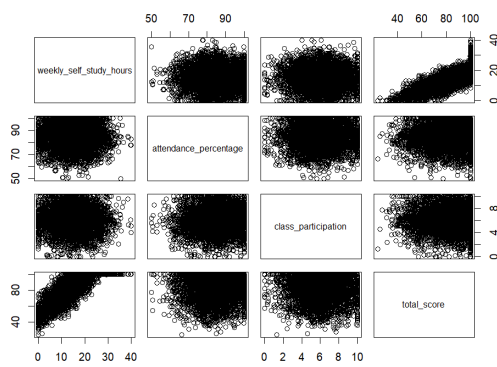
Histogram variabel `weekly_self_study_hours`, memiliki bentuk yang sangat serupa, yaitu simetrik dan berbentuk lonceng, dengan nilai-nilai kecil terpotong. Karena variabel ini tidak bisa bernilai negatif. Hal ini juga diperkuat oleh perbandingan ringkasan statistik keduanya, sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 21.

```
> summary(student$weekly_self_study_hours)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 0.00  10.30  15.00  15.03  19.70  40.00
> summary(stud_dirt1$weekly_self_study_hours)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 0.00  10.30  15.00  15.03  19.70  40.00
```

Gambar 21. Perbandingan ringkasan statistik variabel `weekly_self_study_hours` pada dataset `student` dan `stud_dirt1`.

Ringkasan statistik untuk kedua dataset adalah sama persis. Hal ini menunjukkan keunggulan dari metode regresi linear dalam mengimputasi *missing value*.

Grafik *scatter plot matrix* pada data `stud_dirt1`, diperagakan oleh Gambar 22 berikut ini:



Gambar 22. Scatter Plot Matrix dataset stud_dirt1.

Gambar 22 jika dibandingkan dengan Gambar 5 yaitu *scatter plot matrix* untuk dataset (asli) student, nampaknya sangat mirip.

Evaluasi Statistik Formal terhadap Hasil Imputasi

Untuk memperkuat klaim bahwa distribusi data tidak berubah secara signifikan setelah proses imputasi, dilakukan pengujian statistik formal pada tiga variabel: *attendance_percentage*, *class_participation*, dan *weekly_self_study_hours*. Pengujian meliputi uji beda rata-rata (uji-t), uji kesetaraan distribusi (Kolmogorov–Smirnov), serta analisis bentuk distribusi melalui nilai skewness dan kurtosis.

a) Variabel *attendance_percentage*:

Uji-t menunjukkan perbedaan rata-rata yang signifikan secara statistik ($p = 0.041$), namun selisihnya sangat kecil (± 0.03 poin), sehingga tidak bermakna

secara praktis. Uji KS menunjukkan perbedaan distribusi yang signifikan ($p < 0.001$), yang terutama disebabkan oleh lonjakan nilai pada kelas median akibat metode imputasi median. Skewness dan kurtosis dari kedua dataset menunjukkan distribusi yang serupa dan mendekati normal.

b) Variabel *class_participation*:

Uji-t menghasilkan p-value sebesar 0.824, menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan antara rata-rata data asli dan hasil imputasi. Uji KS menunjukkan perbedaan distribusi yang signifikan secara statistik ($p < 0.001$), namun nilai D yang kecil dan bentuk distribusi yang hampir identik (skewness ≈ -0.11 , kurtosis ≈ 2.8) menunjukkan bahwa metode imputasi *mean* berhasil mempertahankan karakteristik distribusi secara praktis.

c) Variabel

weekly_self_study_hours: Uji-t menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan antara rata-rata kedua dataset ($p = 0.992$), dengan selisih hanya ± 0.0001 . Uji KS menunjukkan perbedaan distribusi yang signifikan secara statistik ($p < 0.001$), namun nilai D yang sangat kecil (0.0035) dan kesamaan bentuk distribusi (skewness ≈ 0.09 , kurtosis ≈ 2.78) menunjukkan bahwa metode imputasi regresi linear

sangat efektif dalam mempertahankan distribusi data asli.

Secara keseluruhan, meskipun uji statistik formal menunjukkan beberapa perbedaan yang signifikan secara statistik, perbedaan tersebut sangat kecil dan tidak berdampak signifikan secara praktis. Visualisasi histogram, scatter plot matrix, dan ringkasan statistik mendukung kesimpulan bahwa metode imputasi yang digunakan berhasil mempertahankan karakteristik distribusi data secara umum.

Berdasarkan hasil semua ini nampaknya proses pembersihan data, terutama penanganan data NA, cukup berhasil, karena secara umum tidak menyimpang dengan dataset awal. Hasil simulasi ini akan menambah keyakinan dalam menggunakan metode ini untuk melakukan imputasi, seperti tahapan-tahapan yang telah dilakukan.

Penelitian ini memiliki keterbatasan, karena bersifat eksploratif dan berfokus pada dokumentasi teknis serta demonstrasi metode imputasi menggunakan R. Evaluasi dilakukan berdasarkan pendekatan deskriptif dan visual, dengan tambahan uji statistik sederhana untuk mendukung interpretasi. Namun, penelitian ini belum mencakup pengujian inferensial yang lebih kompleks, serta belum membandingkan metode imputasi yang lebih canggih seperti kNN atau multiple imputation.

Dataset yang digunakan berasal dari satu sumber (Kaggle – Student Performance), sehingga generalisasi hasil ke konteks lain masih terbatas. Selain itu, aspek efisiensi komputasi seperti waktu proses dan penggunaan memori belum dianalisis secara sistematis. Keterbatasan ini membuka peluang untuk penelitian lanjutan yang lebih mendalam dan komprehensif.

Semua kode R dalam pembahasan ini disediakan pada link di lampiran:

[Artikel.R \(.R\)](#), [Artikel.txt \(.txt\)](#)

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode imputasi menggunakan regresi linear dalam R memberikan hasil yang paling konsisten terhadap distribusi data asli, dibandingkan dengan metode imputasi berbasis nilai tengah seperti *mean* dan *median*. Pemilihan metode imputasi yang tepat dapat didasarkan pada karakteristik distribusi variabel: regresi linear untuk variabel yang berkorelasi kuat, *median* untuk distribusi yang menjulur, dan *mean* untuk distribusi simetris. Proses verifikasi melalui histogram, *scatter plot matrix*, dan ringkasan statistik mendukung efektivitas pendekatan ini. Dengan dukungan fungsi-fungsi dan visualisasi yang lengkap, R terbukti mempermudah proses prapemrosesan data secara efisien

dan terstruktur. Untuk pengembangan selanjutnya, teknik imputasi lain seperti *k-Nearest Neighbors* (kNN), serta tahapan prapemrosesan lainnya seperti integrasi, transformasi, dan reduksi data, sangat disarankan untuk diteliti lebih lanjut guna memperluas cakupan dan penerapan metode ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama-tama penulis ucapkan terima kasih kepada *The R Core Team* (<https://www.r-project.org>) dan para kontri-butur yang telah memelihara dan mengem-bangkan sistem R, sehingga menjadi maju dan semakin baik kinerjanya dari setiap versi ke versi berikutnya, serta yang terpen-ting R tetap non komersial. Terima kasih juga kepada teman-teman Binus dan UPH, yang mana dalam interaksi sehari-hari, dan dalam beberapa kesempatan telah memberi-kan pelatihan R, yang membuat penulis menjadi lebih terasah dan terampil dalam menguasai sistem R.

DAFTAR PUSTAKA

- Cook, R. D., & Weisberg, S. (2009). *An introduction to regression graphics*. Vol. 405. John Wiley & Sons.
- Daniswara, A. A. A., & Nuryana, I. K. D. (2023). Data preprocessing pola pada penilaian mahasiswa program profesi guru. *Journal of Informatics and Computer Science (JINACS)*, 5(1), 97–100.
- Emerson, J. W., Green, W. A., Schloerke, B., Crowley, J., Cook, D., Hofmann, H., & Wickham, H. (2013). The generalized pairs plot. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 22(1), 79–91. <https://doi.org/10.1080/10618600.2012.694762>
- Haliduola, H. N., Bretz, F., & Mansmann, U. (2022). Missing data imputation using utility-based regression and sampling approaches. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 226, 107172. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2022.107172>
- Hamdani, I. M., Nurhidayat, N., Karman, A., & Julyaningsih, A. H. (2024). Edukasi dan pelatihan data science dan data preprocessing. *Intisari: Jurnal Inovasi Pengabdian Masyarakat*, 2(1), 19–26. <https://doi.org/10.58227/intisari.v2i1.125>
- Hasan, R., Palaniappan, S., Mahmood, S., Abbas, A., & Sarker, K. U. (2021). Dataset of students' performance using student information system, Moodle and the mobile application "eDify". *Data*, 6(11), 110. <https://doi.org/10.3390/data6110110>
- Hirsch, R. (2023). Introduction to R. In *Analysis of epidemiologic data using R* (pp. 1–12). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41914-0_1
- Hsu, J. L., Jones, A., Lin, J.-H., & Chen, Y.-R. (2022). Data visualization in introductory business statistics to strengthen students' practical skills. *Teaching Statistics*, 44, 21–28. <https://doi.org/10.1111/test.12291>
- Hudiburgh, L. M., & Garbinsky, D. (2020). Data visualization: Bringing data to life in an introductory statistics course. *Journal of Statistics Education*, 28, 262–279. <https://doi.org/10.1080/10691898.2020.1796399>

- Lin, W. C., & Tsai, C. F. (2020). Missing value imputation: A review and analysis of the literature (2006–2017). *Artificial Intelligence Review*, 53(2), 1487–1509.
- Ochieng'Odhiambo, F. (2020). Comparative study of various methods of handling missing data. *Mathematical Modelling and Applications*, 5(2), 87.
<https://doi.org/10.11648/j.mma.20200502.14>
- Pavlenko, L. V., Pavlenko, M. P., Khomenko, V. H., & Mezhuyev, V. I. (2022). Application of R programming language in learning statistics. In *Proceedings of the 1st Symposium on Advances in Educational Technology* (Vol. 2, pp. 62–72).
<https://doi.org/10.5220/0010928500003364>
- Rahmah, F. R., Sutami, N. A. Z. S., Amanda, M. D. A., & Asbari, M. A. (2025). Ledakan informasi dan kesehatan mental: Peran kecerdasan emosional di era digital. *Journal of Information Systems and Management (JISMA)*, 4(2), 19–28.
<https://jisma.org/index.php/jisma/article/view/1170/234>
- Rennie, N., & Davison, J. (2025). Making 'messy' data: An R package for teaching data wrangling with realistic data. *Teaching Statistics*.
<https://nrennie.rbind.io/making-messy-data/>
- Reyhan, M., Ahmad, D. R., Ramadhan, N. A., & Kusumasari, I. R. (2024). Penggunaan data analisis dan big data dalam strategi pengambilan keputusan keuangan. *Jurnal Akuntansi, Manajemen, dan Perencanaan Kebijakan*, 2(2), 9.
<https://doi.org/10.47134/jampk.v2i2.540>

Rancang Bangun Alat Pengiris Singkong dengan Metode *Quality Function Deployment* (QFD)

[Design and Development of a Cassava Slicing Tool using The Quality Function Deployment (QFD) Method]

Jessica Theresia¹, Agustina Christiani²

^{1,2}Program Studi Teknik Industri, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pelita Harapan,
MH Thamrin Boulevard, Tangerang, 15811, Indonesia

*Korespondensi penulis: jtheresia2003@gmail.com, agustina.christiani@uph.edu

ABSTRACT

This research was conducted to design and develop a cassava slicing tool for the UMKM (Micro, Small, and Medium Enterprises) "Keripik Singkong Bu Supiah" located in Keranggan Village. The design and development process of this slicing tool was carried out using the Quality Function Deployment (QFD) approach and a House of Quality (HOQ) matrix, which was employed to gather user needs (voice of the customer) and then further analyzed to generate HOWs (engineering characteristics). Additionally, a component planning matrix was created, resulting in three key components for the tool's development: the main frame, slicing mechanism, and slicing blade. The next step involved designing and constructing the cassava slicing tool based on user requirements. The developed cassava slicing device was constructed from iron and was equipped with three blades mounted on a rotating disc, which was operated manually using a hand crank. The device also features a container for placing the cassava, fitted with a spring mechanism that facilitates the movement of the cassava toward the blades. The testing results of the developed tool showed a 6.1% improvement in slicing time efficiency and a 0.54% increase in slicing yield. Moreover, the tool development helped minimize the risk of hand injuries from the blade and eliminated waste during the cassava slicing process.

Keywords : *Cassava Slicing Tools; product design; Quality Function Deployment*

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk merancang dan mengembangkan alat pengiris singkong pada UMKM Keripik Singkong Bu Supiah yang terletak di Desa Keranggan. Proses perancangan dan pengembangan alat ini dilakukan dengan pendekatan *Quality Function Deployment* (QFD) yang digunakan untuk mengumpulkan kebutuhan pengguna (*voice of customers*) yang kemudian akan dianalisis lebih lanjut untuk menghasilkan *HOWs* (*engineering characteristics*). Selain itu, terdapat matriks perencanaan komponen yang menghasilkan tiga komponen penting dalam pengembangan alat, yaitu kerangka utama, mekanisme pengirisan, dan pisau pengiris. Proses selanjutnya adalah perancangan dan pembuatan alat pengiris singkong berdasarkan kebutuhan pengguna. Alat pengiris singkong yang dikembangkan terbuat dari besi dengan 3 bilah pisau dipasang pada piringan dan dioperasikan menggunakan engkol yang diputar secara manual. Pada alat tersebut juga terdapat wadah tempat meletakkan singkong yang dilengkapi dengan pegas yang dapat mendorong singkong ke arah pisau. Hasil uji coba dari alat yang telah dikembangkan adalah terdapat peningkatan efisiensi sebesar 6,1% terhadap waktu pengirisan singkong dan peningkatan sebesar 0,54% terhadap hasil irisan singkong. Selain itu, pengembangan alat juga dapat meminimalkan resiko tangan tergores mata pisau dan menghilangkan *waste* yang terdapat dalam proses pengirisan singkong.

Kata kunci : *alat pengiris singkong; perancangan produk; Quality Function Deployment*

PENDAHULUAN

Dalam perkembangan industri modern, Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM) dihadapkan pada berbagai tantangan, seperti tingginya tingkat persaingan, keterbatasan akses terhadap teknologi, serta keterbatasan dalam pemasaran produk (Sri & Ahmad, 2017). Tantangan tersebut dapat memberikan dampak yang beragam. Di satu sisi, tekanan yang muncul mendorong terciptanya inovasi dan pengembangan yang berpotensi meningkatkan kualitas proses maupun produk sehingga UMKM tetap mampu bersaing. Namun, di sisi lain, tidak sedikit UMKM yang gagal beradaptasi sehingga mengalami kerugian bahkan harus menghentikan operasional usahanya.

Salah satu kendala utama yang dihadapi UMKM adalah rendahnya tingkat penerimaan terhadap pemanfaatan teknologi, khususnya pada UMKM yang beroperasi di wilayah pedesaan atau pinggiran kota. Sebagian besar pelaku UMKM masih mengandalkan metode konvensional dan enggan beralih ke teknologi karena dianggap lebih praktis. Padahal, penerapan teknologi terbukti memberikan kontribusi positif, baik dalam aspek produksi maupun pemasaran produk (Akhmad & Purnomo, 2021).

Perkembangan teknologi telah menghasilkan berbagai alat bantu, baik berupa mesin maupun aplikasi berbasis digital seperti website dan e-commerce, yang berfungsi mempermudah pekerjaan serta meningkatkan konsistensi hasil.

Tujuan utama pemanfaatan teknologi dalam UMKM adalah memperluas jangkauan usaha, meningkatkan jumlah konsumen, memperkuat strategi pemasaran, serta mengoptimalkan produktivitas proses produksi. Dengan demikian, berbagai pekerjaan yang sebelumnya dilakukan secara manual dapat didukung atau digantikan oleh teknologi. Hasil penelitian Akhmad dan Purnomo (2021) menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi memberikan dampak positif bagi UMKM di berbagai aspek. Dari 120 UMKM di Kota Surakarta yang menjadi responden, sebanyak 80 UMKM atau 67% menyatakan bahwa penggunaan teknologi berpengaruh secara signifikan terhadap peningkatan aktivitas maupun jumlah produksi.

Perancangan serta pengembangan produk merupakan tahapan penting dalam mewujudkan suatu alat bantu. Pada proses tersebut, terdapat sejumlah faktor yang perlu dipertimbangkan, antara lain spesifikasi, fitur, dan aspek estetika yang harus disesuaikan dengan kebutuhan pengguna (Maulana dkk., 2022). Oleh

karena itu, analisis terhadap permasalahan yang dihadapi pengguna menjadi langkah awal yang krusial, agar produk yang dihasilkan mampu memberikan solusi yang sesuai dengan kebutuhan.

Dalam konteks penelitian ini, pengembangan alat dilakukan untuk mendukung UMKM dalam menghadapi tantangan maupun permasalahan operasional. Metode yang digunakan adalah *Quality Function Deployment (QFD)*, yaitu suatu pendekatan sistematis untuk menerjemahkan kebutuhan dan keinginan pengguna ke dalam rancangan produk dengan spesifikasi teknis tertentu (Akao, 1990). Metode QFD kerap dimanfaatkan dalam peningkatan daya saing, kualitas, serta produktivitas karena berorientasi pada kebutuhan pengguna melalui tahapan identifikasi *voice of customers*.

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan penerapan QFD maupun metode ergonomi dalam perancangan alat bantu. Syarif, Harahap, dan Hasibuan (2024), misalnya, merancang alat pengiris singkong otomatis menggunakan metode RULA dan REBA dengan tujuan memperbaiki postur kerja pengguna serta menurunkan risiko cedera. Hasil kuesioner menunjukkan adanya keluhan nyeri pada beberapa bagian tubuh, dengan skor awal RULA dan REBA masing-masing 7 dan 12, yang mengindikasikan risiko tinggi. Melalui rancangan alat baru, skor tersebut

berhasil diturunkan menjadi 4 (RULA) dan 2 (REBA).

Penelitian lain oleh Lestariningsih dan Mindayani (2018) menggunakan metode QFD dalam perancangan alat pemotong singkong. Dari analisis *House of Quality (HOQ)*, teridentifikasi 11 karakteristik kebutuhan pengguna, dengan tiga prioritas utama yaitu kesesuaian ukuran dengan antropometri, kualitas material, serta ketajaman pisau pemotong. Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Prastyo et al. (2019) menggunakan HoQ dalam pengembangan alat pemotong tempe. Berdasarkan hasil penelitian, alat pemotong tempe yang dikembangkan memiliki dimensi keseluruhan $45 \times 12 \times 15$ cm dan berat 1,8 kg. Alat ini menggunakan dua mata pisau dan wadah pemotong berbentuk kotak berukuran $22,5 \times 8 \times 10$ cm, yang dirancang khusus untuk pemotongan tempe berbentuk persegi.

Penerapan metode QFD juga dilakukan oleh Gunawan (2020) dalam pengembangan alat pengiris biji pinang muda di Sumatera Barat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengguna membutuhkan alat yang mudah dioperasikan, berharga terjangkau, perawatan rendah, produktivitas tinggi, aman digunakan, serta berbahan berkualitas. Dari sisi produksi, alat ini mampu meningkatkan efisiensi dengan memangkas waktu pengirisan dari rata-rata

8 menit/kg menjadi 4 menit/kg. Dewanto (2023) turut menerapkan QFD pada pengembangan alat pengiris daun pisang di Kecamatan Karanggayam. Hasil wawancara menunjukkan keluhan pengguna berupa nyeri saat proses pengirisan. Alat yang dikembangkan dilengkapi dinamo sebagai penggerak dengan hasil potongan berukuran <1 mm. Pengguna merasakan manfaat berupa berkurangnya rasa nyeri pada bahu dan tangan, percepatan proses pemotongan, serta peningkatan efektivitas produksi hingga 20%.

Konteks penelitian ini berfokus pada UMKM di Desa Keranggan, sebuah desa ekowisata di Kecamatan Setu, Tangerang Selatan. Selain mengandalkan potensi pariwisata, Desa Keranggan juga memiliki sejumlah UMKM pengolah hasil pertanian menjadi produk pangan, seperti keripik singkong, jajanan tradisional, dan olahan berbasis tepung. Namun demikian, proses produksi yang dijalankan masih bersifat tradisional, mulai dari pengirisan singkong dengan alat sederhana hingga pengemasan manual. Penggunaan alat pengiris singkong seperti yang ditunjukkan pada gambar 1 berpotensi untuk menimbulkan cedera pada tangan karena posisi pisau sangat dekat dengan tangan yang memegang singkong. Selain itu penggunaan alat tersebut menimbulkan *waste* berupa sisa singkong yang tidak dapat

diiris karena sudah terlalu pendek sehingga sulit untuk dipegang.



Gambar 1. Alat pengiris singkong saat ini

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan produktivitas UMKM Desa Keranggan melalui inovasi alat bantu pada proses pengirisan singkong yang lebih aman dan dapat meminimalkan *waste*.

Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi pendahuluan yang dilakukan melalui wawancara dengan pemilik UMKM dan observasi langsung terhadap proses produksi. Dari hasil pengumpulan data awal diperoleh informasi bahwa UMKM yang dikelola oleh Bu Supiah memproduksi berbagai olahan pangan, seperti keripik singkong, keripik pisang, akar kelapa, jajanan tradisional, dan kembang goyang. Di antara produk tersebut, keripik singkong merupakan komoditas dengan permintaan tertinggi dan dipasarkan melalui berbagai saluran, baik melalui reseller maupun penjualan langsung oleh anggota keluarga.

Proses produksi keripik singkong meliputi tahapan pengupasan, pencucian, pengirisan, perendaman dalam air garam (untuk varian original), penggorengan dan penirisan, penambahan bumbu balado (untuk varian balado), hingga pengemasan.

Berdasarkan hasil wawancara dan observasi, dapat diidentifikasi bahwa permasalahan utama UMKM ini terletak pada proses pengirisan singkong. Proses tersebut masih dilakukan secara manual dan satu per satu, sehingga membutuhkan waktu serta tenaga yang besar. Selain itu, metode pengirisan manual menghasilkan *waste* berupa sisa potongan singkong yang tidak dapat diproses lebih lanjut karena berisiko membahayakan pengguna. Sisa bahan ini biasanya dimanfaatkan kembali untuk konsumsi pribadi, misalnya diolah menjadi opak.

Sejalan dengan temuan tersebut, tujuan penelitian ini difokuskan pada perancangan dan pengembangan alat pengiris singkong yang lebih efektif dan efisien, sehingga mampu mendukung proses produksi UMKM secara lebih optimal. Untuk mendukung perancangan alat, dilakukan studi literatur terkait perancangan dan pengembangan produk, serta konsep *Quality Function Deployment* (QFD) dan *House of Quality* (HOQ). Literatur yang digunakan diperoleh dari sumber-sumber akademik yang kredibel, seperti jurnal ilmiah dan buku.

Pengumpulan data penelitian dilakukan melalui wawancara lanjutan dan observasi mendalam terhadap proses produksi keripik singkong. Data yang diperoleh digunakan untuk mengidentifikasi kebutuhan pengguna (*voice of customers*) serta tingkat kepentingan dan kepuasan mereka. Informasi ini kemudian diterjemahkan ke dalam karakteristik teknis (*HOWs*), yang dianalisis melalui matriks HOQ. Selanjutnya, dilakukan penyusunan konsep alternatif, pemilihan desain terbaik, dan penentuan spesifikasi produk.

Proses perancangan mengikuti beberapa tahapan, dimulai dari *concept development*, *system-level design*, *detail design*, hingga *testing and refinement*. Pada tahap pengujian, dilakukan pengukuran waktu pengirisan dan kualitas hasil irisan menggunakan prototipe alat dengan konfigurasi satu pisau dan tiga pisau. Data yang diperoleh kemudian dianalisis melalui uji validitas, termasuk uji kenormalan, uji keseragaman, dan uji kecukupan. Tahap berikutnya adalah *production ramp-up*, yaitu evaluasi hasil uji coba dan penyempurnaan komponen agar alat dapat berfungsi lebih baik.

Analisis data dilakukan dengan menghubungkan kebutuhan pengguna (*WHATs*) dan karakteristik teknis (*HOWs*) dalam kerangka QFD. Selain itu, dibandingkan pula hasil pengukuran waktu

pengirisan singkong sebelum dan sesudah penggunaan alat yang dikembangkan. Analisis ini menjadi dasar dalam pembahasan efektivitas rancangan yang dihasilkan.

Tahap akhir penelitian adalah penarikan kesimpulan yang berisi temuan utama serta implikasi hasil penelitian. Selain itu, diberikan saran untuk penelitian selanjutnya, agar pengembangan alat pengiris singkong dapat dilakukan secara lebih komprehensif dan memberikan dampak yang lebih luas bagi peningkatan produktivitas UMKM.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Fase 0 *Planning*

Fase 0 pada proses perancangan dan pengembangan produk meliputi identifikasi peluang dari produk yang akan dikembangkan yaitu alat pengiris singkong. Salah satu alat yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi peluang adalah *mission statement* (Ulrich dan Eppinger, 2016), dimana terdapat 8 komponen untuk menilai dan menjelaskan produk yang akan dikembangkan, mulai dari *product description*, *benefit proposition*, *key business goal*, *primary market*, *assumption*, dan *stakeholder*. *Mission Statement* alat pengiris singkong dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. *Mission Statement Product*

Mission Statement	
<i>Product Description</i>	Alat bantu pengiris singkong yang ditujukan kepada UMKM penjual keripik singkong untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi proses pengirisan singkong dari segi waktu dan keamanan selama penggunaan alat.
<i>Benefit Proposition</i>	Produk dirancang dan disesuaikan untuk proses pemotongan singkong secara lebih efektif dan efisien.
<i>Key Business Goal</i>	Membuat alat bantu pengiris singkong yang mudah untuk digunakan, efisien, serta terjangkau untuk para UMKM.
<i>Primary Market</i>	Penjual keripik singkong, khususnya dalam skala mikro, kecil, dan menengah (UMKM) yang masih melakukan pemotongan singkong secara manual.
<i>Assumption</i>	Alat bantu pengiris singkong ini juga dapat dilakukan untuk memotong bahan makanan lainnya, seperti ubi dan kentang.
<i>Stakeholder</i>	1. Konsumen 2. Distributor 3. Vendor

Fase 1 *Concept Development*

HOQ merupakan salah satu alat dalam perancangan dan pengembangan produk yang menggunakan metode *Quality Functional Deployment* (QFD). HOQ melibatkan 2 aspek utama, yaitu WHATs untuk mendefinisikan keinginan dan kebutuhan pengguna, serta HOWs sebagai respon untuk menjawab keinginan dan kebutuhan pengguna dalam produk yang akan dikembangkan. Dengan menghubungkan kedua aspek tersebut, diharapkan produk yang dirancang dan dikembangkan dapat menjawab kebutuhan pengguna (*voice of customers*).

Dalam penelitian ini, *WHATs* didapatkan dari hasil wawancara dengan pihak

UMKM yang kemudian diolah dalam bentuk *voice of customers*. Setelah itu, dilakukan pembuatan *HOWs* (*engineering characteristics*) yang dapat menjawab seluruh kebutuhan *WHATs*, seperti dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. *WHATs* dan *HOWs*

No.	VoC/ <i>WHATs</i>	<i>HOWs</i>
1	Memenuhi fungsionalitas sebagai alat pengiris singkong	Jenis pisau Ketajaman pisau
2	Memiliki dimensi yang tidak terlalu besar dan material yang tidak terlalu berat	Dimensi benda Material benda
3	Penggunaan alat pengiris mudah dan nyaman untuk digunakan	<ul style="list-style-type: none"> • Alat tidak sulit untuk dioperasikan • Arah dan kemiringan mata pisau
4	Penggunaan alat pengiris manual atau memiliki opsi untuk dilakukan secara manual	Tersedia penggunaan alat secara manual
5	Hasil irisan singkong konsisten dan memiliki ketebalan yang sesuai untuk keripik	Ketajaman pisau Kemiringan mata pisau Jenis pisau
6	Hasil irisan singkong tidak hancur atau terbelah	Jarak antar pisau
7	Penggunaan alat pengiris mempercepat proses pengirisan singkong	Jumlah pisau

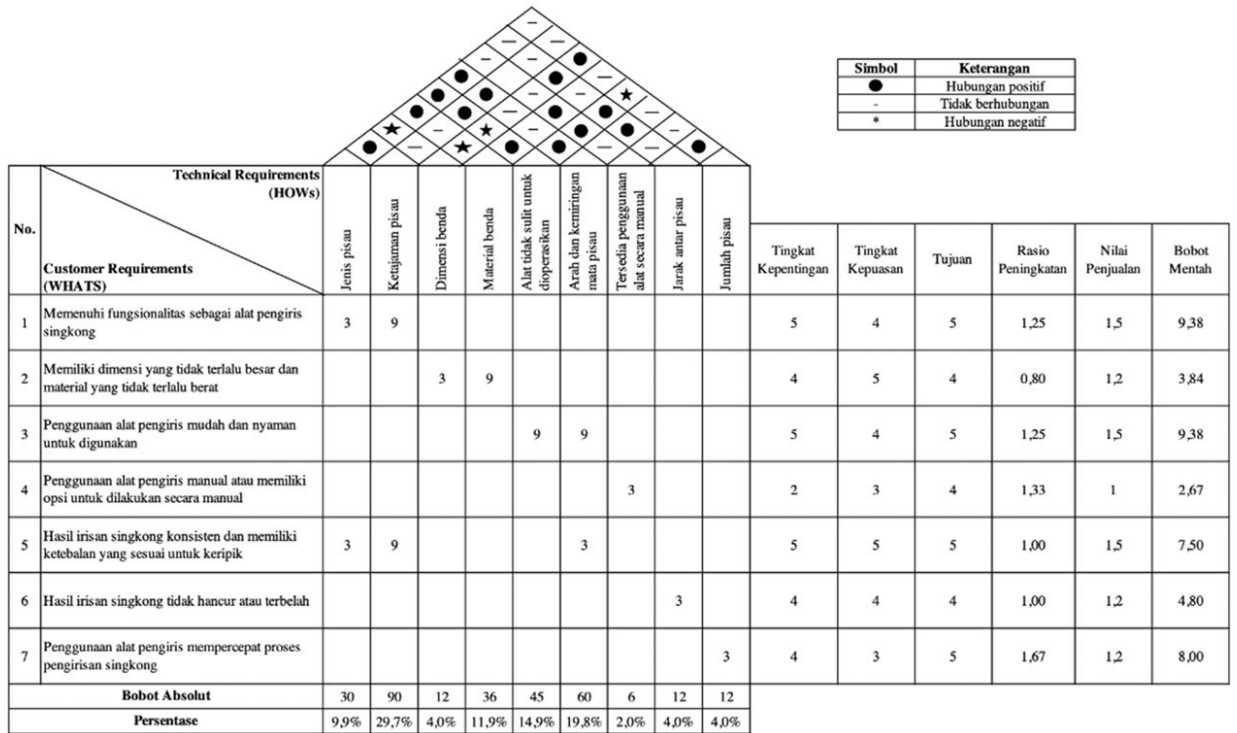
Selanjutnya, dilakukan wawancara kepada pihak UMKM untuk menentukan tingkat kepentingan dan kepuasan, dimana tingkat kepentingan adalah seberapa penting sebuah aspek/ fitur dalam

perancangan dan pengembangan alat, dan tingkat kepuasan adalah seberapa puas pengguna terhadap alat yang saat ini digunakan. Tabel 3 menunjukkan hasil tingkat kepentingan dan tingkat kepuasan menurut pengguna.

Tabel 3. Tingkat Kepentingan dan Kepuasan Pengguna

No.	Pernyataan Pengguna	Tingkat Kepentingan	Tingkat Kepuasan
1	Beroperasi sesuai fungsinya	5	4
2	Tidak berat	4	5
3	Mudah untuk digunakan	5	4
4	Tidak memakan banyak biaya seperti biaya listrik	2	3
5	Hasil irisan tipis dan konsisten	5	5
6	Singkong tidak hancur saat diiris	4	4
7	Bisa mengiris singkong dengan lebih cepat	4	3

Selanjutnya dilakukan penentuan tingkat hubungan antara setiap kebutuhan konsumen dengan kebutuhan teknis, perhitungan bobot mentah dan bobot absolut pada matriks HOQ seperti dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. House of Quality

Matriks perencanaan komponen

Matriks ini merupakan salah satu alat bantu yang bertujuan untuk mengidentifikasi komponen-komponen penting dalam perancangan dan pengembangan alat secara mendalam. Adapun beberapa komponen penting yang terdapat pada alat pengiris singkong ini adalah kerangka utama, mekanisme pengirisan, dan pisau pengiris. Matriks perencanaan komponen dari alat pengiris singkong dapat dilihat pada tabel 4.

Pada alat pengiris singkong, kerangka utama yang dimaksud adalah struktur yang dapat menopang keseluruhan alat tersebut. Dalam matriks HOQ, kerangka utama meliputi dimensi benda dan material benda.

Mekanisme pengirisan merupakan salah satu bagian penting dalam perancangan alat pengiris singkong. Mekanisme pengirisan yang dimaksud adalah sistem dan cara kerja alat pengiris singkong. Perencanaan mekanisme pengirisan juga terdapat dalam beberapa kebutuhan teknis yang telah dibuat, yaitu alat tidak sulit untuk dioperasikan dan tersedia penggunaan alat secara manual.

Pisau pengiris merupakan salah satu komponen utama yang memegang peranan sangat penting dalam perancangan alat pengiris singkong. Dalam hal ini kebutuhan teknis pisau pengiris mencakup jenis pisau, ketajaman pisau, arah dan kemiringan mata pisau, jarak antar pisau, dan jumlah pisau.

Tabel 4. Matriks Perencanaan Komponen

No.	HOWs	Komponen			% How
		Kerangka Utama	Mekanisme Pengirisan	Pisau Pengiris	
1	Jenis pisau	3	3	9	9,9
2	Ketajaman pisau			9	29,7
3	Dimensi benda	9	1	1	4,0
4	Material benda	9	1	3	11,9
5	Alat tidak sulit untuk dioperasikan	3	9		14,9
6	Arah dan kemiringan mata pisau Tersedia		3	9	19,8
7	penggunaan alat secara manual	1	9		2,0
8	Jarak antar pisau	3	1	9	4,0
9	Jumlah pisau	3	1	9	4,0
	Bobot Kolum	242,55	264,33	645,48	1152,36
	persentase	21,05%	22,94%	56,01%	100%

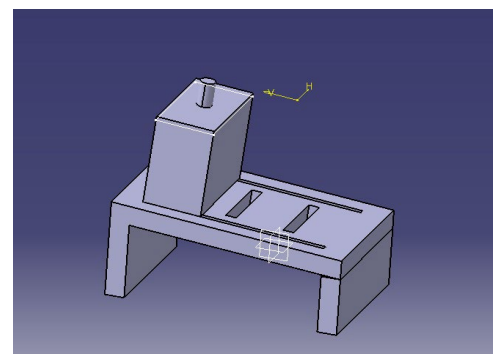
Fase 2 Detail Design dan Fase 3 System-level Design

Perancangan dan pengembangan alat fase 2 dan fase 3 meliputi gambar teknik dari alternatif terpilih, spesifikasi produk, serta proses pembuatan alat. Pada tahap ini dibuat *morphological chart* untuk menyusun alternatif rancangan alat pengiris singkong yang dapat dilihat pada tabel 5. Berdasarkan tabel 5 dibuat 3 alternatif rancangan alat pengiris singkong seperti dapat dilihat pada gambar 3-5.

Alternatif rancangan 1 (gambar 3) menggunakan material kerangka dari kayu dan material pisau dari baja karbon dengan jumlah pisau 3 serta mekanisme pengirisan dengan menggeser.

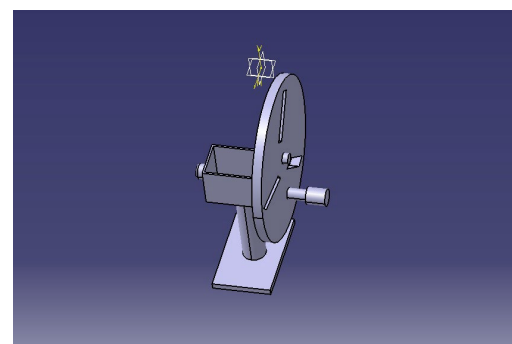
Tabel 5. Morphological Chart Alternatif Terpilih

Kriteria	Pilihan 1	Pilihan 2	Pilihan 3
Material kerangka utama	Kayu	Besi	Plastik
Material pisau pemotong	baja karbon	Stainless steel	Baja
Jumlah pisau	1	2	3
Penyambung	Lem kayu	Las besi	Baut
Mekanisme kerja	Menggeser	Memutar	Menekan
Sumber tenaga	Manual	Manual + listrik	Listrik

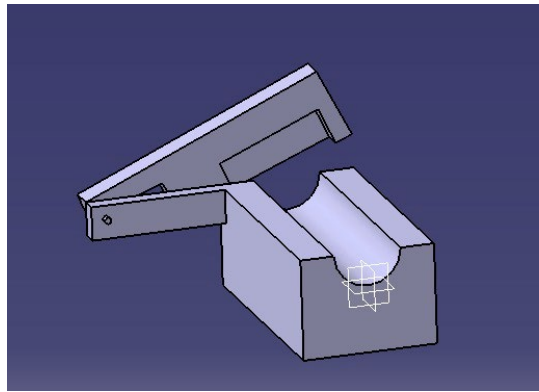


Gambar 3. Alternatif rancangan 1

Alternatif rancangan 2 (gambar 4) menggunakan material kerangka dari besi, material pisau dari baja karbon, dengan jumlah pisau 3 serta mekanisme kerja alat dengan cara diputar.



Gambar 4. Alternatif rancangan 2



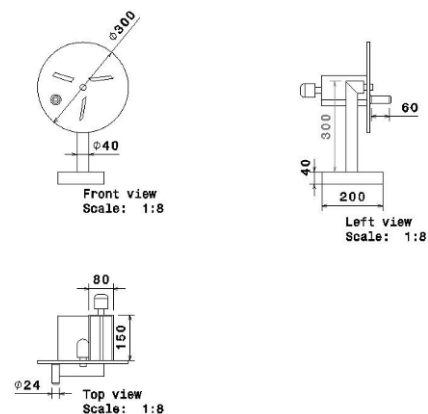
Gambar 5. Alternatif rancangan 3

Alternatif rancangan 3 menggunakan material kerangka dari kayu dan material pisau dari baja karbon dengan jumlah pisau 3, dan cara kerja alat pengiris ditekan.

Berdasarkan hasil pertimbangan terhadap ketiga alternatif yang diajukan, dipilih alternatif 2 untuk dikembangkan dengan memperhatikan aspek material, biaya pembuatan, serta masukan dari pengguna. Alternatif ini dipilih karena sesuai dengan permintaan pengguna. Kerangka utama alat dirancang menggunakan plat besi yang dinilai lebih kokoh, tahan lama, serta aman karena tidak bereaksi dengan makanan. Sementara itu, mata pisau menggunakan material baja karbon yang umumnya digunakan pada gergaji, sesuai permintaan pengguna, karena memiliki ketajaman dan daya tahan lebih baik dibandingkan material lain seperti stainless steel maupun baja biasa. Mekanisme kerja alat ini dioperasikan secara manual melalui pegangan yang diputar, sehingga pisau

berputar melingkar dan mampu memotong singkong sesuai kecepatan tangan pengguna.

Berdasarkan alternatif terpilih, dibuat gambar teknik alat pengiris singkong seperti terlihat pada gambar 6.



Gambar 6. Gambar teknik alat pengiris singkong
Material yang digunakan untuk pembuatan alat pengiris singkong dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Material alat pengiris singkong

Komponen	material
Alas	Plat besi 40 mm
Tiang penyangga	Pipa besi 40 mm
Piringan pisau	Plat besi 3 mm
Pegangan (<i>handle</i>)	Silinder besi 15 mm
Mata pisau	Carbon steel
Wadah singkong	Plat besi 2 mm

Alat pengiris singkong dibuat di bengkel las berdasarkan rancangan gambar teknik pada gambar 6 dan sesuai material yang tertera pada tabel 6. Tampilan alat pengiris singkong yang telah selesai dibuat dapat dilihat pada gambar 7-9.

Fase 4 Testing and Refinement

Pada fase 4, dilakukan uji coba alat pengiris singkong yang telah dikembangkan. Pada pengujian ini akan dibandingkan waktu dan hasil pengirisan singkong dengan alat iris 1 pisau (alat yang saat ini digunakan oleh UMKM) dan alat iris 3 pisau yang dikembangkan. Adapun pengujian ini dilakukan berdasarkan 2 kategori, yaitu data waktu pengirisan 1 buah singkong dan data hasil irisan per 3 menit.



Gambar 7. Alat pengiris singkong (tampak depan)



Gambar 8. Alat pengiris singkong (tampak samping)



Gambar 9. Alat pengiris singkong (tampak atas)

Berdasarkan hasil percobaan alat, ditemukan bahwa alat pengiris singkong dengan 3 pisau yang telah dirancang dan dikembangkan tidak dapat mempercepat proses pengirisan singkong. Hal ini dapat dilihat dari rata-rata waktu pengirisan singkong menggunakan alat iris 1 pisau sebesar 24,91 detik, sedangkan rata-rata waktu pengirisan menggunakan alat iris 3 pisau adalah sebesar 35,39 detik. Dari segi hasil irisan singkong per 3 menit, rata-rata menggunakan alat iris 1 pisau adalah 722,10 gram, sedangkan rata-rata menggunakan alat iris 3 pisau adalah sebesar 671,83 gram.

Setelah dilakukan analisis terhadap penyebab kegagalan alat, ditemukan beberapa faktor atau kelemahan yang menghambat waktu pengirisan singkong sehingga dilakukan perbaikan alat, yaitu:

1. Pengasahan mata pisau, karena saat uji coba ditemukan pisau kurang tajam, sehingga singkong seringkali menyangkut pada mata pisau

2. Pemotongan batang penyangga plat pendorong singkong karena penyangga terlalu panjang sehingga plat seringkali menyangkut pada mata pisau
3. Penambahan mur pada bagian belakang gagang pemutar piringan karena gagang seringkali longgar (tidak kencang)
4. Pengaturan ulang posisi mata pisau karena hasil potongan tidak konsisten, sehingga menghasilkan ketebalan singkong yang berbeda.

Setelah alat selesai diperbaiki, maka kembali dilakukan pengambilan data waktu pengirisan singkong dan hasil irisan singkong per 3 menit. Berdasarkan data yang telah diolah, diketahui rata-rata waktu pengirisan menjadi 23,39 detik per singkong, atau turun sebesar 6,1% dari waktu pengirisan semula. Sementara itu hasil irisan singkong per 3 menit dengan menggunakan alat pengiris yang sudah diperbaiki menjadi 726 gram, atau meningkat sebesar 0,54%. Meskipun peningkatan hasil irisan singkong tidak signifikan, namun dengan alat pengiris yang dikembangkan tangan pekerja menjadi lebih aman karena tidak berada dekat dengan mata pisau. Berdasarkan gambar 10, dapat dilihat bahwa pada alat pengiris singkong yang telah dikembangkan, terdapat tempat menaruh singkong yang

dilengkapi pegas untuk mendorong singkong secara otomatis, sehingga tangan pengguna tidak perlu memegang singkong atau berdekatan dengan mata pisau yang dapat menimbulkan resiko kecelakaan kerja.



Gambar 10. Posisi tangan saat menggunakan alat pengiris singkong

Selain itu penggunaan alat pengiris singkong yang dikembangkan dapat menghilangkan *waste*. Sebelumnya penggunaan alat pengiris singkong selalu menyisakan sekitar 3-4 cm singkong yang tidak bisa diiris karena mata pisau terlalu dekat dengan tangan pekerja.

KESIMPULAN

Melalui penerapan metode *Quality Function Deployment* (QFD), telah dirancang dan dikembangkan alat pengiris singkong yang menggunakan material utama berupa plat besi dengan tiga mata pisau berbahan baja karbon yang dioperasikan secara manual melalui mekanisme pemutaran. Pada bagian atas

alat terdapat wadah penampung singkong yang dilengkapi dengan pegas untuk mendorong singkong secara otomatis menuju pisau pengiris. Alat pengiris singkong tiga pisau yang dikembangkan memiliki tinggi keseluruhan 54 cm dan diameter papan pemotong sebesar 30 cm. Berdasarkan hasil uji kinerja, waktu rata-rata pengirisan menggunakan alat satu pisau adalah 24,91 detik, sedangkan alat tiga pisau membutuhkan waktu rata-rata 23,43 detik, sehingga terjadi peningkatan efisiensi sebesar 6,1%. Dari hasil pengujian terhadap massa hasil irisan, diperoleh bahwa alat satu pisau menghasilkan rata-rata 722,1 gram, sedangkan alat tiga pisau menghasilkan rata-rata 726 gram, yang menunjukkan peningkatan hasil irisan sebesar 0,54%. Meskipun peningkatan efisiensi tidak signifikan, namun penggunaan alat pengiris tiga pisau memberikan keuntungan dari aspek keselamatan kerja, karena dapat meminimalkan risiko cedera akibat kontak langsung antara tangan pengguna dan mata pisau. Selain itu, alat ini juga mampu mengurangi potensi *waste* yang dihasilkan selama proses pengirisan singkong.

