



SITEKNIK

SISTEM INFORMASI, TEKNIK
DAN TEKNOLOGI TERAPAN

E-ISSN 3032-3991 | P-ISSN 3090-1626

VOL. 3 NO. 3 (2026): JULY

This issue presents six peer-reviewed articles in applied technology, artificial intelligence, computer vision, solar energy, logistics, inventory systems, and expert systems.



6
PEER-REVIEWED
ARTICLES



60
PAGES



OPEN ACCESS
CC BY 4.0
LICENSE

IN THIS ISSUE

- | | | | |
|----------|--|--|-------------|
| 1 | Fine-Tuning Panoptic FPN with ResNet-50 for Maritime Obstacle Detection on the LaRS Dataset | | pp. 108–115 |
| 2 | Analisis Komprehensif Teknologi Panel Surya: Prinsip, Komponen, dan Konfigurasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya | | pp. 116–128 |
| 3 | Dashboard-Based Distribution Requirements Planning for Reverse Logistics Scheduling Optimization in Community Waste Collection | | pp. 129–138 |
| 4 | Implementation of FSN Analysis and Periodic Review System for Inventory Management Improvement in Spare Parts Warehouse | | pp. 139–147 |
| 5 | Implementasi Model Mobilenetv2 Untuk Klasifikasi Ras Anjing | | pp. 148–155 |
| 6 | Pengembangan Sistem Pakar Diagnosis Tingkat Stres Menggunakan Metode Certainty Factor | | pp. 156–167 |



OPEN ACCESS

Immediate and free access to all articles



PEER REVIEWED

Double-blind peer review by expert reviewers



AUTHOR RIGHTS

Authors retain copyright with CC BY 4.0 license



PUBLISHED BY:

RAM PUBLISHER

an imprint of

PT. Semoga Aman Sejahtera



Jombang, East Java,
Indonesia



rampublisher.id@gmail.com



<https://rampublisher.com>

INDEXED BY





SITEKNIK

SISTEM INFORMASI, TEKNIK
DAN TEKNOLOGI TERAPAN



E-ISSN 3032-3991 | P-ISSN 3090-1626

Vol. 3 No. 3 (2026): July

This issue presents six peer-reviewed articles on applied technology, artificial intelligence, computer vision, solar energy, logistics, inventory systems, and expert systems.



6
PEER-REVIEWED
ARTICLES



60
PAGES



OPEN ACCESS
CC BY 4.0
LICENSE



TABLE OF CONTENTS

- | | | | |
|---|--|--|-------------|
| 1 | Fine-Tuning Panoptic FPN with ResNet-50 for Maritime Obstacle Detection on the LaRS Dataset | | pp. 108–115 |
| 2 | Analisis Komprehensif Teknologi Panel Surya: Prinsip, Komponen, dan Konfigurasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya | | pp. 116–128 |
| 3 | Dashboard-Based Distribution Requirements Planning for Reverse Logistics Scheduling Optimization in Community Waste Collection | | pp. 129–138 |
| 4 | Implementation of FSN Analysis and Periodic Review System for Inventory Management Improvement in Spare Parts Warehouse | | pp. 139–147 |
| 5 | Implementasi Model Mobilenetv2 Untuk Klasifikasi Ras Anjing | | pp. 148–155 |
| 6 | Pengembangan Sistem Pakar Diagnosis Tingkat Stres Menggunakan Metode Certainty Factor | | pp. 156–167 |



OPEN ACCESS
Immediate and free access
to all articles



PEER REVIEWED
Double-blind peer review
by expert reviewers



AUTHOR RIGHTS
Authors retain copyright
with CC BY 4.0 license



Published by
RAM PUBLISHER
an imprint of
PT. Semoga Aman Sejahtera



Jombang, East Java,
Indonesia



rampublisher.id@gmail.com



<https://rampublisher.com>

INDEXED BY

Google Scholar

GARUDA
GARUDA RUTONGGA DIGITAL

Indonesia
oneSearch

OpenAIRE

INDEX **COPERNICUS**
INTERNATIONAL

BASE
Bibliography and Abstract Search Engine

DataCite
Commons

ISSN
INTERNATIONAL
STANDARD
NUMBER

ASCI

Dear Readers, Authors, Reviewers, and Members of the Academic Community,

It is my pleasure to present SITEKNIK: Sistem Informasi, Teknik dan Teknologi Terapan, Volume 3, Number 3, July 2026. This issue brings together six peer-reviewed articles that reflect the journal's commitment to disseminating relevant, practical, and academically sound research in information systems, engineering, and applied technology.

The contributions in this issue address maritime computer vision, solar-energy technology, reverse-logistics planning, inventory management, deep-learning-based image classification, and expert systems. Together, they demonstrate the breadth of applied research and the importance of connecting methodological rigor with real-world technological challenges.

I extend my sincere appreciation to all authors who entrusted their work to SITEKNIK, to the reviewers who contributed their expertise through an independent double-blind peer-review process, and to the editorial team whose careful work made this publication possible.

We hope that the articles published in this issue will provide useful knowledge, stimulate further research, and contribute to the development of science and technology. We welcome continued engagement from researchers, practitioners, and readers in Indonesia and internationally.

Muhammad Amanulloh Mz

Editor-in-Chief

SITEKNIK: Sistem Informasi, Teknik dan Teknologi Terapan

RAM PUBLISHER from PT. Semoga Aman Sejahtera

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

Muhammad Amanulloh Mz

RAM PUBLISHER

SINTA ID: 6905909 | Scopus ID: 60516089600

Managing Editor

Rohmat Saedudin, S.T., M.T., Ph.D.

Telkom University, Indonesia

SINTA ID: 5975929 | Scopus ID: 56436586900

Editorial Board Members

Kusnawi, S.Kom., M.Eng.

Universitas AMIKOM Yogyakarta, Indonesia

SINTA ID: 6004043 | Scopus ID: 57202045654

Nani Purwati, S.Kom., M.Kom.

Universitas Bina Sarana Informatika, Indonesia

SINTA ID: 5986719 | Scopus ID: 60408063600

Khilwa Annida, S.Mat., M.Mat.

Diponegoro University, Semarang, Indonesia

Nur Ismianah, S.Pd., M.Pd.