SARAN

Saran untuk penelitian selanjutnya antara lain sebagai berikut: (1) menambah jumlah narasumber dari berbagai UMKM guna memperoleh perspektif yang lebih

luas mengenai permasalahan yang mungkin muncul dalam proses pengirisan singkong, (2) melakukan analisis lebih mendalam terhadap jumlah dan karakteristik *waste* yang dihasilkan selama proses pengirisan, serta (3) mempertimbangkan umpan balik dari pengguna, khususnya terkait hasil irisan singkong yang dinilai masih sedikit terlalu tebal.

DAFTAR PUSTAKA

- Akao, Y. (1990). *Quality Function Deployment (QFD) – Integrating Customers's Requirements into Product Design*. USA: Productivity Press.
- Akhmad, K. A., & Purnomo, S. (2021). Pengaruh Penerapan Teknologi Informasi pada Usaha Mikro Kecil dan Menengah di Kota Surakarta. *Sebatik*. 25(1), 234–240 <https://doi.org/10.46984/sebatik.v25i1.1293>
- Dewanto, I. (2023). *Perancangan Alat Pemotong Daun Pisang dengan Metode QFD (Quality Function Deployment) untuk Meningkatkan Efisiensi dan Efektivitas pada UKM Legondo Bu Suad*. [thesis] Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto Yogyakarta.
- Gunawan, M. R. (2020). *Perancangan Alat Bantu Pengiris Biji Pinang Muda Menggunakan Metode Quality Function Deployment (QFD)*. [skripsi] UIN Suska Riau.
- Lestariningsih, S., & Mindhayani, I. (2018). Penggunaan Metode Quality Function Deployment dalam Menentukan Karakteristik Kebutuhan Pengguna Alat Pemotong Singkong. *SIMETRIS*,

9(2), 959-966.
[10.24176/simet.v9i2.2484](https://doi.org/10.24176/simet.v9i2.2484)

Maulana, Y., Fahrudin, W. A., Aprina, B., Taufik, & Wahyu. (2022). *Perencanaan & Perancangan Produk*. Tangerang Selatan: Universitas Pamulang.

Prastyo, Y.A., Maghlidah, S.T., Khano, A. & Andriani, D.P. (2019). Peningkatan Kualitas Alat Bantu Pemotong Tempe pada UKM Keripik Tempe Menggunakan HOQ. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Industri*. Universitas Gadjah Mada.

Sri, M., & Ahmad, Y.. (2017). Peluang dan Tantangan Pengembangan Usaha Mikro Kecil Menengah (UMKM) dari Berbagai Aspek Ekonomi. *Jurnal Ilmiah Manajemen dan Bisnis*, 2(1),181-197.
<https://journal.undiknas.ac.id/index.php/manajemen/article/view/155>

Syarif, A. A., Harahap, I. F., & Hasibuan, Y. M. (2024). Perancangan Alat Pengiris Singkong Otomatis Untuk Menurunkan Resiko Cidera Menggunakan Metode RULA Dan REBA. *Jurnal Optimasi Teknik Industri*, 6(4), 15-22.
<https://doi.org/10.30998/joti.v6i1.21303>

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2016). *Product Deisgn and Development (Sixth Edition)*. New York: Mc Graw Hill Education

**Karakteristik Fermentasi Kitin dari Kulit Udang Windu (*Penaeus monodon*)
dengan Kapang *Trichoderma virens***

**[Characteristics of Chitin Fermentation from Black Tiger Shrimp (*Penaeus monodon*)
using *Trichoderma virens*]**

Gerardo Kevin Liguna¹, Ratna Handayani^{1*}

¹Teknologi Pangan, Universitas Pelita Harapan, Jl. M.H. Thamrin Boulevard 1100
Lippo Village, Karawaci, Tangerang

*Korespondensi penulis: ratna.handayani@uph.edu

ABSTRACT

Black tiger shrimp (Penaeus monodon) is the most widely used shrimp in fisheries industries of Indonesia for export. This activity contribute to increase the amount of shrimp shell waste. Shrimp shell contains chitin at 15-20%. Chitin can be hydrolyzed using chitinase to produce N-acetylglucosamine. This research was conducted to determine profile of chitin fermentation yield from black tiger shrimp shell (Penaeus monodon) using Trichoderma virens. Chitin was made by demineralization and deproteination black tiger shrimp shell waste. The production of fermentation yield was using solid substrate fermentation. Duration of fermentation process was 8 days, incubation temperature was 30 °C and pH 4. Based on the results of fourier transform infrared (FT-IR) spectrophotometer and liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS) analysis, it can be seen that crude N-acetylglucosamine oligosaccharides can be produced as the result of chitin fermentation besides N-acetylglucosamine. It can be determined from the presence of C-O-C groups and the molecular weight (10949,6230) which is a derivative molecule of GlcNAc-2-Man-3-GlcNAc-Fuc-GlcNAc and can be classified as N-glycans.

Keywords : Chitin; Oligo N-acetylglucosamine; N-glycans; *Trichoderma virens*

ABSTRAK

Udang windu (*Penaeus monodon*) merupakan jenis udang yang paling banyak diekspor oleh negara Indonesia. Kegiatan ini berkontribusi dalam peningkatan jumlah limbah kulit udang. Di dalam kulit udang, terkandung 15-20% kitin. Kitin dapat dihidrolisis menggunakan enzim kitinase untuk menghasilkan N-asetilglukosamin. Penelitian ini bertujuan mengetahui profil hasil fermentasi kitin dari kulit udang windu (*Penaeus monodon*) dengan kapang *Trichoderma virens*. Kitin dibuat dengan proses demineralisasi dan deproteinasi limbah kulit udang windu. Proses produksi hasil fermentasi kitin menggunakan proses fermentasi substrat padat. Proses fermentasi dilakukan selama 8 hari dengan suhu inkubasi 30 °C, and pH 4. Berdasarkan hasil analisis *fourier transform infrared (FT-IR) spectrophotometer* dan *liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS)* dapat diketahui bahwa selain dihasilkan N-asetilglukosamin dapat dihasilkan *crude* oligo N-asetilglukosamin merupakan hasil fermentasi kitin. Hal tersebut dapat diketahui dari adanya gugus C-O-C dan berat molekul (1094,6230) yang merupakan molekul turunan GlcNAc-2-Man-3-GlcNAc-Fuc-GlcNAc dan dapat digolongkan sebagai N-glikan.

Kata kunci : Kitin; N-asetilglukosamin; Oligo N-asetilglukosamin; N-glikan; *Trichoderma virens*

PENDAHULUAN

Udang merupakan salah satu komoditas unggulan sektor perikanan Indonesia yang memiliki nilai ekonomi yang tinggi, khususnya udang beku. Udang beku sebagai komoditi ekspor telah dipisahkan dari kepala dan kulitnya, sehingga hal tersebut yang menjadi sumber limbah yang dapat mencemari lingkungan. Limbah yang dihasilkan tersebut dapat mencapai angka 25% dari total produksi. Limbah tersebut yang dihasilkan saat ini digunakan sebagai bahan baku industri kerupuk, petis, terasi, pupuk dan pakan ternak dengan pemanfaatan hanya 30% dari limbah ekspor udang beku segar yang ada (Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2016). Limbah ekspor udang beku segar sebagian besar adalah kulit udang yang memiliki kandungan kitin dan kitosan dengan nilai ekonomis tinggi (Ahing dan Wid, 2016).

Kitin adalah polimer dari monomer β -(1-4)-N-asetil-D-glukosamin. Sintesis kitin di alam dibantu dengan enzim yang mampu menyebabkan transfer glikosil β -(1-4)-N-asetil-D-glukosamin dari uridinedifosfat-N-asetil-D-glukosamin menjadi kitodestrin yang kemudian membentuk polisakarida (Sitanggang *et al.*, 2012). Kitin dapat terdegradasi menjadi monomer N-asetil-D-glukosamin dan oligomer N-asetil-D-glukosamin yang

tersusun atas 2-10 monomer N-asetil-D-glukosamin yang kemudian disebut sebagai oligo N-asetilglukosamin (kitin oligosakarida) (Wang *et al.*, 2008). Glukosamin yang telah dipurifikasi memiliki manfaat sebagai *supplement*, untuk osteoarthritis dan *back pain* (Sashiwa *et al.*, 2003). Proses hidrolisis kitin dapat dilakukan secara enzimatik serta fisik dan kimia (Hargono dan Djaeni, 2008). Salah satu metode hidrolisis kitin yang terus mengalami perkembangan adalah metode enzimatik dengan menggunakan enzim kitinase yang dihasilkan mikroorganisme. Metode tersebut merupakan alternatif dari metode kimia dengan penggunaan bahan kimia yang banyak. Glukosamin dapat didegradasi dari kitin secara enzimatik dan kimiawi. Reaksi enzimatik merupakan metode yang sederhana untuk menghasilkan senyawa turunan dari kitin dan lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan reaksi kimiawi (Krokeide, *et al.*, 2007). Menurut Lv *et al.* (2016), reaksi enzimatik secara mikrobiologis dalam proses fermentasi bersifat selektif. Enzim kitinase yang dihasilkan hanya akan bereaksi dengan substrat enzim tersebut yang merupakan kitin sehingga hasil fermentasi yang dihasilkan dapat bersifat spesifik.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui profil hasil fermentasi kitin

dari kulit udang windu (*Penaeus monodon*) dengan bantuan enzim kitinase dari kapang *Trichoderma virens*.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan yaitu limbah kulit udang dari PT. Lola Mina di Muara Baru, kultur bakteri *Trichoderma virens* dari Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), media *Potato Dextrose Agar* (PDA), akuades, NaOH 3,5%, HCl 1M, KH₂PO₄, MgSO₄.7H₂O, NaNO₃, KCl, butanol, asam asetat glasial, larutan buffer pH 4, larutan buffer pH 7, dye Coomassie Blue G-250, *bovine serum albumine* (BSA), standar N - Asetilglukosamin, dan Ninhydrin (0,8%).

Alat yang dipergunakan adalah *cabinet dryer*, oven, desikator, cawan petri, *erlenmeyer*, mikropipet, pemanas bunsen, *heater*, *magnetic stirrer*, *laminar air flow*, *autoclave*, *vortex*, inkubator, *centrifuge* (Hettich), *water bath* (Memmert), UV-Vis *spectrometer* (Hitachi), *quartz cuvette* (Hellma Analytics), cawan pengabuan, *muffle furnace* (Thermolyne), cawan penguapan, *rotary vapor*, tabung reaksi, rak tabung reaksi, kolom kromatografi (pyrex), *liquid chromaography - mass spectrometry* (LC-MS), dan *fourier transform infrared (FT-IR) spectrometer*.

Metode Penelitian

Penelitian dilakukan untuk menentukan profil hasil fermentasi kitin dengan kapang kapang *Trichoderma virens* dengan perlakuan fermentasi selama 8 hari pada suhu 30 °C dan pH4. Setelah proses fermentasi dilakukan pemisahan dengan kolom kromatografi dengan kombinasi pelarut yaitu butanol, asam asetat glasial, dan akuades (12:5:3). Setelah proses pemisahan, dilakukan analisis menggunakan *fourier transform infrared (FT-IR) spectrophotometer* dan *liquid chromatography-mass spectrometry* (LC-MS) untuk menentukan komponen yang terkandung pada hasil fermentasi kitin.

Pembuatan Kitin (Arif *et al.* 2013)

Tahapan pembuatan kitin meliputi dua bagian yaitu tahapan demineralisasi dan deproteinasi. Demineralisasi dilakukan dengan perendaman kulit udang windu menggunakan HCl 1 M dengan rasio 1:10 (b/v), disertai pemanasan pada suhu 75°C yang disertai dengan pengadukan selama 2 jam. Tahap selanjutnya adalah penyaringan dan pencucian dengan akuader sampai didapatkan pH netral dan dilakukan pengeringan pada suhu 60 °C selama 20 jam.

Kitin yang dihasilkan dari proses demineralisasi selanjutnya dihilangkan proteinnya dengan perendaman dalam

NaOH 3,5% menggunakan rasio 1:10 (b/v) pada suhu 80 °C selama 2 jam. Selanjutnya dilakukan penyaringan dan pencucian dengan akuadest sampai pH netral, dan dilakukan proses pengeringan pada suhu 60 °C selama 20 jam.

Derajat Deasetilasi (Czechowska-Biskup *et al.*, 2012)

Kitin dilarutkan dalam potassium bromida (KBr) dengan rasio 1:100 (b/b). Potassium bromida yang digunakan sudah dikeringkan terlebih dahulu dengan oven (300 °C, 24 jam). Absorbansi sampel diukur dengan menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 400-4000 cm⁻¹ pada suhu ruang. Spektrum ditentukan dari rata-rata hasil 64 *scan* dengan resolusi sebesar 2 cm⁻¹.

Derajat deasetilasi dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\% \text{Derajat Deasetilasi} = \frac{A_{1655}}{A_{3450}} \times \frac{100}{1,33}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Bubuk Kulit Udang dan Kitin

Analisis karakteristik bubuk kulit udang dilakukan melalui tiga uji yaitu uji kadar air, uji kadar abu, dan uji kadar protein. Hasil analisis bubuk kulit udang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil analisis karakteristik bubuk kulit udang dan kitin

Komponen	Bubuk Kulit Udang	Kitin
Kadar Air (%)	9,89 ± 0,39	4,59 ± 0,32
Kadar Abu (%)	49,72 ± 3,01	1,74 ± 0,07
Kadar Protein (%)	34,84 ± 1,30	0,46 ± 0,03

Rendemen Kitin

Rendemen kitin yang dihasilkan dalam penelitian ini sebesar 23,15%. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Hossain dan Iqbal (2014) rendemen kitin yang didapat sebesar 13,12-17,36% sedangkan Arif *et al.* (2013) sebesar 19,38%. Berdasarkan hasil penelitian isolasi kitin yang dilakukan oleh Agustina *et al.* (2015) secara umum rendemen kitin yang dapat dihasilkan dari kulit udang lebih dari 20%. Rendemen kitin yang didapatkan dalam penelitian ini telah sesuai dalam rentang rendemen kitin berdasarkan literatur yang ada. Perbedaan rendemen kitin yang didapatkan dalam setiap penelitian dapat disebabkan oleh lama proses demineralisasi dan deproteinasi yang dilakukan. Semakin lama proses demineralisasi dan deproteinasi dilakukan maka kitin yang dihasilkan akan semakin banyak (Dompeipen *et al.*, 2016).

Derajat Deasetilasi

Perubahan kitin menjadi kitosan dapat terjadi karena adanya gugus hidroksil (OH⁻) dari NaOH yang

digunakan dalam proses deproteinasi. Gugus OH⁻ masuk ke atmon C karbonil karena adanya efek induksi sehingga elektron pada atom C mengarah ke atom O yang menyebabkan C karbonil bersifat elektropositif sehingga ikatan rangkap pada C=O karbonil akan terputus. Atom O pada gugus OH⁻ menarik electron pada H sehingga menyebabkan pembentukan proton. Atom N yang memiliki satu pasang elektron bebas dapat menerima proton sehingga membentuk ammonium. Agar atom N stabil maka dilakukan pemutusan ikatan N-C yang diikuti dengan pembentukan ikatan C=O sehingga terbentuk kitosan (Wahyuni *et al.*, 2016).

Hasil analisis menunjukkan nilai derajat asetilasi kitin sebesar 28,08%. Nilai derajat asetilasi kitin yang didapat sudah sesuai dengan standar Protan *Laboratories* dalam Arif *et al.* (2013) yang menyatakan bahwa derajat deasetilasi kitin berada pada rentang 15-70%. Puspawati dan Simpen (2010) menyatakan bahwa kitin merupakan senyawa polimer N-asetilglukosamin yang dengan rentang lebih besar dari 25% dan lebih kecil dari 70%. Brugnerotto dalam Duarte *et al.* (2002), menyatakan bahwa kitin terdeasetilasi memiliki nilai persentase kurang dari 50%. Derajat deasetilasi sebesar 28,08% menyatakan bahwa 28 unit N-asetilglukosamin telah terdeasetilasi dari 100 unit N-asetilglukosamin.

Fraksinasi dengan *Liquid Chromatography-Mass Spectrometry*

Sampel yang dipilih untuk dianalisis dengan *liquid chromatography-mass spectrometry* (LC-MS) merupakan sampel absorbansi *peak* tertinggi yang berada dalam rentang nilai absorbansi N-asetilglukosamin standar (0.518 A dan 0.590 A) yang dapat dikatakan bahwa pada sampel tersebut mengandung N-asetilglukosamin yang optimum. Namun, belum diketahui keberadaan ikatan antar masing-masing molekul yang terbentuk antar setiap molekul N-asetilglukosamin pada sampel tersebut.

Analisis data hasil fraksinasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MassLynx untuk melihat kromatogram dan spektrum masing-masing *peak*. Dari analisis hasil fraksinasi dengan LC-MS, pada kromatogram dinyatakan nilai *retention time* yang diartikan sebagai waktu yang diperlukan untuk suatu senyawa atau molekul dalam sampel untuk melewati kolom hingga mencapai *peak* tertentu. Dalam analisis LC-MS yang dilakukan dalam penelitian ini didapatkan kromatogram dengan 3 *peak* tertinggi secara berurutan pada *retention time* 10,35; 10,72; dan 11,01. Analisis lebih lanjut dilakukan untuk melihat spektrum masing-masing *peak* kromatogram dan ditemukan bahwa pada *retention time* 10,35 spektrum molekul

tertinggi dengan berat molekul 1094,6230 (44,48%). Pada *retention time* 10,72 spektrum molekul tertinggi dengan berat molekul 1094,6230 (57,77%) sedangkan pada *retention time* 10,60 spektrum molekul tertinggi dengan berat molekul 612,4084 (11,98%).

Dari analisis berdasarkan berat molekul dapat diketahui bahwa Sebagian besar hasil fermentasi adalah oligoglukosamin (kitin oligosakarida) yang dalam penelitian ini disebut sebagai sebagai oligo N-asetilglukosamin. Hal ini menunjukkan bahwa proses fermentasi yang dilakukan dapat berjalan dengan baik. Enzim kitinase yang dihasilkan oleh kapang *Trichoderma virens* dapat mendegradasi kitin menjadi produk turunan secara spesifik yaitu N-asetilglukosamin dan oligo N-asetilglukosamin. Menurut Lv *et al.* (2016), reaksi enzimatik secara mikrobiologis dalam proses fermentasi bersifat selektif. Enzim kitinase yang dihasilkan hanya akan bereaksi dengan substrat enzim tersebut yang merupakan kitin sehingga hasil fermentasi yang dihasilkan dapat bersifat spesifik.

Analisis Hasil Fraksinasi dengan Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrophotometer

Sampel yang dipilih untuk dianalisis dengan *fourier transform infrared* (FT-IR) *spectrophotometer* adalah

sampel dengan nilai absorbansi yang berada dalam rentang nilai absorbansi N-asetilglukosamin standar yaitu sample ke-4 (0,259 A), sample ke-5 & 6 yang sudah dicampur (0.518 A dan 0.590 A), dan sample ke-7 dan 8 (0,276 A dan 0,283 A).

Tabel 2. Perbandingan jejak vibrasi Menurut Kova'cs *et al* (2008) dengan hasil analisis FT-IR

Jejak vibrasi	Literatur (cm ⁻¹)	Sampel ke-4 (cm ⁻¹)	Sampel ke-5&6 (cm ⁻¹)	Sampel ke-7&8 (cm ⁻¹)
OH	3200-3400	3399,98	3401,58	3403,70
N-H	1550	1463,92	1463,87	1463,93
C-H	2875	2875,88	2875,84	2875,93
C=O	1711	1715,26	1715,31	1715,46
CH ₃	1452	1463,92	1463,87	1463,93
C-O-C	1024	1029,55	1029,66	1029,59

Hasil analisis sampel yang didapatkan dibandingkan dengan jejak vibrasi N-asetilglukosamin. Pada Tabel 2 dapat diketahui jejak vibrasi setiap gugus fungsi yang tidak memiliki perbedaan jauh dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Kova'cs *et al* (2008) sehingga dapat dikatakan bahwa pada setiap sampel terdapat kandungan N-asetilglukosamin. Hal tersebut dapat terjadi karena proses fermentasi dan ekstraksi yang dilakukan mengacu pada optimasi produksi N-asetilglukosamin. Namun, dari hasil analisis lebih lanjut menggunakan FT-IR dapat diketahui bahwa selain dihasilkan N-asetilglukosamin dapat dihasilkan senyawa turunan lain seperti oligo N-

asetilglukosamin (kitin oligosakarida). Hal ini dapat dilihat dari adanya ikatan antar gugus karbon dan oksigen yang membentuk ikatan C-O-C secara berurutan nilai serapan jejak vibrasi sampel pada ikatan C-O-C adalah 1029,55, 1029,66, dan 1029,59. Ikatan tersebut terbentuk dari ikatan antar molekul N-asetilglukosamin Oligo N-asetilglukosamin yang terbentuk dapat disebabkan oleh reaksi enzimatik dari enzim kitinase yang dihasilkan oleh kapang *Trichoderma virens*. Hasil analisis membuktikan bahwa terdapat kandungan oligoglukosamin (kitin oligosakarida) sebagai salah satu hasil dari proses fermentasi kitin yang dilakukan dalam penelitian ini.

Hasil dalam penelitian ini hasil monomer N-asetilglukosamin yang lebih rendah dibandingkan dengan oligo N-asetilglukosamin. Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh bentuk substrat kitin yang tidak diberi perlakuan. Pada penelitian yang dilakukan oleh Herdyastuti dan Cahyaningrum (2017) substrat yang digunakan adalah kitin amorf. Wang *et al.* (2006) dan Dahiya *et al.* (2005) menyatakan jika kitin yang digunakan dalam bentuk kitin koloidal yang kemudian diberikan perlakuan asam maka akan secara langsung dapat terhidrolisis sehingga memudahkan enzim kitinase yang didapatkan untuk bereaksi dengan oligomer yang tersisa dandiapatkan hasil

monomer N-asetilglukosamin yang lebih besar dibandingkan dengan hasil akhir oligo N-asetilglukosamin.

Selain itu hal ini dapat disebabkan karena perbedaan rasio endokitinase, eksokitinase, dan N-asetilglukosaminidase. Enzim N-asetilglukosaminidase pada enzim kitinase yang dihasilkan oleh kapang *Trichoderma virens* lebih rendah jika dibandingkan dengan enzim eksokitinase. Meskipun enzim eksokitinase dapat bereaksi dan membentuk monomer namun substrat kitin harus terlebih dahulu dalam bentuk oligomer. Bentuk rantai oligomer akan terbentuk dengan reaksi enzim endokitinase terlebih dahulu sedangkan enzim N-asetilglukosaminidase dapat secara langsung memotong rantai panjang menjadi monomer N-asetilglukosamin (Aziz *et al.*, 2008).

KESIMPULAN

Kulit udang windu dapat dimanfaatkan sebagai bahan dasar dalam pembuatan kitin yang dapat difermentasi oleh kapang *Trichoderma virens* untuk menghasilkan glukosamin. Kandungan yang terdapat pada bubuk kulit udang meliputi air, abu, dan protein adalah 9,89%, 49,27%, dan 35,83% sedangkan pada kitin yang dihasilkan dalam penelitian ini adalah 4,59%, 0,46%, dan 1,74%. Rendemen kitin yang dihasilkan

sebesar 23,15% dengan derajat asetilasi sebesar 28,08%.

Proses fermentasi kitin dengan kapang *Trichoderma virens* pada suhu 30 °C dan pH 4 selama 8 hari terbukti dapat menghasilkan hasil fermentasi yang bervariasi selain N-asetilglukosamin. Berdasarkan hasil analisis LC-MS dan FT-IR yang dilakukan dapat diketahui bahwa selain dihasilkan N-asetilglukosamin, proses fermentasi yang dilakukan dapat menghasilkan *crude* oligoglukosamin (kitin oligosakarida) yang secara spesifik dari analisis LC-MS diketahui molekul berkisar pada 1094,6230 (44,48% pada *retention time* 10,35 dan 57,55% pada *retention time* 10,72) yang merupakan molekul turunan GlcNAc-2-Man-3-GlcNAc-Fuc-GlcNAc. Hasil analisis tersebut dapat digolongkan N-glikan. Hasil analisis FT-IR menunjukkan adanya gugus C-O-C yang menandakan bahwa disamping teridentifikasi kandungan N-asetilglukosamin yang tinggi. Hasil analisis membuktikan bahwa terdapat kandungan *crude* oligoglukosamin (kitin oligosakarida) sebagai salah satu hasil dari proses fermentasi kitin yang dilakukan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Agustina, S., Swantara, I. M. D., dan Suartha, I. N. 2015. Isolasi kitin, karakterisasi, dan sintesis kitosan

dari kulit udang. *Jurnal Kimia* 9 (2): 271-278.

Ahing, F.A. dan Newati Wid. (2016) Extraction and Characterization of Chitosan from Shrimp Shell Waste in Sabah. *Transactions on Science and Technology*, 3 (1-2): 227-237.

Arif, A.R., Ischaidar, Natsir, Hasnah., Dali, Seniwati (2013) Isolasi kitin dari limbah udang putih (*Penaeus merguensis*) secara enzimatis. Seminar Nasional Kimia: Peran Sains dan Teknologi Dalam mendukung Ketahanan Pangan dan Energi Nasional. Universitas Hasanuddin, Makassar: 10-16.

Aziz, Suraini Abd., Teoh Lay Sin, Noorjahan Alitheen, Neelam Shahab, dan Kamarulzaman Kamaruddin. 2008. Microbial Degradation of Chitin Materials by *Trichoderma virens* UKM1. *Journal of Biological Sciences* 8 (1): 52-59. <https://doi.org/10.3923/jbs.2008.52.59>

Czechowska-Biskup, R., Jarosisńska, U., Rokita, B., Ulański, P., Rosiak, J. M. (2012) Determination of degree of deacetylation of chitosan-comparison of methods. *Progress on Chemistry and Application of Chitin*. Volume XVII, 2012. Lodz University of Technology, Poland.

Dahiya, N., R. Tewari, R.P. Tiwari dan G.S. Hoondal. (2005) Chitinase from *Enterobacter* sp. NRG4: Its purification, characterization and reaction pattern. *Eur. J. Biotechnol.*, 8 (2): 134-145. <https://doi.org/10.2225/vol8-issue2-fulltext-6>

Duarte, M., Ferreira, M., Marvão, M., Rocha, J. (2002) An optimized method to determine the degree of acetylation of chitin and chitosan by FTIR spectroscopy. *Int J Biol Macromol* 31: 1-8. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(02\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(02)00039-9)

- Hargono, Abdullah, dan Sumantri I. (2008) Pembuatan kitosan dari limbah cangkang udang serta aplikasinya dalam mereduksi kolesterol lemak kambing *Reaktor* 12(1):53-57. <https://doi.org/10.14710/reaktor.12.1.53-57>
- Herdyausti, N., Raharjo, T.J., Mudasir, dan Matsjeh, S. (2009) Kitinase dan Mikroorganisme kitinolitik: Isolasi, Karakterisasi, dan Manfaatnya. Yogyakarta: Department of Chemistry, Gadjah Mada University. <https://doi.org/10.22146/ijc.21580>
- Hossain, M. S., dan Iqbal, A. (2014) "Production and Characterization of Chitosan from Shrimp Waste". Bangladesh Agricultural University, India. *J. Bangladesh Agril. Univ.* 12 (1): 153-160, 2014. ISSN 1810-3030. <https://doi.org/10.3329/jbau.v12i1.21405>
- Kementerian Kelautan dan Perikanan. 2016. MEA Centre. Sektor Kelautan dan Perikanan. KKP.
- Kova'cs, A., Bala'zs Nyerges, dan Vladislav Izvekov. (2008) Vibrational analysis of N-Acetyl-Alpha-D-glucosamine and Beta-D-Glucuronic Acid. *J. Phys. Chem. B* 112: 5728-5735. <https://doi.org/10.1021/jp710432d>
- Krokeide, I. M., Synstad, B., Gaseidnes, S., Horn, S. J., Eijnsink, V. G., dan Sorlie. (2007) Natural substrate assay for chitinases using high-performance liquid chromatography: A comparison with existing assays. *Anal Biochem* 363: 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2006.12.044>
- Lv, Y.M., P. Laborda, K. Huang, Z.P. Cai, M. Wang, A.M. Lu, C. Doherty, L. Liu, S.L. Flitsch, dan J. Voglmeir. (2017) Highly efficient and selective biocatalytic production of glucosamine from chitin. *Green Chem* 19: 527-535. <https://doi.org/10.1039/C6GC02910H>
- Puspawati, N.M., dan Simpen, I.N. (2010) Optimasi deasetilasi kitin dari kulit udang dan cangkang kepiting limbah restoran *seafood* menjadi kitosan melalui variasi konsentrasi NaOH. Universitas Udayana, Bukit Jimbaran. *Jurnal Kimia* 4 (1), Januari 2010: 79-90.
- Sashiwa, H., Fujishima, S., Yamano N., Kawasaki N., Nakayama A., Muraki E., Hiraga K., Sukwattanasinitt M., Pickyangkura R., and Aiba S. (2003) Enzymatic production of N-acetyl-D glucosamine from chitin. *Carbohydrate Polymers Elsevier* 51 (4): 391-395. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00192-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00192-3)
- Wahyuni, Ahmad Ridhay, dan Nurakhirawati. (2016) Pengaruh waktu proses deasetilasi kitin dari cangkang bekicot (*Achatina fulica*) terhadap derajat deasetilasi. *Kovalen* 2 (1): 1-7. [10.22487/j24775398.2016.v2.i1.6039](https://doi.org/10.22487/j24775398.2016.v2.i1.6039)
- Wang, S. L., Lin, H. T., Liang, T. W., Chen, Y. J., dan Yen, Y. H. (2006) Bioconversion of shellfish chitin wastes for the production of *Bacillus subtilis* W-118 chitinase. *Carbohydrate Res.*, 341: 2507-2515. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2006.06.027>
- Wang, S. L., Lin, H. T., Liang, T. W., Chen, Y. J., Yen, Y. H., & Guo, S. P. 2008. Reclamation of chitinous materials by bromelain for the preparation of antitumor and antifungal materials. *Bioresource Technology* 99: 4386-4393. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.035>

Perancangan dan Implementasi Electronic TPM (E-TPM) Berbasis Website dengan QR Code pada Mesin *Tire Final Inspection* di PT XYZ

[Design and Implementation of a Website-Based Electronic TPM (E-TPM) with QR Codes on The Tire Final Inspection Machine at PT XYZ]

Rahardyan Rachman¹, Rudy Vernando Silalahi²

^{1,2} Program Studi Teknik Industri, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pelita Harapan
Jl. M.H. Thamrin Boulevard 1100, Lippo Village, Tangerang 15811

*korespondensi penulis: rudy.silalahi@uph.edu

ABSTRACT

In the Industrial Revolution 4.0, continuous innovation is crucial for companies striving to achieve their vision and mission. One key initiative is implementing Total Productive Maintenance (TPM). PT XYZ, however, encounters challenge due to its ongoing use of conventional, paper-based methods. These methods have numerous drawbacks, such as incomplete documentation of machine damage, outdated information caused by maintenance department oversights, extended data retrieval times, and the risk of document loss or damage. To overcome these issues, an innovative transition was made from a paper-dependent system to a digital, web-based platform to enhance TPM's effectiveness. Data was collected through direct field observation and processed using the SMART (Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Timebound) methodology to accurately identify problems and solutions. A web-based application named E-TPM was developed, utilizing the PHP programming language, the CodeIgniter framework, a MySQL database, and a straightforward, user-friendly interface designed with Bootstrap 5.0. This digital shift offers substantial benefits, including real-time management of machinery damage data, improving TPM monitoring efficiency. Digital data storage reduces the risk of falsification or loss, as information is centrally located. Moreover, E-TPM implementation has led to a significant reduction in paper costs, approximately Rp. 495,000 per year, due to the elimination of paper-based TPM tags that are prone to damage or loss. Finally, access to precise data and in-depth analysis enables management to make better-informed decisions regarding maintenance strategies.

Keywords : *Electronic TPM; Code Igniter; Paper based; PHP; SMART; Web Based*

ABSTRAK

Dalam era revolusi industri 4.0, inovasi menjadi kunci bagi perusahaan dalam mencapai visi dan misi mereka. Salah satu inovasi tersebut adalah penerapan Total Productive Maintenance (TPM). Namun, PT XYZ masih mengandalkan sistem konvensional berbasis kertas yang memiliki berbagai kelemahan seperti pencatatan kerusakan mesin yang tidak lengkap, risiko data usang karena pembaruan lambat, pencarian data yang membutuhkan waktu lama, serta risiko kehilangan atau kerusakan dokumen. Sebagai solusi, metode *paper-based* digantikan dengan sistem digital melalui pengembangan situs web untuk mengoptimalkan TPM. Data dikumpulkan melalui observasi lapangan dan dianalisis menggunakan metode SMART (*Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Timebound*) untuk memastikan solusi yang efektif. Selanjutnya, aplikasi berbasis web yang dinamakan E-TPM dikembangkan menggunakan PHP, dengan *framework CodeIgniter, database MySQL*, dan desain antarmuka yang mudah digunakan dengan Bootstrap 5.0. Transformasi digital ini memungkinkan pengelolaan data kerusakan mesin secara real-time, meningkatkan efisiensi pengawasan

kegiatan TPM. Penyimpanan data secara digital mengurangi risiko pemalsuan dan kehilangan data. Penerapan E-TPM juga berdampak positif pada penghematan biaya hingga Rp 495.000 per tahun dengan mengurangi penggunaan kertas untuk tag TPM. Dengan data yang akurat, manajemen dapat lebih efektif dalam merumuskan strategi pemeliharaan.

Kata kunci : *Electronic TPM; Code Igniter; Paper based; PHP; SMART; Web Based*

PENDAHULUAN

Dalam lingkungan industri modern yang kompetitif, memastikan efisiensi dan efektivitas produksi adalah kunci keberlanjutan perusahaan. *Total Productive Maintenance (TPM)* adalah salah satu metode yang banyak digunakan untuk tujuan ini, menekankan pemeliharaan preventif dan proaktif serta melibatkan seluruh karyawan. Menurut Venkatesh (2007), TPM terdiri dari tiga elemen: "*Total*" yang menekankan partisipasi semua personel dari berbagai level dan aspek luas; "*Productive*" yang bertujuan untuk pemeliharaan tanpa mengganggu produksi dan mengurangi masalah; dan "*Maintenance*" yang berfokus pada menjaga kondisi optimal peralatan melalui pembersihan, pelumasan, dan inspeksi oleh operator.

Meskipun TPM bertujuan memaksimalkan efisiensi mesin, metode konvensional seperti yang diterapkan di PT. XYZ Departemen Final Inspection dengan pencatatan berbasis kertas, memiliki kelemahan, antara lain inefisiensi waktu, rentan terhadap kesalahan, dan keterbatasan dalam pencatatan serta evaluasi data kerusakan mesin. Dengan

kemajuan teknologi informasi, digitalisasi muncul sebagai solusi potensial untuk mengatasi kendala sistem manual. Implementasi sistem E-TPM berbasis web memungkinkan pencatatan data secara real-time, penggunaan sumber daya yang lebih efisien, serta peningkatan transparansi dan kolaborasi tim. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengimplementasikan E-TPM sebagai inovasi digital dalam sistem pemeliharaan, guna meningkatkan efektifitas dan efisiensi operasional perusahaan.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam perancangan dan implementasi sistem E-TPM terdiri dari beberapa tahap yang sistematis. Tahap awal dilakukan pengumpulan data melalui identifikasi permasalahan terkait penerapan TPM di perusahaan, yang kemudian dilanjutkan dengan observasi langsung untuk mengumpulkan data yang menjadi acuan dalam pengembangan fitur-fitur aplikasi serta pengelolaannya dalam basis data. Selain itu, studi literatur juga dilakukan untuk mendukung pengembangan aplikasi

berbasis website dengan mengkaji teori-teori pendukung yang relevan.

Pengolahan data dilakukan menggunakan metode SMART (*Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Timebound*) untuk memastikan bahwa permasalahan yang diidentifikasi dan solusi yang dirancang memenuhi kriteria tersebut secara tepat. Selanjutnya, interaksi *user* dengan sistem dirancang menggunakan *Use Case Diagram*.

Pengembangan aplikasi sendiri dilakukan dengan memanfaatkan tools pengembangan website, yakni *Visual Studio Code* sebagai editor, framework *CodeIgniter* berbasis PHP sebagai kerangka kerja, serta basis data *MySQL* untuk penyimpanan data. Desain antarmuka pengguna dirancang agar sederhana dan mudah dipahami melalui pembuatan dashboard yang sesuai dengan kebutuhan pengguna. Setelah proses perancangan selesai, dilakukan tahap review terhadap aplikasi hasil pembangunan untuk melakukan evaluasi dan perbaikan sebelum aplikasi diimplementasikan secara penuh.

Tahap terakhir adalah implementasi sistem E-TPM secara real-time, sehingga data kerusakan mesin serta hasil tindakan perbaikan dapat langsung dicatat dan tersimpan dalam database perusahaan. Dengan demikian, sistem ini diharapkan mampu meningkatkan efisiensi pengelolaan data pemeliharaan mesin serta mendukung

pengambilan keputusan manajemen secara cepat dan akurat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi Masalah

Berdasarkan hasil observasi terhadap pelaksanaan TPM di PT. XYZ, dilakukan identifikasi terhadap sejumlah masalah yang terkait dengan penerapan metode tersebut. Data hasil pengamatan tersebut kemudian disusun dalam bentuk tabel sebagai langkah awal dalam rangka analisis dan perancangan solusi yang tepat.

Tabel 1. Identifikasi Masalah

Kategori Bahasan	Identifikasi
Media Informasi	<i>Paper based</i>
Proses Update Data	Manual, melakukan penggantian kertas berkala
Process Pencarian Data	Membuka lembaran data secara manual, ketidaksesuaian antara temuan kerusakan mesin dengan nomer <i>Tag</i>
Perawatan	Kertas mudah hilang, rusak atau tidak tercatat
<i>Review</i> oleh manajemen atau atasan	Tidak terekam atau tercatat
Jangka Waktu	Pendek, potensi hilang saat audit data

Sumber: Observasi lapangan (2025)

Sumber Data

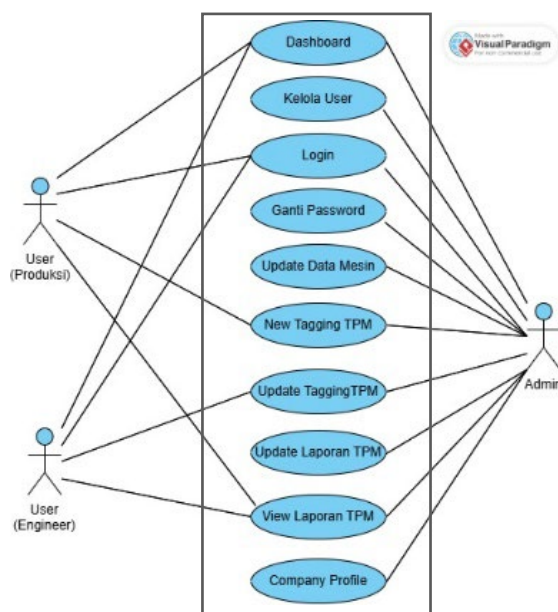
Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data primer dan data sekunder. Penjelasan mengenai kedua jenis data tersebut adalah sebagai berikut:

a. Data Primer: data primer merupakan data yang diperoleh secara langsung dari sumbernya untuk mendukung analisis dalam penelitian. Variabel yang diamati

meliputi data dari formulir TPM dan data terkait mesin yang digunakan dalam proses observasi.

b. Data Sekunder: data sekunder terdiri dari laporan dan dokumen yang telah ada sebelumnya yang berkaitan dengan pencatatan kegiatan implementasi TPM. Data ini mencakup histori tagging TPM, catatan pemeliharaan, serta dokumen teknis yang relevan dengan sistem pemeliharaan yang sudah ada.

Proses Bisnis



Gambar 1. Use Case Diagram

Perancangan proses bisnis dalam implementasi E-TPM menggunakan *use case diagram*. *Use case diagram* adalah salah satu jenis diagram UML (*Unified Modeling Language*) yang digunakan untuk menggambarkan interaksi antara sistem dengan aktor (pengguna atau sistem lain). Terdapat tiga pengguna yang dapat

menjalankan aplikasi yakni tim produksi, engineer, dan admin yang memiliki fungsi dan tanggung jawabnya masing-masing berdasarkan *use case diagram* yang dibuat. Rancangan *use case diagram* aplikasi E-TPM pada Gambar 1.

Perancangan Aplikasi

Dalam merancang sebuah aplikasi, proses analisis kebutuhan pengguna, perancangan sistem informasi yang jelas, serta penentuan aliran data yang akurat merupakan langkah penting untuk memastikan aplikasi dapat berfungsi secara optimal. Selain itu, aspek fleksibilitas pengguna untuk mengakses aplikasi kapan pun dan di mana pun harus menjadi perhatian utama agar mendukung efektivitas operasional. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut dalam pengembangan kode aplikasi E-TPM, digunakan berbagai sumber daya yang mendukung proses pembangunan dan pengujian, antara lain:

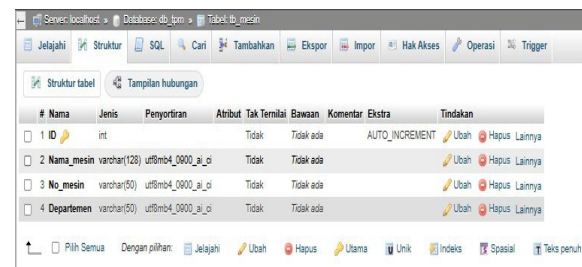
- a. *XAMPP*, yang berfungsi sebagai lingkungan pengembangan web lengkap dan mudah digunakan di komputer lokal. *XAMPP* memfasilitasi pengembang untuk membangun, menguji, serta mengelola aplikasi web secara efisien sebelum diunggah ke server publik.
- b. *Visual Studio Code*, sebagai editor kode sumber yang ringan dan *user-friendly*. Alat ini mempermudah pengembang dalam menulis, mengedit, serta mengelola kode

pemrograman dalam berbagai bahasa pemrograman dan proyek pengembangan aplikasi.

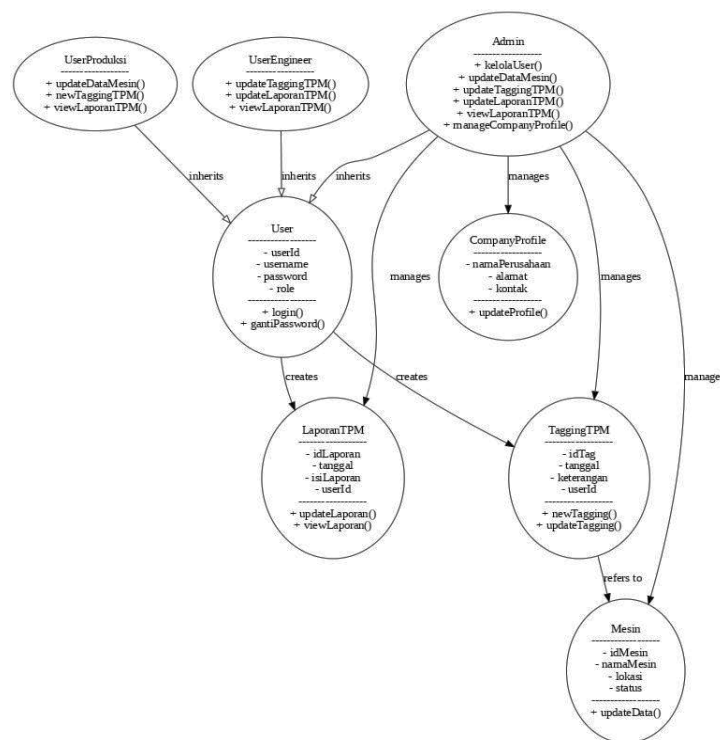
c. *PhpMyAdmin*, yang berperan sebagai alat administrasi basis data berbasis web untuk *MySQL* dan *MariaDB*. *PhpMyAdmin* menyediakan antarmuka grafis (GUI) yang intuitif, memungkinkan pengguna untuk melakukan berbagai tugas pengelolaan database tanpa perlu penulisan perintah SQL secara manual.

d. *Framework CodeIgniter 4.0*, sebagai kerangka kerja berbasis PHP yang ringan dan efisien dalam menyusun struktur aplikasi web. Framework ini membantu dalam mempercepat pengembangan aplikasi dengan menyediakan fitur-fitur yang memudahkan proses pengelolaan data dan struktur kode.

Langkah awal dalam proses perancangan aplikasi adalah menyiapkan struktur database yang akan digunakan, meliputi data mesin yang terdiri dari ID mesin, nama mesin, nomor mesin, dan departemen terkait; data pengguna yang akan berfungsi sebagai user aplikasi; data form tagging E-TPM; serta struktur laporan E-TPM. Penyusunan struktur basis data ini menjadi fondasi utama untuk mendukung keberadaan dan fungsi aplikasi secara efektif dan efisien.

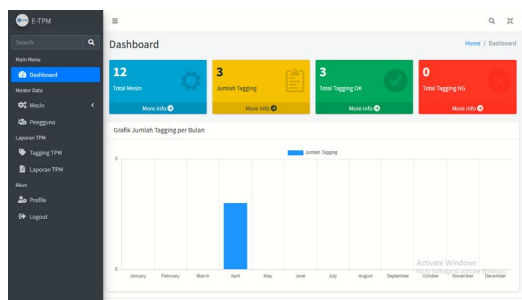


Gambar 2. Database mesin
 Sumber: Hasil pengolahan data (2025)

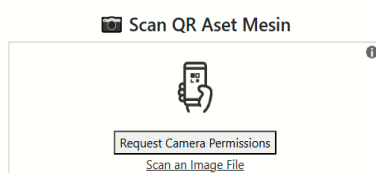


Gambar 3. Class Diagram rancangan

Langkah selanjutnya adalah merancang dashboard aplikasi E-TPM dengan membuat bagian utama penyusun website meliputi; *index.php* sebagai titik masuk (*entry point*), *config.php* sebagai tempat sentral untuk menyimpan berbagai pengaturan konfigurasi *website*, *header.php* sebagai bagian atas dalam website yang berisi kode HTML, *footer.php* sebagai bagian bawah setiap halaman website, *navbar.php* yang berisi kode HTML yang membentuk menu navigasi utama *website*, *sidebar.php* berisi kode HTML yang membentuk bilah samping dari halaman *website*, dan membuat QR-Code untuk setiap mesin yang terintegrasi dalam database dengan menggunakan fitur library yang tersedia di dalam *framework code igniter*.



Gambar 4. Dashboard E-TPM
Sumber: Hasil pengolahan data (2025)



Gambar 5. Scan QR Aset mesin
Sumber: Hasil pengolahan data (2025)

Implementasi E-TPM

Implementasi pencatatan secara *real-time* dilakukan berdasarkan temuan masalah yang diperoleh selama aktivitas harian produksi, bertujuan untuk meningkatkan efisiensi operasional mesin. Hal ini dilakukan melalui pengisian formulir tagging TPM secara konsisten oleh tim produksi, yang berfungsi sebagai laporan kerusakan, perbaikan, serta pembaruan status perbaikan oleh tim engineer. Catatan masalah ini menjadi pusat informasi utama yang disimpan dalam basis data aplikasi, dan dapat digunakan sebagai dasar untuk melakukan langkah-langkah perbaikan dan peningkatan berkelanjutan.

Category	ID	Date Reported	Shift	Asset	Reason	Status	Date Action	Notes	Result	Maintenance By	Image Before	Image After	Detail
Apparatus	1	2025-05-08 04:30:55	1	Machine	Musuh/HRD rusak	Open							
SBM01	1	2025-05-08 03:30:55	1	Machine	Perbaikan speedtest container tidak ada	Open							
SBM02	1	2025-05-08 03:20:40	1	Machine	History log gambar sensor tidak muncul	Open							
Strongbox	2	2025-05-08 02:20:20	1	Machine	Stasiun pemrosesan tidak berfungsi	Open							
Ray 3	1	2025-05-08 03:30:24	1	Machine	AC Control tidak menyala	Open							

Gambar 6. Daftar Laporan TPM
Sumber: Hasil pengolahan data (2025)

Evaluasi Hasil

Berdasarkan implementasi aplikasi E-TPM yang telah dilaksanakan di PT.XYZ mulai dari segi fungsional aplikasi hingga dampak nyata yang didapatkan dalam penerapan adalah sebagai berikut:

a. Fungsional Aplikasi

Perbaikan yang dilakukan terhadap fungsional aplikasi setelah review bersama

tim produksi dan IT Perusahaan adalah kecepatan dalam proses pelaporan Tagging TPM.

Tabel 2. Fungsional aplikasi sebelum dan sesudah review

Sebelum	Sesudah
Scan QR-code mesin diarahkan menuju dashboard utama aplikasi terlebih dahulu, kemudian scan qr-code ulang untuk masuk ke dalam form Tagging TPM	Scan Qr-code langsung diarahkan ke form Tagging TPM sesuai mesin yang dituju.

Sumber: Hasil pengolahan data (2025)

b. Identifikasi Hasil

Berikut ini disajikan tabel yang memuat hasil identifikasi permasalahan terkait penerapan TPM secara konvensional dan perbandingannya dengan solusi melalui digitalisasi menggunakan sistem E-TPM.

Tabel 3. Identifikasi Hasil

Kategori Bahasan	Identifikasi
Media Informasi	Web based
Proses Update Data	Otomatis, melakukan pengisian tagging TPM di aplikasi
Proses Pencarian Data	Membuka lembaran data secara mudah menggunakan ponsel, dan kemudahan pencarian karena disertakan gambar dan informasi yang jelas
Perawatan	Tanpa perawatan
Review oleh manajemen atau atasan	Terekam atau tercatat
Jangka Waktu	Panjang, kemudahan saat ada proses audit

Sumber: hasil pengolahan data (2025)

c. Opportunity Benefit Cost

Selanjutnya, disusun estimasi penghematan sumber daya berupa pengurangan penggunaan kertas untuk identitas tagging TPM, yang diharapkan memberikan manfaat berupa efisiensi dalam konsumsi bahan baku maupun pengurangan biaya operasional.

Tabel 4. Cost sebelum implementasi E-TPM

No	Des. Alat	Jmlh	Harga Satuan	Harga Total
1	Kertas A4	0,5 rim/tahun	Rp. 80.000	Rp. 40.000/tahun
2	Map Clip File	9 pcs/bulan	Rp. 7.000	Rp.63.000 x12bulan= Rp. 756.000/tahun
3	Kertas Mika Tagging TPM (10 x 10 cm)	30 pcs	Rp. 1.500,00	Rp. 75.000
4	Kabel ties	100 pcs/bulan	Rp. 21.000 @1pack /100pcs	Rp.252.000
Total				Rp 1.123.000/tahun

Sumber: hasil pengolahan data (2025)

Tabel 5. Opportunity Benefit Cost sesudah implementasi E-TPM

No	Alat	Jumlah	Harga Satuan	Harga Total
1	Kertas A4	0,5 rim/tahun	Rp. 80.000	Rp. 40.000/tahun
2	Map Clip File	7 pcs/bulan	Rp. 7.000	Rp. 49.000 x 12bulan = Rp. 588.000/tahun
Total				Rp 628.000/tahun
Saving Cost				Rp. 1.123.000 – Rp 628.000 =Rp. 495.000/ tahun

Sumber: hasil pengolahan data (2025)

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengintegrasikan penyimpanan data kerusakan mesin secara sentral melalui pengembangan aplikasi E-TPM berbasis web di PT. XYZ, khususnya di Departemen Final Inspection. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa digitalisasi pengelolaan data pemeliharaan melalui rancangan aplikasi E-TPM memberikan kontribusi yang berarti dalam penyediaan basis data yang mendukung analisis lanjutan, sekaligus meningkatkan transparansi dan akuntabilitas pelaksanaan kegiatan pemeliharaan di departemen tersebut. Selain aspek operasional, implementasi sistem E-TPM juga berdampak positif dari segi ekonomis, dengan estimasi penghematan biaya sebesar Rp. 495.000,00 per tahun, yang diperoleh dari pengurangan penggunaan kertas identitas *tagging* TPM yang rentan rusak atau hilang dalam sistem konvensional. Digitalisasi catatan pemeliharaan dan alur kerja yang terdokumentasi dalam sistem E-TPM memperbaiki visibilitas kegiatan pemeliharaan, memudahkan pelacakan tanggung jawab, serta mengurangi risiko terjadinya ketidaksesuaian informasi. Dengan demikian, proses pemeliharaan menjadi lebih transparan dan akuntabilitas setiap pihak yang terlibat dapat dipantau dengan lebih jelas dan terukur.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidah, I. N., Hamdani, M. A., & Amrozi, Y. (2020). Implementasi sistem basis data *cloud computing* pada sektor pendidikan. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 1(2), 77–84. <https://doi.org/10.24123/saintek.v1i2.2868>
- Adhiwibowo, W., Mahmud, G., & Artikel, I. (2021). Sistem perpustakaan menggunakan *QR code* berbasis web dengan *framework Codeigniter*. *Jurnal Inovasi Sistem Listrik*, 2(1), 55–62. <https://doi.org/10.26623/jisl.v2i1.3424>
- Agung Pratama, M., Kurniawan, A., & Irwan, A. (2020). Analisis penerapan *Total Productive Maintenance (TPM)* melalui metode *Overall Equipment Effectiveness (OEE)* pada mesin *packer* di Pabrik Semen PT.XYZP. *JITEKH*, 8(1), 11–21. <https://doi.org/10.35447/jitekh.v8i1.305>
- Casro, Y. P. (2020). Rancang Bangun Aplikasi Pengaduan Pelanggan Berbasis Web Menggunakan *Framework Codeigniter* di Indotechno Purwokerto. *Jurnal Sains dan Informatika*, 6(2), 1–9. <https://doi.org/10.34128/jsi.v6i2.244>
- Dimas Irwan Aji Andriyono, & A. F. (2020). Rancang Bangun Aplikasi *Total Productive Maintenance (TPM)*. *Jurnal Teknologi Informatika dan Komputer MH Thamrin*, 6(2), 1–11. <https://doi.org/10.37012/jtik.v6i2.235>
- Erliyan Redy Susanto, & F. R. (2017). Rancang Bangun Aplikasi Berbasis Web Perizinan Praktik Tenaga Kesehatan Menggunakan *Framework Codigniter*. *Jurnal TeknoKompak*, 11(2), 55–60. <https://doi.org/10.33365/jtk.v11i2.173>

-
- Faticha, R., Aziza, A., & Hidayat, Y. T. (2019). Analisis *usability desain interface* pada *website Tokopedia* menggunakan metode *Heuristics Evaluation*. *Jurnal Teknokompak*, 13(1), 1–9. <https://doi.org/10.33365/jtk.v13i1.265>
- Harahap, U. N., Eddy, E., & Nasution, C. (2021). Analisis Peningkatan Produktivitas Kerja Mesin dengan Menggunakan Metode *Total Productive Maintenance (TPM)* di PT. Casa Woodworking Industry. *Jurnal VORTEKS*, 2(2), 110–114. <https://doi.org/10.54123/vorteks.v2i2.88>
- Kendall, K. E., & Kendall, J. E. (2014). *Systems analysis and design (9th ed.)*. Pearson.
- Regina Nurfitriyani Anissa, & R. T. (2021). Rancang Bangun Aplikasi Penerimaan Siswa. *Jurnal RESPONSIF*, 3(1), 122–128. <https://doi.org/10.51977/jti.v3i1.497>

Fermentation Using *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica* to Produce N-Acetylglucosamine from Shrimp Shells' Chitin

Yuniwaty Halim^{1*}, Nabilah binti Chanan Din¹, Lucia C. Soedirga¹

¹Food Technology Study Program, Universitas Pelita Harapan, Jl. M.H. Thamrin Boulevard, Tangerang 15811, Indonesia

*Author correspondence: yuniwaty.halim@uph.edu

ABSTRACT

Chitin is a biopolymer that can be extracted from exoskeleton of shrimp shells and other arthropods. One of its derivatives is N-acetylglucosamine that is comprised of glucose and amino acid glutamine. N-acetylglucosamine is known for its health effect, particularly in the treatment of osteoarthritis symptoms. One of the methods to produce N-acetylglucosamine is by fermentation using chitinolytic microorganisms. The aim of this research was to determine the optimum condition (pH, ratio of bacteria, fermentation time, and temperature) for fermentation using the combination of *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica* to produce N-acetylglucosamine. The research was conducted at different pH (5, 6, 7, 8, 9) and bacterial ratios (3:1, 1:1 and 1:3). Furthermore, the optimum incubation temperature (30, 37, 40°C) and fermentation time (1, 2, 3 and 4 days) were also evaluated. The results showed the optimum condition was achieved at pH 8 with bacterial ratio of 1:1, incubated at 37°C for 3 days. Under these conditions, N-acetylglucosamine concentration obtained was 87,707.04 ± 906.54 ppm.

Keywords : colloidal chitin; combined fermentation; microbial; N-acetylglucosamine; shrimp shells

INTRODUCTION

Indonesia is one of the leading producers of agricultural and marine products and possesses great potential in the fisheries sector (Amalia *et al.*, 2022). According to BPS (Central Agency of Statistics in Indonesia) (2018), the export value of shrimp in Indonesia has increased by around 10 % each year. The shrimp exported from Indonesia mainly in forms of frozen unshelled shrimp which leaves the shrimp shell as waste or unused by-products. Approximately 50-60% of dried shrimp shells can produce 25% chitin because it contains 25-40% of protein, 45-

50% of calcium carbonate and 15-20% of chitin (Marganof, 2003).

Chitin is a biopolymer that is easily found in nature and considered as non-toxic, biodegradable, and biocompatible. Chitin extraction involves two main processes, *i.e.*, demineralization and deproteinization. These processes can be performed biologically using microorganisms or chemically using acids and bases (Rahmawati *et al.*, 2012).

Chitin and its derivatives are commonly used in several fields such as medical and health where it can be used as immunoadjuvant and as basic material to make surgical suture (Aiba, 2009). N-

acetylglucosamine is one of the derivatives of chitin that is used to treat the symptoms of osteoarthritis (Wanichpongpan *et al.* 2016), therefore it is often used as a supplement which is commonly consumed by the elderly to treat problems that is associated with the joint (Arbia *et al.*, 2012).

The production of N-acetylglucosamine can be obtained by chemical, enzymatic or microbiological methods. N-acetylglucosamine produced by means of chemical is done with the use of acid or base which results in a relatively fast glucosamine production but can result in low yield and cause acidic waste towards the environment (Wang *et al.*, 2008). Enzymatic hydrolysis method requires higher cost, but the utilization of chitinase enzyme results in a higher yield of glucosamine unlike chemical hydrolysis (Pan *et al.*, 2011). On the contrary, microbiological method for glucosamine production involves fermentation, particularly using chitinase producing bacteria offer some advantages, such as higher yield (the highest reported was 110 g/L N-acetylglucosamine using recombinant strain *E. coli*), no structure modification, and environmental-friendly. However, a major challenge is that the fermentation method cannot yet be applied on a large scale for commercial production (Liu *et al.*, 2013).

Providencia stuartii and *Salmonella enterica* were bacteria isolated from *Penaeus monodon* shrimp shells obtained from previous study done by Hardoko *et al.* (2020). Both bacteria produce chitinase, an enzyme that catalyzes the hydrolysis of insoluble chitin into its oligomeric and monomeric derivatives (Tanaka *et al.*, 2001).

Moreover, previous study by Hardoko *et al.* (2020) also reported that *Providencia stuartii* was the bacterium isolated from shrimp shell waste that possessed the highest chitinolytic activity, while Michelle (2019) found that *Salmonella enterica* produced approximately $73,184.74 \pm 752.02$ ppm of N-acetylglucosamine after three days of fermentation at 37 °C. Therefore, in this study, combined fermentation using these bacteria was expected to produce N-acetylglucosamine more efficiently, in a shorter time, and with a higher yield.

According to Halim *et al.* (2018), several factors influence the N-acetylglucosamine production from fermentation, such as fermentation temperature, pH of the media, and fermentation time. Therefore, this research aimed to determine the optimum pH and bacterial ratio for the combined fermentation of *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica* to produce N-acetylglucosamine. Furthermore, this

research also aimed to determine the optimum fermentation time and temperature for the combined fermentation of *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica* in the production of N-acetylglucosamine.

MATERIALS AND METHOD

Materials and Equipment

The materials used in the experiment were shrimp shells (*Penaeus monodon*) obtained from PT. Wirontono Baru located at Ancol Jakarta Utara, *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica* culture obtained from previous study of Hardoko *et al.* (2020), distilled water, 1 M hydrochloric acid (HCl) “Merck”, 3.5% sodium hydroxide (NaOH) “Merck”, 37% hydrochloric acid (HCl) “Merck”, ethanol “Smartlab”, 1 M sodium hydroxide (NaOH) “Merck”, 5 N sodium hydroxide (NaOH) “Merck”, Nutrient Agar (NA) “Merck”, Nutrient Broth (NB) “Merck”, Monopotassium phosphate (KH_2PO_4) “Merck”, Dipotassium phosphate (K_2HPO_4) “Merck”, Magnesium sulfate ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) “Merck”, Bromocresol Purple (BCP) indicator, tartaric acid “Merck”, sodium phosphate, 0.8% ninhydrin, Coomassie Brilliant Blue G-250 “Merck”, 85% Bovine Serum Albumin (BSA) “Sigma Aldrich”, Methylene Blue (1:5), and N-

acetylglucosamine standard “Sigma Aldrich”.

The equipment used were analytical balance “Mettler Toledo”, dry blender “Philips”, sieve shaker 60 mesh “Retsch”, Miller “Fomac”, centrifuge “Medical Instruments MPW-223e”, UV-Vis spectrophotometer “Thermo Scientific Genesys 10S UV-Vis”, FTIR spectroscopy, furnace “Thermolyne 48000” and autoclave “Hirayama”, and glasswares.

Procedures

Isolation of Chitin from Shrimp Shells

Chitin preparation was done according to Halim *et al.* (2018). *Penaeus monodon* shrimp shells were cleaned, dried under the sun for 2 days, size-reduced using blender and miller, and was further sieved using 60-mesh siever. The shrimp shells powder obtained was analysed for its moisture content (AOAC, 2005), ash content (AOAC, 2005), yield (Dompeipen *et al.*, 2016) and protein content using Bradford method (Nielsen, 2009 with modification).

Afterwards, shrimp shells powder was subjected to demineralization process where the powder was soaked with 1 M HCl (ratio 1:10 w/v) and heated at 75°C for 2 hours. The mixture was then cooled down, neutralized until pH 5 and dried at 50°C for 24 hours using a cabinet dryer. The demineralized powder was then undergone

deproteinization process where the powder was soaked with 3.5% NaOH (ratio 1:10 w/v) and heated at 75°C for 2 hours with constant stirring. Then, the mixture was cooled down, neutralized until pH 7 and dried using a cabinet dryer at 50°C for 24 hours. The isolated chitin was analysed for its moisture content (AOAC, 2005), ash content (AOAC, 2005), yield (Dompeipen *et al.*, 2016), degree of deacetylation (Benhabiles *et al.*, 2012), and protein content using Bradford method (Nielsen, 2009 with modification).

Colloidal Chitin Preparation

10 grams of chitin was mixed with 37% HCl (ratio 1:14 w/v) and stirred continuously for 2 hours at room temperature until chitin fully dissolved. 500 mL ethanol was added to mixture and 5N NaOH was added until reach pH 7. Then the mixture was centrifuged for 5 minutes at 4000 rpm. The precipitate obtained was the colloidal chitin (Setia, 2015 with modification).

Chitinolytic Assay for *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica*

Selective media for chitinolytic activity assay was prepared according to the formulation in Table 1.

Table 1. Formulation for selective media

Ingredient	Amount (g/L)
Nutrient Agar	20.0
Colloidal chitin	5.0
KH ₂ PO ₄	0.3
K ₂ HPO ₄	0.7
MgSO ₄ .7H ₂ O	0.5

Source: Setia (2015)

The selective media was then added Bromocresol purple (BCP) indicator, boiled, cooled down and added with 10% tartaric acid until pH 4.7 was reached. The media was then sterilised in an autoclave for 15 minutes at 121°C. To perform the assay, the media was poured into Petri dish and left to solidify. A 5 mm diameter well was made and 60µL of culture was poured and incubated at 37°C for 24, 48 and 72 hours. According to Halim *et al.* (2018), chitinolytic activity was indicated by the formation of purple color on the clear zones, while no color change indicates the absence of chitinolytic activity. Therefore, chitinolytic index was determined by measuring the diameter of the purple zone around the well using a Vernier calliper. The larger the purple zone, the higher the chitinolytic index of the bacteria (Agrawal and Kotasthane, 2012).

Determination of Optimum pH and Bacterial Ratio of *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica*

In this research, the fermentation using combination of *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica* was done using

different pH and bacterial ratio. The fermentation media itself was prepared according to the formulation in Table 2.

Table 2 Formulation for fermentation media

Ingredient	Amount (g/L)
Chitin	20.0
KH ₂ PO ₄ .3H ₂ O	1.0
MgSO ₄ .7H ₂ O	0.5
NaNO ₃	1.0
Glucose	20.0
Distilled water	Until 1.0 L

Source: Saskiawan and Handayani (2011)

To adjust the pH, the fermentation media were added with either 1 M NaOH or 1 M HCl along with buffer pH to achieve the desired pH which were pH 5, 6, 7, 8 and 9. The media was then sterilised using an autoclave at 121°C for 15 minutes. The media was then inoculated with different ratio of *Providencia stuartii*:*Salmonella enterica*. which were 3:1, 1:1 and 1:3. the media was then incubated at 37°C for 24 hours (Ulfa, 2016 with modification). This fermentation time and temperature was chosen because it is the optimum fermentation temperature and incubation time for *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica* (Keerthirathne *et al.*, 2016). Furthermore, the fermentation results were then analyzed for its *N*-acetylglucosamine content.

Determination of Optimum Incubation Time and Temperature

The pH of media and bacterial ratio in this stage were set according to the optimum pH and the bacterial ratio obtained from the previous stage of

research. Fermentation media was prepared according to Table 2. The media was incubated at different temperatures which were 30, 37 and 40°C. Meanwhile, incubation time was 1, 2, 3, and 4 days, (Ulfa, 2016 with modification). The sample obtained which was *N*-acetylglucosamine was measured using spectrophotometer at 324 nm.

Analysis of N-acetylglucosamine

The analysis of *N*-acetylglucosamine was done according to Ulfa (2016) and Halim *et al.* (2018). There were three steps done for measurement of *N*-acetylglucosamine, consisting of preparation of standard curve, extraction of *N*-acetylglucosamine from the sample, and quantification of *N*-acetylglucosamine.

The standard curve of *N*-acetylglucosamine was prepared by diluting *N*-acetylglucosamine to concentration 2000, 4000, 6000, 8000 and 10000 ppm. 4 mL of each concentration added with 0.5 mL of 0.8% ninhydrin and 0.5 mL buffer phosphate pH 7. These standard solutions were heated in water bath for 15 minutes at 95°C and measured using spectrophotometer at 324 nm. Moreover, the blank used in this measurement was distilled water added with 0.5 mL of 0.8% ninhydrin and 0.5 mL buffer phosphate pH 7.

To extract the N-acetylglucosamine, each fermentation sample was heated in water bath at 75°C for 45 minutes, filtered using Buchner funnel and centrifuged for 15 minutes at 5000 rpm. The supernatant obtained was diluted 10x.

To quantify the concentration of N-acetylglucosamine, 4 mL of diluted mixture was added with 0.5 mL of ninhydrin and 0.5 mL of buffer phosphate pH 7. The mixture was then heated for 15 minutes at 95°C in a water bath and was measured with spectrophotometer at 324 nm to obtain its absorbance value. The concentration of N-acetylglucosamine was then calculated based on the standard curve.

Data Analysis

All data obtained in this research were analyzed statistically using Univariate Analysis and Duncan Test for Post Hoc analysis. The software used for data analysis was SPSS version 25.

RESULTS AND DISCUSSION

Characteristics of Shrimp Shells Powder

The chemical composition of the shrimp shell powder obtained in this research can be seen at Table 3. The moisture content obtained was below 10% and lower compared to previous research by Halim *et al.* (2021), in which the moisture content of shrimp shells powder obtained was $9.99 \pm 0.18\%$. According to

Steele (2004), moisture content of dried sample must be below 10% to increase shelf life and to prevent microbiological contamination. Furthermore, the lower moisture content may be due to the longer drying time applied in this research, which was 2 days. This result also indicated that the drying process was sufficient.

Table 3 Chemical composition of shrimp shell powder

Parameter	Content (%)
Moisture content (wet basis)	5.61 ± 0.49
Ash content (wet basis)	37.24 ± 0.54
Protein content	11.60 ± 0.20

Based on Table 3, the ash content of the shrimp shell powder was $37.24 + 0.54\%$. According to Sillanpaa and Ncibbi (2017), ash content of shrimp shell waste is around 30-50%, therefore the result obtained was in accordance with previous study. Moreover, the protein content of shrimp shells powder obtained in this research ($11.60 + 0.20\%$) was also comparable to previous research by Hossain *et al.* (2014) which was 12.73%.

Characteristics of Isolated Chitin

The chitin was isolated from shrimp shells powder through demineralization and deproteinization process. The chemical composition of isolated chitin can be seen at Table 4. The result obtained was compared to SNI 7948:2013.

Table 4 Chemical composition of isolated chitin

Parameter	Content (%)	SNI Requirement (%)*
Moisture content (wet basis)	6.45 ± 0.29	Max 12
Protein content	0.07 ± 0.02	Max 5
Ash content (wet basis)	0.24 ± 0.02	Max 5
Degree of deacetylation	26.58	10-65
Yield (dry basis)	40.42 ± 1.01	-

Source: *BSN (2013)

Moisture content of chitin obtained in this research was higher than Sanusi (2014) which was 5.22%. This is because Sanusi (2014) used higher drying temperature, *i.e.*, 80°C for 24 hours. However, drying at lower temperature of 50°C for 24 hours that was done in this research resulted in moisture content lower than 12%. Therefore, the isolated chitin was still in accordance with SNI requirements.

The protein content was measured for isolated chitin to determine the efficacy of deproteinization process. According to Table 4, the protein content of isolated chitin obtained in this research was lower than Isa *et al.*, (2012), Islam *et al.* (2016), and Halim *et al.* (2018) which were 4.16%, 3.33%, and 2.16%, respectively. This result shows that the deproteinization process in this research was more efficient to remove to the protein from shrimp shells powder.

Furthermore, the ash content was accounted for in order to see the effectivity of the demineralization process that was done on the shrimp powder. A lower ash content indicates that the chitin contains fewer minerals, showing a higher level of

purity. Based on Table 3, ash content obtained in this research was lower compared to previous research done by Isa *et al.* (2012), which was about 5.6% and comparable to Halim *et al.* (2018), which was about 0.67%. However, this result shows that the demineralization process in this research was more efficient to remove to the protein from shrimp shells powder.

Degree of deacetylation (DD) is measured to ensure that demineralization and deproteinization process resulted in chitin and not chitosan, which is the deacetylated form of chitin. According to Arbia *et al.* (2012), chitin had a DD value of less than 50%, while chitosan had a DD value of higher than 50%. According to Table 3, DD value obtained in this research was 26.58% which is within the range of DD set by SNI (10-65%).

Furthermore, the yield of isolated chitin obtained in this research (40.42 + 1.01%) was similar to the study done by Alabaraoye *et al.* (2017), which was 40.89%. According to Kaimudin *et al.* (2016), there are 40-60% chitin (dry basis) found in the exoskeleton of shrimp. Therefore, it can be stated that the result obtained was in accordance with previous study.

Chitinolytic Activity

Chitinolytic index for both *Providencia stuartii* and *Salmonella*

enterica were measured to ensure that these bacteria possess the chitinolytic activities. The chitinolytic index of *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica* can be seen at Table 5.

Table 5 Chitinolytic index

Bacteria	Chitinolytic Index		
	Day 1	Day 2	Day 3
<i>Providencia stuartii</i>	1.77 ±	2.17 ±	1.43 ±
<i>Salmonella enterica</i>	0.03	0.09	0.12
<i>Salmonella enterica</i>	1.52 ±	1.89 ±	1.36 ±
<i>Providencia stuartii</i>	0.15	0.16	0.02

According to Table 5, *Providencia stuartii* had higher chitinolytic index compared to *Salmonella enterica*, with the highest activity was observed after 2 days of fermentation. This result is in accordance with the result obtained by Hardoko *et al.* (2020) which stated that *Providencia stuartii* had the highest chitinolytic index (4.46) out of all the bacteria isolated from shrimp shell powder. The bacteria with the highest chitinolytic index were *Providencia stuartii* because have chitinase enzyme type A, C1 and chitobiase which makes them able to break down chitin (Hardoko *et al.*, 2020).

On the other hand, *Salmonella enterica* is categorised as lysozyme-like

domain when it comes to their chitinase enzyme (Frederiksen *et al.*, 2013). This means that *S.enterica* does not actually have chitinase but instead have lysozymes or bifunctional chitinases. Therefore, the breakdown of chitin by lysozymes becomes less efficient.

Effect of Different pH and Bacterial Ratio of *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica* on N-acetylglucosamine Production

The result of fermentation using different pH and bacterial ratio of *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica* can be seen in Figure 1. Statistical analysis using Univariate analysis showed that different pH and bacterial ratio significantly affected the concentration of N-acetylglucosamine produced from fermentation ($p < 0.05$). Moreover, the interactions between pH and bacterial ratio also significantly affected the concentration of N-acetylglucosamine produced from fermentation ($p < 0.05$).

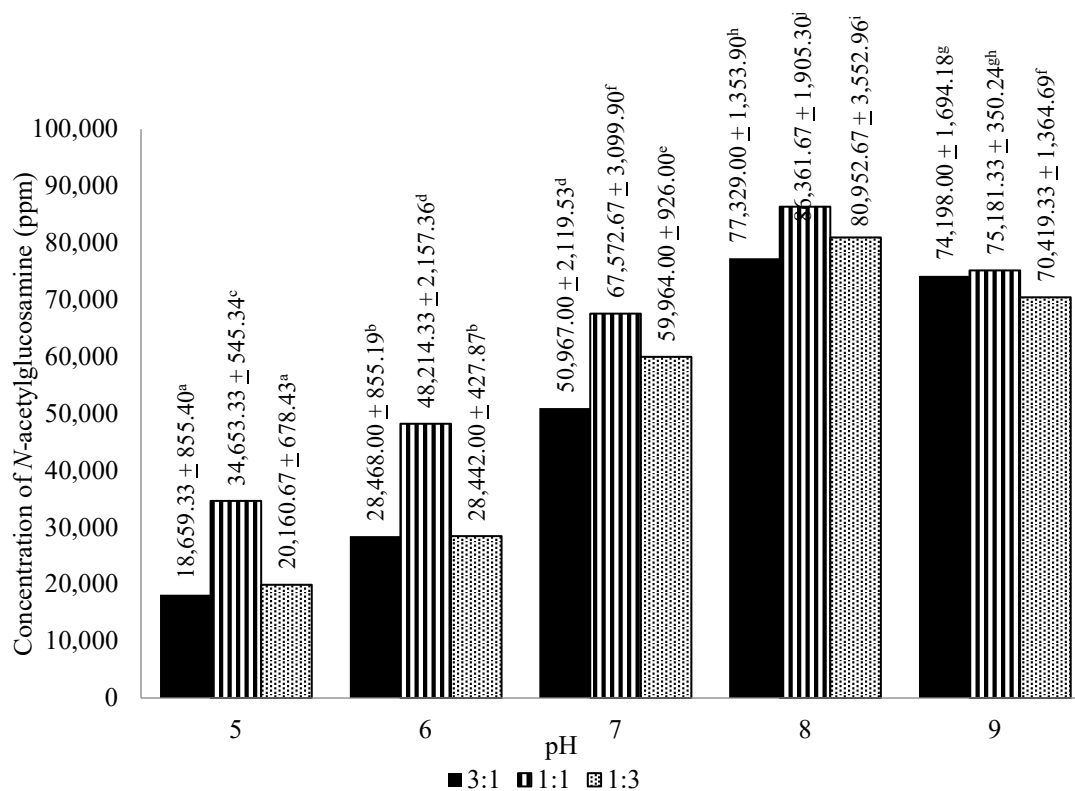


Figure 1. The effect of bacterial ratio and fermentation pH on production of *N*-acetylglucosamine
Note: The different notations (letters) indicating a significant difference ($p < 0.05$)

Figure 1 shows that the lowest *N*-acetylglucosamine production is at fermentation pH of 5 with bacterial ratio of 1:1, which was $34,653.33 \pm 545.34$ ppm, meanwhile the highest *N*-acetylglucosamine produced was obtained at pH 8 with bacterial ratio of 1:1, *i.e.*, $86,361.67 \pm 1,905.30$ ppm. Figure 1 also shows that the *N*-acetylglucosamine production increases as the pH increases until reaches the highest point of pH 8 and then decreases at pH 9. According to Podolak *et al.* (2010), *Salmonella enterica* can grow at a wide range of pH from 5.2 to 9.5. Meanwhile, *Providencia stuartii* can grow at pH ranging 6-9 (Khatib *et al.*, 2017). Therefore, the decrease of *N*-

acetylglucosamine production at pH 9 may be due to partial deacetylation of chitin to chitosan (Younes and Rinaudo, 2014). Partial deacetylation of chitin can occur at high pH (>9) and exposure to heat (>70°C) for a long time (>24 hours) (Cleo *et al.*, 2013). In this research, the exposure to heat might happen during sterilization of media prior to fermentation process. Therefore, less chitin in the fermentation medium means fewer resources for the bacteria to degrade, resulting in reduced *N*-acetylglucosamine production at pH 9.

Furthermore, the bacterial ratio that obtained the highest *N*-acetylglucosamine production was ratio 1:1 (*Providencia stuartii*:*Salmonella enterica*). These

findings indicate a potential synergistic interaction between *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica*. However, *Salmonella enterica* replicates faster compared to *Providencia stuartii* because *Salmonella enterica* reaches optimum cell growth after 8 hours compared to *Providencia stuartii* after 18 hours (Nguyen *et al.*, 2016). However, the plausible reason for bacterial ratio 1:1 (*Providencia stuartii*:*Salmonella enterica*) to produce the highest N-acetylglucosamine may be because although *Salmonella enterica* replicates faster, they possess lower chitinolytic activity compared to *Providencia stuartii* as can be seen on Table 5.

Effect of Different Fermentation Time and Temperature on N-acetylglucosamine Production

The production of N-acetylglucosamine using different fermentation time and temperature was performed using fermentation media with pH 8 and ratio between *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica* of 1:1. The result of fermentation using different incubation time and temperature can be seen in Figure 2.

Statistical analysis using Univariate analysis shows that different fermentation time and temperature significantly affected the production of N-acetylglucosamine ($p <$

0.05). Moreover, the interactions between fermentation time and temperature also significantly affected the N-acetylglucosamine production.

Figure 2 shows that the highest N-acetylglucosamine production was obtained at fermentation temperature of 37°C for 3 days which was $87,707.04 \pm 906.54$ ppm. This is because according to Oscar (2008), *Salmonella enterica* optimum incubation temperature is at 37°C. *Salmonella enterica* can still grow at temperature 40°C but with a longer lag time and will die when the temperature exceeds 50°C (Hudson *et al.*, 2011). Meanwhile, *Providencia stuartii* optimum incubation temperature is also at 37°C (Khatib *et al.*, 2017). Furthermore, the growth of *Providencia stuartii* increases when temperature increases up until the optimum temperature (37°C) and decreases when temperature is higher than 37°C (Ayangbenro, 2017).

Figure 2 also shows that the production of N-acetylglucosamine was the highest at day 3. It is because both bacteria have a stationary phase up to three days (Rychlik *et al.*, 2002; Kurmasheva *et al.*, 2018). Therefore, the production of N-acetylglucosamine decreased after 4 days of fermentation because both bacteria have undergone the death phase. Another possible reason is the limited availability of chitin substrate after 4 days of fermentation.

Furthermore, the N-acetylglucosamine produced in this study was higher than that reported by Michelle (2019), who used *Salmonella enterica* in the fermentation and obtained 73,184.74 ± 752.02 ppm of N-acetylglucosamine after 3 days of incubation, but lower than that reported by Halim *et al.* (2023), who used

Providencia stuartii in the fermentation and obtained 97,722.67 ± 391.07 ppm after 4 days of fermentation. These results suggest that combined fermentation using both bacteria was more effective in enhancing N-acetylglucosamine production from shrimp shells' chitin.

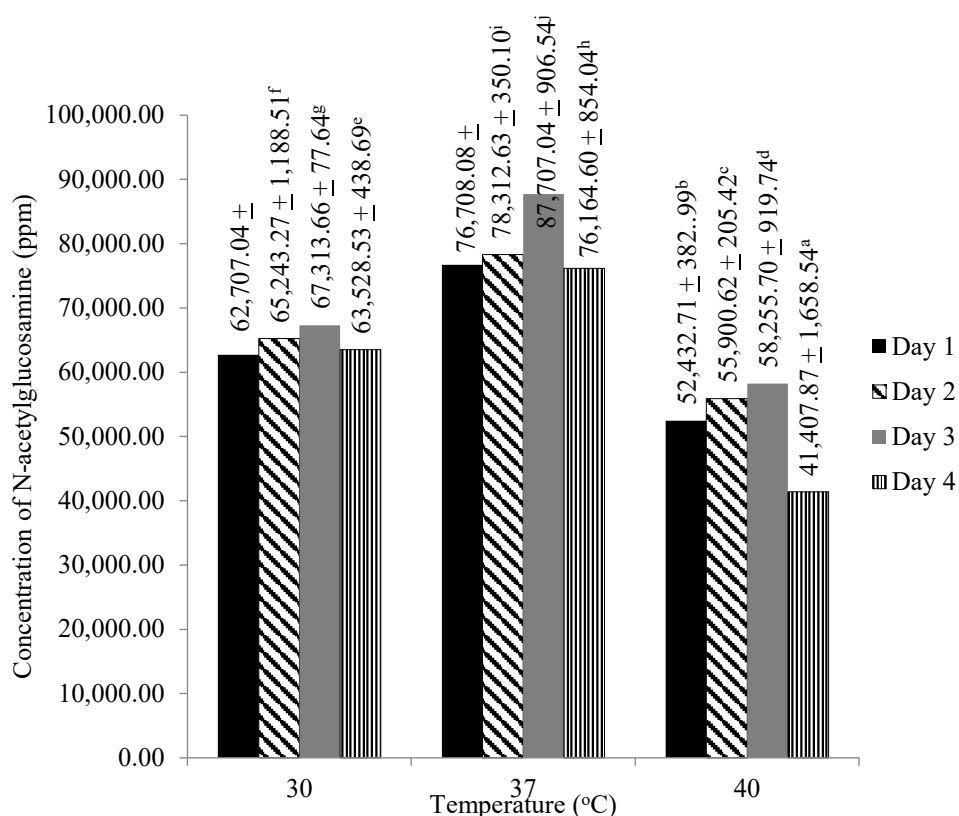


Figure 2. The effect of fermentation time and temperature on production of N-acetylglucosamine
 Note: The different notations (letters) indicating a significant difference (p<0.05)

CONCLUSION

The optimum condition for N-acetylglucosamine production from shrimp shells' chitin through combined fermentation using *Providencia stuartii* and *Salmonella enterica* was achieved in a fermentation medium with pH 8, using ratio between *Providencia stuartii* and

Salmonella enterica of 1:1, with fermentation temperature of 37°C for 3 days. These fermentation condition co yielded N-acetylglucosamine at the concentration of 87,707.04 ± 906.54 ppm.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Microbiology Laboratory and Food Quality

Control Laboratory at Universitas Pelita Harapan for providing the necessary facilities.

REFERENCES

- Agrawal, T., & Kotasthane, A. S. (2012). Chitinolytic assay of indigenous *Trichoderma* isolates collected from different geographical locations of Chhattisgarh in Central India. *Springerplus*, 1(1): 65-73. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-1-73>
- Aiba, S. (2009). Chemical and enzymatic modification of chitin and chitosan towards functional materials. In Lambertus A. M., van den Broek, C., & Boeriu, G. (Eds). *Chitin and Chitosan: Properties and Applications* (pp. 1-18). Institute for Biological Resources and Functions.
- Alabaraoye, E., Achilonu, M., & Hester, R. (2017). Biopolymer (chitin) from various marine seashell wastes: isolation and characterization. *Journal Polymer Environment*, 26(7), 120-132. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1118-y>
- Amalia, R., Rejeki, S., Widowati, L. L., & Ariyati, R. W. (2022). The growth of tiger shrimp (*Penaeus monodon*) and its dynamics of water quality in integrated culture. *Biodiversitas*, 23(1), 593-600. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230164>
- AOAC. 2005. *Official Methods of Analysis*. The Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg.
- Arbia, W., Arbia, L., Adour, L., & A. Amrane, A. (2012). Chitin extraction from crustacean shells using biological methods – a review. *Food Technology Biotechnology*, 51(1), 12-25.
- Ayangbenro, A. S. (2017). Biodegradation of natural bitumen by *Providencia stuartii* isolated from heavy oil contaminated soil. *Global NEST Journal*, 19(2), 353-358. <https://doi.org/10.30955/gnj.002148>
- Badan Pusat Statistik (BPS). (2018). *Statistik Perusahaan Perikanan 2017*. Retrieved May 5, 2019 from <https://www.bps.go.id/publication/2018/10/22/78d5e2542ad793f3fbe4ecc1/statistik-perusahaan-perikanan-2017.htm>
- Benhabiles, M. S., Salah, R., Lounici, H., Drouiche, N., Goosen, M. F. A., & Mameri, N. (2012). Antibacterial activity of chitin, chitosan and its oligomers prepared from shrimp shell waste. *Food hydrocolloids*, 29(1), 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.02.013>
- Cleo, T. P., Vilela, J., & Airoidi, C. (2014). The effect of chitin alkaline deacetylation at different condition on particle properties. *Procedia Chemistry*, 9, 220-225. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.05.026>
- Dompeipen, E. J., Kaimudin, M., & Dewa, R. P. (2016). Isolasi kitin dan kitosan dari limbah kulit udang. *Majalah Biam*, 12(1), 32-38.
- Frederiksen, R. F., Paspaliari, D. K., Larsen, T., Storgaard, B. G., Larsen, M. H., Ingmer, H., Palcic, M. M., & Leisner, J. J. (2013). Bacterial chitinases and chitin-binding proteins as virulence factors. *Microbiology*, 159, 833-847. <https://doi.org/10.1099/mic.0.051839-0>
- Halim, Y., Hardoko, & Christy, A. (2018). Optimum conditions for N-acetyl glucosamine production from *Penaeus monodon* shrimp shells by solid state fermentation using *Trichoderma virens*. *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology, and Environmental Sciences*, 20(4), 1081-1088.
- Halim, Y., Tantradjaja, S. F., Hardoko, & Handayani, R. (2021). Immobilization of *Providencia stuartii* cells in papaya

- trunk wood for N-acetylglucosamine production from *Pennaeus vannamei* shrimp shells. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, 13(2), 208-221. <http://doi.org/10.20473/jipk.v13i2.28011>
- Halim, Y., Handayani, R., Ayu, N., Lamtoro, S. T., & Hardoko. (2023). Penentuan kondisi fermentasi dalam produksi N-asetilglukosamin dari kulit udang menggunakan bakteri *Providencia stuartii*. *Jurnal Sains dan Teknologi Pangan*, 8(5), 6604-6617.
- Hardoko, Josephine, C., Handayani, R., & Halim, Y. (2020). Isolation, identification and chitinolytic index of bacteria from rotten Tiger shrimp (*Penaeus monodon*) shells. *AACL Bioflux*, 13(1), 360-371.
- Hossain, M. S., & Iqbal, A. (2014). Production and characterization of chitosan from shrimp waste. *Journal Bangladesh Agriculture University*, 1(12), 153-160. <https://doi.org/10.3329/jbau.v12i1.21405>
- Hudson, J. A., Olsen, L., & Cook, R. (2011). Maximum Growth Temperatures of foodborne pathogens and appropriate temperatures for hot holding. Publications Logistics Officer, Wellington.
- Isa, M. T., Ameh, A. O., Gabriel, J. O., & Adama, K. K. (2012). Extraction and characterization of chitin from Nigerian sources. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 21, 73-81.
- Islam, S. Z., Khan, M. & Noswad, A. K. M. A. (2016). Production of chitin and chitosan from shrimp shell wastes. *Journal Bangladesh Agriculture University*, 14(2), 253-259. <https://doi.org/10.3329/jbau.v14i2.32701>
- Kaimudin, M., & Leounupun, M. F. (2016). Karakterisasi kitosan dari limbah udang dengan proses bleaching dan deasetilasi yang berbeda. *Majalah Biam*, 12(1), 1-7.
- Keerthirathne, T. P., Ross, K., Fallowfield, H., & Whiley, H. (2016). A review of temperature, pH and other factors that influence the survival of *Salmonella* in mayonnaise and other raw egg. *Pathogens*, 5(63), 1-11. <https://doi.org/10.3390/pathogens5040063>
- Khatib, M. E., Tran, Q. T., Nasrallah, C., Lopes, J., Bolla, J. M., Vivaudou, M., Pages, J. M, & Colletier, J. P. (2017). *Providencia stuartii* forms biofilms and floating communities of cells that display high resistance to environmental insults. *PLOS One*, 12(3), 1-17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174213>
- Kurmasheva, N., Vorobiev, V., Sharipova, M., Efremova, T., & Mardanova, A. (2018). The potential virulence factors of *Providencia stuartii*: motility, adherence, and invasion. *BioMed Research International*, 2018, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2018/3589135>
- Liu, L., Liu, Y., Shin, H. D., Chen, R., Li, J., Du, G., & Chen, J. (2013). Microbial production of glucosamine and N-acetylglucosamine: advances and perspectives. *Applied Microbial Biotechnology*, 97(14), 6149-6158. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-4995-6>
- Marganof, P. (2003). Potensi limbah udang sebagai penyerap logam berat (timbal, kadmium dan tembaga) di perairan [Bachelor Thesis]. Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia.
- Michelle, V. (2019). Production of nN-acetylglucosamine from chitin extracted from shrimp shells by fermentation using *Salmonella enterica* strain LT2 [Bachelor Thesis]. Universitas Pelita Harapan, Tangerang, Indonesia.
- Nguyen, H. H., Yi, S. Y., Woubit, A., & Kim, M. (2016). A portable surface plasmon resonance biosensor for rapid

- detection of *Salmonella typhimurium*. *Applied Science Converging Technology*, 25(3): 61-65. <https://doi.org/10.5757/ASCT.2016.25.3.61>
- Nielsen, S. 2009. *Food Analysis*. Springer, USA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1478-1>
- Oscar, T. P. (2009). Predictive model for survival and growth of *Salmonella Typhimurium* DT104 on chicken skin during temperature abuse. *Journal of Food Protection*, 72(2), 304-314. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-72.2.304>
- Pan, S., Wu, S., & Kim, J. (2011). Preparation of glucosamine by hydrolysis of chitosan with commercial α -amylase and glucoamylase. *Journal of Zhejiang University*, 12(11), 931-934. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1100065>
- Podolak, R., Enache, E., Stone, W., Black, D. G., & Elliott, P. H. (2010). Sources and risk factors for contamination, survival, persistence and heat resistance of *Salmonella* in low-moisture foods. *Journal of Food Protection*, 73(10), 1919-1936. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-73.10.1919>
- Rahmawati, W., Dian, H., & Husniati. (2012). Produksi kitosan dari bahan baku cangkang udang menggunakan metode kimia dan enzimatis dengan enzim kitin deasetilase [Bachelor Thesis]. Universitas Lampung, Lampung, Indonesia.
- Rychlik, I., Martin, G., Methner, U., Lovell, M., Cardova, L., Sebkova, A., Sevcik, M., Damborsky, J., & Barrow, P. A. (2002). Identification of *Salmonella enterica* serovar typhimurium genes suppression in stationary-phase nutrient broth cultures and in the chicken intestines. *Archives of Microbiology*, 178(6), 411-420. <https://doi.org/10.1007/s00203-002-0458-7>
- Sanusi, M. (2004). Transformasi kitin dari hasil isolasi limbah industri udang beku menjadi chitosan. *Marina Chimica Acta*, 5(2), 28-32.
- Saskiawan, I., & Handayani, R. (2011). Production of *N*-acetyl-D-glucosamine by submerged fermentation from chitin. *Berita Biology*, 6, 20-28.
- Setia, I. N. (2015). Chitinolytic assay and identification of bacteria isolated from shrimp waste based on 16S rDNA sequences. *Advances in Microbiology*, 5, 541-548. <http://dx.doi.org/10.4236/aim.2015.57056>
- Sillanpaa, M., & Ncibbi, C. (2017). *A sustainable bioeconomy: the green industrial revolution*. Springer International Publishing, New York.
- Steele, R. (2004). *Understanding and measuring the shelf-life of food*. Woodhead Publishing Limited, Florida. <https://doi.org/10.1533/9781855739024>
- Tanaka, T., Fukui, T., & Imanaka, T. (2001). Different cleavage specificities of the dual catalytic domains in chitinase from the hyperthermophilic archaeon *Thermococcus*. *Journal of Biological Chemistry*, 276(38), 35629-35635. <https://doi.org/10.1074/jbc.M105919200>
- Ulfa, M. (2016). Penentuan kadar glukosamin dari fermentasi kulit udang windu (*Penaeus monodon*) dengan metode hidrolisis dan pemanasan [Bachelor Thesis]. Universitas Lampung, Lampung, Indonesia.
- Wang, W. P., Dua, Y. M., Qiu, Y. L., Wang, X. Y., & Hu, Y. J. (2008). A new green technology for direct production of low molecular weight chitosan. *Carbohydrate Polymers*, 74(1), 127-132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.01.025>
- Wanichpongpan, P., & Attasat, S. (2016). Optimum conditions for preparation of

glucosamine hydrochloride and glucosamine sulfate from shrimp-shell chitin. *International Journal of Applied Science and Technology*, 6(2), 24-29.