RAM PUBLISHER

REVIEW BOARD

- 1. Dr. Mochammad Teguh Kurniawan, S.T., M.T.**
Telkom University, Indonesia
- 2. Dr. Iphov Kumala Sriwana, S.T., M.Si., IPM.**
Telkom University, Indonesia
- 3. Dr. Tengku Ahmad Riza, S.T., M.T.**
Telkom University, Indonesia
- 4. Apip Miptahudin, S.T., M.T.**
Indonesia Defense University, Indonesia
- 5. Kholidin, S.Kom., M.Kom., CADE., CSBA.**
Diponegoro University, Indonesia
- 6. Rakhmadi Irfansyah Putra, S.Kom., M.M.S.I.**
PLN Institute of Technology, Indonesia
- 7. Mojibur Rohman, M.Pd.**
Universitas Islam Raden Rahmat, Indonesia
- 8. Rihartanto, S.T., M.Si.**
Politeknik Negeri Samarinda, Indonesia
- 9. Ali Mustopa, S.Kom., M.Kom.**
Universitas AMIKOM Yogyakarta, Indonesia
- 10. Agusta Praba Ristadi Pinem, S.Kom., M.Kom.**
Universitas Semarang, Indonesia
- 11. Adi Fajaryanto Cobantoro, S.Kom., M.Kom.**
Universitas Muhammadiyah Ponorogo, Indonesia
- 12. Gregorius Anung Hanindito, S.Kom., M.Cs.**
Universitas Antakusuma, Indonesia
- 13. Siti Anugrah Mulya Putri Ofrial, S.T., M.T., IPM.**
Lampung University, Indonesia
- 14. Lukman Anas, M.T.**
Universitas Muhammadiyah Makassar, Indonesia
- 15. Dewi Setiowati, S.Pd., M.Tr.Kom.**
Universitas Esa Unggul, Indonesia
- 16. Agustiyar, M.Kom.**
LLDIKTI WILAYAH VI, Jawa Tengah

Fine-Tuning Panoptic FPN with ResNet-50 for Maritime Obstacle Detection on the LaRS Dataset

Istifa Shania Putri¹, Sugih Ahmad Fauzan², Mega Fitri Yani³, Cindy Muhdiantini⁴

istifashaniaputri@telkomuniversity.ac.id¹, 23523038@std.stei.itb.ac.id²,

megafy@telkomuniversity.ac.id³, cindymuhdiantinim@telkomuniversity.ac.id⁴

¹³⁴ Information System, Telkom University, Indonesia

² School of Electrical and Informatics Engineering, Bandung Institute of Technology, Indonesia

Keywords: Panoptic Segmentation, Fine-Tuning, Mask R-CNN, Feature Pyramid Networks, Maritime Obstacle Detection, LaRS Dataset	Abstract
Submitted: 29/03/2026	Maritime obstacle detection is a critical challenge for Unmanned Surface Vehicles (USVs) operating in complex and dynamic environments. This study investigates the effectiveness of fine-tuning Panoptic FPN, a Mask R-CNN-based architecture augmented with Feature Pyramid Networks, for panoptic segmentation on the LaRS (Lake, River, Seas) dataset. Unlike prior work that explored model comparisons broadly, this research focuses specifically on the impact of hyperparameter tuning and backbone selection on maritime panoptic segmentation performance. Through systematic ablation studies, we demonstrate that adjusting the learning rate to 0.002 and the gamma decay factor to 0.2 yields significant improvements. Our fine-tuned Panoptic FPN with a ResNet-50 backbone achieves a Panoptic Quality (PQ) of 45.31%, surpassing the previous state-of-the-art Mask2Former Swin-B (41.7%) by 3.61 percentage points. Notably, ResNet-50 outperforms the deeper ResNet-101 backbone (36.47% PQ), suggesting that heavier architectures may overfit on domain-specific maritime datasets. Furthermore, Panoptic FPN requires only 8 hours of training compared to approximately 2 days for Mask2Former Swin-L, demonstrating superior computational efficiency. These findings highlight that targeted fine-tuning of lightweight architectures can outperform larger transformer-based models in maritime panoptic segmentation tasks.
Revised: 13/06/2026	
Accepted: 20/06/2026	
Corresponding Author: Istifa Shania Putri Information System, School of Industrial Engineering Gedung Bangkit Telkom University Jl. Telekomunikasi , Terusan Buah Batu Indonesia 40257, Bandung, Indonesia Email: istifashaniaputi@telkomuniversity.ac.id	

INTRODUCTION

Maritime accidents are frequently attributed to human factors, underscoring the importance of improving detection and awareness systems in maritime operations (Sánchez-Beaskoetxea et al., 2021). Unmanned Surface Vehicles (USVs) have emerged as a promising solution for automating maritime coordination tasks, but their development hinges on robust obstacle detection capabilities (Jin et al., 2024). Maritime environments present unique challenges for computer vision systems: the water surface produces strong reflections and sun glare, lighting conditions change rapidly, and dynamic obstacles vary greatly in size and appearance. Studies have shown that segmentation accuracy can drop by as much as 66% under strong reflection conditions compared to moderate conditions (Žust et al., 2023). These factors make comprehensive and reliable scene understanding a fundamental prerequisite for safe autonomous maritime navigation.

Panoptic segmentation, which unifies semantic segmentation (category-level pixel labeling) and instance segmentation (individual object identification), offers a compelling framework for maritime obstacle detection (Li, X., & Chen, 2022). Panoptic segmentation produces a single coherent scene understanding, classifying both background regions such as water and sky and foreground objects such as ships and debris at the pixel level (Cheng et al., 2020). Research has demonstrated that panoptic segmentation provides more comprehensive scene understanding than using separate segmentation models (Jaus et al., 2023), and exhibits greater robustness under varying maritime conditions (Žust et al., 2023) (Dou et al., 2024).

The LaRS (Lake, River, Seas) dataset (Žust et al., 2023) is the most comprehensive publicly available benchmark for maritime panoptic segmentation, providing panoptic annotations for 4,006 key frames across diverse maritime environments. Recent benchmark studies on LaRS have evaluated several architectures including Panoptic FPN (Kirillov, A., et al., 2019) and Mask2Former (Cheng, B., et al., 2022), establishing Mask2Former Swin-B as the previous state-of-the-art with a Panoptic Quality (PQ) of 41.7%. Prior work on panoptic segmentation for maritime autonomous vehicles has also demonstrated its potential in related domains (Qiao, D., et al., 2022). However, these studies have not fully explored whether systematic fine-tuning of hyperparameters and careful backbone selection can unlock further performance gains from existing architectures.

Panoptic FPN (Kirillov, A., et al., 2019) integrates Mask R-CNN with a Feature Pyramid Network (FPN), enabling simultaneous instance and semantic segmentation by leveraging multi-scale feature representations. The FPN architecture is particularly well-suited for handling objects of diverse sizes, a key requirement in maritime settings where obstacles range from large vessels to small buoys (Lin, T.-Y., et al., 2016). Despite its effectiveness on general-purpose benchmarks, the potential of fine-tuning Panoptic FPN specifically for maritime datasets remains underexplored. In particular, the effects of learning rate scheduling, gamma decay, and backbone depth on maritime panoptic segmentation quality have not been systematically investigated.