Younes I., & Rinaudo, M. (2014). Chitin and chitosan preparation from marine sources. *Structure, Properties and Application Marine Drugs*, 13(3), 1133-1174.

<https://doi.org/10.3390/md13031133>

The Role of Geopolymer Concrete in Achieving Sustainable Development Goals

Kevin Aprilio Wibowo¹, Jack Widjajakusuma^{1*}

¹Civil Engineering Study Program, Universitas Pelita Harapan, Jalan M.H. Thamrin Boulevard No.1100, Kelapa Dua, Tangerang Regency, Banten 15811

*Author correspondence: jack.widjajakusuma@uph.edu

ABSTRACT

A sense of safety and comfort is a fundamental right for all people. The United Nations strives to fulfil this through the establishment of 17 Sustainable Development Goals (SDGs). The construction sector plays a significant role in achieving these goals, particularly in the areas of Good Health and Well-being, Clean Water and Sanitation, Decent Work and Economic Growth, Sustainable Cities and Communities, Responsible Consumption and Production, and Climate Action. One key effort in the construction sector is replacing Portland cement with pozzolanic materials. Cement production emits large amounts of carbon dioxide, contributing substantially to global warming. To address this, pozzolanic materials such as fly ash are used as a substitute for cement in the production of geopolymer concrete. Based on compressive strength tests on cylindrical specimens and flexural strength tests on beam specimens, geopolymer concrete demonstrates high potential for structural applications. Its mechanical performance is comparable to that of conventional concrete, making it a promising alternative that supports sustainable development in the construction industry.

Keywords: Cement; Construction; Geopolymer Concrete; Pozzolanic; Sustainable Development Goals

INTRODUCTION

For all people on Earth to enjoy peace, justice, equality, and prosperity, the United Nations (UN) established 17 Sustainable Development Goals (SDGs) at its General Assembly in September 2015, to be achieved by 2030 (Alfathy et al., 2024). Indonesia, as a member of the UN, is participating in the implementation of the SDGs, one of which is by providing legal certainty through the Presidential Regulation of the Republic of Indonesia Number 111 of 2022 concerning the Implementation of the Achievement of the Sustainable Development Goals (Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia, 2022).

The Sustainable Development Report 2024 states that Indonesia has made significant progress in achieving the SDGs among all upper-middle-income countries. Over five years, from 2019 to 2024, Indonesia's score increased from 64.2 to 69.4, and its ranking improved from 102nd to 78th (J. Sachs et al., 2019; J. D. Sachs et al., 2024). The report also states that, out of 289 indicators, Indonesia has achieved the target for 40% of the indicators and has shown limited progress on 36% of the others, thus demonstrating significant improvement (J. D. Sachs et al., 2024).

Despite progress in some areas and countries, significant gaps remain in achieving the SDGs overall. The world's

primary concern today is climate change—a global challenge that requires a collective response from all countries. Indonesia, as one of the countries most vulnerable to the impacts of climate change, has a significant responsibility to reduce greenhouse gas emissions and increase its resilience to natural disasters related to climate change.

In 2023, efforts to mitigate greenhouse gas emissions became a key focus of the Indonesian government. The global community believes that with the help of science, technology, and innovation, greenhouse gas emissions can be reduced. Therefore, the role of universities—especially those with Faculties of Engineering/Technology or Science—is crucial in reducing greenhouse gas emissions through research, facilitating innovation, leading by example, and collaborating with community partners. In addition to having science, technology, and innovation, reducing greenhouse gas emissions also requires strong institutional support. Institutions engaged in reducing emissions must collaborate and synchronise their actions.

To help the government accelerate the achievement of the TPB/SDGs, the Civil Engineering Study Program at Pelita Harapan University seeks to contribute, one way being by encouraging the use of environmentally friendly and sustainable building materials to reduce greenhouse gas

emissions. One such alternative material is geopolymers, which can be used as a substitute for ordinary Portland cement (Singh & Middendorf, 2020). Geopolymer cement is a byproduct of coal combustion at power plants (PLTU), in the form of fly ash and bottom ash (FABA) (Prayoga & Afla, 2023). The purpose of this study is to examine the extent to which various TPB/SDG goals have been achieved in Indonesia through the use of geopolymers as a substitute for ordinary Portland cement.

MATERIALS AND METHODS

Sustainable Development Goals (SDGs)

The use of concrete in Indonesia is increasing in line with the rapid development of housing and infrastructure projects. This is due to several advantages of concrete, such as its high compressive strength and relative stability, high durability, low maintenance requirements, fire resistance, and ease of shaping. The UN General Assembly proposed a set of 17 global Sustainable Development Goals (SDGs) (Figure 1.). The construction industry plays a critical role in supporting the achievement of these goals (Fei et al., 2021). The industry contributes not only to a few but to almost all of the 17 SDGs. One of the key concerns in the construction sector is its significant contribution to greenhouse gas emissions (Arioğlu Akan et

al., 2017). Innovation in building materials that can reduce the carbon footprint contributes directly to sustainability targets.

Therefore, the use of alternative binders to replace cement is a strategic move toward fulfilling the world's SDG commitments.



Figure 1. Seventeen Sustainable Development Goals

Geopolymer Concrete

The basic ingredients for making concrete are cement, coarse aggregate, fine aggregate, and water. Indonesia is the largest producer and consumer of cement in Southeast Asia. At the global level, Indonesia is the 6th largest producer. Indonesia's cement production in 2023 was around 66 million metric tons (China Research and Intelligence, 2024). However, cement production is not environmentally friendly (Mehta, 2001). Various efforts are being made to reduce cement use, such as minimising combustion energy in the production process or using alternative materials with similar adhesive capabilities to cement in concrete. Several studies (Benhelal et al., 2013; Nielsen & Glavind, 2007; Ralli & Pantazopoulou, 2021;

Wibowo et al., 2024; Widjajakusuma et al., 2022) suggest the use of waste materials as substitutes for cement, such as fly ash, rice husk ash, palm oil ash, steel slag, microsilica, and metakaolin ash.

A study by Widjajakusuma et al. (2022) examined the mechanical characteristics of fly ash-based geopolymer concrete, including compressive strength, tensile strength, and flexural strength, and compared them with concrete made from Portland cement. The results showed that the average compressive strength of the geopolymer concrete reached 38.2 MPa, which is 13% lower than that of normal concrete. However, this value is still acceptable as a substitute for Portland cement-based concrete. The study found that the average flexural strength of

geopolymer concrete reached 22.9 kN·m, which is relatively better than that of normal concrete. This indicates that the bonding between geopolymer concrete and reinforcing steel is superior to that of normal concrete. The setting time of geopolymer concrete is approximately 30–60 minutes, whereas that of normal concrete is around 1–2 hours. The workability of geopolymer concrete is lower than that of normal concrete, but it is still sufficient to form blocks, as demonstrated in this study. Based on the study's results, geopolymer concrete can be recommended as an alternative material for construction.

RESULTS AND DISCUSSION

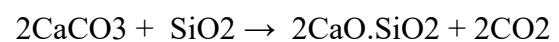
This study discusses how the transition from Portland cement to fly ash-based geopolymer paste can support various SDGs. One of the primary objectives of the SDGs is to limit the global average temperature increase to a maximum of 2°C, with the ultimate goal of achieving a temperature rise of no more than 1.5°C. Geopolymer cement has a lower carbon footprint than Portland cement—around 60% to 80% lower (Benhelal et al., 2013). Additionally, the use of fly ash waste as a pozzolanic material reduces pollution, utilises resources more efficiently, and promotes a circular economy.

The first discussion focuses on how reducing the use of Portland cement can

help achieve several SDGs. The high carbon footprint of Portland cement production can be attributed to the following factors.

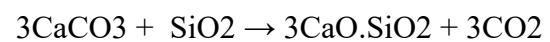
The burning of limestone and silica produces cement. Chemically, the result of the burning process is dicalcium silicate, as shown in the following reaction:

- Reaction (1)



and tricalcium silicate:

- Reaction (2)



Reactions (1) and (2) indicate that the production of 1 ton of cement emits approximately 0.545 tons of CO₂. Additionally, burning 1 ton of clinker requires around 1,800 MJ of energy and produces 0.4 tons of CO₂ (Rashad & Zeedan, 2011). Meanwhile, transporting raw materials results in CO₂ emissions of about 0.1 tons (Benhelal et al., 2013). Therefore, the total emissions from producing 1 ton of cement amount to approximately 1 ton of CO₂ (Benhelal et al., 2013; Yu et al., 2019). Technical and managerial inefficiencies can further increase emissions. Overall, the cement industry contributes about 5% to 7% of global annual CO₂ emissions (Benhelal et al., 2013).

Thus, replacing ordinary Portland cement with geopolymer cement can help reduce emissions and support Goal 13 of the

SDGs: "Take urgent action to combat climate change and its impacts."

The production of 1 ton of cement also consumes natural resources. Around 2.8 tons of non-renewable raw materials, such as limestone and clay, are required to produce 1 ton of cement (Guo et al., 2010). Therefore, using geopolimer cement helps conserve natural resources and aligns with Goal 12.2 of the SDGs: "By 2030, achieve sustainable management and efficient use of natural resources."

Concrete production also requires a large volume of water, as it serves both as a cement hydrator (approximately 25% of the cement weight) and as a lubricant for aggregates. Additionally, water is essential for curing. According to SNI 03-6861.1-2002, only clean water is allowed in concrete production (Badan Standardisasi Nasional, 2002). Although no exact data exist, it is estimated that the concrete industry consumes around 1 trillion litres of clean water annually (Mehta, 2001).

Recent studies (Cahyadi et al., 2022; Danareksa Research Institute, 2023) have highlighted that clean water supply remains a global concern, including in Indonesia. This is due to extreme climate change and increasing water pollution in rivers, lakes, and streams. The only practical large-scale solution is to use water resources more efficiently.

Thus, replacing Portland cement with geopolimer cement can significantly reduce the use of clean water and support SDG Target 6.4: "By 2030, substantially increase water-use efficiency across all sectors and ensure sustainable withdrawals and supply of freshwater to address water scarcity and substantially reduce the number of people suffering from water scarcity" (Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia, 2022).

The second discussion examines how the use of fly ash-based pozzolanic cement contributes to achieving the SDGs. The use of fly ash significantly supports the concept of a circular economy, which is based on three key principles: eliminating or reducing waste and pollution, increasing the value of waste by converting it into materials or products, and regenerating natural resources. The circular economy has great potential to support several SDG goals.

Fly ash and bottom ash (FABA), which are by-products of coal combustion in power plants, are examples of such waste. In 2019, FABA production reached approximately 8.3 million tons and is expected to continue rising with economic and population growth. Dry fly ash can cause respiratory irritation when inhaled and may release hazardous elements such as lead, arsenic, or mercury into groundwater, resulting in secondary pollution.

Utilising fly ash as a cement substitute is a form of circular economy and can contribute to several SDGs, including Goal 3 (Good Health and Well-being), Goal 8 (Decent Work and Economic Growth), Goal 11 (Sustainable Cities and Communities), and Goal 12 (Responsible Consumption and Production).

Research on geopolymer concrete at the Civil Engineering Study Program of Universitas Pelita Harapan began with the development of a suitable mix design. The molarity of the sodium hydroxide (NaOH) solution affects compressive strength, setting time, and workability. Higher NaOH concentration results in higher compressive strength but also accelerates setting time and decreases workability—and vice versa. After identifying a mix design that could yield a compressive strength of 25–40 MPa, further research explored the effect of admixtures to slow down the setting time. One challenge of geopolymer concrete is its short setting time (30–60 minutes) compared to that of normal concrete (60–120 minutes). Certain types of admixtures were found to increase both workability and setting time.

Another factor affecting compressive strength is the curing method. While traditional concrete is typically cured by surface wetting, research shows that geopolymer concrete cured at elevated temperatures (such as in ovens or steam

chambers) exhibits higher early-age strength. However, recent findings suggest that while high-temperature curing accelerates the chemical reaction, it does not significantly affect long-term compressive strength compared to curing at room temperature.

Material homogeneity is also crucial in achieving optimal results. In the preparation of geopolymer concrete, sodium hydroxide flakes are typically dissolved in water and allowed to stand for 24 hours to achieve a homogeneous solution. A study investigating the use of freshly mixed (non-aged) sodium hydroxide showed lower compressive strength, confirming the importance of a homogeneous alkaline solution.

High compressive strength is critical in structural materials. Therefore, additional research explored mix designs that incorporate materials rich in silica, alumina, and calcium, such as palm kernel shell ash, rice husk ash, kaolin, iron powder, and marble powder. These additions were found to enhance compressive strength when used in the right proportions.

Further studies involved flexural testing of geopolymer concrete beams with dimensions of 125 × 200 × 1600 mm to evaluate their potential as structural elements. Other research examined the effect of fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement, the impact of direct and

indirect burning, and indirect tensile strength.

Scanning electron microscope (SEM) tests were conducted on several specimens to analyse microstructural characteristics. The results showed that compressive strength correlates with crack width and frequency. Early-age specimens (Figure 2.) displayed different crack patterns compared to specimens aged 56 days (Figure 3.), due to the continued pozzolanic reaction over time.

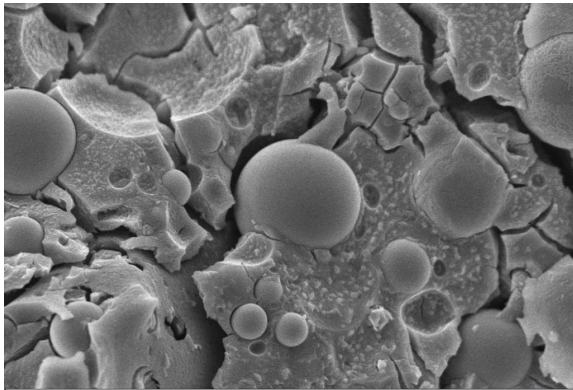


Figure 2. Scanning electron microscopy results of 7-day-old geopolymer concrete

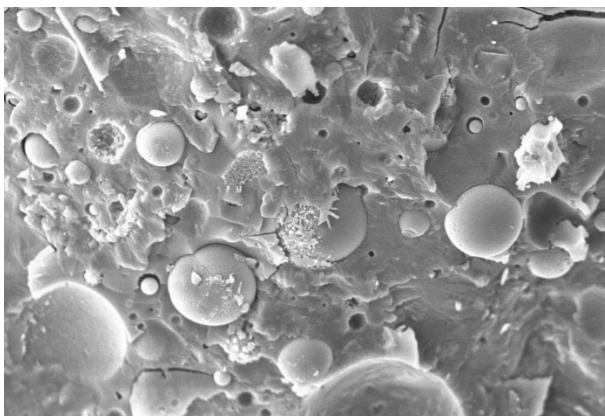


Figure 3. Scanning electron microscopy results of 56-day-old geopolymer concrete

CONCLUSION

The use of fly ash-based cement as a substitute for Portland cement supports

the achievement of several SDG targets, including Goal 3 (Good Health and Well-being), Goal 6 (Clean Water and Sanitation), Goal 8 (Decent Work and Economic Growth), Goal 11 (Sustainable Cities and Communities), Goal 12 (Responsible Consumption and Production), and Goal 13 (Climate Action). To enable the widespread use of fly ash-based cement as a commercial construction material, it is essential to establish technical standards (such as SNI) that ensure compliance with all structural and non-structural concrete requirements for building applications.

ACKNOWLEDGEMENT

The author would like to express sincere gratitude to the Research and Community Service Institute (LPPM) of Universitas Pelita Harapan for the financial support provided through the internal research grant, Research Number P-02-FaST/I/2023. This support was instrumental in enabling the collection and analysis of data for the findings presented in this article.

REFERENCES

- Alfathy, R. M., Saputro, S., Sarwanto, & Ramli, M. (2024). Implementation of sustainable development goals in higher education modalities: Literature review. *Journal of Turkish Science Education*, 21(1), 22–43.

- <https://doi.org/10.36681/tused.2024.002>
- Arioğlu Akan, M. Ö., Dhavale, D. G., & Sarkis, J. (2017). Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1195–1207. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.225>
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A (Bahan Bangunan Bukan Logam) SNI 03-6861.1-2002*. BSN.
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 142–161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>
- Cahyadi, R., Kusumaningrum, D., & Prasetyoputra, P. (2022). Self-supplied water in Indonesia: recent spatial and socio-demographic conditions and its future development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1062(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1062/1/012038>
- China Research and Intelligence. (2024). *Indonesia Cement Industry Research Report 2024-2033*. In *CRI*.
- Danareksa Research Institute. (2023). *Pengelolaan Air Bersih Berkelanjutan*.
- Fei, W., Opoku, A., Agyekum, K., Oppon, J. A., Ahmed, V., Chen, C., & Lok, K. L. (2021). The Critical Role of the Construction Industry in Achieving the Sustainable Development Goals (SDGs): Delivering Projects for the Common Good. *Sustainability*, 13(16), 9112. <https://doi.org/10.3390/su13169112>
- Guo, X., Shi, H., & Dick, W. A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003>
- Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia. (2022). *Peraturan Presiden (PERPRES) Nomor 111 Tahun 2022 : Pelaksanaan Pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan*.
- Mehta, K. (2001). Reducing the Environmental Impact of Concrete. *Concrete International*, 23, 61–66.
- Nielsen, C. V., & Glavind, M. (2007). Danish Experiences with a Decade of Green Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 3–12. <https://doi.org/10.3151/jact.5.3>
- Prayoga, M. B. R., & Afla, R. A. (2023). Utilization of fly ash and bottom ash waste: a study at PLTU tanjung jati B, Jepara, Indonesia. *Asean Journal of Toxicology, Environmental, and Occupational Health*, 1(1), 9–19.
- Ralli, Z. G., & Pantazopoulou, S. J. (2021). State of the art on geopolymer concrete. *International Journal of Structural Integrity*, 12(4), 511–533. <https://doi.org/10.1108/IJSI-05-2020-0050>
- Rashad, A. M., & Zeedan, S. R. (2011). The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3098–3107. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.044>
- Sachs, J. D., Lafortune, G., & Fuller, G. (2024). *Sustainable Development Report 2024*.
- Sachs, J., Schmidt-Traub, G., Kroll, C., Lafortune, G., & Fuller, G. (2019). *Sustainable Development Report 2019*.
- Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>

-
- Wibowo, K. A., Christianto, D., & Widjajakusuma, J. (2024). Peningkatan Kuat Tekan pada Beton Geopolimer Akibat Metode Perawatan Dipanaskan. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 79–86. <https://doi.org/10.24912/jmts.v7i1.25150>
- Widjajakusuma, J., Bali, I., Ng, G. P., & Wibowo, K. A. (2022). An Experimental Study on the Mechanical Properties of Low-Aluminum and Rich-Iron-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Advances in Technology Innovation*, 7(4), 295–302. <https://doi.org/10.46604/aiti.2022.10525>
- Yu, Q., Li, S., Li, H., Chai, X., Bi, X., Liu, J., & Ohnuki, T. (2019). Synthesis and characterization of Mn-slag based geopolymer for immobilization of Co. *Journal of Cleaner Production*, 234, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.149>

Optimasi Formula Balsam Stik Minyak Atsiri Lengkuas (*Alpinia galanga* (L.) Willd.)

[*Optimization of Galangal (Alpinia galanga* (L.) Willd.) Essential Oil Stick Balsam Formula]

Ernestine Arianditha Pranasti^{1*}, Nurista Dida Ayuningtyas², Anastasia S. Pramitaningastuti³, Gabriella Lisy Cahaya⁴

^{1,3} Program Studi Pendidikan Profesi Apoteker, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Pelita Harapan

^{2,4} Program Studi Sarjana Farmasi, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Pelita Harapan

*Korespondensi penulis: ernestine.pranasti@uph.edu

ABSTRACT

*High occurrence of muscle pain has encouraged the development of practical natural solutions, such as stick balm formulated with galangal (*Alpinia galanga*) essential oil, which shows potential as a topical analgesic agent. This study formulated galangal stick balm to relieve muscle pain while meeting physical requirements and user preferences. The formulation involved variations in base composition (solid paraffin and white petrolatum) and methyl salicylate concentration to evaluate physical characteristics such as pH, homogeneity, melting point, and irritation potential. A hedonic test was conducted to determine the most preferred formula. Results showed that all formulas had safe pH levels (4.5–6.5), good homogeneity, melting points between 57–60°C, and caused no skin irritation in volunteers. Hedonic testing identified Formula F4 as the best candidate based on aroma, warmth, and texture. Therefore, galangal essential oil stick balm has promising potential to be developed as a safe, stable, and user-friendly analgesic topical preparation.*

Keywords : Galangal; Formula; Balm; Stick

ABSTRAK

Tingginya kasus nyeri otot mendorong pengembangan solusi alami yang praktis, seperti balsam stik berbahan minyak atsiri lengkuas (*Alpinia galanga*), yang memiliki potensi sebagai agen analgetik topikal. Penelitian ini merumuskan formulasi balsam stik lengkuas untuk meredakan nyeri otot yang memenuhi syarat fisik dan disukai. Formulasi dilakukan dengan variasi komposisi basis (paraffin solid dan vaselin album) dan variasi metil salisilat untuk mengevaluasi karakteristik fisik seperti pH, homogenitas, titik lebur, dan potensi iritasi. Uji kesukaan dilakukan untuk melihat formula mana yang paling disukai. Hasil menunjukkan bahwa seluruh formula memiliki pH dalam rentang aman (4,5–6,5), homogenitas yang baik, titik lebur antara 57–60°C, serta tidak menimbulkan iritasi pada kulit sukarelawan. Uji kesukaan menunjukkan Formula F4 sebagai kandidat terbaik berdasarkan aroma, kehangatan, dan tekstur. Dengan demikian, balsam stik minyak atsiri lengkuas berpotensi dikembangkan sebagai sediaan antinyeri yang aman, stabil, dan disukai pengguna.

Kata kunci : Lengkuas; Formula; Balsam; Stik

PENDAHULUAN

Nyeri otot merupakan keluhan umum yang ditandai dengan rasa sakit, berat, dan kaku (Azis *et al.*, 2022). Prevalensi mialgia secara global mencapai 50,62% menurut WHO (2018), dan di Indonesia sekitar 45–59% (Azis *et al.*, 2022). Survei Jakpat terhadap 487 responden Gen Z menunjukkan 58,5% mengalami pegal-pegal (Rizaty, 2022). Penyebabnya meliputi gangguan saraf, penggunaan otot berlebihan, peradangan, infeksi, cedera, penyakit otot, stres, dan ketegangan (Leclair *et al.*, 2023).

Postur kerja seperti berdiri, duduk, jongkok, membungkuk, dan berjalan juga berkontribusi terhadap nyeri otot (Yudiardi *et al.*, 2021). Mialgia lebih sering menyerang penduduk negara industri (WHO, 2018). Secara keseluruhan, prevalensi nyeri otot diperkirakan mencapai 60–85% populasi dunia.

Melihat tingginya prevalensi nyeri otot di masyarakat, diperlukan solusi berbasis bahan alam yang efektif dan mudah digunakan. Indonesia, sebagai negara dengan keanekaragaman hayati tinggi, memiliki berbagai tanaman penghasil minyak atsiri yang berpotensi dikembangkan. Salah satu tanaman tersebut adalah lengkuas (*Alpinia galanga* (L.) Willd.), anggota famili Zingiberaceae yang berasal dari Cina, India, dan Asia Tenggara,

serta dikenal sebagai tanaman obat dengan kandungan senyawa aktif seperti flavonoid dan minyak atsiri yang memiliki berbagai farmakologis termasuk antinyeri / analgetik (Eram *et al.*, 2019; Fath *et al.*, 2024; Sumonda *et al.*, 2021).

Di Indonesia, rimpang lengkuas termasuk dalam kategori tanaman biofarmaka dan menempati posisi ketiga dalam kontribusi terhadap total tanaman biofarmasi nasional dengan persentase sebesar 6,33% pada tahun 2020 (BPS, 2020; Pradani *et al.*, 2024). Namun, pemanfaatan minyak atsiri oleh masyarakat masih terbatas, terutama dalam bentuk sediaan topikal. Oleh karena itu, diperlukan inovasi produk yang lebih praktis dan nyaman, seperti balsam stik (Widnyana *et al.*, 2021).

Balsam stik merupakan sediaan topikal semi padat yang digunakan dengan cara dioleskan atau digosok pada kulit, terutama di area peradangan sendi. Produk ini bersifat rubifisien, memberikan efek hangat dan membantu relaksasi otot (Ayuningtyas *et al.*, 2024). Formulasinya umumnya menggunakan basis salep berbahan hidrokarbon yang mampu menghidrasi kulit dan meningkatkan penyerapan bahan aktif (Hartesi *et al.*, 2020). Dibandingkan salep, balsam stik memiliki konsistensi lebih padat sehingga lebih praktis digunakan.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Alat

Alat yang digunakan adalah timbangan analitik (OHAUS), penangas air (Memmert), cawan porselen, gelas kimia (Borosil), batang pengaduk, spatula, wadah/cetakan stik, sudip, serbet, pH meter (Metrohm), kaca preparat, oven (Memmert), *hotplate* (Thermo).

Bahan

Minyak atsiri rimpang lengkuas (Happy Green, nomor izin edar BPOM: TR226076001), metil salisilat, mentol, paraffin solidum, vaselin album.

Metode Penelitian

Formulasi Sediaan Balsam Stik

Paraffin solid dan vaselin album dilebur dalam cawan penguap menggunakan metode pemanasan tidak langsung (water bath) pada suhu $\pm 90^{\circ}\text{C}$ hingga terbentuk campuran yang homogen. Secara terpisah, menthol dilarutkan bersama metil salisilat dalam gelas kimia dan diaduk hingga larut sempurna. Setelah campuran basis (paraffin dan vaselin) mencapai homogenitas, basis diangkat dari penangas dan didinginkan hingga suhu mencapai $\pm 65^{\circ}\text{C}$. Selanjutnya, larutan menthol-metil salisilat serta minyak atsiri lengkuas ditambahkan ke dalam campuran basis dan diaduk secara perlahan hingga

tercampur merata. Campuran akhir dituangkan ke dalam cetakan stik dan dibiarkan mengeras pada suhu ruang hingga terbentuk sediaan balsam stik.

Tabel 1. Formula Balsam Stik

Bahan	Jumlah			
	F1	F2	F3	F4
Minyak Atsiri Lengkuas (mL)	2	2	2	2
Metil Salisilat (gram)	6	6	7	7
Menthol (gram)	2,5	2,5	2,5	2,5
Paraffinum Solidum (gram)	7	7,5	7	7,5
Vaselin Album (gram)	2,5	2,5	1,5	1,5

Evaluasi Sediaan Balsam Stik

Uji Homogenitas Sediaan

Uji Homogenitas dengan cara meletakkan 1 gram sediaan di atas plat kaca dan ditimpa plat kaca lain di atasnya kemudian dilihat apakah ada gumpalan kasar pada sediaan. Pengujian diulang sebanyak 3 kali (Purba *et al.*, 2020).

Uji pH Sediaan

Pengukuran pH dilakukan dengan menggunakan alat pH meter setelah sediaan dilelehkan terlebih dahulu pada suhu sekitar $\pm 60^{\circ}\text{C}$, dicampurkan dengan 10 bagian air, aduk, kemudian elektroda dimasukkan dan nilai yang tertera pada pH meter menunjukkan pH dari sediaan tersebut (Hairunnisa *et al.*, 2024). Pengujian diulang sebanyak 3 kali (Rachman *et al.*, 2023).

Uji Titik Lebur Sediaan

Uji titik lebur sampel *lip balm* menggunakan *hotplate*. Ditimbang sampel sebanyak 1 g menggunakan cawan porselen. Kemudian diletakkan di atas *hotplate* suhu awal 50°C dan ditambah 1°C setiap 10 menit, uji ini dilakukan hingga sediaan melebur (Ardini & Sumardilah, 2021).

Uji Iritasi Kulit

Uji iritasi dilakukan terhadap 16 panelis. Pengujian ini dilakukan dengan cara mengoleskan sediaan balsam stik pada kulit lengan, kemudian dibiarkan selama 30-60 menit dan diamati reaksi kulit yang terjadi. Reaksi iritasi ditandai oleh adanya ruam, pembengkakan, gatal, atau adanya benjolan kecil di daerah yang diberi perlakuan (Purba *et al.*, 2020). Untuk

melihat tingkat iritasi yang dialami oleh panelis, dibuat penilaian skala numerik dengan kategori-kategori seperti yang tertera pada Tabel 2.

Uji Kesukaan (*Hedonic Test*)

Uji kesukaan dilakukan secara visual dan organoleptik terhadap 16 orang sukarelawan. Atribut pengamatan pada uji kesukaan adalah aroma, warna, dan sensasi kehangatan yang dirasakan pada kulit (Purba *et al.*, 2020). Setiap sukarelawan diminta untuk mengoleskan formula sediaan yang dibuat pada lengan bawah (Purba *et al.*, 2020). Kemudian untuk melihat tingkat kesukaan sukarelawan terhadap sediaan berdasarkan masing-masing parameter digunakan skala numerik dengan kategori-kategori yang seperti tertera pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Uji, Skala, Kategori, dan Keterangan Uji Hedonik dan Uji Iritasi

Parameter Uji	Skala	Kategori	Keterangan Detil (Penilaian)
Aroma (Kesukaan)	1	Sangat Tidak Suka	Bau sangat menyengat atau tidak sedap.
	2	Tidak Suka	Bau kurang enak atau ada bau yang mengganggu.
	3	Netral	Tidak terlalu suka, tidak terlalu tidak suka.
	4	Suka	Bau enak dan nyaman.
	5	Sangat Suka	Bau enak, disukai, dan menyenangkan.
---	---	---	---
Hangat (Sensasi Panas)	1	Sangat Tidak Kuat	Tidak ada sensasi hangat sama sekali.
	2	Tidak Kuat	Hangatnya sangat minimal atau hampir tidak terasa.
	3	Terlalu kuat	Hangatnya terlalu panas/berlebihan.
	4	Kuat, tapi berlebihan	Hangatnya terasa jelas, namun kurang nyaman karena terasa kuat.
	5	Optimal/Pas	Hangatnya ideal, terasa pas, nyaman, tidak berlebihan.
---	---	---	---
Tekstur	1	Sangat Tidak Suka	Sangat lengket/berminyak, susah diratakan, atau kasar.

(Kenyamanan Olesan)	2	Tidak Suka	Agak lengket/berminyak, sedikit sulit diratakan.
	3	Netral	Cukup mudah dioleskan, tidak terlalu lengket/berminyak.
	4	Suka	Mudah diratakan, halus, cepat meresap, dan nyaman di kulit.
	5	Sangat Suka	Sangat halus, merata dengan sempurna, tidak lengket sama sekali.
	---	---	---
Iritasi (Efek Samping)	1	Iritasi Sangat Kuat	Rasa gatal/perih yang hebat, panas, dan menimbulkan kemerahan parah.
	2	Iritasi Kuat	Rasa gatal/perih yang jelas, mungkin disertai kemerahan ringan.
	3	Iritasi Ringan	Rasa gatal/perih ringan yang berlangsung sebentar.
	4	Iritasi Sangat Ringan	Rasa gatal/perih sangat minimal dan segera hilang.
	5	Tidak Ada Iritasi	Tidak ada rasa gatal, perih, atau kemerahan sama sekali.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Formulasi Balsam Stik

Formulasi sediaan balsam stik dengan minyak atsiri lengkuas dilakukan dengan variasi komposisi basis paraffin dan vaselin album sebagai bahan dasar untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap karakteristik fisik seperti kekerasan / tekstur dan titik lebur sediaan. Parafin solid dan vaselin album digunakan sebagai basis karena keduanya memiliki sifat oklusif dan mampu membentuk struktur padat (Kamrani *et al.*, 2024) yang sesuai untuk sediaan stik. Variasi dilakukan pada jumlah metil salisilat, paraffinum solidum, dan vaselin album. Peningkatan konsentrasi metil salisilat bertujuan untuk mengoptimalkan efek analgesik dan sensasi hangat yang dihasilkan.

Dalam proses pembuatan, terdapat beberapa proses kritis yang perlu

diperhatikan. Pelelehan basis dilakukan menggunakan metode pemanasan tidak langsung (*water bath*) pada suhu sekitar 90°C untuk melelehkan seluruh lemak padat memastikan homogenitas campuran. Penambahan komponen aktif seperti menthol, metil salisilat, dan minyak atsiri lengkuas dilakukan setelah campuran basis didinginkan hingga suhu $\pm 65^{\circ}\text{C}$, guna menjaga stabilitas senyawa volatil dan mencegah penguapan. Proses homogenisasi harus dilakukan secara perlahan dan merata untuk memastikan distribusi zat aktif yang konsisten. Selain itu, pencetakan ke dalam wadah stik harus dilakukan segera setelah pencampuran selesai dan pendinginan pada suhu ruang diperlukan untuk memperoleh bentuk akhir yang stabil dan tidak mudah meleleh. Kebersihan alat dan wadah juga menjadi faktor penting dalam menjaga

mutu dan keamanan sediaan balsam stik yang dihasilkan.

Hasil sediaan balsem stik dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sediaan Balsam Stik Minyak Atsiri Lengkuas

Hasil Pengukuran pH Sediaan

Nilai pH yang baik pada sediaan balsem stik adalah 4,5 – 6,5 atau sesuai dengan nilai pH kulit pada manusia (Widnyana *et al.*, 2021). Jika pH pada sediaan topikal terlalu asam, hal tersebut dapat memicu iritasi pada kulit. Sebaliknya, pH yang terlalu basa juga tidak dianjurkan karena dapat menyebabkan kulit menjadi kering dan bersisik. Hasil pengukuran pH pada sediaan balsem stik dapat ditemukan pada Tabel 3. Seluruh formula memenuhi syarat, yaitu berada dalam rentang 4,5 – 6,5.

Tabel 3. Hasil Evaluasi pH

No	Formula	pH (n=3)
1	F1	5,36 ± 0,040
2	F2	5,35 ± 0,015
3	F3	5,13 ± 0,017
4	F4	5,12 ± 0,021

Hasil pengukuran pH menunjukkan bahwa F1 dan F2 memiliki pH tertinggi, yaitu 5,36 ± 0,040 dan 5,35 ± 0,015. F3 dan F4 menunjukkan pH lebih rendah, masing-

masing 5,13 ± 0,017 dan 5,12 ± 0,021. Penurunan pH pada F3 dan F4 kemungkinan besar disebabkan oleh peningkatan konsentrasi metil salisilat dari 6 gram menjadi 7 gram. Metil salisilat adalah ester dari asam salisilat yang dikenal memiliki sifat asam lemah (Priambodo *et al.*, 2019), sehingga peningkatan jumlahnya dapat menurunkan pH sediaan. Selain itu, penurunan vaselin album dari 2,5 gram menjadi 1,5 gram pada F3 dan F4 juga dapat mengurangi efek emolien dan penyangga terhadap keasaman, sehingga pH menjadi lebih rendah.

Hasil Pemeriksaan Homogenitas Sediaan

Hasil uji homogenitas pada sediaan balsam stik menunjukkan bahwa tidak ditemukan butiran kasar ketika sediaan diaplikasikan pada kaca transparan (objek glass). Hal ini mengindikasikan bahwa sediaan yang dibuat memiliki susunan yang merata atau homogen.

Hasil Uji Titik Lebur

Suhu lebur balsam stik dibuat lebih tinggi antara 50-70°C sehingga pada kondisi penyimpanan (25-30°C) tidak meleleh (Hairunnisa *et al.*, 2024). Hasil menunjukkan bahwa sediaan aman disimpan pada suhu ruang dan tidak akan cepat meleleh pada suhu diatas 50°C sehingga balsam stik lebih tahan lama pada panas sinar matahari saat penyimpanan.

Hasil uji titik lebur sediaan F1, F2, F3, dan F4 dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Evaluasi Titik Lebur

No	Formula	Suhu Lebur (C°) (n=3)
1	F1	57.33 ± 0,577
2	F2	60.67 ± 0,577
3	F3	57.00 ± 1,000
4	F4	60.67 ± 0,577

Titik lebur tertinggi ditemukan pada F2 dan F4 (60,67 °C), sedangkan F1 dan F3 lebih rendah (sekitar 57 °C). Hal ini disebabkan oleh peningkatan jumlah Paraffin solidum dari 7 gram (F1, F3) menjadi 7,5 gram (F2, F4). Parafin padat memiliki titik leleh tinggi (sekitar 48-66 °C) dan berfungsi sebagai bahan dasar yang memberikan struktur dan kekerasan pada sediaan (Asyilla, 2022).

Hasil Uji Iritasi Sediaan Terhadap Kulit Sukarelawan

Hasil uji iritasi yang dilakukan terhadap 16 panelis dan didapatkan hasil dimana seluruh panelis memberikan kriteria 5 sebagai uji iritasi dimana tidak ada rasa gatal, perih, atau kemerahan sama sekali pada keempat formula balsam stik.

Tabel 5. Hasil Evaluasi Uji Iritasi

No	Panelis	Hasil Uji Iritasi			
		F1	F2	F3	F4
1	Panelis 1	5	5	5	5
2	Panelis 2	5	5	5	5
3	Panelis 3	5	5	5	5
4	Panelis 4	5	5	5	5

No	Panelis	Hasil Uji Iritasi			
		F1	F2	F3	F4
5	Panelis 5	5	5	5	5
6	Panelis 6	5	5	5	5
7	Panelis 7	5	5	5	5
8	Panelis 8	5	5	5	5
9	Panelis 9	5	5	5	5
10	Panelis 10	5	5	5	5
11	Panelis 11	5	5	5	5
12	Panelis 12	5	5	5	5
13	Panelis 13	5	5	5	5
14	Panelis 14	5	5	5	5
15	Panelis 15	5	5	5	5
16	Panelis 16	5	5	5	5
Rata-rata		5	5	5	5

Hasil Uji Kesukaan (*Hedonic Test*)

Hasil dari uji kesukaan didapatkan data uji kesukaan balsam stik berbahan minyak lengkuas berdasarkan 16 panelis dan 4 formula (F1, F2, F3, F4) yang dapat dilihat pada Tabel 6 dan untuk data lebih lebih rinci pada Tabel 7.

Tabel 6. Rata-rata Nilai Kesukaan per Formula

Atribut	F1	F2	F3	F4
Aroma	3.6	3.4	3.9	3.8
Kehangatan	2.6	2.4	2.6	3.8
Tekstur	3.9	3.9	3.9	4.1

Analisis atribut kesukaan menempatkan Formula F4 sebagai pilihan terbaik, menunjukkan hasil hedonik yang tinggi dan konsisten. Pada atribut aroma, F3 mendapat skor tertinggi (3,9), namun F4 mengikutinya dengan sangat dekat (3,8), menandakan keduanya paling disukai. Keunggulan F4 paling signifikan terlihat

pada kehangatan sediaan, di mana skor 3,8 jauh melampaui formula lain yang hanya berkisar antara 2,4 hingga 2,6. Meskipun keempat formula memiliki tekstur yang relatif seragam, F4 kembali sedikit unggul

dengan skor rata-rata 4,1. Formula F4 menjadi kandidat paling potensial untuk pengembangan produk, sementara Formula F2 yang secara umum mendapat skor terendah.

Tabel 7. Data Skor Panelis terhadap Uji Aroma, Uji Kehangatan, dan Uji Tekstur Keempat Formula Balsam Stik.

No	Panelis	Hasil Uji Aroma				Hasil Uji Kehangatan Sediaan				Hasil Uji Tekstur			
		F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
1	Panelis 1	5	5	4	4	5	2	5	4	4	4	4	3
2	Panelis 2	5	3	3	2	1	2	1	5	5	4	4	5
3	Panelis 3	5	5	5	5	5	2	2	5	5	4	4	4
4	Panelis 4	5	5	5	4	2	2	4	4	5	4	4	5
5	Panelis 5	4	5	5	5	5	1	1	5	5	3	3	4
6	Panelis 6	1	1	2	2	1	4	3	2	1	3	3	3
7	Panelis 7	3	4	3	3	3	4	3	3	3	4	4	4
8	Panelis 8	4	3	3	4	5	1	3	5	4	4	4	5
9	Panelis 9	3	3	5	3	1	1	5	1	3	3	3	3
10	Panelis 10	3	4	4	5	4	5	3	5	1	4	4	5
11	Panelis 11	3	2	3	5	1	1	1	1	5	4	4	3
12	Panelis 12	5	5	5	5	1	1	1	5	5	5	5	5
13	Panelis 13	1	1	5	4	1	2	1	5	4	4	4	5
14	Panelis 14	5	1	5	4	4	4	5	5	5	3	3	4
15	Panelis 15	2	2	2	2	1	5	2	1	3	4	4	4
16	Panelis 16	4	5	3	4	1	1	1	5	4	5	5	4
Rata-rata		3,6	3,4	3,9	3,8	2,6	2,4	2,6	3,8	3,9	3,9	3,9	4,1

KESIMPULAN

Formulasi balsam stik dengan minyak atsiri lengkuas menunjukkan hasil yang memenuhi standar karakteristik fisik dan keamanan sediaan topikal. Seluruh formula memiliki pH yang sesuai dengan pH kulit (4,5–6,5), homogenitas yang baik, serta titik lebur antara 57–60°C yang

menjamin kestabilan pada suhu ruang. Uji iritasi terhadap 16 panelis menunjukkan tidak adanya reaksi negatif pada kulit, menandakan keamanan penggunaan. Berdasarkan uji kesukaan, Formula F4 dinilai paling unggul dari segi aroma, kehangatan, dan tekstur, sehingga menjadi kandidat terbaik untuk pengembangan

produk balsam stik berbahan minyak atsiri lengkuas sebagai sediaan antinyeri yang praktis dan nyaman digunakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Farmasetika dan Teknologi Farmasi, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Pelita Harapan yang telah memberikan izin penggunaan fasilitas laboratorium sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardini, d., & sumardilah, d. (2021). Efek lip balm ekstrak lidah buaya (*Aloe vera*) sebagai pelembab bibir. *Jurnal kesehatan metro sai wawai*, 10–18. <https://doi.org/10.26630/jkm.v14i1.2886>
- Ayuningtyas, N. D., Hardy, J., Pramitaningastuti, A. S., Pranasti, E. A., Santoso, F. R. C., & Setiawan, B. (2024). Edukasi pemanfaatan toga dan pembuatan produk disinfektan serta balsam stik berbahan dasar lengkuas. *Jurnal empathy pengabdian kepada masyarakat*, 5(1), 48–55. <https://doi.org/10.37341/jurnalempathy.v5i1.195>
- Azis, p., juhanto, a., & rahmawati, r. (2022). Hubungan postur kerja dengan kejadian myalgia pada petani di kecamatan bungaya kabupaten gowa. *Unm environmental journals*, 5(2), 01. <https://doi.org/10.26858/uej.v5i2.41750>
- BPS (Badan Pusat Statistik). (2020). Produksi tanaman biofarmaka (obat) 2018-2020. *Badan pusat statistik*. <https://www.bps.go.id/indicator/55/63/1/produksi-tanaman-biofarmaka-obat-.html>
- Eram, s., mujahid, m., bagga, p., ansari, v. A., ahmad, m. A., kumar, a., ahsan, f., & akhter, m. S. (2019). A review on phytopharmacological activity of *alpinia galanga*. *International journal of pharmacy and pharmaceutical Sciences*, 11(3), 6–11. <https://doi.org/10.22159/ijpps.2019v11i3.31352>
- Asyilla, S. H. P. (2022). Formulasi dan evaluasi sediaan balsam stick dari minyak atsiri lengkuas (*Alpinia galanga* L.) *Skripsi*, STIKes Kharisma Husada Garut. Repositori STIKes Kharisma Husada Garut.
- Fath, d. H. M., Muchlisin, M. A., & Jamil, A. S. (2024). Analisis network pharmacology senyawa metabolit sekunder tanaman lengkuas (*Alpinia galanga*) pada penyakit kanker. *Journal of Islamic Pharmacy*, 9(1), 43–49. <https://doi.org/10.18860/jip.v9i1.27094>
- Hairunnisa, Rahman, I., Sari, D., & Kurnianto, E. (2024). Formulasi balsem stick minyak atsiri *Menta piperita*, *Copaifera officinalis* (Jacq.) L, dan *Gaultheria procumbens* L. *Journal of pharmacy tiara bunda*, 1(2), 12–19. <https://doi.org/10.62619/jptb.v1i2.64>
- Hartesi, B., Sagita, D., & Qalbi, H. R. (2020). Perbandingan basis salep terhadap aktivitas antibakteri ekstrak kasar bromelin dari bonggol nanas. *Jurnal farmasi galenika (galenika journal of pharmacy) (e-journal)*, 6(2), 269–279. <https://doi.org/10.22487/j24428744.2020.v6.i2.15092>
- Kamrani, P., Hedrick, J., Marks, J. G., & Zaenglein, A. L. (2024). Petroleum jelly: a comprehensive review of its history, uses, and safety. *Journal of the american academy of dermatology*, 90(4), 807–813. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2023.06.010>
- Leclair, V., Tsui, H., & Hudson, M. (2023). Pain in autoimmune inflammatory

- myopathies: a scoping review. *Rmd open*, 9(1), 1–10.
<https://doi.org/10.1136/rmdopen-2022-002591>
- Pradani, Putri Kurnia; M., Ponco Rahayu, m., Harjanti, R., & Priya Haresmita, P. (2024). Profil ekstrak rimpang lengkuas (*Alpinia galanga* (L.) Willd.) Dari lokasi tanam dengan perbedaan letak ketinggian geografis profile of galangal (*Alpinia galanga* (L.) Willd.) Rhizome extract from locations with geographical differences. *Pharmacy: jurnal farmasi indonesia*, 21(01).
<https://doi.org/10.30595/pharmacy.v0i0.18646>
- Priambodo, W. S., Daniel, Saleh, C. (2019). Pembuatan Metil Salisilat Menggunakan Katalis Asam dengan Metode Tanpa Pelarut. *Jurnal Atomik* 04(1):41-44
- Purba, O., Tumanggor, N., Syafitri, A., Meliala, L., & Simorangkir, D. (2020). Pembuatan sediaan balsem stick dari sereh (*cymbopogon citratus* (dc.) Stapf) sebagai aromaterapi. *Jurnal penelitian farmasi & herbal*, 3(1), 75–81.
<https://doi.org/10.36656/jpfh.v3i1.326>
- Rachman, e., hutahaen, t., & zuhriyah, a. (2023). Formulasi dan uji evaluasi sediaan stick balsem dari minyak atsiri serai dapur (*Cymbopogon citratus*) sebagai analgesik dan aromaterapi relaksan. *Pharmacy Medical Journal*, 3(2a), 388–395.
<https://doi.org/10.54957/ijhs.v3i2a.517>
- Rizaty, M. (2022). *Keluhan Kesehatan Gen Z, dari Pegal sampai Sakit Pinggang*. Katadata.Co.Id.
<https://databoks.katadata.co.id/layanan-konsumen-kesehatan/statistik/c8bd910dc5e60b9/keluhan-kesehatan-gen-z-dari-pegal-sampai-sakit-pinggang>
- Sumonda, J. B., Mongie, J., Karauwan, F. A., & Lengkey, Y. K. (2021). Uji efektivitas ekstrak etanol rimpang lengkuas putih (*Alpinia galanga* (L.) Willd) sebagai analgesik pada tikus putih (*Rattus norvegicus*). *Jurnal Biofarmasetikal Tropis*, 4(2), 53–59.
e-ISSN 2685-3167.
<https://doi.org/10.55724/j.biofar.trop.v4i2.360>
- Widnyana, I., Subaidah, W., & Hanifa, N. (2021). Optimasi Formula Stick Balm Minyak Atsiri Daun Sereh (*Cymbopogon citratus*). *Jurnal Penelitian Farmasi Indonesia*, 10(2), 16–24.
<https://doi.org/10.51887/jpfi.v10i2.1417>

Pengaruh Penambahan Ekstrak Kulit Buah Naga terhadap Karakteristik Fisikokimia, Aktivitas Antioksidan, dan Sensori Permen Jeli Glukomanan Konjak

[The Impact of Dragon Fruit Peel Extract Addition on The Physicochemical Properties, Antioxidant Activity, and Sensory Attributes of Konjac Glucomannan Jelly Candy]

Wiwit Amrinola^{1*}, Hanandhiya Sekarningrum²

^{1,2}Program Studi Teknologi Pangan, Universitas Bina Nusantara, Jl. Jalur Sutera Bar. No.Kav. 21, RT.001/RW.004, Panunggan, Kec. Pinang, Kota Tangerang, Banten 15143

*Korespondensi penulis: wiwit.amrinola@binus.ac.id

ABSTRACT

Dragon fruit peel is an agro-industrial by-product rich in bioactive compounds such as flavonoids, anthocyanins, phenolics, thiamine, pyridoxine, cobalamin, and carotene, which exert various physiological health effects. This study aimed to evaluate the effect of dragon fruit peel extract on the physical, chemical, functional, and sensory characteristics of konjac glucomannan-based jelly candy. The research was conducted in two stages: (1) extraction and characterization of dragon fruit peel extract, and (2) formulation of jelly candy with four extract concentrations, namely T0 (0%), T1 (9%), T2 (10%), and T3 (11%). Data were analyzed using ANOVA followed by Duncan's multiple range test. The extract contained alkaloids, flavonoids, tannins, and steroids, with total anthocyanin content of 77.57 mg/L and antioxidant activity of 46.3%. The best formulation was obtained at T3 (11%), which exhibited total anthocyanins of 27.55 mg/L, antioxidant activity (IC₅₀) of 98.44 ppm, total dissolved solids of 60.63 °brix, hardness of 2.31 N, L is -46,40, a* is 30,81, b* is 14,80, c* is 32,19, H* is 9,35, and an overall sensory acceptance score of 4.68 (neutral-like). The addition of up to 11% dragon fruit peel extract enhanced antioxidant activity of the jelly candy without negatively affecting consumer acceptance.*

Keywords : Antioxidant; Dragon Fruit Peel; Jelly candy; Konjac Glucomannan

ABSTRAK

Kulit buah naga merupakan hasil samping yang kaya akan senyawa bioaktif seperti flavonoid, antosianin, fenolik, tiamin, piridoksin, kobalamin, dan karoten yang memiliki efek fisiologis bagi kesehatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh ekstrak kulit buah naga terhadap karakteristik fisik, kimia, fungsional, dan sensori permen jeli berbasis glukomanan konjak. Penelitian terdiri atas dua tahap, tahap 1 adalah ekstraksi dan karakterisasi ekstrak kulit buah naga, dan tahap 2 adalah formulasi permen jeli dengan empat perlakuan konsentrasi ekstrak kulit buah naga: T0 (0%), T1 (9%), T2 (10%), dan T3 (11%). Analisis yang dilakukan meliputi analisis fisik, analisis kimia, analisis fungsional, dan analisis sensori. Data dianalisis menggunakan ANOVA dan uji lanjut *Duncan*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ekstrak kulit buah naga mengandung alkaloid, flavonoid, tanin, dan steroid, dengan total antosianin 77,57 mg/L dan aktivitas antioksidan 46,3%. Formula terbaik diperoleh pada perlakuan T3 (11%) dengan total antosianin 27,55 mg/L, aktivitas antioksidan (IC₅₀) 98.44 ppm, total padatan terlarut 60,63 °Brix, kekerasan 2,31 N, L* sebesar -46,40, a* sebesar 30,81, b* sebesar 14,80, c* sebesar 32,19 dan H* sebesar 9,35, dan nilai penerimaan sensori keseluruhan 4,68 (kategori netral-suka). Penambahan ekstrak kulit buah naga hingga 11% meningkatkan aktivitas antioksidan tanpa menurunkan penerimaan konsumen.

Kata kunci : Antioksidan; Kulit buah naga; Permen jeli; Glukomanan konjak

PENDAHULUAN

Permen jeli merupakan salah satu produk konfeksioneri yang digemari oleh konsumen berusia di bawah 20 tahun karena memiliki tekstur kenyal, mudah dikunyah, serta tidak lengket di mulut. Produk ini umumnya berbentuk gel yang dibuat dari campuran sari buah (sekitar 45 g/100 g) dan gula dalam bentuk sirup sukrosa atau glukosa (sekitar 55 g/100 g), serta dilengkapi bahan pembentuk gel, asam, perisa, dan pewarna pangan (Teixeira-Lemos *et al.*, 2021). Berdasarkan SNI 3547.2-2008, permen lunak jenis jeli dikategorikan sebagai produk bertekstur kenyal yang menggunakan bahan hidrokoloid seperti pektin, agar, pati, karagenan, gum, atau gelatin untuk memodifikasi tekstur. Produk ini biasanya dicetak dan melalui tahap *aging* sebelum dikemas untuk mencapai stabilitas bentuk dan kelembutan yang diinginkan.

Data Riskesdas (2018) menunjukkan bahwa konsumsi makanan manis di Indonesia mencapai 87,9%, dengan sekitar 30% di antaranya berasal dari produk permen. Konsumsi permen jeli yang tinggi dan bersifat meluas dapat menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan, terutama karena rendahnya kandungan senyawa bioaktif dan nilai fungsionalnya (Maryam *et al.*, 2021). Oleh karena itu, upaya peningkatan nilai

fungsional permen jeli menjadi penting, salah satunya melalui fortifikasi dengan bahan alami yang kaya vitamin dan senyawa fenolik bersifat antioksidan, antibakteri, dan antiinflamasi.

Salah satu sumber lokal potensial adalah buah naga merah (*Hylocereus polyrhizus*). Selain daging buahnya, kulit buah naga yang mencakup sekitar 30–35% dari total berat buah diketahui mengandung berbagai senyawa bioaktif, termasuk flavonoid, antosianin, fenolik, tiamin, piridoksin, kobalamin, dan karoten, yang memiliki aktivitas fisiologis tinggi. Kulit buah naga juga mengandung karbohidrat, protein, vitamin, dan mineral dalam jumlah yang cukup signifikan. Namun, pemanfaatannya di Indonesia masih sangat terbatas; dari potensi limbah kulit buah naga sebesar 2.000–2.300 ton per tahun, sebagian besar hanya menjadi hasil samping tanpa nilai tambah atau bahkan dibuang sebagai limbah organik (Hasanah *et al.*, 2022). Oleh karena itu, diversifikasi pemanfaatan kulit buah naga menjadi produk pangan fungsional bernilai ekonomi tinggi menjadi peluang penting yang perlu dikembangkan.

Dalam proses pembuatan permen jeli, bahan pembentuk gel yang umum digunakan adalah gelatin, karagenan, pektin, dan agar. Namun, keterbatasan ketersediaan dan tingginya biaya gelatin

mendorong industri pangan untuk mencari alternatif sumber gel alami. Salah satu bahan yang berpotensi digunakan adalah glukomanan dari umbi konjak (*Amorphophallus konjac*), yang dikenal sebagai *konjac glucomannan (KGM)*. Senyawa ini merupakan polisakarida hidrofilik yang dikenal memiliki viskositas yang tinggi, menyerap air yang besar, dan memiliki potensi membentuk gel. Banyak studi yang menunjukkan bahwa substitusi parsial gelatin dengan KGM memberikan pengaruh terhadap kemampuan pembentukan gel, tekstur, viskositas, dan sineresis (Onsamlee dan Srikok, 2022). Bintoro *et al.*, (2024) juga menjelaskan bahwa KGM mampu menggantikan Sebagian gelatin pada pembuatan *marshmallow/jelly-like*, dan memberikan pengaruh terhadap kelembaban, aktivitas air, dan tekstur.

Penggunaan KGM dalam formula pembuatan produk permen akan menghasilkan permen jeli yang kaya akan serat larut (Tarahi *et al.*, 2023). KGM juga mampu memberikan manfaat fisiologis, seperti menurunkan kadar kolesterol, memperlambat pengosongan lambung, mempertahankan rasa kenyang, dan berfungsi sebagai pengganti agar-agar maupun gelatin (Aryanti *et al.*, 2015).

Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi kandungan fitokimia,

total antosianin, dan aktivitas antioksidan ekstrak kulit buah naga merah, serta menganalisis pengaruh penambahannya terhadap karakteristik fisikokimia, fungsional, dan sensori permen jeli berbasis glukomanan konjak. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan menentukan formulasi terbaik untuk menghasilkan produk permen jeli glukomanan dengan nilai fungsional dan sensoris yang optimal. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pemanfaatan hasil samping kulit buah naga sebagai bahan pangan fungsional sekaligus meningkatkan nilai ekonomisnya melalui inovasi produk berbasis glukomanan konjak sebagai agen pembentuk gel alami.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan adalah kulit buah naga segar yang berasal dari Malang (Jawa Timur), glukomanan konjak (Ikarié), gelatin sapi (Essenli), gula, dan aquades, kemudian bahan kimia yang digunakan untuk analisa dan karakterisasi produk adalah etanol pro analysis, DPPH, KCl, Na-asetat, Pb-asetat, HCl, NaOH, FeCl₃, pereaksi meyer, dan pereaksi *dragendorff*. Sedangkan alat (instrumen) yang digunakan diantaranya adalah mikropipet (Dragon Lab), *vortex (Thermo Scientific)*, *centrifuge (Eppendorf)*, *rotary vacuum evaporator*

(*Buchi Rotavapor R-100*)), oven (Memmert), *waterbath* (Memmert), *blender* (Waring Commercial), *texture analyzer* (Shimadzu, Model Ez-SX), colorimeter (3nh), refraktometer (Atago), dan spektrofotometri UV-VIS (Thermo Scientific, tipe Genesys 10S UV-Vis).

Pembuatan Ekstrak Kulit Buah Naga

Kulit buah naga terlebih dahulu dipisahkan dari daging buahnya, kemudian dibersihkan dan disortasi untuk memisahkan bagian kulit utama dari sisik-sisik atau kotoran yang menempel. Bagian kulit yang telah bersih kemudian dirajang dengan ukuran dan ketebalan seragam, selanjutnya dikeringkan menggunakan oven pada suhu 55°C selama 24 jam hingga mencapai kadar air rendah. Sampel kering kemudian digiling menggunakan *blender* hingga menjadi bubuk halus dan diayak untuk memperoleh ukuran partikel seragam (Putra *et al.*, 2021).

Proses ekstraksi untuk karakterisasi senyawa bioaktif dilakukan menggunakan metode maserasi (Jawa La *et al.*, 2020). Sebanyak 100 g bubuk kulit buah naga kering dimasukkan ke dalam wadah maserasi berbahan kaca berwarna gelap, kemudian ditambahkan etanol p.a dengan rasio pelarut 1:10 (b/v) atau 1000 mL. Maserasi dilakukan pada suhu ruang, terlindung dari paparan cahaya matahari, selama 72 jam dengan pengadukan berkala

menggunakan *magnetic stirrer*. Filtrat hasil maserasi disaring menggunakan kertas Whatman No. 40 dan dipekatkan dengan rotary evaporator pada suhu 50°C selama 1 jam hingga diperoleh ekstrak kental. Ekstrak etanol yang dihasilkan disimpan dalam botol kaca berwarna cokelat dan ditempatkan dalam *chiller* pada suhu 10°C.

Untuk aplikasi pada pembuatan permen jeli, ekstrak diperoleh dengan melarutkan 10 g bubuk kulit buah naga ke dalam 100 mL akuades. Campuran tersebut dipanaskan menggunakan *water bath* selama 15 menit hingga larut, kemudian disaring untuk memperoleh filtrat jernih yang digunakan sebagai bahan tambahan pada formulasi permen jeli.

Pembuatan Permen Jeli

Proses pembuatan permen jeli diawali dengan penimbangan masing-masing bahan baku, yaitu larutan ekstrak kulit buah naga, gelatin, glukomanan konjak, gula, dan air sesuai dengan perlakuan yang telah ditetapkan. Selanjutnya, campuran bahan dimasak selama 10–15 menit menggunakan api sedang sambil diaduk secara berkala hingga mendidih dan tercampur secara homogen. Setelah itu, adonan permen jeli dituangkan ke dalam cetakan silikon dan didinginkan di dalam *chiller* selama 24 jam hingga mengeras. Setelah proses pendinginan selesai, permen jeli dikeluarkan dari

cetakan (Alvita *et al.*, 2021). Formula permen jeli disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Formula permen jeli glukomanan konjak dengan variasi konsentrasi ekstrak kulit buah naga

Bahan	Perlakuan (%)			
	T0	T1	T2	T3
Gelatin	5	5	5	5
Glukomanan Konjak	0.5	0.5	0.5	0.5
Larutan Ekstrak Kulit Buah Naga	0	9	10	11
Gula	49	49	49	49
Air	45.5	36.5	35.5	34.5

Analisis Fisikokimia

Analisis fisik permen jeli yang dilakukan adalah analisis tekstur dan warna. Analisis tekstur dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan (tekstur) dari permen jeli yang dihasilkan. Analisis tekstur dilakukan menggunakan alat *texture analyzer* dengan satuan Newton (Julyaningsih *et al.*, 2022).

Pengujian warna permen jeli dilakukan dengan menggunakan alat *colorimeter* (Fitriana *et al.*, 2020), pengujian diawali dengan mengarahkan sensor *colorimeter* pada *tools* alat untuk mengetahui standar terang dan gelap, kemudian sampel diletakkan pada sensor *colorimeter*.

Analisis kimia permen jeli yang dilakukan adalah pengujian total padatan terlarut menggunakan refraktometer. sampel permen yang sudah dilarutkan

diletakkan pada prisma refraktometer, kemudian hasil pembiasan cahaya diukur sebagai persentase *Brix*-nya. (Sari *et al.*, 2021).

Analisis Fungsional

a. Skrining senyawa fitokimia pada ekstrak kulit buah naga

Skrining senyawa fitokimia yang dilakukan diantaranya adalah analisis senyawa terpenoid/steroid, alkaloid, flavonoid, saponin, dan tanin. Skrining dilakukan untuk mengetahui jenis senyawa kimia yang terdapat pada ekstrak tanaman. Metode ini dilakukan dengan melarutkan ekstrak etanol kulit buah naga menggunakan pelarut atau reagen yang sesuai untuk mendeteksi masing-masing golongan senyawa (Fitriana *et al.*, 2020).

• Terpenoid/Steroid

Sebanyak 2 mL larutan uji diuapkan di atas penangas air hingga kering. Residu yang diperoleh kemudian dilarutkan dalam 0,5 mL kloroform, dipindahkan ke dalam tabung reaksi, dan ditambahkan 0,5 mL asam asetat anhidrat serta 2 mL asam sulfat pekat secara perlahan melalui dinding tabung.

Terbentuknya cincin berwarna kecokelatan atau ungu pada batas antara dua lapisan menunjukkan adanya senyawa terpenoid, sedangkan cincin berwarna biru

kehijauan menandakan keberadaan senyawa steroid.

• *Alkaloid*

Sebanyak 2 mL larutan uji diuapkan di atas penangas air hingga diperoleh residu. Residu yang terbentuk ditambahkan dengan 5 mL larutan HCl 2N dan dibiarkan hingga dingin, kemudian disaring. Filtrat yang diperoleh dibagi ke dalam tiga tabung reaksi. Tabung pertama digunakan sebagai blanko, tabung kedua ditetesi tiga tetes pereaksi Dragendorff, dan tabung ketiga ditetesi tiga tetes pereaksi Mayer melalui dinding tabung. Terbentuknya endapan berwarna jingga pada tabung kedua dan endapan berwarna kuning pada tabung ketiga menunjukkan adanya senyawa alkaloid dalam sampel uji.

• *Flavonoid*

Sebanyak 1 mL larutan uji disiapkan dan dimasukkan ke dalam tiga tabung reaksi. Tabung pertama digunakan sebagai kontrol. Pada tabung kedua ditambahkan 1 mL larutan Pb asetat 10%, dan terbentuknya endapan berwarna kuning menunjukkan hasil positif terhadap keberadaan flavonoid. Pada tabung ketiga ditambahkan beberapa tetes larutan NaOH 20%, dan terbentuknya warna kuning mengindikasikan adanya senyawa flavonoid.

• *Saponin*

Sebanyak 10 mL larutan uji dipanaskan, kemudian dikocok selama 10

detik hingga terbentuk busa. Busa tersebut dibiarkan selama 10 menit, kemudian ditetaskan dengan 1 tetes larutan HCl 2N. Busa yang terbentuk tidak hilang setelah penambahan HCl.

• *Tanin*

Sebanyak 1 mL larutan uji ditambahkan dengan larutan FeCl₃ 10%. Terbentuknya warna hitam kehijauan menunjukkan adanya kandungan tanin.

b. Total antosianin

Pengujian total antosianin dilakukan menggunakan metode diferensial pH yang mengacu pada Permatasari dan Yusma Deofsila (2021). Prinsip metode ini didasarkan pada pengukuran perbedaan nilai absorbansi sampel pada dua kondisi pH yang berbeda. Analisis total antosianin dilakukan terhadap ekstrak kulit buah naga serta sampel permen jeli.

Prosedur dimulai dengan penyiapan dua jenis larutan buffer. Larutan buffer KCl 0,025M pH 1,0 disiapkan dengan melarutkan 1,86 g KCl ke dalam 980 mL akuades, kemudian ditambahkan HCl hingga pH mencapai 1,0. Larutan buffer natrium asetat (Na-asetat) 0,4M pH 4,5 disiapkan dengan melarutkan 54,43 g CH₃COONa·3H₂O ke dalam 960 mL akuades, kemudian ditambahkan HCl hingga pH mencapai 4,5.

Sebanyak 0,1 g sampel ditimbang dan dimasukkan ke dalam labu ukur 10 mL, kemudian dilarutkan hingga mencapai tanda batas. Larutan tersebut selanjutnya dibagi menjadi dua perlakuan, yaitu larutan pada pH 1,0 (menggunakan buffer KCl) dan pH 4,5 (menggunakan buffer Na-asetat). Sampel didiamkan selama 15–20 menit sebelum dilakukan pengukuran absorbansi pada panjang gelombang 517 nm dan 700 nm. Setiap pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan untuk memperoleh hasil yang lebih representatif. Nilai total antosianin kemudian dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$(1) A = (\text{Abs } 517 - \text{Abs } 700)_{\text{pH } 1,0} - (\text{Abs } 517 - \text{Abs } 700)_{\text{pH } 4,5}$$

(2) Dengan total konsentrasi antosianin dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut,

Total antosianin (mg/L)

$$= \frac{A \times Df \times MW \times 1000}{\epsilon \times l}$$

Keterangan:

A: Absorbansi larutan

Df: Faktor dilusi

MW: Berat molekul untuk sianidin-3-glukosida (449.2 g.mol⁻¹)

ε: Koefisien absorptivity molar 26.900 L/(cm.mol)

c. Aktivitas antioksidan

Pengujian aktivitas antioksidan dilakukan dengan metode DPPH yang

mengacu pada (Noviyanty *et al.*, 2019). Pengujian diukur berdasarkan kapasitas penangkalan zat radikal bebas, elektron pada atom DPPH direduksi dengan menerima atom hidrogen dari antioksidan. Analisis aktivitas antioksidan dilakukan terhadap ekstrak kulit buah naga dan permen jeli, proses diawali dengan pembuatan larutan stok DPPH 50 ppm, yaitu dengan melarutkan 5 mg DPPH dengan 100 mL etanol.

Pembuatan larutan stok ekstrak kulit buah naga 1000 ppm, dilakukan dengan melarutkan 50 mg ekstrak dengan 50 mL etanol. Pembuatan larutan permen jeli dilakukan dengan menghaluskan permen jeli menggunakan mortar alu, kemudian sebanyak 1 g dilarutkan dengan aquades dan divortex hingga larut, lalu disentrifugasi selama 15 menit, supernatan yang terbentuk kemudian di analisis aktivitas antioksidannya.

Pengukuran aktivitas antioksidan dilakukan dengan melarutkan sampel larutan stok kulit buah naga dengan konsentrasi 20 ppm, 40 ppm, 60 ppm, 80 ppm, 100 ppm menggunakan etanol. Dari larutan tersebut kemudian diambil 1 mL larutan dan ditambah 2 mL larutan stok DPPH. Larutan tersebut divortex hingga homogen dan diinkubasi selama 30 menit pada ruangan tertutup dan diukur serapan sampel dengan menggunakan

spektrofotometer UV-VIS pada panjang gelombang 517 nm. Hasil % inhibisi digunakan untuk membuat kurva dan menentukan nilai IC₅₀ dengan persamaan garis yang diperoleh. Nilai absorbansi yang diperoleh digunakan untuk menentukan nilai % inhibisi.

$$\% \text{ Inhibisi} = \frac{\text{Abs}_{\text{kontrol}} - \text{Abs}_{\text{Sampel}}}{\text{Abs}_{\text{kontrol}}}$$

Analisis Sensori

Analisis sensori dilakukan dengan menggunakan uji skala hedonik (Susanti *et al.*, 2017), yaitu tingkat penerimaan terhadap atribut tekstur, rasa, warna, aroma dan keseluruhan. Prinsip dari pengujian ini bertujuan untuk mengetahui sampel yang diterima panelis yang mewakili konsumen, pada uji ini dibutuhkan 75 orang panelis tidak terlatih. Setiap panelis akan diberikan 3 sampel secara bergantian dengan kode sesuai perlakuan. Skala yang digunakan terdiri dari 7 skala yaitu (1) sangat tidak suka, (2) tidak suka, (3) agak tidak suka, (4) netral/biasa, (5) agak suka, (6) suka, dan (7) sangat suka.

Analisis penentuan formula terbaik

Penentuan formula terbaik dilakukan dengan menggunakan metode bayes (Cahyanti *et al.*, 2016). Metode bayes merupakan metode klasifikasi dengan model statistik untuk menghitung

probabilitas suatu kelas yang memiliki setiap kelompok atribut yang ada dengan menentukan kelas mana yang paling optimal. Bobot dalam metode bayes berdasarkan tingkat kepercayaan dan pengalaman dalam pengambilan keputusan, dalam penelitian ini kelas atau kriteria yang digunakan adalah analisis fisik, kimia, fungsional dan sensori, untuk menghitung nilai setiap alternatif digunakan persamaan berikut.

$$\text{Total Nilai } i = \sum_{j=1}^m \text{Nilai } ij(\text{Krit}_j)$$

Keterangan:

Total nilai _i = Total nilai akhir dari alternatif ke-i

Nilai _{ij} = Nilai dari alternatif ke-i pada kriteria ke-j

Krit _j = Tingkat kepentingan (bobot) kriteria ke-j

I = 1,2,3...n = jumlah alternatif

J = 1,2,3...n = jumlah kriteria

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis komponen fitokimia ekstrak kulit buah naga

Proses skrining senyawa fitokimia dilakukan sebagai uji pendahuluan yang bertujuan untuk mengetahui senyawa aktif yang berperan dalam sifat fungsional ekstrak kulit buah naga. Hasil dari analisis

kualitatif senyawa fitokimia ekstrak kulit buah naga terdapat pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil skrining fitokimia ekstrak kulit buah naga

Senyawa	Pereaksi	Tanda positif	Hasil Pengamatan	Kesimpulan
Alkaloid	Dragendorff	Terbentuk endapan oranye/merah kecoklatan	Terbentuk endapan oranye	Positif
	Mayer	Terbentuk endapan putih/kuning	Terbentuk endapan kuning	
Flavonoid	Pb-asetat 10%	Terbentuk endapan kuning	Terbentuk endapan kuning	Positif
	NaOH 20%	Terbentuk warna kuning/oranye	Larutan berubah menjadi kuning	
Tanin	FeCl ₃	Terbentuk warna hitam kehijauan atau kuning gelap	Larutan berubah menjadi lebih gelap dan berwarna kuning kehitaman	Positif
Saponin	Aquades dan HCl 2N	Terbentuk busa stabil dan tetap stabil setelah diberikan HCl 2N	Terbentuk busa tetapi tidak bertahan lama dan pudar secara perlahan	Negatif
Steroid	Lieberman burchard	Terbentuk lapisan cincin biru kehijauan	Terbentuk lapisan berwarna biru kehijauan dibagian atas larutan	Positif

Hasil skrining senyawa fitokimia ekstrak kulit buah naga menunjukkan bahwa positif mengandung golongan senyawa aktif alkaloid, flavonoid, tanin dan steroid, tetapi negatif pada golongan senyawa saponin. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Jawa La *et al.* (2020) juga menunjukkan hasil yang serupa, bahwa hasil skrining ekstrak kulit buah naga dengan metode pelarut yang sama positif mengandung senyawa flavonoid, alkaloid, steroid dan tanin, terbukti dari perbedaan warna yang terbentuk pada larutan. Senyawa aktif yang terdapat dalam kulit buah naga termasuk flavonoid, alkaloid, steroid dan tanin dapat bertindak secara mandiri atau sinergis untuk memberikan nilai gizi yang tinggi dan manfaat kesehatan untuk tubuh (Yuda *et al.*, 2017).

Analisis kandungan total antosianin dan aktivitas antioksidan ekstrak kulit buah naga

Hasil dari analisis kuantitatif total antosianin dan aktivitas antioksidan ekstrak kulit buah naga menunjukkan bahwa aktivitas antioksidan pada ekstrak kulit buah naga mencapai 46,31% (± 0.47) inhibisi dan Nilai IC₅₀ sebesar 59,15 ppm (± 0.29). Total antosianin pada sampel ekstrak kulit buah naga diketahui mencapai 77,57 mg/L (± 3.52).

Kandungan senyawa aktif (alkaloid, flavonoid, tanin, dan steroid) yang terdapat dalam ekstrak kulit buah naga berperan sebagai penangkal radikal bebas. Aktivitas pemulungan radikal senyawa antosianin terutama disebabkan oleh adanya gugus hidroksil, sehingga kandungan antosianin

pada sampel juga dikaitkan dengan kandungan senyawa aktif yang terdapat pada ekstrak kulit buah naga. Hasil penelitian ini sejalan dengan (Prabowo *et al.*, 2019) yang menyebutkan bahwa aktivitas antioksidan ekstrak kulit buah naga berada pada 36,24% - 56,68% sesuai dengan konsentrasinya, dan senyawa aktif yang berperan sebagai antosianin adalah sianidin, malvidin, dan delphinidin. Sedangkan untuk senyawa antosianin sendiri berada pada 63,21 mg/g – 135,4 mg/g, beberapa manfaat kesehatan dari antosianin adalah antikanker, antidiabetes, antimikroba, dan peningkatan fungsi visual.

Analisis warna

Spektrum warna pada sampel di uji berdasarkan lima koordinat warna, yaitu L*, a*, b*, C*, dan H*. Parameter L* mewakili tingkat kecerahan sampel. Parameter a bergerak antara hijau dan merah dari warna ruang, di mana +a dan -a masing-masing mewakili derajat kemerahan dan kehijauan. Parameter b bergerak antara biru dan kuning di mana -b dan +b masing-masing menunjukkan tingkat kebiruan dan kekuningan. Kroma C menggambarkan persentase kemurnian dan kepuhupan warna, sedangkan H (*hue*) menggambarkan warna dominan yang diamati oleh pengamat (Pérez, 2021). Hasil dari analisa warna pada sampel permen jeli terdapat pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil analisa warna permen jeli

Jenis Sampel	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*
T0	$-38,56 \pm 2,75^a$	$16,11 \pm 2,04^a$	$13,51 \pm 0,71^a$	$20,27 \pm 1,94^a$	$5,60 \pm 0,51^a$
T1	$-40,43 \pm 3,86^{ab}$	$29,03 \pm 2,06^b$	$13,42 \pm 0,73^a$	$30,72 \pm 1,64^b$	$8,96 \pm 0,53^b$
T2	$-44,71 \pm 2,19^{bc}$	$29,31 \pm 4,77^b$	$11,08 \pm 2,58^a$	$30,10 \pm 3,27^b$	$9,32 \pm 1,44^b$
T3	$-46,40 \pm 0,71^c$	$30,81 \pm 6,60^b$	$14,80 \pm 3,43^a$	$32,19 \pm 6,28^b$	$9,35 \pm 1,32^b$

Keterangan: notasi superskrip yang berbeda (a, b, c) menyatakan terdapat perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$)



Gambar 1. Perbedaan warna secara visual masing-masing sampel permen

Perbedaan warna permen jeli secara visual antar perlakuan dapat dilihat pada Gambar 1. Diketahui bahwa intensitas warna pada sampel dipengaruhi oleh pigmen antosianin

yang terdapat pada kulit buah naga, pigmen antosianin adalah ion positif, atau kation, menyerap cahaya dalam spektrum biru-hijau (sekitar 450 - 560 nm) dan tampak merah di mata manusia, sehingga penambahan ekstrak kulit buah naga memberikan warna dengan kecendrungan merah. Meskipun antosianin bukan

fitokimia utama yang terkandung dalam sampel buah naga merah, antosianin adalah bioaktif polifenol dengan beberapa manfaat kesehatan, warna antosianin bervariasi dengan pH yang menunjukkan kemampuan beradaptasi dengan alam dengan kondisi lingkungan yang bervariasi (Siwi *et al.*, 2019)

Analisis tekstur

Tekstur (kekerasan) merupakan gaya yang diperlukan untuk menekan suatu produk pada siklus pertama dan menunjukkan kekuatan struktur gel. Hasil dari analisis tekstur pada sampel permen jeli terdapat pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil analisis tekstur permen jeli

Jenis Sampel	Hardness Force (N)
T0	3,65 ± 0,15 ^a
T1	3,07 ± 0,25 ^b
T2	2,49 ± 0,55 ^c
T3	2,31 ± 0,10 ^c

Keterangan: notasi superskrip yang berbeda (a, b, c) menyatakan terdapat perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$)

Pembentukan gel pada permen jeli terjadi karena adanya ikatan hidrogen antara gugus karboksil bebas pada molekul pektin metoksil dan gugus hidroksil molekul tetangganya. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa gel yang dihasilkan dari kulit buah naga dapat menjadi pembentuk tekstur yang sangat baik, sehingga ekstrak kulit buah naga mempengaruhi struktur pembentuk gel dalam permen jeli. (Muhammad *et al.*, 2020)

Analisis total padatan terlarut

Hasil analisis total padatan terlarut diperoleh melalui teori refraksi cahaya pada sampel permen jeli berbetuk cairan. Hasil dari analisis total padatan terlarut pada sampel permen jeli terdapat pada Tabel 5. Diketahui bahwa persen brix total padatan terlarut pada keempat sampel mengalami penurunan, semakin banyak porsi penambahan ekstrak kulit buah naga, total padatan terlarut gula cenderung mengalami penurunan. Hal ini terjadi karena gula dan senyawa seperti sukrosa dan glukosa larut dalam kandungan air yang terdapat pada ekstrak kulit buah naga.

Tabel 5. Hasil analisis total padatan terlarut

Jenis sampel	⁰ Brix
T0	70,46 ± 1,15 ^a
T1	62,46 ± 0,47 ^b
T2	61,43 ± 0,32 ^{bc}
T3	60,63 ± 0,20 ^c

Keterangan: notasi superskrip yang berbeda (a, b, c) menyatakan terdapat perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$)

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Sari *et al.*, (2021) bahwa perlakuan permen jeli juga mengalami penurunan total padatan terlarut gula yang disebabkan oleh tingginya kandungan sari kulit buah naga, semakin tinggi penambahan ekstrak kulit buah, maka kadar gula semakin rendah. Hal ini dikarenakan setiap penambahan ekstrak kulit buah menyebabkan kandungan gula

semakin rendah dan total padatan terlarut semakin rendah.

Analisis total antosianin

Hasil dari analisis total antosianin pada ekstrak kulit buah naga, dan sampel permen jeli terdapat pada tabel 6. Dari tabel diketahui bahwa sampel mengalami kenaikan kadar total antosianin yang disebabkan oleh ekstrak kulit buah naga. Semakin meningkatnya jumlah penambahan ekstrak kulit buah naga pada produk permen jeli maka semakin meningkat juga total antosianinnya.

Tabel 6. Hasil analisis total antosianin permen jeli

Jenis sampel	Total antosianin (mg/L)
T0	8,80 ± 0,34 ^a
T1	22,81 ± 2,82 ^b
T2	24,67 ± 1,21 ^{bc}
T3	27,55 ± 1,05 ^c

Keterangan: notasi superskrip yang berbeda (a, b, c) menyatakan terdapat perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$)

Meskipun tidak ada hubungan langsung antara glukomanan konjak dan antosianin, tetapi diketahui bahwa glukomanan konjak berpengaruh dalam mempertahankan matriks pembentuk gel akibat perbedaan pH, sehingga pada sampel T0 terdeteksi kandungan antosianin. Penelitian sebelumnya (Karismawati *et al.*, 2015) menyebutkan bahwa perlakuan dengan persentase penggunaan glukomanan konjak lebih banyak mengalami peningkatan total antosianin, hal ini

disebabkan oleh stabilitas matriks pembentuk gel yang dibentuk oleh KGM. Zhang *et al.*, 2024 menjelaskan bahwa KGM dapat membentuk ikatan hidrogen atau interaksi *van der Waals* dengan molekul antosianin, sehingga pigmen terperangkap atau terlindungi dalam jaringan gel/matriks KGM.

Analisis aktivitas antioksidan

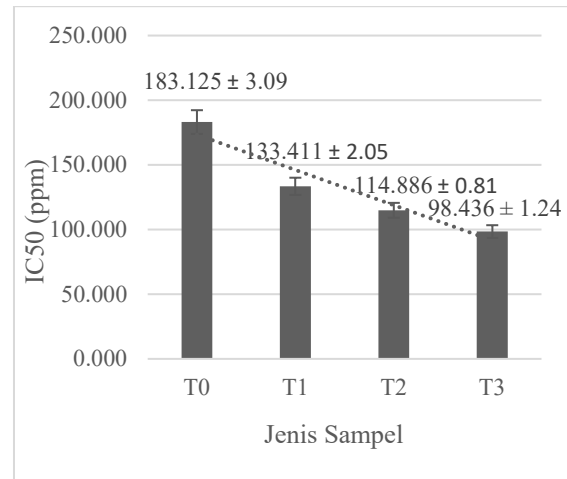
Hasil analisis aktivitas antioksidan pada IC_{50} permen jeli dapat dilihat pada gambar 2. Hasil analisis aktivitas antioksidan dengan metode DPPH menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi sampel berbanding lurus dengan peningkatan persen inhibisi radikal bebas. Peningkatan aktivitas antioksidan ini sejalan dengan meningkatnya proporsi ekstrak kulit buah naga yang ditambahkan ke dalam formulasi permen jeli. Hal tersebut mengindikasikan bahwa senyawa bioaktif dalam ekstrak, seperti flavonoid dan antosianin, berperan penting dalam menangkap radikal bebas dan meningkatkan kapasitas antioksidan produk.

Selanjutnya, hasil pengujian nilai IC_{50} (Gambar 2) menunjukkan tren yang konsisten dengan persen inhibisi. Nilai IC_{50} dihitung berdasarkan persamaan regresi linier antara konsentrasi sampel (sumbu X) dan persen inhibisi (sumbu Y), dengan titik potong pada 50% inhibisi. Persen inhibisi

aktivitas antioksidan memiliki hubungan yang berbanding terbalik dengan nilai IC_{50} . Artinya, semakin tinggi persen inhibisi, maka nilai IC_{50} semakin rendah.

Diketahui bahwa ekstrak kulit buah naga yang digunakan dalam sampel, memiliki aktivitas antioksidan sebesar 46,3% dan nilai IC_{50} sebesar 59,145 ppm, sehingga penambahan ekstrak kulit buah naga secara nyata memberikan pengaruh terhadap aktivitas antioksidan pada permen jeli. Aktivitas antioksidan yang tinggi pada permen jeli dapat memberikan efek fungsional bagi kesehatan saat permen jeli tersebut dikonsumsi. Aktivitas penghilangan radikal DPPH dari tepung konjak dikaitkan dengan senyawa fenolik, flavon, peptida bioaktif, dan vitamin.

Kandungan asam fenolik, anthocyanin, dan karotenoid yang tinggi, yang terkait erat dengan antioksidan, telah dilaporkan dalam konjak, penelitian yang dilakukan oleh (Fang *et al.*, 2023) menunjukkan bahwa tepung glukomanan konjak memiliki aktivitas hipoglikemik dan antioksidan secara *in vitro* dan *in vivo*, sehingga pada sampel T0 meskipun dalam jumlah yang sedikit kandungan glukomanan konjak dapat mempengaruhi aktivitas antioksidan.



Gambar 2. Aktivitas antioksidan (IC_{50}) permen jeli. Diketahui nilai IC_{50} pada kisaran 50 – 100 (ppm) dengan penghambatan kuat, kisaran 100 – 200 (ppm) dengan penghambatan sedang, dan pada kisaran > 200 (ppm) dengan penghambatan lemah. Oleh karena itu sampel permen T0 merupakan kategori IC_{50} lemah, T1 dan T2 kategori IC_{50} sedang, T3 dan ekstrak etanol kategori IC_{50} kuat. (Noviyanty *et al.*, 2019).

Hasil analisis sensori

Hasil analisis sensori sampel permen jeli terdapat pada Tabel 7. Hasil uji skala hedonik menunjukkan bahwa atribut rasa menjadi satu-satunya faktor yang menunjukkan perbedaan signifikan antar perlakuan, dengan T1 paling disukai oleh panelis. Penurunan ini disebabkan oleh rasa kulit buah naga yang hambar karena kandungan gula dan asam organiknya yang rendah. Selain itu, komponen fenolik atau serat dari kulit buah naga dapat memberikan *aftertaste* yang sedikit getir atau tidak manis (Nilawati *et al.*, 2019). Hal

tersebut dapat menyebabkan produk dengan proporsi kulit buah naga lebih tinggi (T2 dan T3) memberikan sensasi rasa yang kurang disukai panelis.

Atribut warna, aroma, tekstur, dan keseluruhan tidak menunjukkan perbedaan nyata, artinya variasi bahan kulit buah naga tidak terlalu memengaruhi aspek visual maupun fisik produk. Warna permen jeli dari kulit buah naga umumnya stabil dan menarik karena pigmen betasianin, yang memberi warna merah keunguan cerah (Nilawati *et al.*, 2019). Perbedaan tidak nyata antar perlakuan menunjukkan bahwa intensitas pigmen betasianin tidak berubah signifikan antar formula, atau perbedaan konsentrasi tidak cukup besar untuk ditangkap secara visual oleh panelis.

Sedangkan tekstur permen jeli dipengaruhi oleh komposisi gelling agent (gelatin dan KGM), kadar air, dan gula (Nilawati *et al.*, 2019). Penambahan atau variasi kulit buah naga tidak menyebabkan perubahan nyata pada kekerasan, elastisitas, atau kekenyalan permen jeli.

Penurunan kesukaan terhadap rasa (T3) disebabkan oleh karakteristik alami kulit buah naga yang hambar dan sedikit getir, sesuai dengan temuan Nilawati *et al.* (2019). Meskipun demikian, semua nilai masih berada dalam kategori “agak suka”, menunjukkan bahwa penambahan kulit buah naga tetap dapat diterima panelis secara umum dan berpotensi meningkatkan nilai fungsional produk.