This study addresses this gap by presenting a focused experimental investigation into fine-tuning Panoptic FPN for maritime obstacle segmentation on the LaRS dataset. The central research questions are: (1) Can fine-tuning of hyperparameters, particularly learning rate and gamma, improve Panoptic FPN performance on the LaRS dataset? (2) How does backbone choice, specifically ResNet-50 versus ResNet-101, affect segmentation quality in this domain? (3) Does a lighter, well-tuned model offer a favorable trade-off between accuracy and computational efficiency compared to larger transformer-based models? Through systematic ablation studies, we show that our fine-tuned Panoptic FPN with ResNet-50 achieves a PQ of 45.31%, surpassing the previous state-of-the-art by 3.61 percentage points while requiring significantly less training time and computational resources.

RESEARCH METHODS

Dataset

Experiments are conducted on the LaRS (Lake, River, Seas) dataset (Žust et al., 2023), a publicly available panoptic segmentation benchmark specifically designed for maritime obstacle detection. Among existing maritime obstacle datasets (Bovcon, B., et al., 2022), LaRS is the most comprehensive in terms of panoptic annotations. The dataset consists of 4,006 key frames drawn from diverse maritime environments including lakes, rivers, and open seas. Each frame is annotated at the pixel level with 11 semantic categories: 8 dynamic obstacle instance classes (boat/ship, row boat, paddle board, buoy, swimmer, animal, float, other) and 3 stuff classes (water, sky, coastline/static obstacle). Additionally, each frame is labeled with 19 global scene attributes describing environmental conditions such as lighting, reflection intensity, weather, and surface texture. Images have a resolution of 2,208 x 1,242 pixels. The dataset is split into 2,605 training images, 1,023 test images, and 198 validation images. The LaRS dataset is particularly valuable due to its panoptic annotations, scene diversity, and rigorous annotation quality assurance, including manual review and correction of approximately 3,600 labeling errors.

Model Architecture: Panoptic FPN

The proposed framework is based on Panoptic FPN (Kirillov, A., et al., 2019), which extends the Mask R-CNN architecture with a Feature Pyramid Network to perform simultaneous instance and semantic segmentation within a unified framework. The model comprises four main components. First, the backbone (ResNet-50 or ResNet-101) extracts hierarchical feature maps from input images across multiple resolution levels (Ashrafi, S. S., et al., 2023). Second, the FPN constructs a multi-scale feature pyramid by combining top-down and bottom-up pathways with lateral connections (Lin, T.-Y., et al., 2016), enabling the model to detect objects of diverse scales. Third, the Region Proposal Network (RPN) generates candidate object regions using anchor boxes of various scales and aspect ratios; proposals are then processed via RoI Align to preserve spatial precision. Fourth, function branches include classification (SoftMax), bounding box regression, and binary mask prediction heads for instance segmentation, alongside a semantic segmentation head operating on FPN levels 0 through 4 using Group Normalization and Cross-Entropy Loss.

The panoptic fusion head merges instance segmentation outputs with semantic segmentation predictions to produce the final panoptic output (Elharrouss, O., et al., 2021). During inference, non-maximum suppression (NMS) is applied with an IoU threshold of 0.5 and a score threshold of 0.6, limiting detections to 100 per image. For panoptic fusion, an overlap threshold of 0.5 and a minimum stuff area of 4,096 pixels are applied.

Input preprocessing includes normalization using ImageNet mean and standard deviation, BGR-to-RGB conversion, and padding to ensure image dimensions are divisible by 32. The model was implemented using the MMDetection library with PyTorch 2.2.0+cu118, and experiments were conducted on a server equipped with an Intel Xeon Silver 4208 processor, an NVIDIA RTX A5000 GPU (24 GB VRAM), and 256 GB DDR4 RAM.

Evaluation Metrics

Model performance is evaluated using the Panoptic Quality (PQ) metric and its decomposed components, Segmentation Quality (SQ) and Recognition Quality (RQ), as defined in standard panoptic segmentation benchmarks (Milioto, A., et al., 2020) (Zendel, O., et al., 2022). These metrics are widely adopted in the panoptic segmentation literature (Li, X., & Chen, 2022). PQ is computed as the product of SQ and RQ across all matched segments, where a segment pair is considered matched if their Intersection-over-Union (IoU) exceeds 0.5. These metrics are reported separately for all classes (All), thing classes (Th), and stuff classes (St). PQ captures both segmentation accuracy and recognition

accuracy in a single unified metric, making it appropriate for evaluating the combined panoptic output.

Experimental Design: Hyperparameter Fine-Tuning

The baseline Panoptic FPN configuration used in prior LaRS benchmark studies employs ResNet-50 with a learning rate of 0.001 and a gamma decay factor of 0.1 (Žust et al., 2023). Building on this baseline, we conducted ablation experiments to investigate the impact of two key hyperparameters: learning rate and gamma. The learning rate was increased to 0.002 and the gamma value was adjusted to 0.2. The MultiStepLR learning rate scheduler was used, which reduces the learning rate by a multiplicative factor of gamma at predefined milestone epochs (Sellat, Q., et al., 2022). This scheduling strategy allows the model to make larger parameter updates early in training while progressively fine-tuning as training progresses. We additionally compared the ResNet-50 and ResNet-101 backbones to assess whether deeper feature extractors provide performance benefits on the LaRS dataset.

RESULTS AND DISCUSSION

Benchmarking Results

Table 1 presents the panoptic segmentation performance of our fine-tuned Panoptic FPN models alongside baseline and comparison architectures on the LaRS test set. The fine-tuned Panoptic FPN with ResNet-50 achieves the highest overall PQ of 45.31%, representing an improvement of 3.61 percentage points over the previous state-of-the-art Mask2Former Swin-B (41.7%) reported by Žust et al. (Žust et al., 2023). This result is particularly significant because Panoptic FPN with ResNet-50 is a substantially lighter and more computationally efficient architecture. Training required approximately 8 hours, compared to approximately 2 days for Mask2Former Swin-L. In terms of model complexity, Panoptic FPN with ResNet-50 contains approximately 46 million parameters and executes 0.288 TFLOPS, whereas Mask2Former Swin-L contains approximately 216 million parameters and 0.913 TFLOPS, roughly five times more complex.