Tabel 7. Hasil analisis sensori skala hedonik

Jenis Sampel	Rata-rata penilaian atribut				
	Rasa	Warna	Aroma	Tekstur	Keseluruhan
T1	5,14 ± 1,14 ^a	5,34 ± 1,07 ^a	4,54 ± 1,01 ^a	4,90 ± 1,46 ^a	4,98 ± 1,23 ^a
T2	4,96 ± 1,34 ^{ab}	5,36 ± 1,14 ^a	4,45 ± 1,14 ^a	4,74 ± 1,61 ^a	4,84 ± 1,34 ^a
T3	4,72 ± 1,25 ^b	5,54 ± 1,08 ^a	4,52 ± 1,09 ^a	4,52 ± 1,56 ^a	4,68 ± 1,20 ^a

Keterangan: notasi superskrip yang berbeda (a, b, c) pada kolom yang sama menyatakan terdapat perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$)

Penentuan formula terbaik

Dari hasil penentuan perlakuan terbaik diketahui bahwa sampel T1 memiliki jumlah nilai sebesar 4,52, sampel T2 memiliki jumlah nilai sebesar 4,63, dan sampel T3 memiliki jumlah nilai sebesar 4,74, dapat disimpulkan bahwa sampel T3 mendapati jumlah nilai tertinggi atau peringkat pertama, sehingga perlakuan

terbaik pada produk permen jeli glukomanan konjak adalah dengan penambahan 11% ekstrak kulit buah naga. Metode penentuan skor didasarkan pada hasil masing-masing analisis yang kemudian dihitung distribusi probabilitas posterior, mulai dari distribusi probabilitas sebelumnya pada analisis yang mungkin dikondisikan ke hasil data.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa ekstrak kulit buah naga memiliki senyawa aktif berupa alkaloid, flavonoid, tanin, dan steroid dengan total antosianin sebesar 77,57 mg/L dan aktivitas antioksidan 46,3%. Penambahan ekstrak kulit buah naga berpengaruh terhadap sifat fungsional, fisikokimia, dan sensori (rasa) pada permen jeli. Perlakuan terbaik diperoleh pada sampel T3, yaitu permen jeli glukomanan konjak dengan penambahan 11% ekstrak kulit buah naga, yang memiliki kandungan total antosianin sebesar 27,55 mg/L dan aktivitas antioksidan sebesar 38,275%, total gula sebesar 60,63%, tingkat kekerasan sebesar 2,31 N, serta karakteristik warna dengan nilai L* sebesar -46,40, nilai a* sebesar 30,81, nilai b* sebesar 14,80, nilai C* sebesar 32,19 dan nilai H* sebesar 9,35. Nilai penerimaan panelis terhadap atribut sensori secara keseluruhan mencapai 4,68 atau termasuk dalam kategori netral hingga suka. Aplikasi ekstrak kulit buah naga dalam produk pangan tidak hanya dapat memberikan efek sensori, tetapi juga dapat memberikan efek fungsional dengan kandungan senyawa aktif yang berperan sebagai antioksidan dan antosianin.

SARAN

Saran penelitian ini adalah analisis

senyawa aktif yang terkandung dalam ekstrak kulit buah naga dapat dioptimalkan dengan penujian lanjut dengan metode kromatografi lapis tipis (KLT) sehingga dapat mendeteksi jenis senyawa dengan akurat. Ekstrak kulit buah naga dapat berperan sebagai sumber alami dari senyawa yang bermanfaat bagi kesehatan, terdapat potensi besar untuk studi di masa depan serta pemanfaatannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Alvita, R. L., Elsyana, V., & Kining, E. (2021). Formulasi Permen Jelly Jeruk Kalamansi Dengan Substitusi Glukomanan Konjak. *Journal Of Nutrition And Culinary (JNC)*, Vol 1 No. 2, 1(2), 11–19. <https://doi.org/10.24114/JNC.V1I2.26863>
- Aryanti, N., Kharis, D., & Abidin, Y. (2015). Ekstraksi Glukomanan dari Porang Lokal (*Amorphophallus oncophyllus* dan *Amorphophallus muerelli blume*). In *METANA* (Vol. 11, Issue 01). Universitas Diponegoro.
- Bintoro, V. P., Dwiloka, B., Ekaputri H. L., Kamil, R. Z., (2024). The effect of gelatin and konjac glucomannan concentrations on moisture content, water activity, texture, density, and protein content in synbiotic marshmallows. *Food Research* 8 (4): 409 – 41. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.8\(4\).623](https://doi.org/10.26656/fr.2017.8(4).623)
- Choirunisa, R.F., Susilo, B., & Nugroho, W.A. (2014). Pengaruh Perendaman Natrium Bisulfat (NaHSO₃) dan Suhu Pengeringan terhadap Kualitas Pati Umbi Ganyong (*Canna Edulis Ker*). *Jurnal Bioproses Komoditas Tropis*, 2(2), pp. 116–122.
- Fang, Y. *et al.* (2023). Konjak

- Glucomannan: An Emerging Specialty Medical Food to Aid in the Treatment of Type 2 Diabetes Mellitus. *Foods*, 12(2), p. 363. <https://doi.org/10.3390/foods12020363>
- Fitriana, T., Nurwantoro., & Susanti, S. (2020). Pengaruh Proporsi Kolang – Kaling Terhadap Karakteristik Fisik , Kimia dan Hedonik Permen Jelly Labu Kuning. *J. Teknologi Pangan*, 4(1), pp. 30–35. Available at: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/tekpangan/article/view/24037> (Accessed: 30 December 2022).
- Hasanah, A., Nurrahman., & Suyanto, A. (2022). Penambahan Ekstrak Kulit Buah Naga terhadap Derajat Warna, Kadar Antosianin, Aktivitas Antioksidan dan Sifat Sensoris Cendol. *Jurnal Pangan Dan Gizi*, 12(1), 25–31. <https://doi.org/10.26714/jpg.12.1.2022.25-31>
- Herawati, H., & Kamsiati, E. (2022). The Characteristics of Low Sugar Jelly Made From Porang Flour and Agar. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1024(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1024/1/012019>
- Jawa La, E.O., Sawiji, R.T., & Yulawati, A.N. (2020). Skrining Fitokimia Dan Analisis Kromatografi Lapis Tipis Ekstrak Etanol Kulit Buah Naga Merah (*Hylocereus polyrhizus*). *Indonesian Journal of Pharmacy and Natural Product*, 3(1), pp. 45–58. <https://doi.org/10.35473/ijpnp.v3i1.503>
- Julyaningsih, A.H., Yuliana, I., & Binalopa, T. (2022). Penentuan Perlakuan Terbaik Formulasi Sari Buah Buni sebagai Minuman Fungsional Menggunakan Analytic Hierarchy Process. *Dewantara Journal of Technology*, 03(01), pp. 1–5. <https://doi.org/10.59563/djtech.v3i1.143>
- Karismawati, A.S., Nurhasanah, N., & Widyaningsih, T.D. (2015). Pengaruh minuman fungsional jelly drink kulit buah naga merah dan rosella terhadap stres oksidatif [inpress april 2015]. *Jurnal Pangan dan Agroindustri*, 3(2), pp. 407–416. Available at: <https://jpa.ub.ac.id/index.php/jpa/article/view/157> (Accessed: 23 February 2023).
- Maryam, A., Dian Sari., & Barat, K. (2021). Formulasi permen jelly sari buah jeruk siam. *Jurnal Agercolere*, 3(2), 57–62. <https://doi.org/10.37195/jac.v3i2.132>
- Nilawati, N.K., Suriani, M., & Panti, R. (2019). Pemanfaatan kulit buah naga menjadi permen jelly kering. *Jurnal Bosaparis: Pendidikan Kesejahteraan Keluarga*, 10(2), p. 95. <https://doi.org/10.23887/jppkk.v10i2.2133>
- Noviyanty, A., Salingkat, C.A., & Syamsiar, S. (2019). Pengaruh jenis pelarut terhadap ekstraksi dari kulit buah naga merah (*hylocereus polyrhizus*). *Kovalen: Jurnal Riset Kimia*, 5(3), pp. 271–279. <https://doi.org/10.22487/kovalen.2019.v5.i3.14037>
- Onsamlee, G., and Srikok, S. (2022). Use of Konjac Powder in Mulberry Jelly Gummy Products, *RMUTI Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 107–120, Dec. 2022.
- Pérez, S. M. (2021). Physicochemical Characterization of Pomegranate (*Punica Granatum L.*) Native to Jordan During Different Maturity Stages: Color Evaluation Using the Cielab and Cielch Systems. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 214–221. <https://doi.org/10.12911/22998993/137440>
- Permatasari, N.A., & Yusma Deofsila, K. (2021). Perubahan Kualitas Bubuk Pewarna Alami Buah Buni (*Antidesma Bunius* (L) Spreng) Selama Penyimpanan dengan Menggunakan Metode Akselerasi. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 31(2), pp. 176–189. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2021.31.2.176>

- Prabowo, I. *et al.* (2019). Characteristics and antioxidant activities of anthocyanin fraction in red dragon fruit peels (*Hylocereus polyrhizus*) extract. *Drug Invention Today*, 12(4), pp. 670–678. Available at: <https://futuresciencepress.com/public/storage/CJ871.pdf> (Accessed: 23 February 2023).
- Putra, Y. A., Putra Mahardika, M., Ayu, D., & Permatasari, I. (2021). Uji aktivitas antioksidan fraksi kloroform-fraksi etil asetat-fraksi air kulit buah naga merah (*hylocereus polyrhizus*) dengan metode DPPH (1,1-Diphenyl-2-Picrylhydrazyl). *Jurnal Farmasi Dan Kesehatan Indonesia*, 1(2), 40–53. <http://journal.ukrim.ac.id/index.php/jfki/article/view/243>
- Sari, S. S., Nurrahman, & Nurhidajah. (2021a). Pemanfaatan Sari Kulit Buah Naga sebagai Upaya Peningkatan Nilai Fisik dan Sensori pada Permen Jelly Sari Tempe. *Jurnal Pangan Dan Gizi*, 11(01), 60–72.
- Siwi, A. N., Luthfhianto, D., & Wardana, A. S. (2019). Pengaruh pewarna kulit buah naga merah terhadap potensi antioksidan, warna dan sensoris permen jelly jagung (*Zea mays*. L). *Jurnal BisTek pertanian: Agribisnis Dan Teknologi Hasil Pertanian*, 01(08), 150–263. <https://doi.org/10.37832/bistek.v6i01.8>
- Susanti, L. H., Pratama, Y., Nurwantoro, N. (2017). Preferensi Konsumen terhadap Bakso Analog Tepung Kacang Koro Pedang dengan Penambahan Tepung Maizena sebagai Bahan Pengikat. *Jurnal Teknologi Pangan*, 1(2), 28–32. <https://doi.org/10.14710/jtp.v1i2.17290>
- Tarahi, M., *et al.* (2023). Current Innovations in the Development of Functional Gummies Candies. *Foods* 2024, 13(1), 76; <https://doi.org/10.3390/foods13010076>
- Teixeira-Lemos, E., Almeida, A.R., Vouga, B., Morais, C., Correia, I., Pereira, P., & Guiné, R.P.F. (2021). Development and characterization of healthy gummy jellies containing natural fruits. *Open Agriculture*, 6(1), 466–478. <https://doi.org/10.1515/opag-2021-0029>
- Yuda, P. E. S. K., Cahyaningsih, E., Winariyanthi, N. P. Y. (2017). Skrining fitokimia dan analisis kromatografi lapis tipis ekstrak tanaman patikan kebo (*Euphorbia hirta* L.). *Jurnal Ilmiah Medicamento*, 3(2), 61–70. <https://doi.org/10.36733/medicamento.v3i2.891>
- Zhang, H. *et al.* (2024). Enhanced stability and bioavailability of mulberry anthocyanins through the development of sodium caseinate-konjac glucomannan nanoparticles. *Food Chem* 439:138150. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138150>

Rancang Bangun Prototipe Sistem Keamanan Rumah Berbasis Internet Of Things (IoT) dengan Integrasi Sensor Pintar

[*Design and Construction of an Internet of Things (IoT)-Based Home Security System Prototype with Smart Sensor Integration*]

Zainal Abidin¹, Affan Bachri², Rizky Ananda Nugraha³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam
Lamongan, Jl. Veteran No. 53 A Lamongan – Jawa Timur

*Korespondensi penulis: zaenalabidin@unisla.ac.id

ABSTRACT

In this study, the author designed an internet-connected security system that allows homeowners to easily and efficiently control and monitor the system. The microcontroller used in this study, the ESP32-WROVER-CAM module, also requires several sensors: a PIR sensor, an RFID sensor, a touch sensor, a reed switch, a buzzer, a relay module, a camera sensor, and a door lock solenoid. This research resulted in a home security system that can be controlled in two ways: using RFID sensor readings and using the Telegram app. Using the Telegram app, the system responds and executes the command. Using an RFID card by attaching the card to the reader, if the card is detected correctly, all sensors will detect no suspicious activity. If someone opens the door by breaking in, the buzzer will sound, activating all sensors to notify the door has been forced open by an unknown person.

Keywords: ESP32-WROVER-CAM; Door Lock Solenoid; RFID; OV2640 Camera; Telegram

ABSTRAK

Pada penelitian ini penulis merancang sebuah sistem keamanan yang terkoneksi dengan internet sehingga pemilik rumah dengan mudah dapat mengontrol dan memonitoring dengan mudah dan efisien. Mikrokontroler yang digunakan pada penelitian ini yakni Modul ESP32-WROVER CAM, juga memerlukan beberapa sensor yaitu sensor PIR, sensor RFID, sensor sentuh, *reed switch*, buzzer, modul relay, sensor kamera dan *solenoid door lock*. Penelitian ini menghasilkan sebuah sistem keamanan rumah yang dapat dikontrol menggunakan 2 cara yaitu menggunakan pembacaan dari sensor RFID dan juga bisa menggunakan aplikasi telegram, jika menggunakan aplikasi telegram dengan memberikan perintah ke sistem, sistem akan merespon dan langsung mengeksekusi perintah. Jika menggunakan kartu RFID dengan cara menempelkan kartu ke reader, apabila kartu yang terdeteksi benar maka seluruh sensor tidak akan mendeteksi hal-hal yang mencurigakan. Apabila seseorang membuka pintu dengan cara dibobol maka buzzer akan berbunyi, semua sensor aktif untuk memberikan notifikasi bahwa pintu telah dibuka secara paksa oleh orang yang tidak dikenali.

Kata Kunci: ESP32-Wrover-Cam; Selenoid Doorlock, RFID; Kamera OV2640; Telegram

PENDAHULUAN

Sebagian masyarakat pada kota-kota besar melakukan aktivitas sehari-hari di luar rumah. Dengan jam kerja yang panjang, banyak rumah yang ditinggalkan kosong oleh penghuninya yang menjadi sasaran empuk bagi pencuri, terutama jika tidak

dilengkapi dengan sistem keamanan yang memadai. Pencuri memiliki berbagai cara untuk melancarkan aksinya, misalnya, orang yang tidak dikenal mencuri barang-barang berharga dengan mendobrak pintu rumah dan merusak kunci.(Kurniawan et al., 2018).

Perkembangan teknologi semakin modern seiring berjalannya waktu, salah satunya adalah teknologi Internet of Things (IoT) yang merupakan teknologi digunakan untuk meningkatkan kualitas hidup manusia melalui penggunaan sensor pintar dan perangkat pintar yang berkomunikasi melalui jaringan internet. Untuk mengendalikan suatu objek, diperlukan sebuah mikrokontroler. Pada penelitian ini menggunakan mikrokontroller ESP32-WROVER, modul ini merupakan modul *Wireless Fidelity* yang didalamnya memiliki sebuah komponen chip berupa yang terintegrasi didesain untuk keperluan yang tersambung ke jaringan internet. Penelitian ini juga memerlukan beberapa komponen yaitu sensor PIR, sensor RFID, reed switch, buzzer, LCD 16x2 I2C, sensor kamera dan solenoid door lock.

Seiring kemajuan teknologi Internet of Things (IoT), dapat dibangun sistem keamanan yang terhubung secara pintar untuk memonitor dan mengendalikan keamanan rumah dengan lebih efektif. Sistem ini memudahkan pemilik rumah untuk mengontrol dan memonitor siapa yang masuk ke dalam rumah saat rumah sedang kosong. Dari latar belakang di atas, penulis berinovasi membuat sistem keamanan rumah yang mudah untuk dikendalikan dari jarak jauh untuk menjaga keamanan rumah pada saat rumah tidak berpenghuni.

Permasalahan penelitian ini adalah :
(a) Bagaimana cara merancang prototipe sistem keamanan rumah berbasis IoT dengan integrasi sensor pintar? (b) Bagaimana cara kerja prototipe sistem keamanan rumah berbasis IoT dengan integrasi sensor pintar?

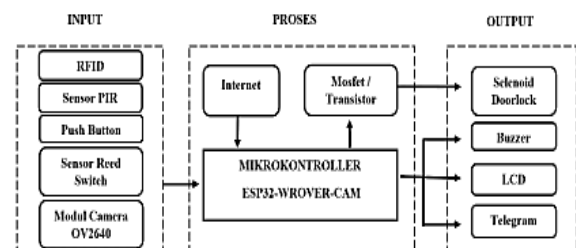
METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Mikrokontroler Esp32-Wrover-cam, ESP32-Cam, RFID RC522, solenoid *doorlock*, sensor magnet MC-38, *buzzer*, sensor PIR, LCD 16x2 I2C dan Aplikasi telegram

Desain Sistem

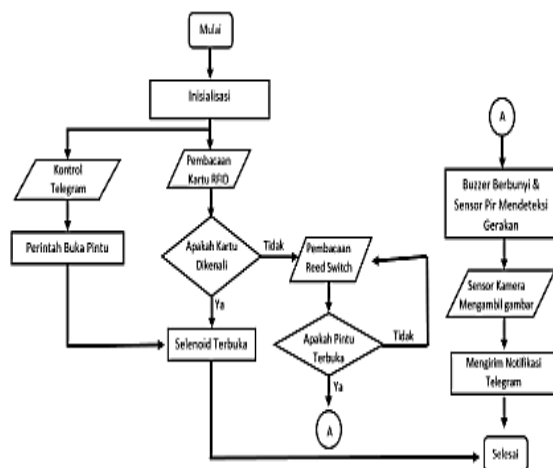
Sistem terdiri dari input, proses dan output, dimana input terdiri dari sensor RFID, sensor PIR, Push Button, Sensor Reed Switch, dan modul camera OV2460, bagian proses terdiri dari mikrokontroler ESP32-Wrover-Cam, dan sisi output terdiri dari solenoid doorlock, buzzer, LCD dan aplikasi telegram. Diagram blok sistem dapat dilihat pada gambar 1 berikut:



Gambar 1. Diagram blok sistem

Diagram Alir Sistem

Flowchart sistem alat dijelaskan langkah-langkah sistem penelitian yang akan dilakukan secara keseluruhan. Flowchart sistem keseluruhan alat akan ditunjukkan pada gambar di bawah ini:

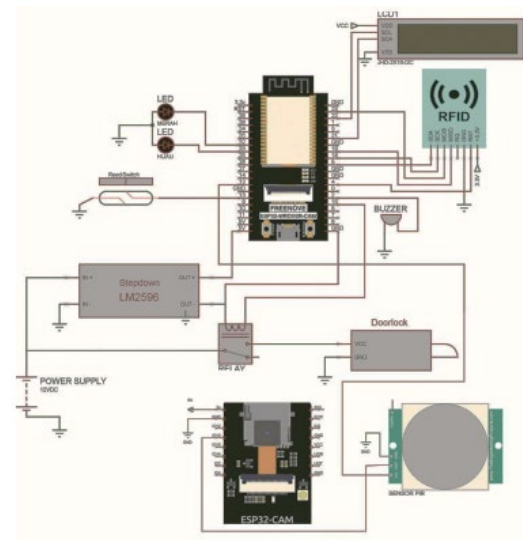


Gambar 2. Flowchart sistem

Dari gambar 2 menjelaskan sensor RFID, sensor pir, sensor reed switch dan sensor sentuh terhubung dengan mikrokontroler ESP32-WROVER-CAM, sensor RFID melakukan pembacaan pada kartu tag, apabila kartu dikenali maka solenoid akan terbuka, jika kartu tidak dikenali maka sensor sentuh akan melakukan pembacaan, jika terdeteksi sentuhan maka buzzer berbunyi, jika sensor PIR mendeteksi adanya gerakan maka sistem akan memerintahkan buzzer sebagai alarm tanda bahaya dan sensor kamera akan menangkap objek atau gambar kemudian diproses oleh mikrokontroler untuk mengirimkan foto yang berhasil ditangkap dan memberikan notifikasi ke aplikasi telegram, sensor reed switch mengirimkan

sinyal pada mikrokontroler untuk mendeteksi pintu apakah pintu dalam keadaan terbuka atau tertutup, yang dapat dimonitor melalui aplikasi telegram, aplikasi telegram selain bisa digunakan untuk memonitor juga dapat memberikan perintah mikrokontroler kepada *solenoid doorlock* untuk mengunci atau membuka pengunci pintu tersebut.

Skema Rangkaian Keseluruhan



Gambar 3. Rangkaian Keseluruhan Sistem

Power supply diperoleh dari jaringan PLN menggunakan *power jack* adaptor sebagai sumber tegangan solenoid dan dihubungkan dengan stepdown untuk memberikan tegangan pada mikrokontroler ESP32-WROVER-CAM, pada pin vcc dan gnd sensor PIR dihubungkan ke pin 5v dan pin gnd mikrokontroler kemudian *output* dari sensor PIR dihubungkan ke GPIO 13 ESP32 Cam, pin sensor *reed switch* dihubungkan ke GPIO 13 Mikrokontroler dan ground mikrokontroler, pin sda RFID

dihungkan ke GPIO 5 sck dihubungkan ke GPIO 18 mosi dihubungkan ke GPIO 23 miso duhabungkan ke GPIO 19 rst dihubungkan ke GPIO 4 dan vcc gnd RFID dihubungkan ke pin vcc gnd mikrokontroller, pin vcc buzzer dihubungkan ke GPIO 2 dan pin gnd dihubungkan ke gnd mikrokontroller, kemudian untuk selenoid karena membutuhkan tegangan 12volt mak dihubungkan ke relay yang telah diberi tegangan 12v dan gnd *power supply*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian RFID

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk membaca id tag yang terdapat pada kartu RFID , kemudian mengukur jarak antara kartu tag dengan RFID *reader* serta mengukur kecepatan respon RFID reader untuk membaca id tag pada kartu.

Tabel 1. Hasil pengujian RFID

Uji	Jarak	Baca RFID card	Respon Waktu	Ket
1	1 cm		0.39 ms	Kartu terdeteksi
2	2 cm		0.50 ms	Kartu terdeteksi
3	3 cm		0.68 ms	Kartu terdeteksi
4	4 cm		0.83 ms	Kartu terdeteksi
5	5 cm			Kartu tidak terdeteksi

Berdasarkan tabel hasil pengujian yang telah dilakukan sebanyak 5 kali dalam beberapa jarak yang berbeda-beda, maka

dapat diketahui bahwa RFID dapat mendeteksi pada jarak 1 – 4 cm dengan respon waktu rata-rata 0,6 detik

Hasil Pengujian Sensor PIR

Tujuan dari pengujian sensor pir ini adalah untuk mendapatkan parameter tentang jarak jangkauan sensor saat mendeteksi gerakan manusia sehingga dapat disesuaikan dengan rancangan sistem keamanan rumah.

Pengujian ini dilakukan dengan cara mengambil data antara tiap jarak 1 meter untuk mendapatkan parameter jarak maksimal yang dapat dijangkau sensor saat ini. Parameter selanjutnya adalah untuk mendapatkan parameter berapa lama waktu sensor ini merespon gerakan. Tujuan dari pengujian ini agar dapat mengetahui jarak dan waktu respon yang paling ideal sehingga nantinya akan disesuaikan dengan rancangan sistem keamanan rumah yang akan dibuat.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sensor PIR

Jarak	Tegangan	Waktu Respon	Banyak percobaan	Ket
1	5 volt	0,52 dtk	5 kali	Mendeteksi
2	5 volt	1,25 dtk	5 kali	Mendeteksi
3	5 volt	1,78 dtk	5 kali	Mendeteksi
4	5 volt	2,1 dtk	5 kali	Mendeteksi
5	5 volt	2,57 dtk	5 kali	Mendeteksi
6	5 volt	-	5 kali	Tidak mendeteksi

Berdasarkan tabel hasil pengukuran di atas dapat disimpulkan bahwa sensor pir

akan bekerja jika objek yang dideteksi memiliki jarak kurang 6 meter, dengan rata-rata waktu sensor PIR ini merespon gerakan adalah 1,6 detik. Sehingga dapat disesuaikan dengan rancangan jarak jangkauan sensor PIR pada sistem keamanan rumah yaitu 30 – 50 cm. dengan menggunakan detik, sehingga sensor PIR ini sangat cocok untuk digunakan pada sistem rangkaian ini.

Pengujian Reed Switch

Tujuan dari pengujian sensor *reed switch* ini adalah untuk membaca dan mendapatkan nilai toleransi jarak antara magnet dan switch yang nantinya akan dihubungkan pada mikrokontroler membantu untuk memudahkan pada saat membuat program. Cara kerja *magnetic switch* adalah, switch akan dalam kondisi tertutup / terhubung (logika '0') bila terdeteksi magnet, dan sebaliknya *switch* akan dalam kondisi terbuka / terputus (logika '1') bila tidak terdeteksi magnet.

Tabel 3. Pengujian Reed Switch

Uji	Tegangan n	Jarak antar kutub	Nilai	Ket
1	5 volt	0 -1,1 cm	Low (0)	Switch terhubung
2	5 volt	1,2 -1,5 cm	High (1)	Switch tidak terhubung

Pengujian Kamera ESP32 Cam

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kamera dapat bekerja serta dapat mengambil gambar/video. Pengujian ini dilakukan dengan cara membuat program dengan mengkoneksikan modul kamera ke internet kemudian mendapatkan alamat IP yang dapat digunakan untuk melihat hasil gambar yang yang ditangkap oleh modul kamera. Adapun alat yang digunakan untuk melakukan pengujian pada modul kamera adalah sebagai berikut: ESP32Cam, PC/laptop, software arduino IDE dan kabel jumper.

Tabel 4. Hasil pengujian Kamera ESP32 Cam

Internet	Gerakan	Kamera ESP-32 Cam
Terkoneksi	Terdeteksi	Menampilkan gambar
Tidak Terkoneksi	Tidak Terdeteksi	Tidak menampilkan gambar

Pengujian Mikrokontroler

Tujuan dari pengujian mikrokontroler ini agar dapat mengetahui bahwa mikrokontroler berfungsi dengan baik, pengujian ini dilakukan dengan cara menguji tiap pin digital yang nantinya digunakan untuk menghubungkan dan integrasi seluruh sensor yang digunakan, mikrokontroler yang digunakan memiliki 16 pin digital dan 1 pin analog dalam pengujian kali ini menggunakan bantuan led sebagai indikator untuk menguji seluruh pin agar dapat digunakan dengan baik. Hal

ini dilakukan karena mikrokontroller adalah komponen inti dari seluruh rangkaian atau juga dapat disebut otak dari seluruh sistem yang akan dibuat, maka dari itu pengujian ini harus dilakukan dengan benar.

Tabel 5. Hasil pengujian mikrokontroller

Pin	V DC	Kondisi LED	Keterangan
Vin	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
Vin	0 volt	Mati	Pin berfungsi baik
GPIO 1	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 2	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 3	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 4	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 5	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 6	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 7	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 8	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 9	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 10	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 11	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 12	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 13	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 14	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 15	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
GPIO 16	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik
ADC 0	5 volt	Menyala	Pin berfungsi baik

Pengujian Pengiriman Pesan Bot Telegram

Tujuan pengujian ini adalah untuk menjalankan perintah dan memberikan respon sesuai dengan permintaan secara *real-time*. Pengujian ini dilakukan dengan cara pertama mengukur kecepatan internet karena dalam pengujian ini bot telegram memerlukan internet untuk berkomunikasi dua arah dengan mikrokontroller. Kedua mengukur *response time* bot saat

mendapatkan perintah melalui chat telegram, pada pengujian ini akan dilakukan sebanyak 5 kali untuk mengetahui nilai rata-rata kecepatan internet dan juga *response time* dari mikrokontroller.

Tabel 6. Pengujian Pengiriman pesan bot Telegram

Percobaan	Kecepatan Internet	Waktu Respon Bot Telegram
1	6,58 Mbps	1,34 detik
2	7,87 Mbps	0,91 detik
3	9,18 Mbps	0,69 detik
4	7,97 Mbps	0,87 detik
5	10,19 Mbps	0,52 detik

Berdasarkan tabel hasil pengujian di atas dapat disimpulkan bahwa kecepatan internet juga berpengaruh pada mikrokontroller untuk melakukan perintah dari pesan yang dikirimkan melalui bot telegram. Dari sebanyak 5 kali percobaan yang telah dilakukan, bot telegram memiliki total rata-rata *response time* adalah 0,86 detik dengan total rata-rata kecepatan internet sebesar 8,32 Mbps.

Hasil Pengujian Keseluruhan

Berdasarkan pengujian keseluruhan yang telah dilakukan, program yang telah dibuat tidak ditemukan kesalahan/eror pada pengujian software, kemudian program diupload pada mikrokontroller dan juga sensor kamera, hasil pengujian pada keseluruhan antara lain sebagai berikut:

- Sistem keamanan rumah ini dapat dikontrol menggunakan aplikasi telegram dengan respon waktu maksimal 1,34 detik dengan kecepatan internet 6,58 Mbps, setelah perintah dikirim dari telegram
- Membuka pintu menggunakan RFID dengan jarak kartu pada *reader* maksimal 4cm dengan respon waktu 0,83 detik. Apabila kartu yang ditempelkan benar maka selenoid akan terbuka selama 4 detik sesuai dengan program yang telah dimasukkan.
- Membuka pintu melalui aplikasi telegram sistem merespon perintah selama 1 detik kemudian menjalankan perintah menyalakan selenoid, dan sensor pir, kamera dan reed switch tidak mendeteksi adanya kecurigaan.
- Apabila kartu yang ditempelkan tidak sesuai maka selenoid tidak akan terbuka. Ketika pintu dibuka dengan cara dipaksa maka reed switch akan mendeteksi karena jarak maksimal antara magnet dan switch adalah 1,5 cm. buzzer berbunyi selama pintu masih terbuka atau selama *reedswitch* mendeteksi. kemudian sensor pir akan merespon gerakan dengan jarak kurang dari 1 meter adalah 0,52 detik. Dan sensor kamera merespon kurang dari 1 detik untuk mengambil gambar dan mengirimkan ke telegram selama 1,34

detik dengan kecepatan internet 6,58 Mbps.

KESIMPULAN

1. Penelitian ini berhasil merancang dan membangun prototipe sistem keamanan rumah berbasis Internet of Things (IoT) dengan integrasi berbagai sensor pintar menggunakan mikrokontroler ESP32-WROVER-CAM. Sistem ini mampu dioperasikan dengan dua metode kendali, yaitu melalui pembacaan kartu RFID dan aplikasi Telegram secara real-time. Berdasarkan hasil pengujian, sistem menunjukkan performa yang stabil dengan rata-rata waktu respon 0,86 detik pada koneksi internet sebesar 8,32 Mbps, serta jangkauan pembacaan RFID efektif hingga 4 cm dengan waktu respon 0,6 detik.
2. Integrasi sensor PIR, reed switch, kamera, dan buzzer terbukti mampu mendeteksi aktivitas mencurigakan, seperti usaha pembobolan pintu, kemudian secara otomatis mengirimkan notifikasi dan foto ke aplikasi Telegram. Dengan demikian, sistem ini mampu memberikan keamanan yang adaptif, efisien, dan dapat diakses dari jarak jauh melalui jaringan internet.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa konsep smart home security berbasis IoT dengan kombinasi sensor cerdas dan komunikasi daring dapat menjadi solusi

efektif untuk meningkatkan keamanan rumah modern. Untuk pengembangan selanjutnya, perlu dilakukan optimasi pada kecepatan respon sistem dan kestabilan komunikasi jaringan agar kinerja sistem lebih andal di kondisi internet yang bervariasi.

SARAN

Untuk penelitian selanjutnya, sistem keamanan rumah berbasis IoT ini dapat dikembangkan dengan penambahan fitur kecerdasan buatan (AI) seperti *face recognition* atau *machine learning* untuk meningkatkan akurasi identifikasi pengguna dan deteksi intrusi. Selain itu, perlu dilakukan optimasi komunikasi data agar respon antara mikrokontroler dan aplikasi Telegram lebih cepat dan stabil meskipun dalam kondisi jaringan internet yang tidak ideal. Integrasi penyimpanan berbasis cloud juga disarankan untuk pencatatan log aktivitas serta dokumentasi gambar dari kamera agar sistem lebih informatif dan mudah dipantau. Pengembangan desain perangkat keras menggunakan casing tahan cuaca dan desain modular akan meningkatkan keandalan sistem untuk penggunaan di lingkungan luar ruangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Ketua Program Studi Teknik

Elektro, dan Divisi Litbang Program Studi yang telah memberikan support dana dan fasilitas laboratorium untuk melakukan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Afuw, R., Subyan, R., Hardi, N., & Arbasyah, A. (2023). *Alat Berbasis IOT Smarthome Monitoring dan Kontrol via Telegram Menggunakan Nodemcu*. 4(1), 7–11. <https://doi.org/10.31294/instk.v4i1.2018>
- Bachri, A. (2018). *Rancang Bangun Sistem Keamanan Sepeda Motor Dengan Fingerprint Berbasis Telephone*. 3(2), 19.
- ELKOMIKA: *Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 6(1), 1. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v6i1.1>
- Emi, H. (2023). *TTP-223 module*. Espressif Systems. (2017). *ESP32-WROVER Datasheet*.
- Handayani, T., Basuki, A., & Dirgantara, I. (2023). *Rancang Bangun Sistem Keamanan Pintu Menggunakan Metode Pengenalan Wajah Berbasis Internet of Things*. 5(1), 1–11. <https://doi.org/10.28989/avitec.v5i1.1393>
- JTEIN: *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 3(1), 136–146. <https://doi.org/10.24036/jtein.v3i1.217>
- Julianthi, P., Husen, A., Tjahjono, G., & Tamal, C. P. (n.d.). *Rancang Bangun Sistem Pengaman Sepeda Motor Dengan Menggunakan Sensor Sentuh TTP223*. 6(2), 56–63.
- Keamanan, S., & Berbasis, R. (2023). *Sistem keamanan rumah berbasis esp32-cam dan telegram sebagai notifikasi*. 8(1), 30–38. <https://doi.org/10.32897/infotronik.2023.8.1.2291>

- Kurniawan, A. D. (2021). *Design and Implementation of Home Security Using Telegram Botfather*. 2(1), 11–15.
<https://doi.org/10.52005/fidelity.v2i1.105>
- Kurniawan, M. H., Siswanto, S., & Sutarti, S. (2019). Design and Build a Motorcycle Security System with Fingerprints and Telephone Call Notifications Based on Atmega 328. *PROSISKO: Jurnal Pengembangan Riset dan Observasi Sistem Komputer*, 6(2), 152–165.
- Kurniawan, M. I., Sunarya, U., & Tulloh, R. (2018). Internet of Things : Sistem Keamanan Rumah berbasis Raspberry Pi dan Telegram Messenger. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v6i1.1>
- Magara, T. (2024). *Internet of Things (IoT) of Smart Homes: Privacy and Security*. *Journal* [online].
<https://doi.org/10.1155/2024/7716956>
- Mandalawangi, A. R., & Habibullah, H. (2022). Rancang Bangun Sistem Pengendali CCTV Berbasis Node MCU Menggunakan Smartphone Android.
<https://doi.org/10.24036/jtejn.v3i1.217>
- Mansyah, S., & Myori, D. E. (2022). Rancang Bangun Alarm Pintu Rumah Otomatis Menggunakan Sensor Magnet Bebasis Arduino Uno. 3(2), 407–415.
<https://doi.org/10.24036/jtejn.v3i2.267>
- Monita, M., & Hendri, H. (2021). Sistem Kontrol Rumah Pintar Menggunakan Kamera Berbasis IoT. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 2(1), 107–112.
<https://doi.org/10.24036/jtejn.v2i1.141>
- Parti, I. K., Mudiana, I. N., Darminta, I. K., Rasmini, N. W. (2024). *Modellings Smart Home Security Based Internet of Things (IoT)*. *Proceedings*.
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-364-1_5
- Pi, R., Pemantauan, S., Kaca, R., Pi, R., & Node-red, M. (2022). *Greenhouse Monitoring System using ESP32* ., 11(3), 133–138.
- Prasad, A., Kapoor, P., Singh, T. P. (Eds.). (2022). *Communication Technologies and Security Challenges in IoT*. Springer.
- Sabit, H. (2025). *Artificial Intelligence-Based Smart Security System Using Internet of Things for Smart Home Applications*. *Electronics*, 14(3), 608.
- Sani, A., Julianto, R., Maulidiah, H. M., & Wimbang, J. (2023). *Sistem Keamanan Pintar Menggunakan Kamera Berbasis OpenCV*. 42–47.
<https://doi.org/10.30871/jaee.v7i1.5017>
- Sanjaya, D., & Jaya, P. (2023). *Rancang Bangun Smart Locker Berbasis Internet Of Things P - ISSN: 2302-3295*. 11(1).
<https://doi.org/10.24036/voteteknika.v11i1.121187>
- Sharma, S., Thirumalaisamy, M., Balusamy, B., Chilamkurti, N. (Eds.). (2024–2025). *Artificial Intelligence and IoT for Cyber Security Solutions in Smart Cities*. [Publisher].
<https://doi.org/10.1201/9781003459835>
- Shull, H. (1977). The overhead headache. *Science*, 195(4279), 639.
<https://doi.org/10.1126/science.195.4279.639>
- Tappari, S. (2023). *IoT Based Smart Home Automation and Security*. LAP Lambert Academic Publishing.
<https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.54204>
- Vardakis, G. (2024). *Review of Smart-Home Security Using the Internet of Things*. *Electronics*, 13(16), 3343.
<https://doi.org/10.3390/electronics13163343>
- Watmah, S., Kautsar, H. A. Al, & Suryanto, S. (2021). Perancangan Sistem Keamanan Brankas Menggunakan Metode Finger Print Berbasis SMS Gateway. *INSANtek*, 2(2), 35–39.
<https://doi.org/10.31294/instk.v2i2.907>

You, L., Zhou, J., Li, Z., Chen, F. (2024).
*AI Ethics in Smart Homes: Progress,
User Requirements and Challenges.*
arXiv preprint.

Analisis Keamanan Kunci-Pintu Nirkabel Mobil dengan Software Defined Radio (SDR)

[Analysis of Wireless Car-Key Security with Software Defined Radio (SDR)]

Hadipranowo Hartanto^{1*} dan Ihan Martoyo¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Universitas Pelita Harapan, Jl. M.H. Thamrin Blvd. 1100,
Tangerang 15811

*Korespondensi penulis: h.pranowo@yahoo.com

ABSTRACT

Wireless Communication is not a new phenomenon in the 21st century. Many devices are using wireless technology, including opening a car's door using a remote wireless key. To ensure the security of a wireless system, certain encryption methods and algorithms are used. The rolling code techniques, where the encryption code will be rolled to a different code after usage, are often found in wireless car key systems. This paper describes the analysis of the wireless car-key security by trying to take over control by using Software Defined Radio (SDR). The security is tested using a simple mechanism of save-and-replay, in which the signal from the wireless car-key is received by an SDR and saved into a computer within a large distance from the car. If the car-key signal is not received by the car, the rolling code mechanism might not be triggered. Then the same car-key signal can be replayed to try to open the car door. A few cars which we tested can be opened in such a way. In this paper some security practices will be suggested to avoid the save-replay hacking mechanism with SDR.

Keywords : car hacking; software defined radio; wireless control; wireless security.

ABSTRAK

Komunikasi nirkabel bukanlah suatu fenomena yang baru pada abad ke-21. Banyak alat yang memanfaatkan teknologi nirkabel, termasuk membuka pintu mobil dengan kunci nirkabel. Untuk menjamin keamanan sistem nirkabel biasanya dilakukan dengan algoritma dan metode enkripsi tertentu. Metode keamanan dengan mekanisme *rolling code*, di mana kode enkripsi yang digunakan selalu berganti ke kode yang berbeda setelah dipakai, biasanya ditemukan dalam sistem kunci nirkabel mobil. *Paper* ini menjelaskan analisis tingkat keamanan dari sistem kunci-mobil nirkabel dengan berusaha mengambil alih kendali berbekal *Software Defined Radio* (SDR). Keamanan akan diuji dengan mekanisme yang cukup sederhana, yakni simpan dan kirim, di mana sinyal dari kunci nirkabel akan ditangkap dengan SDR dan disimpan ke dalam komputer dengan jarak yang cukup jauh dari mobil. Jika sinyal kunci tidak ditangkap mobil, maka mekanisme *rolling code* tidak terpicu. Setelah itu sinyal yang sama dapat diputar ulang untuk mencoba membuka kunci mobil. Beberapa mobil yang diuji dapat dibuka dengan cara demikian. Dalam *paper* ini juga akan diusulkan praktik pengamanan untuk menghindari pembukaan kunci dengan mekanisme simpan-kirim dengan SDR.

Kata kunci : keamanan nirkabel; kontrol nirkabel; peretasan mobil; *software defined radio*.

PENDAHULUAN

Mobil modern biasanya sudah dilengkapi dengan kunci nirkabel. Walaupun memberikan berbagai kemudahan, sistem kunci nirkabel juga memberikan peluang diakses lewat udara oleh siapa saja, sehingga dapat timbul masalah keamanan.

Salah satu cara serangan terhadap sistem kunci nirkabel adalah melalui *relay attack* pada sistem PKES (*Passive Keyless Entry and Start*), yang dilakukan dengan memperpanjang jarak jangkauan komunikasi antara kunci-ke-mobil dengan menggunakan relay. PKES yang berfungsi seperti RFID yang dapat membuka kunci mobil dan menyalakan mesin secara otomatis jika berdekatan dengan mobil dapat menyangka bahwa kunci berada dekat mobil dan mulai membuka pintu dan menyalakan mesin, padahal sinyal kunci diteruskan oleh *relay* yang ditambahkan dengan tersembunyi (Francillon, Danev, & Capkun, 2011). Beberapa cara yang dapat digunakan untuk menghindari *relay attack* antara lain adalah dengan melakukan *shielding* pada kunci mobil, atau melakukan modifikasi *software* atau *hardware* sehingga sistem PKES dapat dinonaktifkan sementara jika kunci dibawa menjauh.

Sistem kunci mobil nirkabel yang hanya digunakan untuk membuka pintu mobil (tidak untuk menyalakan mesin) disebut sistem *Remote Keyless Entry* (RKE). Jenis serangan yang umum disebutkan dapat

dilakukan pada RKE adalah varian dari *replay attack*. Sistem RKE biasa dilindungi dengan *rolling-code*, sehingga *code* yang dipakai untuk membuka pintu mobil saat berikutnya selalu tidak sama, akibatnya serangan *replay* sederhana saja tidak cukup, dan diperlukan satu variasi lain, yaitu *jam-listen-replay* (Ibrahim *et al.*, 2018). Ketika pintu mobil ingin dibuka dengan kunci secara nirkabel sinyal dari kunci di-*jam*, namun pada saat bersamaan juga direkam. Ketika pemilik mobil terpaksa membuka pintu dengan kunci secara manual, sinyal yang sudah direkam dapat dipakai untuk membuka pintu kemudian, karena sistem *code* belum *rolling*.

Bersamaan dengan perkembangan sistem otomotif, perkembangan teknologi perangkat nirkabel juga sudah menghasilkan *Software Defined Radio* (SDR) dengan harga yang cukup terjangkau (Kumbhar, 2017). SDR adalah perangkat radio yang diimplementasikan dengan *hardware* yang dapat dikontrol dan diprogram secara *software* (Kumbhar, 2017). Salah satu jenis SDR yang cukup mudah didapatkan adalah BladeRF. Satu perangkat BladeRF dapat diprogram secara multifungsi menjadi *spectrum analyzer*, *custom RF modem*, *GPS receiver*, *ATSC transmitter*, serta GSM dan LTE *picocell*.

BladeRF diproduksi oleh Nuand LLC memiliki beberapa seri yakni generasi pertama x40 dan x115, serta generasi kedua xA4 dan xA9. Seri yang digunakan pada

penelitian ini adalah BladeRF x40. Semua seri BladeRF berfungsi secara *full-duplex*, dan untuk seri x40 mempunyai jangkauan frekuensi 300 MHz – 3.8 GHz. Karena kemampuan *full-duplex* yang dapat mengirim dan menerima sinyal secara bersamaan, BladeRF misalnya, dapat difungsikan sebagai mini BTS GSM (Martoyo *et al.*, 2018, November).

Dalam analisis awal yang dilaporkan dalam *paper* ini, kami mencoba menggunakan skenario yang lebih sederhana daripada *jam-listen-replay* untuk menyerang RKE, yaitu metode *save-and-replay*, yang terdiri dari dua tahap. Tahap pertama (*save*) adalah melakukan perekaman sinyal dari kunci pada saat kunci berjauhan dari mobil. Karena berjauhan, mobil tidak menangkap sinyal kunci, sehingga mekanisme *rolling code* yang dipakai kemungkinan tidak terpicu. Tahap kedua adalah percobaan memutar ulang (*replay*) dari sinyal yang sudah direkam untuk membuka pintu mobil.

Bagian berikutnya akan menjelaskan sistem BladeRF x40 yang dipakai untuk melakukan serangan *save-and-replay* pada RKE, *software* yang diperlukan untuk menjalankan BladeRF x40, serta cara kerja sistem RKE. Kemudian dilanjutkan dengan diskusi hasil percobaan, dan ditutup dengan beberapa kesimpulan.

SISTEM SDR BLADERF X40 DAN RKE

Software Defined Radio (SDR) BladeRF x40 yang dipakai di sini mempunyai jangkauan frekuensi 300 MHz – 3.8 GHz, cukup untuk menangkap sinyal dari sistem RKE yang biasanya beroperasi di sekitar 433.92 MHz atau 315 MHz (Smith, 2016; Yang & Huang, 2018). BladeRF x40 berfungsi secara *full-duplex* dapat digunakan untuk operasi *save-and-replay* yang melakukan perekaman sinyal dan transmisi sinyal secara terpisah. Spesifikasi lain dari BladeRF x40 seperti memiliki sample rate sebesar 40 Msps 12-bit quadrature sampling, tuned oscillator VCTCXO dari 1 Hz sampai 38.4 MHz, dan pada kondisi performa RF puncak dapat menangkap 28 MHz dari bandwidth yang dioperasikan tanpa spurs yang signifikan (Martoyo *et al.*, 2018, November).



Gambar 1. Modul BladeRF x40 (Martoyo *et al.*, 2018)

Gambar 1 menunjukkan modul BladeRF x40 dan rangkaian di dalamnya. Modul BladeRF x40 dioperasikan dengan Laptop. *Operating system* (OS) pendukung

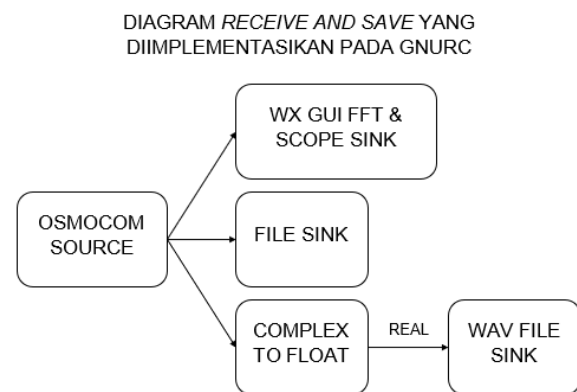
utamanya adalah Linux dengan aplikasi GNU *Radio Companion* (GNURC). OS yang kami gunakan adalah Linux Ubuntu 18.04. GNURC merupakan *software* yang *open source* berbasis bahasa pemrograman python dan dapat digunakan untuk pemrograman sederhana dengan perancangan *block diagram*.

Metode Penelitian

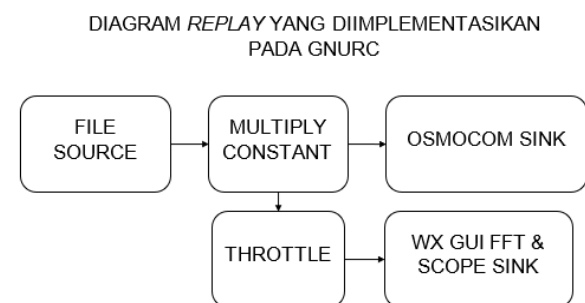
Pemrograman perekaman sinyal dan transmisi sinyal melalui GNURC pada BladeRF x40 dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3 yang merupakan block diagram pada GNURC dengan simplifikasi (bagian variabel tidak ditunjukkan).

Gambar 2 menjelaskan proses penyimpanan sinyal yang dilakukan. *Osmocom Source* merupakan modul *receiver* untuk BladeRF yang ada pada *library* GNURC. Ada 2 jenis modul penyimpanan sinyal yang digunakan, pertama modul *File Sink* yang menyimpan secara utuh sinyal yang diterima dari *source* untuk nanti dikirim ulang pada rangkaian Gambar 3, dan kedua modul *Wav File Sink* yang menyimpan sinyal ke format ekstensi audio (.wav) untuk analisis lebih lanjut dengan aplikasi *audio editing* seperti Audacity. Sebelum memasuki modul *Wav File Sink*, sinyal perlu diproses terlebih dahulu agar hanya bagian riil dari sinyal saja yang diterima dengan modul *Complex to*

Float.



Gambar 2. *Block diagram* yang diimplementasikan pada GNURC untuk merekam sinyal



Gambar 3. *Block diagram* yang diimplementasikan pada GNURC untuk mengirim ulang sinyal

Gambar 3 menunjukkan proses pemutaran ulang sinyal. Modul *File Source* berfungsi untuk *loading file* sinyal yang telah disimpan di komputer sebelumnya oleh modul *File Sink* pada Gambar 2. Modul *Multiply Constant* digunakan untuk memperbesar amplitudo sinyal, lalu dikirim ke udara melalui *Osmocom Sink* yang merupakan modul *transmitter* untuk BladeRF. Modul *Throttle* berfungsi menyesuaikan *sample rate*. GNURC sendiri memiliki modul GUI FFT untuk *spectrum analyzer* dan GUI scope untuk osiloskop, *library* GUI yang digunakan adalah WX GUI.

Sistem RKE pada setiap mobil bisa berbeda. Sinyal yang dipancarkan pada 433.92 MHz atau 315 MHz dapat menggunakan teknik modulasi yang berbeda. Menurut Yang & Huang (2018), yang umum digunakan adalah modulasi ASK/OOK dan FSK.

Ada beberapa metode *cryptography* yang digunakan pada sistem RKE. Yang sering disebutkan adalah sistem KEEOLOG dan Hitag2 (Garcia *et al.*, 2016). Benadjila *et al.* (2017) menyajikan analisis yang lebih mendalam mengenai mekanisme Hitag2, sedangkan Verstegen, Verdult & Bokslag (2018) menunjukkan cara yang lebih cepat untuk menemukan kunci Hitag2 dengan menebak dan mengabaikan kombinasi yang tak mungkin. Jika metode enkripsi dapat dikalahkan, maka perhitungan kombinasi kunci dapat ditemukan dan kunci mobil dapat dikloning.

Dalam percobaan awal di paper ini, kami tidak akan mencoba mengalahkan metode enkripsi yang dipakai dalam sistem RKE mobil. Dengan serangan *save-and-replay* yang sederhana, kami akan menguji keamanan beberapa jenis kendaraan dengan SDR BladeRF x40 tanpa mencoba mengkloning kunci mobil. Jika terdapat mekanisme *rolling-code* yang diterapkan pada RKE, kami berharap bahwa perekaman sinyal kunci yang dilakukan jauh dari mobil dapat digunakan untuk membuka pintu, karena mekanisme *rolling* belum terpicu.

Sebanyak empat buah mobil dengan merek Mazda2 (2012), Suzuki Sidekick (2002), Toyota Fortuner (2006), dan Ford Viesta (2013) kami sertakan dalam penelitian pendahuluan ini. Secara berurutan, 4 buah mobil yang diuji beroperasi pada frekuensi 315 MHz, 433.82 MHz, 433.915 MHz, dan 433.937 MHz.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1 menunjukkan data pengujian dari empat mobil yang disertakan dalam percobaan.

Tabel 1. Tingkat keberhasilan pintu mobil terbuka dengan metode *save and replay*

Merk	Frekuensi (MHz)	Pintu terbuka	<i>Rolling code</i>
Mazda2	315	Tidak	Belum diverifikasi
Suzuki Sidekick	433.82	Ya	Tidak ada
Toyota Fortuner	433.915	Ya	Tidak ada
Ford Viesta	433.937	Ya	Tidak ada

Dari Tabel 1 terlihat bahwa tiga dari empat mobil yang diuji dapat dibuka dengan serangan *save-and-replay* dan tidak menggunakan *rolling code*. Ketiadaan mekanisme *rolling code* diketahui karena pintu mobil dapat dibuka berkali-kali dengan satu kode yang sama yang telah disimpan sebelumnya. Dalam penelitiannya, Garcia *et al.* (2016) menemukan bahwa ada mobil Mercedes Benz produk sekitar tahun 2000 yang masih menggunakan *fixed code* seperti ini. Tingkat keamanan RKE yang demikian sangatlah rendah.

Satu mobil dengan RKE pada 315 MHz tak dapat terbuka. Keberadaan mekanisme *rolling code* belum dapat diverifikasi dan dibutuhkan percobaan yang lebih banyak untuk memastikannya. Selain itu, perlu juga diuji kombinasi setting parameter lain seperti sampling rate, yang dapat saja mempengaruhi mekanisme kunci jika resolusi sampling yang digunakan kurang.

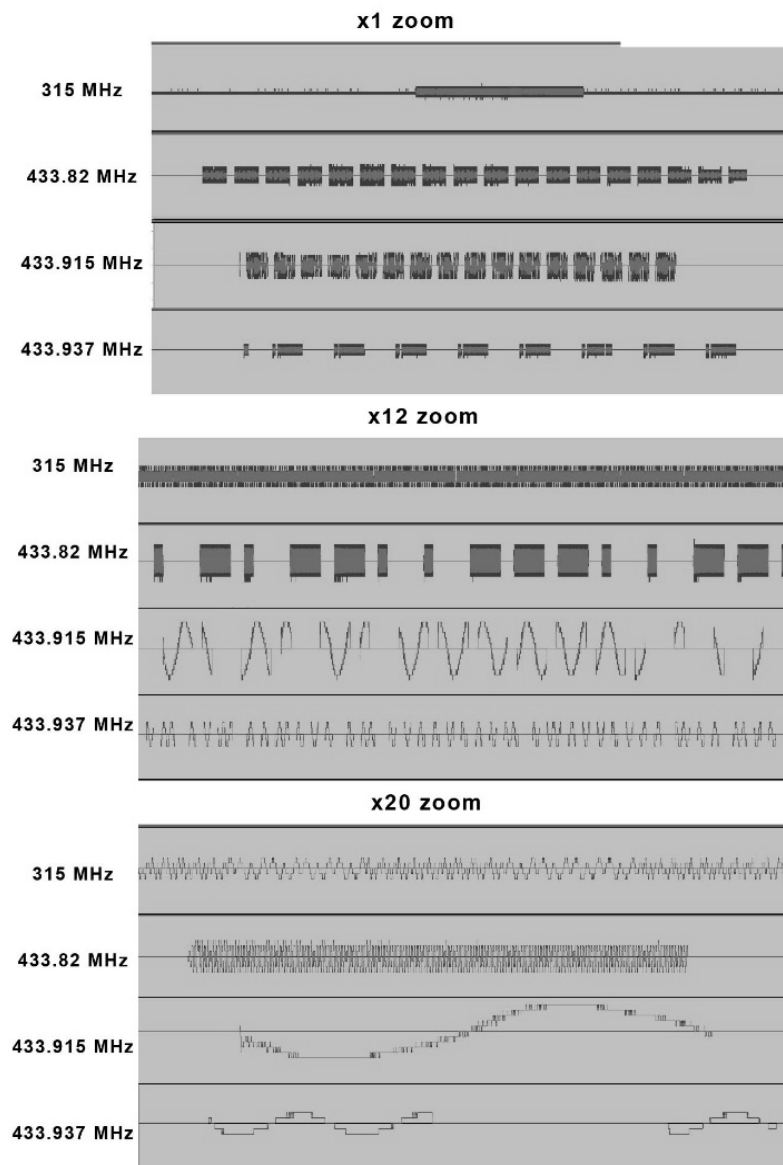
Gambar 4 menunjukkan sinyal yang ditangkap dari 4 mobil dengan 3 variasi *zoom scale* pada sumbu horizontal (waktu). Pada skala x1 terlihat bahwa sinyal kunci nirkabel terdiri atas beberapa pulsa yang berderet. Sebagian pulsa ini berfungsi sebagai sinyal sinkronisasi dan sebagian pulsa lainnya sebagai sinyal informasi. Bentuk sinyal pada frekuensi 315 MHz sangat berbeda dibandingkan sinyal pada mobil lain, yang terlihat menggunakan modulasi OOK atau FSK/PSK.

Pada percobaan permulaan ini ditemukan bahwa masih cukup banyak mobil yang hanya menerapkan *fixed code* untuk sistem RKE-nya. Serangan *save-and-replay* dengan mudah membuka pintu RKE yang kebanyakan beroperasi pada frekuensi di sekitar 433 MHz.

Untuk mobil yang menerapkan *fixed code*, tidak ada cara lain untuk menghindari serangan *save-and-replay* kecuali mematikan sistem RKE. Menggunakan kunci setang tambahan dapat juga membuat usaha kejahatan lebih sulit. Selain itu, selalu penting untuk tidak meninggalkan barang berharga di dalam mobil.

Jika *rolling code* digunakan, maka serangan *save-and-replay* masih punya kemungkinan membuka sistem RKE, jika proses rekam dilakukan jauh dari mobil. Sehingga penting untuk selalu menjaga akses ke kunci RKE sehingga sinyal kunci tidak direkam oleh pihak lain dengan diam-diam.

Jika serangan ingin dilakukan dari jarak dekat, maka dapat digunakan metode *jam-listen-replay* (Ibrahim *et al.*, 2018). Dengan metode ini, ketika sinyal dari kunci terkena *jamming*, maka pintu tak membuka dan pemilik mobil terpaksa membuka pintu secara manual, sementara RKE belum *rolling*. Sinyal kunci yang direkam sambil melakukan *jamming* kemudian dapat dipakai untuk membuka pintu mobil.



Gambar 4. Hasil sinyal kunci RKE dari 4 mobil yang memberi perintah buka dengan 3 variasi *zoom*, ditangkap dengan *sample rate* 2 MHz dengan program *audacity*

Walaupun BladeRF x40 memiliki kemampuan *full-duplex* yang dapat mengirim sinyal jam dan menangkap sinyal kunci dengan 1 alat saja, tetapi untuk skenario *jam-listen-replay* umumnya dibutuhkan 2 buah SDR sekaligus, satu dipasang dekat mobil untuk melakukan *jamming*, sedangkan yang lainnya dibawa ke dekat kunci untuk merekam sinyal ketika sinyal ke mobil mengalami *jamming*. Hal ini untuk menghindari *feedback*

sinyal dengan frekuensi sama yang terjadi pada *single device*, akibatnya sinyal *jam* akan terlalu besar dan menutup sinyal kunci yang ingin disimpan. Keberhasilan metode ini sangat tergantung jarak kunci ke mobil. Jika kunci terlalu dekat ke mobil, maka frekuensi pancar kunci juga akan ikut terkena *jamming*, sehingga SDR perekam harus berada lebih dekat kepada kunci. Garcia *et al.* (2016) mengusulkan agar memperhatikan kelakuan

aneh dari kunci mobil jika tiba-tiba tidak bekerja sebagai indikasi ada serangan secara nirkabel.

Sinyal yang berhasil ditangkap BladeRF x40 dan diamati di komputer berpotensi untuk diproses lebih jauh dengan metode decoding tertentu. Jika metode enkripsi RKE dapat dikalahkan, baik dengan kalkulasi *brute-force* (menghitung semua kemungkinan), atau perhitungan yang lebih terarah yang lebih cepat (Verstegen, Verdult & Bokslag, 2018), maka kunci RKE akan dapat dikloning.

Pemanfaatan SDR ditambah dengan klasifikator *Machine Learning* seperti Support Vector Machine (SVM) untuk membedakan antara sinyal kunci asli dan sinyal tiruan diusulkan oleh Quintero *et al.* (2023). Namun penelitian mereka sendiri sebelumnya (Quintero *et al.*, 2021) menunjukkan bahwa banyak mobil di Bogota yang masih rentan terhadap serangan *brute force* atau *replay attack*, terutama jika ada skenario yang membuat pemilik kendaraan meninggalkan kunci mobilnya (misalnya parkir *valet*). Solusi terhadap kelemahan *security* demikian tampaknya tidak dapat diatasi dengan aplikasi *Machine Learning* untuk membandingkan kemiripan sinyal radio, yang dapat berfluktuasi karena interferensi atau jarak. Peningkatan keamanan baru dapat dicapai dengan modifikasi algoritma kunci yang menggunakan angka random yang hanya

dihasilkan hanya sekali (*nonce*) untuk menghasilkan sinyal kunci.

KESIMPULAN

Sebanyak tiga dari empat mobil yang diuji berhasil dibuka pintunya dengan serangan *save-and-replay*. Mobil-mobil yang pintunya berhasil terbuka ini tidak menggunakan *rolling code*, dan mengindikasikan tingkat keamanan yang rendah. Bagi mobil lama dengan sistem RKE *fixed code* disarankan untuk menggunakan kunci setang dan tidak meninggalkan barang berharga dalam mobil.

Serangan *save-and replay* bagi sistem RKE yang menggunakan *rolling code* dapat dihindari dengan selalu menjaga akses ke kunci RKE agar tidak direkam diam-diam oleh pihak lain. Serangan *jam-listen-replay* membutuhkan dua buah perangkat SDR, dan dapat menghasilkan fenomena bahwa kunci tiba-tiba tidak berfungsi, yang harus dicermati oleh pemilik mobil.

Penelitian awal ini membuka kemungkinan untuk percobaan decoding sinyal RKE lebih jauh dengan BladeRF x40. Mobil-mobil keluaran terbaru mungkin sudah menggunakan sistem *challenge-response* (*nonce*) yang lebih aman.

DAFTAR PUSTAKA

- Benadjila, R., Renard, M., Lopes-Esteves, J., & Kasmi, C. (2017). One car, two frames: attacks on hitag-2 remote keyless entry systems revisited. In *11th {USENIX} Workshop on Offensive Technologies ({WOOT} 17)*.
- Francillon, A., Danev, B., & Capkun, S. (2011). Relay attacks on passive keyless entry and start systems in modern cars. In *Proceedings of the Network and Distributed System Security Symposium (NDSS)*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Department of Computer Science.
- Garcia, F. D., Oswald, D., Kasper, T., & Pavlidès, P. (2016). Lock it and still lose it—on the (in) security of automotive remote keyless entry systems. In *25th {USENIX} Security Symposium ({USENIX} Security 16)*.
- Ibrahim, O. A., Hussain, A. M., Oligeri, G., & Di Pietro, R. (2018). Key is in the Air: Hacking Remote Keyless Entry Systems. In *Security and Safety Interplay of Intelligent Software Systems* (pp. 125-132). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16874-2_9
- Kumbhar, A. (2017). Overview of ISM bands and Software-defined Radio Experimentation. *Wireless Personal Communications*, 97(3), 3743-3756. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4696-z>
- Martoyo, I., Coandi, A., Pratignyo, D., Kanalebe, H. Y., Uranus, H. P., & Pardede, M. (2018, November). Software Defined Radio Applications for Mini GSM BTS and Spectrum Analyzer with BladeRF. In *2018 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)* (pp. 108-111). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2018.8683935>
- Quintero, J. C. M., Cuesta, E. P. E., & Sarmiento, A. T. C. (2021). Vulnerability analysis in RF locking systems of vehicles in Bogotá, Colombia. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*, 9(1), 114-129. <https://doi.org/10.11591/ijeel.v9i1.2450>
- Quintero, J. C. M., Cuesta, E. P. E., & Lopez, L. J. R. (2023). A new method for the detection and identification of the replay attack on cars using SDR technology and classification algorithms. *Results in Engineering*, 19, 101243. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101243>
- Smith, C. (2016). *The Car Hacker's Handbook: A Guide for Penetration Tester*. No Strach Press, San Francisco. <https://doi.org/10.4271/1593277032>
- Verstegen, A., Verdult, R., & Bokslag, W. (2018). Hitag 2 Hell—Brutally Optimizing Guess-and-Determine Attacks. In *12th {USENIX} Workshop on Offensive Technologies ({WOOT} 18)*.
- Yang, Q., & Huang, L. (2018). 433/315 MHz Communication. In *Inside Radio: An Attack and Defense Guide* (pp. 123-171). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8447-8_4

High-Reliability Teams at Sea: The Role of Psychological Safety, Human–System Interaction, and Workload in Error Reporting Behavior among Offshore Workers

Chrysan Gomargana^{1*}, Kevin Aprilio Wibowo², Jack Widjajakusuma³

¹Faculty of Psychology, Universitas Pelita Harapan, Jl. M.H. Thamrin Boulevard 1100, Tangerang, Banten; ^{2,3}Department of Civil Engineering, Universitas Pelita Harapan, Jl. M.H. Thamrin Boulevard, 1100, Tangerang, Banten

*Author correspondence: chrysan.gomargana@uph.edu

ABSTRACT

Offshore oil and gas operations demand high reliability under extreme physical and psychological conditions. Despite robust engineering systems, many accidents still stem from human and organizational factors. This study examines the role of psychological safety, human–system interaction, and workload in predicting error reporting behavior among offshore workers. A quantitative, cross-sectional design was applied using validated self-report scales: the Psychological Safety Scale (Edmondson), System Usability Scale (SUS), NASA Task Load Index (NASA-TLX), and an adapted Error Reporting Behavior Scale. Data were collected from 188 offshore workers in Indonesia through online questionnaires. Multiple linear regression analysis revealed that psychological safety ($\beta = .38, p < .001$) and human–system interaction ($\beta = .27, p < .001$) significantly and positively predicted error reporting behavior, while workload showed a significant negative effect ($\beta = -.23, p < .001$). The model accounted for 36% of the variance in error reporting ($R^2 = .36$). These findings indicate that workers are more likely to report errors when they feel safe to speak up, perceive systems as user-friendly, and experience manageable workloads. The study highlights the need for integrated interventions that simultaneously foster psychological safety, ergonomic system design, and balanced workload management to enhance proactive safety behavior in offshore environments. This research contributes to the intersection of industrial–organizational psychology and human factors engineering, emphasizing that safety performance in high-reliability organizations relies on both social and technological resilience. These findings align with Sustainable Development Goal 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), reinforcing that resilient and sustainable industrial systems require the integration of human factors into safety management and system design.

Keywords : error reporting; human–system interaction; sustainable industrialization; psychological safety; workload

INTRODUCTION

Offshore oil and gas operations represent one of the most complex and high-risk industrial environments in the world. Workers in offshore platforms operate under extreme conditions—exposure to volatile substances, confined spaces, long shifts, and physical isolation—where a single human error can lead to

catastrophic consequences for life, the environment, and the company's reputation (Mearns & Yule, 2009; Ghaleh et al., 2019; Zara et al., 2023). Although technological and engineering controls have advanced dramatically in recent decades, research consistently shows that a significant proportion of accidents in offshore environments can be traced to human and

organizational factors rather than technical failures alone (Read et al., 2021; Maternová et al., 2023; Kasyk et al., 2023). As a result, there has been growing attention to the psychological and behavioral dimensions of safety in high-reliability organizations (HROs), particularly how offshore teams communicate, perceive risk, and report errors (Rajapakse & Emad, 2025; Lezdkalne, 2025).

The offshore oil and gas sector is often characterized as a “high-reliability system,” meaning that its success depends on maintaining consistently safe operations despite high hazard potential (Rivera et al., 2021). However, maintaining reliability at sea is uniquely challenging because of long duty cycles, complex human–machine interfaces, and the social dynamics of isolated teams (Parkes et al., 2012; Rivera et al., 2021). Despite rigorous safety management systems, incident analyses reveal that near misses and minor errors often go unreported due to fear of blame, rigid hierarchies, or system usability issues (Antonsen et al., 2017; Wang et al., 2018). This underreporting creates blind spots in risk management and impedes learning from mistakes.

Safety performance in offshore environments therefore cannot be improved by procedural compliance alone; it requires cultivating an environment where workers

feel psychologically safe to voice concerns, supported by ergonomic and technological systems that facilitate error detection and reporting (Zhang et al., 2020). From an industrial-organizational psychology perspective, safety behavior is not only a matter of training or compliance but also of motivation, interpersonal trust, and perceived system usability.

Psychological safety refers to a shared belief that the team is safe for interpersonal risk-taking (Edmondson, 1999). In psychologically safe environments, individuals feel comfortable expressing concerns, admitting mistakes, and asking questions without fear of embarrassment or punishment. Within the context of offshore platforms, where team members depend heavily on one another for survival and task completion, psychological safety is crucial for effective communication and learning (Conchie & Donald, 2009).

Recent studies in safety-critical industries, including aviation, healthcare, and energy, have shown that psychological safety significantly predicts safety participation, error reporting, and learning behaviors (Frazier et al., 2017; Newman et al., 2020). When workers feel psychologically safe, they are more likely to report near misses and unsafe conditions, thereby allowing the organization to detect

weak signals before accidents occur. In contrast, when fear or punitive culture prevails, errors are concealed, and systemic risks remain unaddressed (Ofori et al., 2023).

In offshore environments, psychological safety may be especially fragile. Factors such as hierarchical leadership, multi-national crews, and extended isolation from the mainland can intensify interpersonal tension and reduce open communication (de Almeida & Vinnem, 2020). Conchie and Donald (2009) observed that offshore supervisors who encouraged open dialogue and acknowledged human fallibility fostered higher levels of trust and safety voice behavior among their crews. Conversely, authoritarian leadership styles were linked to silence and underreporting.

Psychological safety operates as a social-cognitive mechanism enabling “mindful organizing”—a team’s collective capacity to notice, interpret, and respond to anomalies before they escalate (Amici & Farnese, 2024). Offshore teams with high psychological safety are more likely to share small errors or uncertainties, enhancing collective sensemaking and adaptive response. Thus, psychological safety can be viewed as the interpersonal foundation of high-reliability performance at sea.

While interpersonal climate shapes communication and reporting, the physical and cognitive design of human-system interfaces equally determines whether workers can effectively identify and report errors. Human-system interaction (HSI) encompasses the usability, accessibility, and ergonomic compatibility between operators and the technologies they use (Wilson, 2014). In offshore rigs, control rooms, monitoring panels, and safety systems form an integrated sociotechnical environment where usability directly affects human performance. Poorly designed interfaces can create cognitive overload, delay decision-making, and mask early warning signs of failure (Stanton et al., 2017).

Research on industrial ergonomics has demonstrated that usability issues—such as unclear alarm hierarchies, inconsistent information displays, or complex reporting systems—are frequent contributors to offshore incidents (Patterson, 2017). When workers perceive systems as difficult to use, their willingness to engage with safety tools, including error reporting platforms, diminishes (Karsh et al., 2014). Conversely, user-friendly and intuitive systems enhance compliance, situational awareness, and response accuracy (Salmon et al., 2021). Integrating ergonomic and psychological perspectives

reveals that usability does not operate in isolation; it interacts with team climate. Even well-designed systems can fail to improve safety if workers fear retribution for reporting, while a psychologically safe climate may be insufficient if reporting tools are cumbersome or inaccessible. Hence, human–system interaction represents the ergonomic substrate upon which psychological safety can translate into actual reporting behavior.

Another key determinant of safety behavior is workload, defined as the perceived mental, physical, and temporal demands imposed by tasks (Hart & Staveland, 1988). Offshore workers often face irregular shifts, demanding physical labor, and prolonged vigilance, all of which can elevate fatigue and cognitive strain (Ferguson et al., 2023). Excessive workload has been associated with attentional lapses, reduced error detection, and lower compliance with safety protocols (Roelen et al., 2018).

The NASA Task Load Index (NASA-TLX) remains a gold-standard instrument for measuring subjective workload across these dimensions (Hart, 2006). In offshore contexts, high mental and temporal demands can create a cognitive bottleneck, reducing the attentional resources available for error recognition or reporting (Probst et al.,

2019). Moreover, chronic workload imbalance can erode psychological safety indirectly by increasing irritability, stress, and conflict within teams (Nahrgang et al., 2011).

Balancing workload is therefore not merely an operational concern but a psychological necessity for maintaining a culture of safety. Research in industrial settings has found that moderate workload levels support engagement and vigilance, whereas both overload and underload impair safety communication and performance (Probst et al., 2019). Offshore environments—with their high-pressure deadlines and shift rotations—demand particularly nuanced workload management strategies to prevent “safety drift,” where minor rule deviations become normalized under pressure (Willis et al., 2024).

Although psychological safety, human–system interaction, and workload have each been studied individually in safety research, few empirical models have integrated these constructs to explain error reporting behavior in offshore contexts. Error reporting refers to the willingness and action of workers to disclose mistakes, near misses, or unsafe conditions (Nahrgang et al., 2011). It is a key proactive safety behavior, allowing organizations to learn and adapt.

From a behavioral perspective, error reporting can be understood as a cost–benefit decision shaped by social, cognitive, and environmental factors. When psychological safety is high, perceived interpersonal cost (e.g., embarrassment, punishment) decreases, making reporting more likely (Frazier et al., 2017). When human–system interaction is efficient and intuitive, the cognitive cost of reporting (e.g., time, complexity) also decreases (Karsh et al., 2014). Conversely, high workload raises the opportunity cost—workers may perceive they “don’t have time” to report minor issues.

Integrating these dynamics, we can conceptualize offshore error reporting as the product of (1) a supportive interpersonal climate (psychological safety), (2) an ergonomic and usable system (human–system interaction), and (3) a manageable cognitive load (workload). These three domains—psychological, technological, and operational—reflect the multidisciplinary nature of safety in high-reliability environments.

Empirical evidence supports this integration: in aviation and nuclear sectors, safety voice behavior increases when teams report high psychological safety and low perceived workload (Stanton et al., 2017). Similarly, ergonomic interventions improving system usability have been

shown to raise both perceived control and reporting compliance (Stanton et al., 2017). Yet, in offshore oil and gas industries, comprehensive models combining these constructs remain scarce, particularly in developing regions where cultural hierarchies and resource constraints may intensify these challenges (Haavik et al., 2023).

Although psychological safety, human–system interaction, and workload have each been studied individually in safety research, few empirical models have integrated these constructs to explain error reporting behavior in offshore contexts. Error reporting—the willingness of workers to disclose mistakes, near misses, or unsafe conditions—is a key proactive safety behavior that enables organizational learning and accident prevention (Karsh et al., 2014).

From a behavioral standpoint, error reporting can be viewed as a decision process shaped by interpersonal climate, system usability, and cognitive demands. High psychological safety reduces interpersonal barriers such as fear of punishment or embarrassment (Frazier et al., 2017); intuitive and user-friendly systems lower cognitive barriers to reporting (Karsh et al., 2014); and manageable workloads minimize the perceived time and effort costs of reporting.

However, research integrating these psychosocial, ergonomic, and workload dimensions into a single predictive model remains limited—particularly in offshore oil and gas settings where hierarchical culture and physical isolation can intensify underreporting (Haavik et al., 2023).

Therefore, this study aims to examine the simultaneous influence of psychological safety, human–system interaction, and workload on error reporting behavior among offshore oil rig workers.

By employing a multiple linear regression framework, the study quantifies how interpersonal climate, system usability, and task demands collectively predict safety communication behaviors. From an applied perspective, this research contributes to both psychology and human factors engineering by: (1) expanding the understanding of how psychological safety interacts with ergonomic and workload conditions in shaping reporting behaviors; (2) providing empirical evidence using validated instruments (e.g., Psychological Safety Scale, System Usability Scale, NASA-TLX) in offshore contexts; and (3) offering practical implications for safety management systems—highlighting that fostering psychological safety and ergonomic design are equally vital to improving reporting culture.

RESEARCH METHOD

Method

This study employed a quantitative, cross-sectional survey design to examine the relationships among psychological safety, human–system interaction, workload, and error reporting behavior among offshore oil rig workers. The design was selected to enable statistical assessment of how individual perceptions of interpersonal climate, system usability, and task demands predict proactive safety communication. A multiple linear regression approach was used to determine the combined and unique contributions of the three predictor variables on the dependent variable—error reporting behavior.

The study followed ethical standards for research involving human participants and adhered to the principles of the Declaration of Helsinki (World Medical Association, 2013). Participation was voluntary, and informed consent was obtained electronically prior to data collection.

Participants

Participants were offshore oil rig workers employed in exploration and production operations located in Indonesia. Inclusion criteria required that participants (a) had at least six months of offshore

experience, (b) were directly involved in operational or maintenance tasks, and (c) could communicate in Bahasa Indonesia. Workers in purely administrative or onshore roles were excluded. A minimum sample size of 77 was estimated using GPower 3.1 (Faul et al., 2007) for multiple regression with three predictors, assuming a medium effect size ($f^2 = 0.15$), $\alpha = .05$, and power $(1-\beta) = .80$. To increase statistical reliability and account for potential incomplete responses, the target sample size was set at 188 participants.

Demographic data such as age, gender, years of offshore experience, job role (e.g., drilling, maintenance, safety supervision), and work rotation pattern (e.g., 14/14, 21/21) were collected for descriptive purposes and as potential control variables. The study followed ethical standards for research involving human participants and adhered to the principles of the Declaration of Helsinki (World Medical Association, 2013). Participation was voluntary, and informed consent was obtained electronically prior to data collection.

Measures

All variables were measured using validated self-report scales with demonstrated psychometric reliability in industrial or safety-critical contexts.

Responses were recorded using Likert-type scales, and total scores were computed according to established scoring procedures. Cronbach's alpha coefficients above .70 were considered acceptable for internal consistency (Nunnally & Bernstein, 1994).

Psychological safety was assessed using the Psychological Safety Scale developed by Edmondson (1999), consisting of seven items that measure the extent to which team members feel safe to express opinions and admit mistakes without fear of negative consequences. Sample items include: *"It is safe to take a risk in this team"* and *"Members of this team are able to bring up problems and tough issues."* Participants rated their agreement on a 5-point Likert scale (1 = *Strongly Disagree*, 5 = *Strongly Agree*). Higher scores indicate greater perceived psychological safety. The scale has demonstrated strong reliability and validity across diverse occupational settings, including offshore and industrial environments (Frazier et al., 2017). In the current study, the Cronbach's alpha coefficient was expected to exceed .85, consistent with previous applications (Newman et al., 2017).

Human-System Interaction (Perceived usability of the offshore reporting and control systems) was

measured using the System Usability Scale (SUS) by Brooke (1996). The SUS consists of ten items rated on a 5-point scale (1 = *Strongly Disagree*, 5 = *Strongly Agree*). It assesses overall usability and ease of interaction with technological systems, including clarity, consistency, and confidence of use. Items alternate between positive and negative wording, which are reverse scored as recommended. The total SUS score ranges from 0 to 100, with higher values indicating better perceived usability. SUS has been widely used in industrial and safety-critical domains with strong internal consistency ($\alpha \approx .90$). In this study, the scale was adapted slightly to reflect offshore safety and reporting systems (e.g., digital reporting interfaces, control panels, and alarm systems).

Workload was measured using the NASA Task Load Index (NASA-TLX) developed by Hart and Staveland (1988). The NASA-TLX evaluates six subdimensions: Mental Demand, Physical Demand, Temporal Demand, Performance, Effort, and Frustration. Participants rated each dimension on a 20-point scale (from *Very Low* to *Very High*). A composite workload score was calculated by averaging the six dimensions, following Hart's (2006) recommendation for general research applications. The NASA-TLX has been validated in various high-stakes

environments, including aviation, maritime, and offshore operations. Higher scores represent higher perceived workload.

Error reporting behavior—the dependent variable—was measured using a 6-item scale adapted from Voice Behavior and Error Reporting Scales (Whitacre et al., 2025). The items assess workers' self-reported frequency and willingness to report near misses, unsafe acts, or system irregularities. Sample items include: "*I report mistakes or near misses even when they are minor,*" and "*I speak up when I notice safety issues, even if others might not.*" Responses were recorded on a 5-point frequency scale (1 = *Never*, 5 = *Always*). Higher scores reflect stronger engagement in error reporting behaviors. The adapted scale has shown excellent internal reliability ($\alpha = .86-.91$) in previous studies within safety-critical sectors.

Procedure

Data collection was conducted over a three-month period. Digital based questionnaires were distributed via online platform (Google Forms). Participation was anonymous to minimize social desirability bias and encourage honest responses.

Respondents were provided with a brief introduction outlining the study's purpose, confidentiality assurance, and estimated completion time (approximately

15–20 minutes). They were informed that there were no right or wrong answers and that their responses would not affect their employment status. Completed questionnaires were sealed in envelopes or submitted via encrypted online forms.

To minimize respondent fatigue, items were randomized across sections, and demographic questions were placed at the end of the survey. Variables were measured using validated self-report scales with demonstrated psychometric reliability in industrial or safety-critical contexts. Responses were recorded using Likert-type scales, and total scores were computed according to established scoring.

Hypothesis Testing

A multiple linear regression analysis was conducted with psychological safety, human–system interaction, and workload as independent variables, and error reporting behavior as the dependent variable. The following hypotheses were tested:

H1: Psychological safety positively predicts error reporting behavior among offshore workers.

H2: Human–system interaction (usability) positively predicts error reporting behavior.

H3: Workload negatively predicts error reporting behavior.

H4: Psychological safety, human–system interaction, and workload jointly predict error reporting behavior.

The level of significance was set at $p < .05$ (two-tailed). Adjusted R^2 values were used to evaluate the explanatory power of the model, and standardized beta coefficients (β) were interpreted to assess relative predictor importance.

To ensure the validity of regression results, assumptions of linearity, homoscedasticity, normality, and independence of residuals were examined. Scatterplots and standardized residual plots were inspected for violations. The Durbin–Watson statistic was used to test for autocorrelation, with values between 1.5 and 2.5 indicating independence.

RESULTS AND DISCUSSION

Descriptive Statistics & Correlation

All variables were within acceptable skewness and kurtosis ranges (± 2). Table 1 presents the descriptive statistics and correlations.

Table 1. Mean and Standard Deviation (N = 188)

Variable	M	SD
Psychological Safety	3.87	0.56
Human-System Interaction	74.23	10.21
Workload	62.19	8.92
Error Reporting Behavior	4.01	0.58

Psychological safety also showed a significant positive correlation with error reporting ($r = .47, p < .05$), as did human–system interaction ($r = .38, p < .05$). Workload demonstrated a negative relationship with error reporting ($r = -.35, p < .05$).

Hypothesis Testing

The multiple regression model predicting error reporting was significant, $F(3, 184) = 34.27, p < .001, R^2 = .36$, indicating that the three predictors jointly explained 36% of the variance in error reporting behavior.

Table 2 presents the standardized regression coefficients, t -values, and significance levels for each predictor variable, showing the unique contribution of psychological safety, human–system interaction, and workload to error reporting behavior.

Table 2. Regression Coefficients

Predictor	β	t	p
Psychological Safety	.38	6.02	<.001
Human-System Interaction	.27	4.41	<.001
Workload	-.23	-3.82	<.001

The findings indicate that psychological safety and human–system interaction positively predict error reporting behavior, while workload has a significant negative effect. Psychological safety emerged as the strongest predictor ($\beta = .38$).

The results provide empirical support for the critical role of psychological and ergonomic factors in promoting safety behaviors within high-reliability offshore environments. Specifically, the findings highlight that when offshore workers feel psychologically safe, perceive systems as usable, and experience manageable workloads, they are more likely to report errors proactively — a cornerstone of organizational learning and accident prevention.

Consistent with prior studies (Bye et al., 2020; Hasan et al., 2020; Fleming et al., 2022; Simonova et al., 2024; Zhan et al., 2025), the strong positive relationship between psychological safety and error reporting underscores the importance of trust and interpersonal openness in safety-critical teams. Offshore workers often operate in tightly interdependent conditions, where hierarchical distance and communication barriers can inhibit reporting. When team members believe that speaking up will not result in punishment or ridicule, they become active participants in the organization’s safety culture. This finding extends Edmondson’s (1999) theory into the high-reliability offshore domain, showing that psychological safety functions as a social mechanism that transforms latent risk into explicit, reportable information.

The usability of offshore control systems significantly contributed to error reporting behavior. This supports prior ergonomic research emphasizing that human–system compatibility enhances situational awareness and reduces cognitive strain (Stanton et al., 2017). When systems are intuitive and responsive, operators can focus cognitive resources on task monitoring rather than interface navigation. This finding bridges psychological safety and ergonomics: effective system design not only reduces errors but also conveys institutional care, reinforcing the perception of a psychologically safe climate.

Workload exhibited a negative association with error reporting, aligning with cognitive load theory and previous findings (Hasan et al., 2020; Fleming et al., 2022; Haavik et al., 2023). Excessive workload can overwhelm attentional capacity, suppressing self-monitoring and communication. In offshore contexts, chronic time pressure and fatigue may lead workers to prioritize production goals over reporting (Hasan et al., 2020; Casey et al., 2022). Thus, managing workload balance is essential not only for performance but also for sustaining a safe reporting culture.

The combined predictive power ($R^2 = .36$) suggests that psychological safety, human–system interaction, and workload jointly shape a worker’s readiness to report.

These findings align with the socio-technical systems theory, which emphasizes the interdependence between human, technological, and organizational subsystems (Carayon et al., 2025). Interventions that target only technical or procedural dimensions without addressing interpersonal and workload factors may fail to achieve sustainable safety outcomes.

Organizations operating in offshore environments can draw three key insights: (1) Cultivate psychological safety: Supervisors should model openness by acknowledging their own mistakes and inviting input, signaling that reporting is valued; (2) Enhance system usability: Regular usability testing and participatory design with end-users can reduce error likelihood and frustration; (3) Manage workload: Shift rotations, staffing adequacy, and workload monitoring systems can prevent cognitive overload and promote vigilance.

Although this study provides valuable insights, its cross-sectional design limits causal interpretation. Future research could adopt longitudinal or experimental methods to track how interventions in psychological safety or ergonomic redesign influence reporting over time. Additionally, qualitative approaches such as focus groups could uncover cultural and organizational

nuances specific to offshore operations in different regions.

CONCLUSION

This study examined how psychological safety, human-system interaction, and workload simultaneously influence error reporting behavior among offshore oil rig workers. The regression results demonstrated that psychological safety and human-system interaction positively predict error reporting, while workload has a significant negative effect. Together, these three factors explained 36% of the variance in workers' reporting behavior, underscoring that both interpersonal and ergonomic conditions shape the willingness to report errors at sea.

The findings align with previous research highlighting psychological safety as a key antecedent of safety voice (Frazier et al., 2017) and extend this understanding by integrating human-system interaction and workload within the same predictive model. This integrated approach provides a more holistic view of safety behavior, emphasizing that error reporting is not solely a social or individual decision but also a function of system design and task demands.

From a theoretical standpoint, this study contributes to the growing intersection between psychology and

human factors engineering by bridging psychosocial and ergonomic perspectives in explaining safety communication. From a practical perspective, the results suggest that offshore safety programs should not only focus on cultivating trust and open communication but also ensure that reporting systems are intuitive and workload is manageable. Interventions combining leadership practices that foster psychological safety with user-centered reporting tools may therefore enhance error transparency and learning culture in high-reliability maritime operations.

Future research could explore longitudinal or cross-industry comparisons to identify how cultural or organizational contexts moderate these relationships. Additionally, qualitative approaches could enrich the quantitative findings by uncovering workers' lived experiences and perceived barriers to reporting.

In sum, the present study advances understanding of how psychological, technological, and operational factors interact to promote reliable reporting behavior in offshore environments—contributing to safer, more adaptive, and human-centered safety systems.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to express sincere gratitude to the teams and

employees of the participating offshore oil and gas companies, whose participation made this research possible. Special thanks are due to the safety officers who facilitated access and provided valuable contextual insights about offshore operations. This study was conducted as part of a broader initiative to advance occupational safety and human factors research in high-reliability industries. The authors also acknowledge the contributions of research assistants who assisted in data management and statistical analysis.