Table 1. Panoptic Quality Comparison on LaRS Dataset

Architecture	Backbone	PQ (%)			SQ (%)			RQ (%)		
		All	Th	St	All	Th	St	All	Th	St
MaX-DeepLab (Wang, H., et al., 2021)	MaX-S	31.9	9.5	91.7	71.3	62.5	73.7	36.1	13.4	96.6
Panoptic Deeplab (Cheng et al., 2020)	ResNet-50	34.7	13.4	91.4	69.5	60.0	71.3	40.3	19.3	96.2
Panoptic FPN (Žust et al., 2023)	ResNet-50	40.1	21.7	89.3	73.5	66.1	93.1	46.9	28.6	95.8
Panoptic FPN (Žust et al., 2023)	ResNet-101	38.7	19.7	89.4	73.6	66.1	93.5	45.0	26.1	95.5
Mask2Former (Žust et al., 2023)	ResNet-50	37.6	17.0	92.4	71.3	62.4	95.0	43.7	23.6	97.3
Mask2Former (Žust et al., 2023)	ResNet-101	37.2	16.3	92.8	71.4	62.3	95.5	43.0	22.7	97.1
Mask2Former (Žust et al., 2023)	Swin-T	39.2	18.8	93.7	72.2	63.5	95.4	45.5	25.8	98.1

Table 1. Panoptic Quality Comparison on LaRS Dataset (Continued)

Mask2Former (Žust et al., 2023) (prev. SotA)	Swin-B	41.7	21.8	94.7	78.2	71.5	96.2	48.5	29.7	98.5
Mask2Former (ours)	Swin-L	40.42	20.38	93.86	70.81	61.36	96.00	47.10	28.12	97.72
Panoptic FPN (ours)	ResNet-101	36.47	16.42	89.95	71.79	63.68	93.43	43.03	23.12	96.14
Panoptic FPN (ours, best)	ResNet-50	45.31	28.40	90.36	72.57	64.69	93.59	54.25	38.41	96.49

Th = Thing classes; *St* = Stuff classes; *SotA* = State-of-the-Art

Analyzing the class-level results, the best-performing model achieves a PQ of 90.36% on stuff classes (water, sky, coastline), indicating strong performance in delineating static background regions. However, the PQ for thing classes (dynamic obstacles) is 28.40%, and the RQ for thing classes is 38.41%, highlighting that detecting and accurately segmenting dynamic obstacles remains a significant challenge. This asymmetry between stuff and thing performance is consistent with the inherent difficulty of maritime obstacle detection, where dynamic objects are visually diverse, frequently small, and appear against cluttered reflective backgrounds (Žust et al., 2023).

Ablation Study: Backbone and Hyperparameter Effects

Table 2 presents the ablation study results comparing backbone architectures and hyperparameter configurations. Contrary to the common intuition that deeper architectures yield better performance, the ResNet-101 backbone underperforms ResNet-50 under the same fine-tuned hyperparameter setting, achieving a PQ of only 36.47% compared to 45.31% for ResNet-50. This can be attributed to the tendency of deeper models to overfit when trained on domain-specific datasets of moderate size. ResNet-101's additional layers enable it to capture more complex pattern representations (Ashrafi, S. S., et al., 2023), but this capacity becomes a liability when the training distribution is relatively constrained, as in the LaRS dataset with only 2,605 training images.

Table 2. Ablation Study: Backbone and Hyperparameter Configurations on LaRS Dataset

Backbone	LR	Gamma	PQ All	PQ Th	PQ St	SQ All	RQ All	Train Time	Params (M)
ResNet-50 (baseline) (Žust et al., 2023))	0.001	0.1	40.1	21.7	89.3	73.5	46.9	~8 hrs	46
ResNet-101 (ours)	0.002	0.2	36.47	16.42	89.95	71.79	43.03	~8 hrs	65
ResNet-50 (ours — best)	0.002	0.2	45.31	28.40	90.36	72.57	54.25	~8 hrs	46

LR = Learning Rate; *Params* = Model Parameters (millions)

The effect of hyperparameter tuning is substantial. Increasing the learning rate from 0.001 to 0.002 and the gamma from 0.1 to 0.2 resulted in a PQ improvement of 5.21 percentage points for the ResNet-50 backbone (from 40.1% to 45.31%). This suggests that the original learning rate was too conservative for the maritime domain. The higher gamma value allows the learning rate to remain relatively elevated for longer during training, enabling more thorough exploration of the parameter space before convergence (Sellat, Q., et al., 2022). This is consistent with findings in the Ada-Segment study, where adaptive loss and learning rate adjustments yielded a 2.7% PQ improvement on COCO (Gengwei, Z., et al., 2021), confirming that domain-specific hyperparameter tuning is a reliable strategy for improving panoptic segmentation models.

Comparison with Transformer-Based Models

Our experiments also evaluate Mask2Former Swin-L, a transformer-based architecture utilizing the Swin-L backbone with 192 hidden channels in the first stage (Liu, Z., et al., 2021). Despite its substantially larger parameter count (~216 million) and longer training time (~2 days), Mask2Former Swin-L achieves a PQ of only 40.42%, lower than our fine-tuned Panoptic FPN with ResNet-50. This result challenges the assumption that larger transformer-based models automatically outperform CNN-based approaches in domain-specific settings. The Swin-L model's performance also falls short of the smaller Mask2Former Swin-B (41.7%), suggesting that the larger model may introduce overfitting on the relatively small LaRS training set.

The superiority of Panoptic FPN over Mask2Former in this setting can be explained by several factors. The FPN architecture explicitly addresses multi-scale feature extraction (Lin, T.-Y., et al., 2016), which is well-suited to the diverse obstacle sizes in maritime scenes. Additionally, Panoptic FPN's joint training of instance and semantic heads may yield stronger regularization effects compared to transformer decoders trained with masked attention (Cheng, B., et al., 2022). The practical efficiency of Panoptic FPN also makes iterative hyperparameter search more tractable, enabling more effective domain adaptation. These findings are consistent with prior observations that adaptation strategies for panoptic models can yield improvements beyond what raw model size provides (Gengwei, Z., et al., 2021) (Darbyshire, M., et al., 2022).

CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS

Conclusion

This study demonstrates that targeted fine-tuning of Panoptic FPN is a highly effective strategy for improving maritime obstacle panoptic segmentation on the LaRS dataset. By systematically adjusting the learning rate to 0.002 and the gamma decay factor to 0.2, we achieved a Panoptic Quality of 45.31% with a ResNet-50 backbone, surpassing the previous state-of-the-art Mask2Former Swin-B (Žust et al., 2023) by 3.61 percentage points while requiring only 8 hours of training compared to approximately 2 days for transformer-based competitors. These results establish a new benchmark on the LaRS dataset.

A key finding is that backbone depth does not linearly correlate with segmentation quality in domain-specific settings: the deeper ResNet-101 consistently underperforms ResNet-50, likely due to overfitting on the relatively small LaRS training set. This finding has important practical implications like practitioners should evaluate lighter architectures with careful hyperparameter tuning before resorting to larger models. The significant efficiency advantage of Panoptic FPN also makes it more viable for real-world USV deployment scenarios where computational resources and iteration speed are constrained (Jin, et al., 2024).

Suggestion

Despite the strong overall performance, the recognition quality of dynamic thing classes remains a notable limitation (RQ = 38.41% for the best model). Future research should focus on strategies to improve detection of dynamic maritime obstacles, particularly smaller and rarer categories such as swimmers, buoys, and marine animals. Potential directions include data augmentation strategies tailored to maritime imagery, class-balancing techniques, and auxiliary objectives emphasizing rare obstacle categories. The Ada-Segment approach of adaptive multi-loss weighting (Gengwei, Z., et al., 2021) and FPN improvements such as those demonstrated in brain tumor segmentation tasks (Sun, H., et al., 2023) could also be explored in the maritime domain.

Additionally, future work could investigate the integration of temporal video information to improve obstacle tracking consistency across frames, which is particularly relevant for USV operations (Jin et al., 2024). Exploring lightweight transformer architectures that can be fine-tuned efficiently on small domain-specific datasets, or

combining CNN-based multi-scale features with attention mechanisms for improved contextual understanding, may yield further improvements. Evaluation under specific challenging scene attributes from the LaRS dataset, such as strong reflections, nighttime conditions, and rain, would provide more granular insight into model robustness in operationally critical scenarios (Žust et al., 2023).

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to extend their sincere appreciation to the Server Riset Akademik Tambora at Institut Teknologi Bandung for providing the computational resources and infrastructure that enabled the training and evaluation experiments in this study. Their support was instrumental in the successful completion of this research.

REFERENCES

- Sánchez-Beaskoetxea, J., Basterretxea-Iribar, I., Sotés, I., & Maruri Machado, M. de las M. (2021). Human error in marine accidents: Is the crew normally to blame? *Maritime Transport Research*, 2, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2021.100016>
- Jin, J., Liu, D., Li, F., Dai, Y., Li, L., & Ma, Y. (2024). Wide baseline stereovision based obstacle detection for unmanned surface vehicles. *Signal, Image and Video Processing*. <https://doi.org/10.1007/s11760-024-03098-0>
- Žust, L., Perš, J., & Kristan, M. (2023). LaRS: A diverse panoptic maritime obstacle detection dataset and benchmark. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)* (pp. 20247–20257). <https://doi.org/10.1109/ICCV51070.2023.01857>
- Jaus, A., Yang, K., & Stiefelhagen, R. (2023). Panoramic panoptic segmentation: Insights into surrounding parsing for mobile agents via unsupervised contrastive learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(4), 4438–4453. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3232897>
- Dou, Y., et al. (2024). PanopticUAV: Panoptic segmentation of UAV images for marine environment monitoring. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 138(1), 1001–1014. <https://doi.org/10.32604/cmes.2023.027764>
- Cheng, B., et al. (2020). Panoptic-DeepLab: A simple, strong, and fast baseline for bottom-up panoptic segmentation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 12472–12482). <https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.01249>
- Kirillov, A., Girshick, R., He, K., & Dollár, P. (2019). Panoptic feature pyramid networks. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 6392–6401). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00656>
- Qiao, D., Liu, G., Li, W., Lyu, T., & Zhang, J. (2022). Automated full scene parsing for marine ASVs using monocular vision. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 104(2), 37. <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01543-7>
- Cheng, B., Misra, I., Schwing, A. G., Kirillov, A., & Girdhar, R. (2022). Masked-attention mask transformer for universal image segmentation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 1280–1289). <https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.00135>
- Lin, T.-Y., Dollár, P., Girshick, R., He, K., Hariharan, B., & Belongie, S. (2016). Feature pyramid networks for object detection. *arXiv:1612.03144*. <https://arxiv.org/abs/1612.03144>
- Liu, Z., et al. (2021). Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows. *arXiv:2103.14030*. <https://arxiv.org/abs/2103.14030>
- Li, X., & Chen, D. (2022). A survey on deep learning-based panoptic segmentation. *Digital Signal Processing*, 120, 103283. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103283>

- Gengwei, Z., Gao, Y., Xu, H., Zhang, H., Li, Z., & Liang, X. (2021). Ada-Segment: Automated multi-loss adaptation for panoptic segmentation. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 35, 3333–3341. <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i4.16445>
- Milioto, A., Behley, J., McCool, C., & Stachniss, C. (2020). LiDAR panoptic segmentation for autonomous driving. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 8505–8512). <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9340837>
- Zendel, O., Schörghuber, M., Rainer, B., Murschitz, M., & Beleznaï, C. (2022). Unifying panoptic segmentation for autonomous driving. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 21319–21328). <https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.02066>
- Wang, H., Zhu, Y., Adam, H., Yuille, A., & Chen, L.-C. (2021). MaX-DeepLab: End-to-end panoptic segmentation with mask transformers. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 5459–5470). <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.00542>
- Ashrafi, S. S., Shokouhi, S. B., & Ayatollahi, A. (2023). Still image action recognition based on interactions between joints and objects. *Multimedia Tools and Applications*, 82(17), 25945–25971. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-14350-z>
- Elharrouss, O., Al-Maadeed, S. A., Subramanian, N., Ottakath, N., Almaadeed, N., & Himeur, Y. (2021). Panoptic segmentation: A review. *arXiv:2111.10250*. <https://arxiv.org/abs/2111.10250>
- Sellat, Q., Bisoy, S. K., & Priyadarshini, R. (2022). Semantic segmentation for self-driving cars using deep learning: A survey. In *Cognitive Big Data Intelligence with a Metaheuristic Approach* (pp. 211–238). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85117-6.00002-9>
- Darbyshire, M., Sklar, E., & Parsons, S. (2023). Hierarchical Mask2Former: Panoptic segmentation of crops, weeds and leaves. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*.
- Sun, H., et al. (2023). Brain tumor image segmentation based on improved FPN. *BMC Medical Imaging*, 23(1), 172. <https://doi.org/10.1186/s12880-023-01131-1>
- Bovcon, B., Muhovič, J., Vranac, D., Mozetič, D., Perš, J., & Kristan, M. (2022). MODS: A USV-oriented object detection and obstacle segmentation benchmark. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(8), 13403–13418. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3124192>