REFERENCES

- Amici, B., & Farnese, M. L. (2024). Learning to manage the unexpected: Applying Weick and Sutcliffe's HRO principles to oil tanker accidents. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 33(2), 98–113. <https://doi.org/10.1108/DPM-03-2023-0065>
- Antonsen, S., Nilsen, M., & Almklov, P. G. (2017). Regulating the intangible: Searching for safety culture in the Norwegian petroleum industry. *Safety Science*, 92, 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.10.013>
- Brooke, J. (1996). SUS—A quick and dirty usability scale. In *Usability evaluation in industry* (pp. 189–194). Taylor & Francis.
- Bye, R. J., Aalberg, A. L., & Røyrvik, J. O. D. (2020). What we talk about when we talk about HSE and culture: A mapping and analysis of the academic discourses. *Safety Science*, 129, 104846. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104846>
- Carayon, A., Tortel, E., Martinie, C., Palanque, P., Morey, F. X. G., & Manresa-Yee, C. (2025, September). Accounting both safety and performance for goal-directed training and rehabilitation: A generic tool-supported multimodal approach. In *IFIP Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 177–201). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-05005-2_10
- Casey, T. W., Hu, X., Reid, C., Tran, P. A., & Guldenmund, F. W. (2022). Rolling up our sleeves and pulling up our socks: A critical review of safety culture definitions and measures, and innovative ways to move the field forward. In *Handbook of research methods for organisational culture* (pp. 291–311). <https://doi.org/10.4337/9781788976268.00027>
- Conchie, S. M., & Donald, I. J. (2009). The moderating role of safety-specific trust on the relation between safety-specific leadership and safety citizenship behaviors. *Journal of Occupational Health Psychology*, 14(2), 137–147. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/a0014247>
- de Almeida, A. G., & Vinnem, J. E. (2020). Major accident prevention illustrated by hydrocarbon leak case studies: A comparison between Brazilian and Norwegian offshore functional petroleum safety regulatory approaches. *Safety Science*, 121, 652–665. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.08.028>
- Edmondson, A. (1999). Psychological safety and learning behavior in work teams. *Administrative Science Quarterly*, 44(2), 350–383. <https://doi.org/10.2307/2666999>
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and

- biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175–191.
<https://doi.org/10.3758/BF03193146>
- Ferguson, J. J., Fritsch, A., Rentmeester, C., Clewley, D., & Young, J. L. (2023). Feeling exhausted: How outpatient physical therapists perceive and manage job stressors. *Musculoskeletal Care*, 21(3), 845–855.
<https://doi.org/10.1002/msc.1761>
- Fleming, M., Harvey, K., & Bowers, K. C. (2022). Development and testing of a nuclear regulator safety culture perception survey. *Safety Science*, 153, 105792.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105792>
- Frazier, M. L., Fainshmidt, S., Klinger, R. L., Pezeshkan, A., & Vracheva, V. (2017). Psychological safety: A meta-analytic review and extension. *Personnel Psychology*, 70(1), 113–165.
<https://doi.org/10.1111/peps.12183>
- Ghaleh, S., Omidvari, M., Nassiri, P., Momeni, M., & Lavasani, S. M. M. (2019). Pattern of safety risk assessment in road fleet transportation of hazardous materials (oil materials). *Safety Science*, 116, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.039>
- Haavik, T. K., Kongsvik, T., & Vigen, M. (2023). Risk in transit: A case study of the introduction of a new risk definition for risk management in the Norwegian petroleum industry. *Journal of Risk Research*, 26(11), 1244–1262.
<https://doi.org/10.1080/13669877.2023.2270663>
- Hart, S. G. (2006, October). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 50, No. 9, pp. 904–908). Sage CA: Los Angeles, CA: Sage Publications.
<https://doi.org/10.1177/154193120605000909>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In *Advances in psychology* (Vol. 52, pp. 139–183). North-Holland.
[https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Hasan, R., Chatwin, C., & Sayed, M. (2020). Examining alternatives to traditional accident causation models in the offshore oil and gas industry. *Journal of Risk Research*, 23(9), 1242–1257.
<https://doi.org/10.1080/13669877.2019.1673796>
- Jamil, Z., Nordin, S. M., Miraj, M., Alqahtani, M., Shaik, R. A., Akhtar, S., & Nizam Isha, A. S. (2025). Sustainable safety practices and hazard management in the oil and gas industry: An HSE perspective. *Frontiers in Public Health*, 13, 1611106.
<https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1611106>
- Karsh, B. T., Waterson, P., & Holden, R. J. (2014). Crossing levels in systems ergonomics: A framework to support ‘mesoergonomic’ inquiry. *Applied Ergonomics*, 45(1), 45–54.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.021>
- Kasyk, L., Wolnowska, A. E., Pleskacz, K., & Kapuściński, T. (2023). The analysis of social and situational systems as components of human errors resulting in navigational accidents. *Applied Sciences*, 13(11), 6780.
<https://doi.org/10.3390/app13116780>
- Lezdkalne, J. (2025). Integrating human factors into occupational accident investigation: A literature review of methodologies and their applications. *Agronomy Research*, 23, 93 - 108.
<https://doi.org/10.15159/AR.25.036>
- Maternová, A., Materna, M., Dávid, A., Török, A., & Švábová, L. (2023). Human error analysis and fatality

- prediction in maritime accidents. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(12), 2287. <https://doi.org/10.3390/jmse11122287>
- Mearns, K., & Yule, S. (2009). The role of national culture in determining safety performance: Challenges for the global oil and gas industry. *Safety Science*, 47(6), 777–785. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.01.009>
- Nahrgang, J. D., Morgeson, F. P., & Hofmann, D. A. (2011). Safety at work: A meta-analytic investigation of the link between job demands, job resources, burnout, engagement, and safety outcomes. *Journal of Applied Psychology*, 96(1), 71–94. <https://doi.org/10.1037/a0021484>
- Newman, A., Donohue, R., & Eva, N. (2017). Psychological safety: A systematic review of the literature. *Human Resource Management Review*, 27(3), 521–535. <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2017.01.001>
- Nunnally, J. C., & Bernstein, I. H. (1994). *The assessment of reliability*. In *Psychometric theory* (3rd ed., pp. 248–292). McGraw-Hill.
- Ofori, E. K., Aram, S. A., Saalidong, B. M., Gyimah, J., Niyonzima, P., Mintah, C., & Ahakwa, I. (2023). Exploring new antecedent metrics for safety performance in Ghana’s oil and gas industry using partial least squares structural equation modelling (PLS-SEM). *Resources Policy*, 81, 103368. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103368>
- Parkes, K., Hodkiewicz, M., & Morrison, D. (2012). The role of organizational factors in achieving reliability in the design and manufacture of subsea equipment. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 22(6), 487–505. <https://doi.org/10.1002/hfm.20289>
- Patterson, R. E. (2017). Intuitive cognition and models of human–automation interaction. *Human Factors*, 59(1), 101–115. <https://doi.org/10.1177/0018720816659796>
- Probst, T. M., Goldenhar, L. M., Byrd, J. L., & Betit, E. (2019). The Safety Climate Assessment Tool (S-CAT): A rubric-based approach to measuring construction safety climate. *Journal of Safety Research*, 69, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2019.02.004>
- Rajapakse, A., & Emad, G. R. (2025). Are “doubts related to work procedures” the enigma behind accidents? A sociocultural perspective from the maritime industry. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 1–26. <https://doi.org/10.1080/18366503.2025.2488088>
- Read, G. J., Shorrock, S., Walker, G. H., & Salmon, P. M. (2021). State of science: Evolving perspectives on “human error.” *Ergonomics*, 64(9), 1091–1114. <https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1953615>
- Rivera, G., Yunusa-Kaltungo, A., & Labib, A. (2021, July). A hybrid approach for an oil and gas company as a representative of a high reliability organization. In *Safety and Reliability* (Vol. 40, No. 3, pp. 130–156). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/09617353.2021.1920299>
- Roelen, C. A., van Hoffen, M. F., Waage, S., Schaufeli, W. B., Twisk, J. W., Bjorvatn, B., & Pallesen, S. (2018). Psychosocial work environment and mental health-related long-term sickness absence among nurses. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 91(2), 195–203. <https://doi.org/10.1007/s00420-017-1268-1>
- Salmon, P. M., Carden, T., & Hancock, P. A. (2021). Putting the humanity into inhuman systems: How human factors

- and ergonomics can be used to manage the risks associated with artificial general intelligence. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 31(2), 223–236. <https://doi.org/10.1002/hfm.20883>
- Simonova, N. N., & Korneeva, Y. A. (2024, September). The functional states' dynamics during the shift period of oil exploration workers with different work and rest regimes as a marker of their psychological safety. In *SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability* (p. D031S029R004). SPE. <https://doi.org/10.2118/220482-MS>
- Stanton, N. A., Salmon, P. M., Rafferty, L. A., Walker, G. H., Baber, C., & Jenkins, D. P. (2017). *Human factors methods: A practical guide for engineering and design*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315587394>
<https://doi.org/10.4324/9781351156325>
- Wang, B., Wu, C., Reniers, G., Huang, L., Kang, L., & Zhang, L. (2018). The future of hazardous chemical safety in China: Opportunities, problems, challenges and tasks. *Science of the Total Environment*, 643, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.174>
- Whitacre, P., Wullert, K., & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2025, May). Job burnout: Consequences for individuals, organizations, and equity. In *Impact of burnout on the STEMM workforce: Proceedings of a workshop*. National Academies Press (US). <https://doi.org/10.17226/29078>
- Willis, S., Holman, D., Clarke, S., & Hartwig, A. (2024). Understanding the regulator–regulatee relationship for developing safety culture. *Risk Analysis*, 44(4), 972–990. <https://doi.org/10.1111/risa.14214>
- Zara, J., Nordin, S. M., & Isha, A. S. N. (2023). Influence of communication determinants on safety commitment in a high-risk workplace: A systematic literature review of four communication dimensions. *Frontiers in Public Health*, 11, 1225995. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1225995>
- Zhan, X., Wu, J., & Jie, Y. (2025). How and when psychological safety impacts employee innovation: The roles of thriving at work and regulatory focus. *Current Psychology*, 44(5), 3736–3746. <https://doi.org/10.1007/s12144-025-07348-3>
- Zhang, J., Fu, J., Hao, H., Fu, G., Nie, F., & Zhang, W. (2020). Root causes of coal mine accidents: Characteristics of safety culture deficiencies based on accident statistics. *Process Safety and Environmental Protection*, 136, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.024>

Analisis dan Pengendalian Produk Cacat pada Produk *Rubber Clutch Damper* dengan Pendekatan DMAIC

[DMAIC Based Approach for Analyzing and Controlling Defective Product in Rubber Clutch Damper Product]

Tegar Tandika¹, Christopher Nata^{1*}, Priskila Christine Rahayu¹

¹Program Studi Teknik Industri, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pelita Harapan
Jl. MH. Thamrin Boulevard, Tangerang 15811, Banten, Indonesia

*Korespondensi penulis: christopher.nata@uph.edu

ABSTRACT

Rejects represent a major quality issue in the production process. If not effectively mitigated, they can increase production costs, disrupt process flow, and reduce customer satisfaction. This study aimed to minimize product rejection in rubber clutch damper manufacturing by applying the Six Sigma DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) methodology. In the Define phase, Critical to Quality (CTQ) characteristics were identified to determine key improvement priorities. The Measure phase involved data collection to calculate Defects per Million Opportunities (DPMO), sigma level, and the construction of a Pareto chart to highlight the dominant sources of defects. Subsequently, the Analyze phase employed Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) to evaluate the Severity, Occurrence, and Detection of potential failures, leading to the determination of the Risk Priority Number (RPN) as a basis for improvement prioritization. In the Improve phase, corrective actions targeting the highest RPN factors were implemented, followed by the Control phase, which established sustainability through One Point Lessons and Standard Operating Procedures (SOPs). The implementation of the DMAIC framework resulted in a substantial improvement in process capability, indicated by an increase in sigma level from 4.11 to 4.58, and a reduction in the total production rejection rate from 1.51% to 0.31%. A paired t-test confirmed a statistically significant difference between pre- and post-improvement rejection rates ($t = 61.63$, $p < 0.0001$), leading to the rejection of the null hypothesis. These findings demonstrate that the applied improvements effectively reduced product defects and achieved a total rejection rate below the company's management target of 0.40%. The study confirms the effectiveness of the DMAIC approach in enhancing product quality and operational efficiency within rubber component manufacturing.

Keywords : DMAIC; DPMO; Quality

ABSTRAK

Permasalahan *reject* merupakan salah satu isu krusial dalam proses produksi yang apabila tidak segera ditangani, dapat berdampak pada peningkatan biaya produksi, keterlambatan pengiriman antarproses, serta penurunan tingkat kepuasan pelanggan. Penelitian ini bertujuan untuk menurunkan tingkat *reject* pada produk *rubber clutch damper* melalui penerapan metodologi Six Sigma dengan pendekatan DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*). Pada tahap *Define*, dilakukan identifikasi *Critical to Quality* (CTQ) untuk menentukan karakteristik yang berpengaruh signifikan terhadap kualitas produk. Tahap *Measure* meliputi pengumpulan data produksi guna menghitung nilai *Defects Per Million Opportunities* (DPMO), tingkat sigma, serta penyusunan diagram Pareto untuk mengidentifikasi jenis cacat dengan kontribusi terbesar terhadap total *reject*. Selanjutnya, tahap *Analyze* dilaksanakan menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA)

dengan penilaian terhadap parameter *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*, yang dikalikan untuk memperoleh nilai *Risk Priority Number* (RPN) sebagai dasar prioritas tindakan perbaikan. Tahap *Improve* difokuskan pada penerapan solusi korektif terhadap faktor penyebab dengan nilai RPN tertinggi, sedangkan tahap *Control* menitikberatkan pada keberlanjutan hasil perbaikan melalui penyusunan *One Point Lessons* (OPL) dan *Standard Operating Procedures* (SOP). Penerapan metodologi DMAIC menghasilkan peningkatan kapabilitas proses dengan kenaikan nilai sigma dari 4,11 menjadi 4,58, serta penurunan *rejection rate* total produksi dari 1,51% menjadi 0,31%. Hasil uji *paired t-test* menunjukkan perbedaan yang signifikan antara tingkat *rejection rate* sebelum dan sesudah perbaikan ($t = 61,63; p < 0,0001$), sehingga hipotesis nol ditolak. Dengan demikian, penerapan DMAIC terbukti efektif dalam menurunkan tingkat *reject* secara signifikan hingga di bawah target manajemen sebesar 0,40%, sekaligus meningkatkan kualitas produk dan efisiensi proses produksi.

Kata kunci : *DMAIC; DPMO; Quality;*

PENDAHULUAN

Industri suku cadang kendaraan bermotor memiliki peran vital dalam mendukung perkembangan industri otomotif secara keseluruhan. Suku cadang kendaraan, termasuk komponen-komponen seperti sistem transmisi, suspensi, rem, dan mesin, memainkan peran penting dalam memastikan kinerja optimal dan keselamatan kendaraan. Permintaan terhadap suku cadang berkualitas tinggi terus meningkat seiring dengan bertambahnya produksi kendaraan dan tingginya harapan konsumen akan durabilitas dan performa (Setiawan & Setiawan, 2020). Untuk memenuhi tuntutan pasar yang semakin kompleks ini, perusahaan harus berinvestasi dalam penelitian dan pengembangan untuk menghasilkan suku cadang inovatif yang tidak hanya memenuhi tetapi juga melampaui ekspektasi standar industri (Fitriana et al., 2023). Komponen seperti

rubber clutch damper, oil seal, dan o-ring, yang banyak digunakan dalam kendaraan bermotor, harus melalui proses manufaktur yang presisi dan berkualitas untuk menjamin fungsionalitas serta masa pakai yang panjang.

Dalam ekosistem industri suku cadang ini, penerapan standar internasional, seperti ISO dan IATF, menjadi keharusan bagi perusahaan agar mampu bersaing dan mendapatkan kepercayaan pasar global. Di samping itu, efisiensi dalam proses produksi dan kontrol kualitas yang ketat menjadi elemen kunci untuk mempertahankan keberlanjutan perusahaan di tengah persaingan industri yang semakin ketat (Trimarjoko et al., 2019). Oleh sebab itu, perbaikan berkelanjutan sangat penting untuk memastikan produk berkualitas tinggi dan konsistensi dalam memenuhi kebutuhan pasar yang terus berkembang (Mittal et al., 2023). Produk-produk seperti clutch damper, oil seal, o-ring, dan VSS merupakan komponen krusial dalam

kendaraan dan harus memenuhi standar kualitas yang ketat. Kegagalan dalam menjaga kualitas dapat mengakibatkan kerugian signifikan, baik dari segi biaya maupun reputasi perusahaan (Trimarjoko et al., 2019). Oleh karena itu, penerapan metode yang efektif untuk mengurangi produk cacat (*reject*) menjadi sangat esensial bagi kelangsungan bisnis (Imansuri et al., 2024) (Trimarjoko et al., 2019). Pendekatan seperti Six Sigma dan Lean Six Sigma sering diimplementasikan untuk mengidentifikasi akar penyebab cacat, mengurangi pemborosan, dan meningkatkan efisiensi operasional (Afifa & Damayanti, 2023) (Nurchayo et al., 2017) (Huda et al., 2025). Sebagai contoh, industri otomotif secara keseluruhan menghadapi tekanan yang luar biasa untuk mengurangi biaya tanpa mengorbankan kualitas dan kinerja, terutama dalam desain dan manufaktur (Sampaio-Neto et al., 2024). Hal ini sejalan dengan kebutuhan pasar yang semakin dinamis, dimana pelanggan menuntut produk berkualitas tinggi yang spesifik dan kustom (Suwikromo et al., 2022). Dengan demikian, setiap perusahaan perlu berupaya untuk mempertahankan serta meningkatkan kualitas produk secara berkelanjutan guna memenuhi kebutuhan pelanggan dan memperkecil variasi proses produksi (Lima et al., 2025) (Trimarjoko et al., 2019) (Dewi & Ummah, 2019).

PT X, sebagai perusahaan yang berfokus pada produksi *rubber parts* otomotif, harus mampu memproduksi produk berkualitas tinggi untuk mendukung kebutuhan industri otomotif. Sebagai produsen komponen kritis, PT X perlu memastikan bahwa setiap tahap proses produksinya berjalan lancar dan memenuhi standar kualitas yang ditetapkan. Proses produksi di PT X terdiri dari beberapa tahapan utama, yaitu *Material Preparation*, *Molding*, *Finishing*, *Visual Inspection*, dan *Packaging*. Namun, dalam setiap tahapan tersebut terdapat potensi terjadinya *reject* produk akibat berbagai faktor. Misalnya, pada tahap *Material Preparation*, masalah seperti *less rubber* dan *stuck foreign material* sering kali menjadi penyebab utama *reject*. Kemudian di tahap *Molding*, cetakan yang kotor dapat mengakibatkan cacat pada produk, sedangkan pada tahap *Finishing*, masalah seperti *chipping* dan *scars* sering terjadi. Setiap jenis *reject* ini memiliki kontribusi tersendiri terhadap tingkat *reject* keseluruhan yang menjadi perhatian utama dalam pengelolaan kualitas di PT X.

Tingkat *reject* produk di PT X merupakan salah satu *Key Performance Indicator* (KPI) dari departemen Produksi. Peningkatan *reject rate* tidak hanya berdampak pada efisiensi produksi, tetapi juga memengaruhi kemampuan perusahaan dalam memenuhi target kualitas yang telah

ditetapkan. Oleh sebab itu pada penelitian ini terlebih dahulu diukur kinerja proses produksi saat ini, kemudian selanjutnya dilakukan analisis menggunakan pendekatan DMAIC untuk memperoleh Solusi efektif untuk memperbaiki faktor yang mengakibatkan *reject*.

Dari sisi akademik, penelitian ini memberikan kontribusi empiris terhadap dengan menekankan penerapan DMAIC pada industri berbasis material elastomer, di mana variasi proses dan keseragaman material menjadi tantangan signifikan. Pendekatan ini diharapkan memperkaya pemahaman tentang DMAIC dalam konteks manufaktur yang memiliki kompleksitas tinggi dan ketergantungan kuat terhadap kondisi mesin serta operator.

BAHAN DAN METODE

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Six Sigma dengan kerangka kerja DMAIC (*Define–Measure–Analyze–Improve–Control*) untuk mengevaluasi dan meningkatkan kualitas proses produksi *rubber clutch damper*.

- *Define*

Tahap pertama, Define, diawali dengan identifikasi menyeluruh terhadap proses produksi yang dijalankan. Pada tahap ini dilakukan penentuan *Critical to Quality* (CTQ) serta pemetaan potensi permasalahan melalui identifikasi faktor

4M (*Man, Machine, Method, Material*) atau 7 *Waste* yang berpotensi menurunkan kualitas produk.

- *Measure*

Selanjutnya, pada tahap Measure, dilakukan pengukuran kinerja proses melalui perhitungan nilai *Defects Per Million Opportunities* (DPMO) dan level sigma. Perhitungan DPMO dilakukan menggunakan rumus:

$$DPMO = (\text{Jumlah kegagalan/jumlah yang diperiksa} \times \text{CTQ Opportunity}) \times 1000$$

- *Analyze*

Pada tahap analisis, dilakukan pengolahan dan interpretasi data untuk mengetahui faktor-faktor penyebab utama terjadinya cacat produk. Analisis dilakukan menggunakan *fishbone diagram* untuk mengidentifikasi faktor dominan yang berpengaruh terhadap proses produksi *clutch damper*. Kemudian, analisis lanjutan menggunakan *Pareto chart* untuk membantu menentukan jenis cacat yang paling dominan sehingga dapat menjadi prioritas perbaikan. Kemudian, dibuat histogram untuk melihat distribusi dan pola variasi data hasil produksi.

- *Improve*

Berdasarkan hasil analisis, disusun usulan perbaikan proses. Selanjutnya, disusun tabel FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) untuk menentukan prioritas

perbaikan berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN). Langkah ini memastikan bahwa tindakan perbaikan difokuskan pada area yang memiliki risiko tertinggi terhadap kualitas produk.

- *Control*

Usulan perbaikan yang akan diterapkan harus dipastikan dapat dipertahankan dan dijalankan secara konsisten. Pada tahap *control* meliputi kegiatan pengukuran ulang nilai DPMO untuk melakukan verifikasi peningkatan kualitas proses. Kemudian, disusun sebuah instrumen pengendalian, seperti *checksheet* untuk pengecekan harian, instruksi kerja lapangan (SOP), serta pelatihan operator guna menjaga standar kerja yang telah ditetapkan.

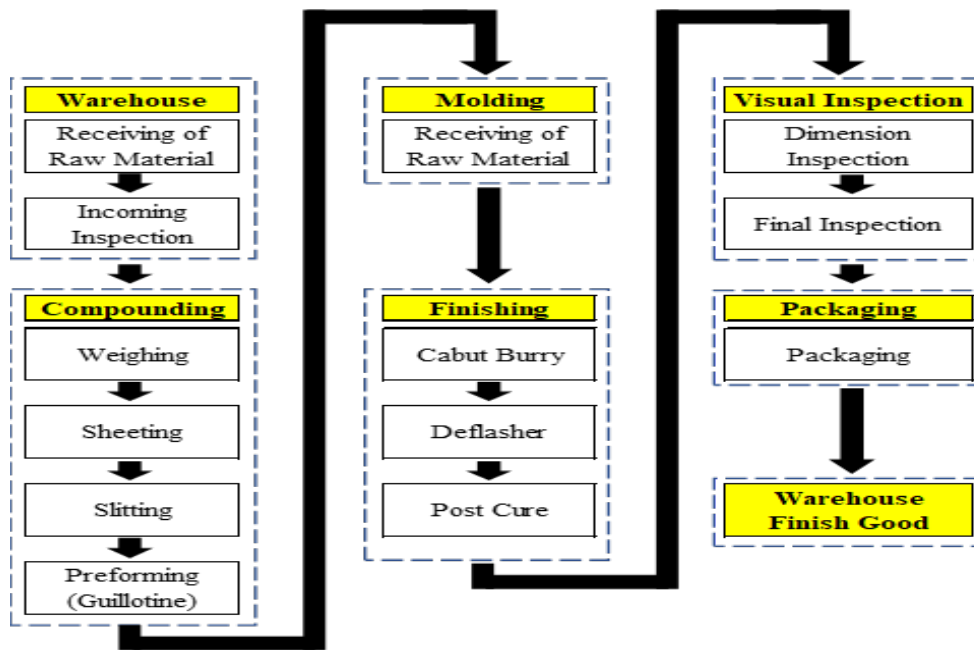
Penelitian ini berbentuk studi kasus, dengan struktur penerapan DMAIC yang disajikan dapat dijadikan acuan perbaikan kualitas pada industri dengan karakteristik serupa. Penjabaran tiap tahapan dari *Define* hingga *Control* dalam konteks nyata

memberikan panduan praktis yang dapat direplikasi oleh perusahaan lain yang menghadapi permasalahan variasi proses atau cacat produk dengan karakteristik serupa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses Produksi

Proses produksi *clutch damper* di dimulai dari area *warehouse* dan *compounding*, di mana *compound* atau *rubber* yang dibutuhkan untuk pembuatan *clutch damper* disiapkan. Setelah itu, *rubber* tersebut dikirim ke area *molding* untuk dibentuk, kemudian melalui tahapan *finishing* dan *visual inspection*. Setelah lolos pemeriksaan, produk akan diproses di bagian *packaging* sebelum siap digunakan sebagai komponen yang berfungsi menyerap dan meredam guncangan serta getaran pada sistem kopling dan *pulley* belakang kendaraan bermotor. Gambar 1 merupakan diagram alir proses produksi *rubber clutch damper*.



Gambar 1. Diagram Alir Proses Produksi

Kondisi Saat Ini

Untuk mengukur kondisi saat ini, maka diambil data reject bulanan *clutch damper* dari periode Februari hingga Agustus 2024. Selanjutnya, data *reject* bulanan tersebut akan dianalisis menggunakan diagram pareto untuk mengidentifikasi masalah utama yang menjadi penyebab terbesar reject pada produk *rubber clutch damper*. Tabel 1 merupakan data *reject rubber clutch damper* pada periode bulan Februari-Agustus 2024.

Tabel 1. Data *Reject Rubber Clutch Damper*

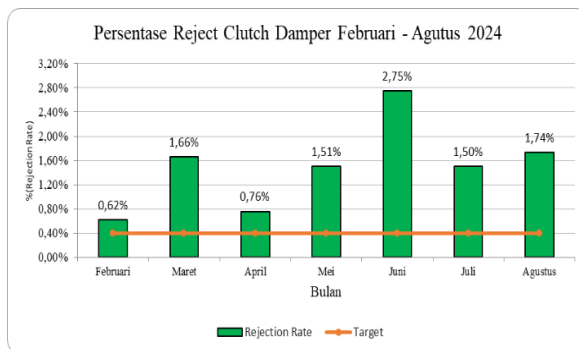
No	Bulan	Total Reject	Rejection Rate	Target
1	Februari	2.254	0,62%	0,4%
2	Maret	40.609	1,66%	0,4%
3	April	10.782	0,76%	0,4%
4	Mei	33.398	1,51%	0,4%
5	Juni	46.864	2,75%	0,4%

6	Juli	26.238	1,50%	0,4%
7	Agustus	39.111	1,74%	0,4%
<i>Average</i>		26.781	1,51%	0,4%

Berdasarkan tabel 1 diketahui bahwa *total reject* yang terjadi pada periode yang tercatat di tabel ini bervariasi setiap bulannya. Rata-rata *reject* yang terjadi dalam periode ini adalah 26.781 pcs, dengan rata-rata produksi yang mencapai 1.735.978 pcs per bulan. Persentase *rejection rate* yang dihasilkan dari data total *reject* dan total produksi adalah sekitar 1,51%, yang berada di atas target yang telah ditetapkan sebesar 0,40%. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat *reject* masih perlu diperbaiki untuk mencapai target kualitas yang diinginkan.

Kemudian, analisis histogram pada gambar 2 juga menunjukkan bahwa

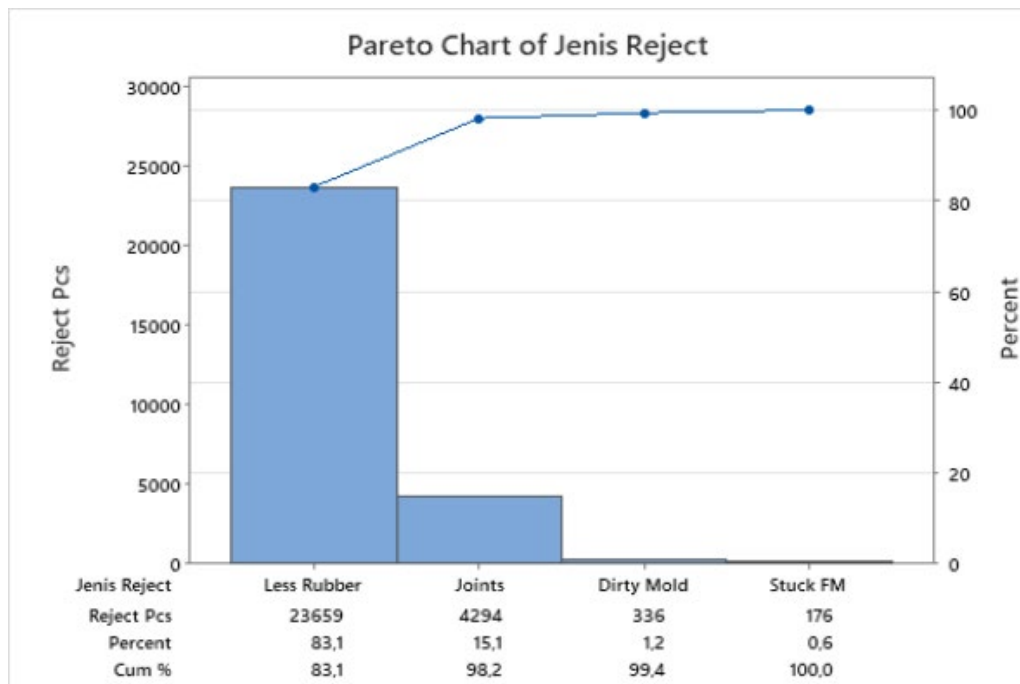
persentase *defect* dari bulan Februari hingga Agustus masih berada di atas target yang telah ditetapkan Perusahaan, dengan persentase *defect* tertinggi terjadi pada bulan Agustus yaitu sebesar 2,75%. Tren peningkatan *reject* terlihat signifikan pada bulan Juni. Berdasarkan Analisa kondisi saat ini, Perusahaan sangat memerlukan perbaikan dan penanganan lebih lanjut agar dapat menurunkan *reject rate* dan mencapai target kualitas yang telah ditetapkan.



Gambar 2. Histogram *Reject Rubber Clutch Damper*

Pareto Diagram

Diagram Pareto dibentuk untuk memfokuskan item perbaikan yang perlu dilakukan untuk mengurangi *reject* pada *rubber clutch damper*. Berdasarkan pengamatan, terdapat 4 jenis *reject* pada proses produksi yaitu *Less Rubber* Kondisi dimana terdapat celah kosong atau rongga pada hasil cetak, kemudian *joints* yaitu terjadi ketika terdapat celah atau sambungan tidak sempurna, lalu *dirty mold* adalah kondisi tidak mulusnya permukaan produk yang disebabkan kondisi mold yang tidak bersih, kemudian yang terakhir adalah *stuck FM (Foreign Material)* yang terjadi ketika ada benda atau substansi asing yang tidak seharusnya berada di dalam produk. Berdasarkan 4 jenis *defect* ini maka dilakukan pemetaan diagram Pareto nya. Gambar 3 merupakan diagram Pareto untuk jenis *defect*.



Gambar 3. Diagram Pareto Jenis Reject

Hasil diagram Pareto menunjukkan bahwa masalah dengan jumlah *reject* tertinggi adalah *less rubber* dengan rata-rata sebesar 23.659 pcs *rubber clutch damper reject* selama periode 7 bulan pengamatan.

DPMO

Perhitungan DPMO bertujuan untuk mengetahui jumlah reject yang terjadi per satu juta produk, yang nantinya digunakan untuk mengukur kinerja suatu proses dengan meningkatkan tingkat sigma.

Tabel 2. Konversi Reject Six Sigma

No.	Bulan	Total Reject (Pcs)	Total Produksi (Pcs)	CTQ	DPO	DPMO	Nilai Sigma
1	Feb-24	2.254	361.200	3	0,00208	2.080	4,37
2	Mar-24	40.609	2.452.788	3	0,005519	5.519	4,04
3	Apr-24	10.782	1.419.600	3	0,002532	2.532	4,30
4	Mei-24	33.398	2.217.600	3	0,00502	5.020	4,07
5	Jun-24	46.864	1.705.200	3	0,009161	9.161	3,86
6	Jul-24	26.238	1.744.260	3	0,005014	5.014	4,07
7	Ags-24	39.111	2.251.200	3	0,005791	5.791	4,02
Rata-rata		28.465	1.735.978	3	0	5.017	4,11

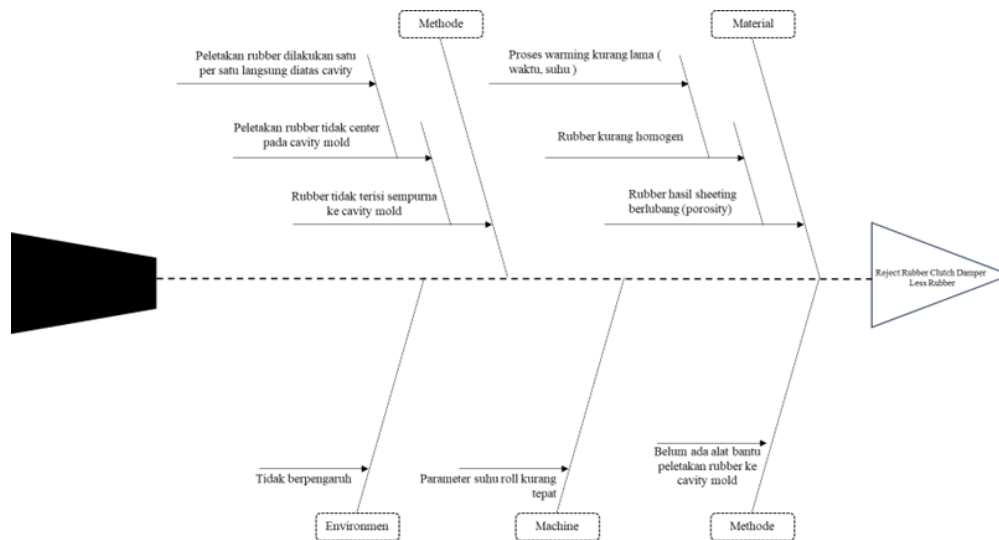
Berdasarkan tabel 2 mengenai perhitungan *DPMO* pada proses produksi *rubber clutch damper*, rata-rata nilai

DPMO dari Februari hingga Agustus 2024 adalah 28.465 pcs. Nilai ini artinya setiap produksi sebanyak 1 juta unit menghasilkan

sekitar 28.465 pcs produk *reject*. Selain itu, tingkat *sigma* yang dicapai adalah 4,11, yang menunjukkan kinerja yang cukup baik, namun masih perlu peningkatan untuk mencapai target *reject* yang ditetapkan, yaitu sebesar 0,40%.

Fishbone Diagram

Diagram tulang ikan / *Fishbone Diagram* dibuat untuk mengetahui akar permasalahan dari jenis *reject* yang sudah dianalisis. Gambar 4 merupakan hasil pengolahan data *Fishbone Diagram*.



Gambar 4. Diagram Tulang Ikan

Berdasarkan diagram *fishbone*, dapat diidentifikasi bahwa penyebab utama masalah berasal dari faktor 4M, dengan faktor metode dan manusia sebagai penyebab dominan. Kemudian, berdasarkan validasi akar masalah yang telah dilakukan pada proses *sheeting* dan *molding* terbukti bahwa akar masalah yang diidentifikasi memang berpotensi menyebabkan *reject less rubber*, sehingga perlu dilakukan perbaikan yang terfokus untuk mengatasi berbagai masalah, seperti proses warming kurang lama dan *rubber* yang tidak terisi sempurna ke *cavity mold*. Dalam perbaikan yang akan dilakukan,

harus mempertimbangkan berbagai faktor, termasuk *safety*, *quality*, *cost*, dan waktu pengerjaan, agar perbaikan dapat berlangsung secara efektif, efisien, dan hasil yang diperoleh dapat meminimalisir atau mengurangi *reject less rubber*.

FMEA

Berdasarkan hasil *fishbone diagram*, akar permasalahan ada pada proses *sheeting* dan *molding* yang berujung pada *defect less rubber*. Kemudian, dibuatlah FMEA untuk 2 proses tersebut seperti dapat dilihat pada tabel 3

Tabel 3. FMEA Rubber Clutch Damper Proses Sheeting dan Molding

Proses	Potensi Kegagalan	Potensi Dampak kegagalan	S	Potensi Penyebab Kegagalan	O	Kontrol Proses Saat ini	D	RPN	Action
Sheeting	Suhu akhir rubber under sehingga kurang homogen	Terdapat porositas pada hasil sheeting	7	Proses Warming Kurang Lama	5	Setting suhu roll dan durasi warming	6	210	Menambahkan suhu roll pada saat start dan durasi pada saat warming
Molding	Rubber tidak terdistribusi dengan sempurna pada cavity molding	Terdapat celah pada rubber clutch damper	8	Peletakan rubber tidak center pada cavity mold	6	Menyusun rubber satu per satu langsung ke cavity mold	7	336	Pembuatan alat bantu peletakan rubber pada cavity mold

Dari FMEA yang telah dibuat, diketahui bahwa masalah terbesar yang menyebabkan *reject less rubber* adalah peletakan *rubber* yang tidak center pada *cavity mold*, ditunjukkan dengan nilai RPN tertinggi, yaitu 336. Peletakan yang tidak center ini menyebabkan *rubber* tidak terdistribusi dengan sempurna di *cavity mold*, sehingga terdapat celah pada *rubber clutch damper* setelah proses *molding*. Masalah terbesar kedua adalah suhu akhir *rubber under*, yang menyebabkan *rubber* kurang homogen dengan nilai RPN sebesar 210. Hal ini mengakibatkan *porosity* pada *rubber* hasil *sheeting*, yang disebabkan oleh proses *warming* yang kurang lama.

Perbaikan

Setelah mengidentifikasi berbagai usulan perbaikan atau rekomendasi

tindakan dari masing-masing akar masalah menggunakan FMEA, langkah berikutnya adalah menerapkan perbaikan tersebut untuk melihat apakah berhasil menurunkan *reject less rubber* pada produk *rubber clutch damper*.

- Suhu akhir

Defect less rubber terjadi akibat suhu akhir *rubber* dibawah standar sehingga *rubber* kurang homogen. Hal ini dapat diatasi dengan menaikkan suhu *roll open mill* saat proses *sheeting*. Kemudian dapat juga menentukan waktu yang lebih tepat pada saat tahap *warming*.

- Cavity Molding

Reject less rubber juga dapat terjadi jika *rubber* tidak terdistribusi sempurna pada *cavity molding*. Hal ini diatasi dengan membuat alat bantu peletakan *rubber* diatas *cavity mold* agar memastikan posisi cetakan

tepat ditengah. Gambar alat bantu ada pada gambar 5.



Gambar 5. Alat Bantu Peletakan *Rubber*

Setelah perbaikan dilakukan dan diambil sampel sebanyak 10 lot *rubber*. Tidak lagi didapati adanya *porosity* atau rongga rongga pada *rubber* seperti dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Sampel *rubber* Setelah Perbaikan

Nilai Sigma

Setelah perbaikan dilakukan, jumlah persentase *defect* sehingga nilai sigma meningkat dari yang sebelumnya 4,11 pada bulan Februari – Agustus menjadi 4,58 pada bulan November setelah perbaikan dilakukan. Peningkatan nilai sigma dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. FMEA *Rubber Clutch Damper* Proses *Sheeting* dan *Molding*

No.	Bulan	Total Reject (Pcs)	Total Produksi (Pcs)	CTQ	DPO	DPMO	Nilai Sigma
1	Februari – Agustus 2024	26.781	1.735.978	3	0,00502	5.017	4,11
2	September 2024	45.566	3.267.600	3	0,00465	4.648	4,10
3	Oktober 2024	15.849	2.556.120	3	0,00207	2.067	4,37
4	November 2024	9.262	2.987.880	3	0,00103	1.033	4,58

Paired T-Test

Paired T-test dilakukan untuk menganalisis signifikansi perbaikan yang terjadi. Data bulan September dibandingkan dengan bulan November. Tabel 5

merupakan data *reject rate* bulan September dan November, sedangkan gambar 7 merupakan hasil uji Paired T-test menggunakan aplikasi Minitab.

Tabel 5. Data *Reject Rate* Sebelum dan Sesudah Perbaikan

Sep-24				Nov-24			
Tanggal	<i>Rejection Rate</i>	Tanggal	<i>Rejection Rate</i>	Tanggal	<i>Rejection Rate</i>	Tanggal	<i>Rejection Rate</i>
1	1,44%	16	1,27%	1	0,29%	16	0,35%
2	1,29%	17	1,53%	2	0,29%	17	0,31%
3	1,37%	18	1,32%	3	0,30%	18	0,34%
4	1,46%	19	1,47%	4	0,33%	19	0,34%
5	1,32%	20	1,50%	5	0,30%	20	0,31%
6	1,27%	21	1,51%	6	0,30%	21	0,32%
7	1,36%	22	1,38%	7	0,31%	22	0,32%
8	1,32%	23	1,50%	8	0,31%	23	0,30%
9	1,43%	24	1,51%	9	0,29%	24	0,33%
10	1,25%	25	1,28%	10	0,32%	25	0,32%
11	1,40%	26	1,49%	11	0,32%	26	0,32%
12	1,52%	27	1,38%	12	0,28%	27	0,29%
13	1,25%	28	1,51%	13	0,30%	28	0,28%
14	1,45%	29	1,38%	14	0,29%	29	0,29%
15	1,33%	30	1,49%	15	0,32%	30	0,34%

Hasil *Paired T-test* menunjukkan bahwa nilai P-value sama dengan 0, hal ini menunjukkan bahwa pengurangan *defect rate* yang terjadi setelah perbaikan di bulan November adalah signifikan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa usulan perbaikan yang diimplementasikan telah berhasil berdampak positif terhadap rantai produksi di PT X.

Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Rejection Rate Before	30	0,013992	0,000925	0,000169
Rejection Rate After	30	0,003108	0,000195	0,000036

Test

Null hypothesis H₀: $\mu_{\text{difference}} = 0$
 Alternative hypothesis H_a: $\mu_{\text{difference}} \neq 0$

T-Value	P-Value
61,63	0,000

Estimation for Paired Difference

Mean	StDev	SE Mean	95% CI for $\mu_{\text{difference}}$
0,010884	0,000967	0,000177	(0,010523; 0,011245)

$\mu_{\text{difference}}$: population mean of (Rejection Rate Before - Rejection Rate After)

Gambar 7. Hasil Uji Statistik *Paired T-test*

KESIMPULAN

Proses perbaikan dimulai pada bulan November 2024. Setelah perbaikan dilakukan, *rejection rate* proses produksi *rubber clutch damping* berhasil turun dari sebelumnya rata-rata sebesar 1,51% menjadi 0,31%.

Kemudian nilai *Six Sigma* DPMO juga mengalami penurunan dari sebelumnya 5,017 atau sama dengan 4,11 sigma kini turun menjadi 1,033 dengan nilai sigma meningkat signifikan menjadi 4,58. Berdasarkan hasil menunjukkan bahwa proses perbaikan dengan pendekatan DMAIC yang dilakukan telah berhasil menurunkan jumlah *reject* sekaligus meningkatkan nilai sigma dalam produksi *rubber clutch damper*.

DAFTAR PUSTAKA

- Afifa, E. P. V., & Damayanti, R. W. (2023). Six Sigma implementation on wash motor twin tub washing machine: A case study. *E3S Web of Conferences*, 465, 2045. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346502045>
- Dewi, S. K., & Ummah, D. M. (2019). Perbaikan kualitas pada produk genteng dengan metode Six Sigma. *JTI UNDIP Jurnal Teknik Industri*, 14(2), 87–92. <https://doi.org/10.14710/jati.14.2.87-92>
- Fitriana, F., Azizah, F. N., & Hamdi, M. (2023). Analisis Statistical Quality Control dalam proses produksi komponen wheel rim. *Go-Integratif: Jurnal Teknik Sistem dan Industri*, 4(1), 11–18. <https://doi.org/10.35261/gijtsi.v4i01.8778>
- Huda, K. N., Kusuma, R. A., Ghani, F. A., Jaya, R., & Purwaningrum, T. (2025). Perusahaan pembuat spare part motor Mantri Karbu: Mengoptimalkan proses produksi dengan metode transformasi. *Jurnal Manuhara: Pusat Penelitian Ilmu Manajemen dan Bisnis*, 3(2), 46–54. <https://doi.org/10.61132/manuhara.v3i2.1595>
- Imansuri, F., Chayatunnufus, T., Safril, S., Sumasto, F., Purwojatmiko, B. H., & Salati, D. (2024). Reducing defects using DMAIC methodology in an automotive industry. *Spektrum Industri*, 22(1), 1–10. <https://doi.org/10.12928/si.v22i1.171>
- Lima, A. K. S. R., Becerra, C. E. T., Feitosa, A. D., Albuquerque, A. P. G. de, Melo, F. J. C. de, & Medeiros, D. D. de. (2025). Effective practices for implementing quality control circles aligned with ISO quality standards: Insights from employees and managers in the food industry. *Standards*, 5(1), 6. <https://doi.org/10.3390/standards501006>
- Mittal, A., Gupta, P. K., Kumar, V., Owad, A. A., Mahlawat, S., & Singh, S. (2023). The performance improvement analysis using Six Sigma DMAIC methodology: A case study on Indian manufacturing company. *Heliyon*, 9(3), e14625. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14625>
- Nurchahyo, R., Apdillah, R., & Yadrifil. (2017). Application of Lean Six Sigma and theory of inventive problem solving to reduce waste and improve the quality of motorcycle rear arm. *Journal of Asian Scientific Research*, 7(5), 176–186. <https://doi.org/10.18488/journal.2.2017.75.176.186>
- Sampaio-Neto, R., Souza, C. G. P., Brito, L., & Guimarães, G. L. N. (2024). Challenges in cost reduction for

- automotive parts: A comprehensive analysis. *SAE Technical Papers on CD-ROM/SAE Technical Paper Series, I*. <https://doi.org/10.4271/2024-36-0174>
- Setiawan, I., & Setiawan, S. (2020). Defect reduction of roof panel part in the export delivery process using the DMAIC method: A case study. *Jurnal Sistem dan Manajemen Industri*, 4(2), 108–115. <https://doi.org/10.30656/jsmi.v4i2.2775>
- Suwikromo, R. M., Soegoto, A. S., & Ogi, I. W. J. (2022). Analisis kualitas produk harga dan kualitas pelayanan terhadap kepuasan pelanggan di PT. Air Manado. *Deleted Journal*, 10(3), 410–418. <https://doi.org/10.35794/emba.v10i3.42278>
- Trimarjoko, A., Saroso, D. S., Purba, H. H., Hasibuan, S., Jaqin, C., & Aisyah, S. (2019). Integration of nominal group technique, Shainin system and DMAIC methods to reduce defective products: A case study of tire manufacturing industry in Indonesia. *Management Science Letters*, 9(7), 2421–2430. <https://doi.org/10.5267/j.msl.2019.7.013>