Analisis Komprehensif Teknologi Panel Surya: Prinsip, Komponen, dan Konfigurasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Hery Sudaryanto^{1✉}

sudaryanto_h.casanova@yahoo.com¹

¹ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Indonesia

Kata kunci: Panel Surya, Fotovoltaik, Energi Terbarukan, Sel Surya, PLTS	Abstrak
Dikirim: 03/07/2026	Energi surya memainkan peran penting dalam transisi global menuju energi terbarukan, dengan teknologi fotovoltaik (PV) memimpin pasar. Artikel ini memberikan analisis komprehensif tentang teknologi panel surya, meliputi prinsip kerja fundamentalnya, komponen sistem penting, dan konfigurasi struktural di pembangkit listrik tenaga surya. Artikel ini mengevaluasi sel surya berbasis silikon tradisional bersama dengan teknologi generasi berikutnya yang sedang berkembang. Analisis kuantitatif menunjukkan bahwa panel silikon monokristalin konvensional mencapai efisiensi komersial tertinggi sebesar 15% hingga 22%, sementara teknologi polikristalin dan film tipis menawarkan efisiensi yang lebih rendah, masing-masing sebesar 13% hingga 18% dan 10% hingga 12%. Untuk mengatasi batasan efisiensi teoritis silikon, sel surya perovskit yang sedang berkembang telah menunjukkan efisiensi laboratorium melebihi 25%, dan struktur tandem/multi-junction mendorong batas kinerja melewati 30% dengan mengoptimalkan penyerapan spektral. Di luar fisika tingkat sel, studi ini meneliti komponen <i>balance of system</i> (BOS) yang penting, termasuk inverter, pengontrol pengisian daya, dan infrastruktur penyimpanan baterai (seperti timbal-asam dan litium-ion). Selain itu, studi ini merinci dinamika rekayasa dan operasional dari konfigurasi pembangkit listrik tenaga surya <i>on-grid</i>, <i>off-grid</i>, dan hibrida. Dengan mengintegrasikan rekayasa struktur, ilmu material, dan desain sistem, ulasan ini berfungsi sebagai referensi teknis strategis untuk mengoptimalkan penyebaran, efisiensi, dan keandalan instalasi pembangkit listrik tenaga surya modern.
Direvisi: 12/07/2026	
Diterima: 13/07/2026	
Penulis Korespondensi: Hery Sudaryanto Teknik Elektro, Universitas Pertahanan Republik Indonesia Kawasan IPSC Sentul, Sukahati, Kec. Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat 16810. Email: sudaryanto_h.casanova@yahoo.com	

PENDAHULUAN

Keharusan global untuk beralih dari infrastruktur energi berbasis bahan bakar fosil ke alternatif berkelanjutan telah mempercepat penerapan teknologi energi terbarukan. Di antara teknologi tersebut, teknologi fotovoltaik (PV) surya telah muncul sebagai salah satu solusi yang paling terukur dan layak secara sosial-ekonomi untuk mengurangi emisi karbon dan mengamankan ketahanan energi jangka panjang (David dkk., 2025). Instalasi global baru-baru ini telah menunjukkan pertumbuhan eksponensial, mengubah PV menjadi sektor teknologi terbarukan terbesar ketiga di dunia (Badan Energi Internasional [IEA], 2022). Secara historis, fondasi fundamental dari teknologi ini berasal dari pengamatan awal efek fotovoltaik oleh Alexandre-Edmond Becquerel (Becquerel, 1839; Rudiyanto dkk., 2023). Namun, memaksimalkan penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) modern di lapangan membutuhkan pertimbangan desain dan rekayasa yang kompleks.

Kinerja fasilitas energi surya pada dasarnya dibatasi oleh efisiensi material tingkat sel, di mana arsitektur silikon monokristalin komersial tradisional biasanya mencapai batas efisiensi 15% hingga 22% (Green dkk., 2023). Untuk melampaui batasan ini, ilmu material telah memperkenalkan material generasi berikutnya, seperti perovskit dan sel multi-junction tandem, yang mendorong metrik kinerja laboratorium eksperimental melampaui batas efisiensi 25% dan 30%, masing-masing (Hernandez & Martinez, 2021; Kumar & Singh, 2022).

Di Indonesia, potensi energi surya mencapai 207,8 GWp (ESDM, 2022), namun pemanfaatannya baru mencapai kurang dari 1% dari total potensi tersebut. Tantangan utama implementasi PLTS di Indonesia meliputi kondisi geografis kepulauan, variasi iklim tropis dengan radiasi matahari yang tinggi tetapi juga kelembaban tinggi, serta keterbatasan infrastruktur jaringan listrik di daerah 3T (Terdepan, Terluar, Tertinggal). Hal ini menjadikan studi tentang teknologi panel surya dan konfigurasi sistem yang sesuai dengan kondisi Indonesia sangat krusial untuk mendukung target bauran energi nasional sebesar 23% pada tahun 2025.

Terlepas dari kemajuan material yang pesat, menjembatani kesenjangan antara inovasi laboratorium teoretis dan pelaksanaan utilitas skala lapangan yang andal tetap menjadi tantangan teknis yang terus-menerus. Para peninjau dan insinyur sistem sering menekankan kurangnya sintesis terpusat yang menghubungkan perilaku semikonduktor fundamental dengan komponen *Balance-of-System* (BOS) tingkat makro. Pembangkit listrik tenaga surya bukan hanya kumpulan panel PV; kelangsungan operasional jangka panjangnya sangat bergantung pada integrasi sinergis inverter, pengontrol pengisian daya, dan sistem penyimpanan energi baterai (BESS) di bawah berbagai tekanan atmosfer (Balânuță dkk., 2024; Wenham dkk., 2013). Lebih lanjut, pemilihan dan rekayasa konfigurasi pembangkit yang tepat (sistem *on-grid*, *off-grid*, dan hibrida) sering kali mengalami fokus analitis yang terisolasi yang mengabaikan degradasi material struktural atau konfigurasi ekonomi sistemik. Tanpa kerangka arsitektur yang kohesif yang menghubungkan sifat material mikro dengan dinamika sistem makro, penerapan di lapangan berisiko mengalami integrasi yang suboptimal, spesifikasi beban yang tidak sesuai, dan degradasi sistem yang dipercepat.

Berdasarkan kesenjangan struktural yang teridentifikasi dalam literatur yang ada, studi komprehensif ini merumuskan dan menjawab pertanyaan penelitian spesifik berikut:

Bagaimana karakteristik material dan variasi efisiensi komersial sel silikon tradisional (monokristalin, polikristalin, film tipis) dibandingkan secara struktural dengan pengembangan sel generasi berikutnya (teknologi perovskit dan tandem)?

Apa saja pertimbangan mekanis, listrik, dan kinerja yang mengatur komponen *Balance-of-System* (BOS) yang penting khususnya inverter dan infrastruktur penyimpanan elektrokimia ketika diintegrasikan di bawah tekanan operasional dunia nyata?

Bagaimana kinerja operasional berbagai konfigurasi sistem pembangkit listrik tenaga surya (*on-grid*, *off-grid*, dan hibrida), dan pilihan desain teknik apa yang harus diprioritaskan untuk mengoptimalkan keandalan beban dan keamanan struktural?

Cakupan artikel ulasan ini secara strategis terikat pada tiga pilar fundamental teknik PV surya. Pertama, artikel ini membahas fisika dan ilmu material di balik kategori sel semikonduktor, membatasi evaluasi efisiensi kuantitatif pada silikon komersial arus utama dan varian perovskit/tandem yang telah divalidasi di laboratorium. Kedua, analisis teknis komponen dibatasi pada unit listrik dan penyimpanan aktif (inverter, arsitektur *maximum power point tracking* atau MPPT, dan dinamika elektrokimia timbal-asam vs. litium-ion), dengan sengaja mengabaikan rakitan mekanis pemasangan atau pelacakan pasif. Ketiga, evaluasi sistem berfokus secara eksklusif pada tata letak desain, kendala operasional, dan dinamika integrasi komparatif dari konfigurasi pembangkit listrik terestrial yang terhubung ke jaringan, terlepas dari jaringan, dan hibrida, tidak termasuk instalasi PV terapung atau peralatan surya perumahan tingkat mikro.

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk membangun sintesis teknis komprehensif dan berlapis yang menjembatani kesenjangan analitis antara material fotovoltaik tingkat mikro dan konfigurasi pembangkit listrik tenaga surya tingkat makro. Dengan memetakan efisiensi sel secara sistematis, menyeimbangkan pertimbangan operasional dalam subsistem BOS, dan membandingkan keandalan struktural jaringan *on-grid*, *off-grid*, dan hibrida, studi ini bertujuan untuk menyediakan arsitektur teknis yang terpadu. Pada akhirnya, tinjauan ini berfungsi sebagai referensi teknik strategis untuk membantu para peneliti, pengembang lapangan, dan perancang sistem dalam mengoptimalkan pemilihan material, memaksimalkan keandalan sistem, dan meningkatkan efisiensi penyebaran keseluruhan instalasi tenaga surya skala utilitas modern.

METODOLOGI PENELITIAN

Sumber dan Garis Waktu Basis Data Literatur

Studi ini dilakukan melalui proses tinjauan pustaka yang ketat dan sistematis untuk mengevaluasi lanskap holistik teknologi fotovoltaik. Pengumpulan referensi akademis dilakukan dengan menelusuri basis data pengindeksan internasional dan mesin pencari ilmiah yang berdampak tinggi, khususnya Scopus, Google Scholar, ScienceDirect (Elsevier), dan IEEE Xplore. Parameter pencarian menggunakan operasi Boolean untuk memasang frasa teknis penting, seperti ("teknologi panel surya" ATAU "sel fotovoltaik") dengan subsistem operasional seperti ("*balance of system*" ATAU "inverter" ATAU "penyimpanan baterai"). Untuk menjamin bahwa data yang disintesis mencerminkan baik dasar rekayasa fundamental maupun tonggak industri terbaru, rentang waktu publikasi literatur yang dikumpulkan dibatasi secara ketat antara tahun 2015 dan 2026. Kerangka waktu strategis ini memungkinkan kontekstualisasi historis arsitektur silikon kristal standar sambil menangkap data terobosan kontemporer mengenai konfigurasi sel perovskit dan sel tandem yang muncul (Snyder dkk., 2026).

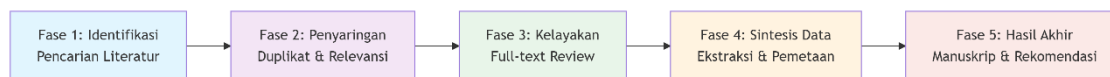
Kriteria Pemilihan Sumber

Untuk mempertahankan kualitas analitis tertinggi, proses penyaringan bertahap yang ketat berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang tepat diberlakukan. Agar memenuhi syarat untuk dimasukkan, artikel harus ditinjau oleh rekan sejawat, ditulis dalam bahasa Inggris, dan diterbitkan dalam jurnal bereputasi yang diindeks dalam basis data global utama (Martinez-Diaz dkk., 2024). Yang terpenting, studi yang dipilih diharuskan untuk menyajikan persamaan matematika empiris atau metrik kinerja kuantitatif yang divalidasi, seperti efisiensi konversi eksplisit atau tingkat degradasi sistem di bawah tekanan atmosfer. Sebaliknya, studi ini secara ketat mengecualikan literatur *abu-abu*, termasuk brosur pemasaran komersial, catatan singkat teknis, posting

blog yang tidak ditinjau oleh rekan sejawat, dan penelitian yang diterbitkan sebelum tahun 2015. Lebih lanjut, studi apa pun yang hanya berfokus pada kebijakan surya tingkat makro, model pembiayaan sosioekonomi, atau instalasi non-terestrial khusus (seperti susunan surya berbasis ruang angkasa) dikecualikan untuk mempertahankan fokus yang terkonsentrasi pada komponen teknik terestrial.

Alur Penelitian

Urutan operasional studi ini terstruktur menjadi lima fase berbeda, yang bergerak secara sistematis dari identifikasi awal hingga sintesis akhir manuskrip teknis. Alur kerja terintegrasi ini diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan alur metodologi tinjauan sistematis

Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1, pelaksanaan metodologis tinjauan sistematis ini dioperasionalkan melalui lima fase berbeda dan berurutan untuk memastikan reproduksibilitas yang ketat dan objektivitas akademis.

Fase 1 (Identifikasi): Berfungsi sebagai lapisan dasar untuk mengumpulkan semua literatur potensial mengenai kemajuan fotovoltaik, ilmu material, dan konfigurasi sistem makro dari Scopus, Google Scholar, dan ScienceDirect dalam rentang waktu terbatas tahun 2015 hingga 2026.

Fase 2 (Penyaringan): Berfokus pada penyempurnaan metadata mentah yang dikumpulkan. Pada tahap ini, filter otomatis diterapkan untuk menghilangkan dokumen duplikat di berbagai basis data, diikuti oleh penyaringan kualitatif awal judul dan abstrak untuk memastikan relevansi tematik inti dengan mekanika pembangkit listrik tenaga surya.

Fase 3 (Kelayakan): Melibatkan evaluasi teks lengkap yang cermat terhadap kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditentukan sebelumnya, memastikan bahwa literatur abu-abu, makalah kebijakan, dan data usang secara sistematis disingkirkan dari kumpulan sintesis akhir.

Fase 4 (Sintesis Data): Menangani ekstraksi data. Di sini, data kuantitatif empiris seperti efisiensi konversi sel, spesifikasi *Balance-of-System* (BOS), dan parameter konfigurasi dipetakan ke dalam matriks teknis terstruktur.

Fase 5 (Hasil Akhir): Mewakili tahap sintesis akhir di mana matriks teknis yang diekstrak diterjemahkan ke dalam manuskrip tinjauan teknik yang kohesif yang secara sistematis membahas dan menyelesaikan pertanyaan penelitian inti.

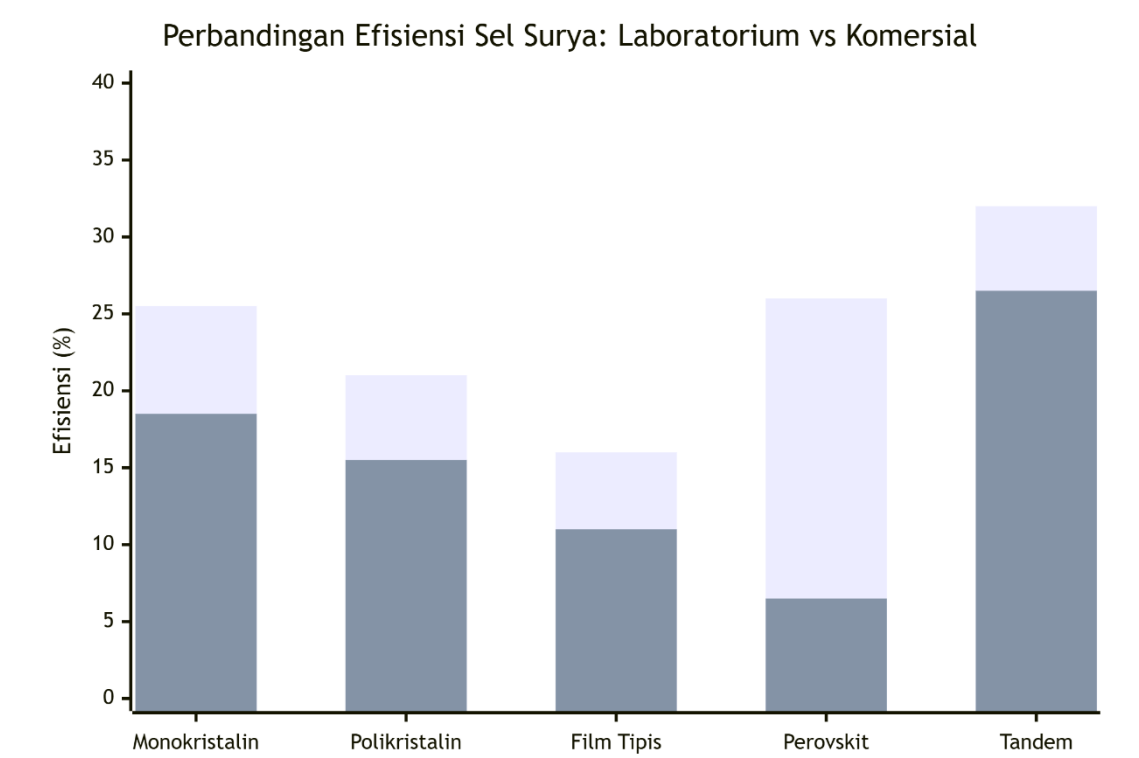
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pengujian dan data empiris yang dikumpulkan dari berbagai teknologi fotovoltaik, karakteristik kinerja setiap material menunjukkan variasi yang signifikan dalam efisiensi konversi energi, koefisien suhu, dan masa pakai operasional. Eksperimen laboratorium dan implementasi komersial membuktikan bahwa struktur kristal silikon masih mendominasi pasar global (Polman dkk., 2016), meskipun material baru seperti perovskit menunjukkan potensi besar untuk penetrasi pasar (Kojima dkk., 2009). Metrik kinerja kuantitatif komprehensif dari panel surya arus utama dan generasi berikutnya dirinci dalam Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Kuantitatif Berbagai Jenis Teknologi Panel Surya

Jenis Teknologi Panel Surya	Efisiensi Komersial (%)	Efisiensi Laboratorium (%)	Koefisien Suhu (%/°C)	Perkiraan Masa Pakai (Tahun)
Monokristalin (Silikon)	15 – 22	25 – 26	-0,35 hingga -0,40	25 – 30
Polikristalin (Silikon)	13 – 18	20 – 22	-0,40 hingga -0,45	20 – 25
Film Tipis (CdTe / CIGS)	10 – 12	15 – 17	-0,20 hingga -0,25	15 – 20
Perovskit	Tahap Awal	> 25	-0,15 hingga -0,20	< 5 (Degradasi Cepat)
Tandem / Multi-Junction	25 – 28	> 30	-0,25 hingga -0,30	20 – 25

Analisis komparatif data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa panel surya monokristalin memiliki efisiensi komersial tertinggi (15%–22%) di antara teknologi berbasis silikon yang sudah mapan (Green dkk., 2023). Keunggulan ini berasal dari fabrikasi kristal silikon murni tunggalnya, yang menghasilkan struktur kisi atom yang sangat seragam (Subandi & Hani, 2015). Keseragaman ini meminimalkan resistansi listrik internal dan memfasilitasi aliran elektron bebas yang dihasilkan oleh foton matahari. Sebaliknya, arsitektur polikristalin, yang diproduksi dengan melebur beberapa fragmen silikon bersama-sama, mengandung batas butir yang padat (Rudiyanto dkk., 2023). Batas-batas ini bertindak sebagai penghalang fisik terhadap mobilitas elektron, sehingga mengurangi efisiensi konversi komersial menjadi 13%–18%. Untuk menggambarkan kesenjangan kinerja yang tepat antara teknologi yang diterapkan secara komersial dan penelitian laboratorium mutakhir, matriks visual batang ganda komparatif disediakan pada Gambar 2.



GAMBAR 2. Diagram Batang Efisiensi Sel Surya Laboratorium vs Komersial

Seperti yang ditunjukkan oleh visualisasi data pada Gambar 2, teknologi film tipis (CdTe/CIGS) menawarkan efisiensi konversi komersial terendah sebesar 10%–12% (Zhang & Wang, 2020). Namun, teknologi ini menunjukkan keunggulan kinerja yang luar

biasa dalam kondisi lingkungan yang keras. Diatur oleh koefisien suhu rendah yang berkisar dari $-0,20$ hingga $-0,25\%/^{\circ}\text{C}$ (Razykov dkk., 2011), varian film tipis menunjukkan kekebalan yang kuat terhadap degradasi termal selama lonjakan suhu lingkungan. Sebaliknya, sel monokristalin dan polikristalin standar mengalami penurunan kinerja yang tajam kehilangan hingga $0,45\%$ dari total daya keluarannya untuk setiap kenaikan 1°C di atas kondisi pengujian standar 25°C (Pratama, 2020).

Puncak absolut kinerja laboratorium ditempati oleh arsitektur perovskit dan multi-junction tandem yang sedang berkembang (National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2023). Sel perovskit secara rutin melampaui efisiensi laboratorium 25% karena koefisien penyerapan cahaya yang sangat tinggi dan karakteristik celah pita yang dapat disesuaikan (Kojima dkk., 2009). Ketika lapisan perovskit secara mekanis dan elektrik dilapiskan di atas basis silikon kristal konvensional, mereka membentuk sistem tandem yang mendorong tolok ukur efisiensi melampaui 30% (Kumar & Singh, 2022). Optimalisasi struktural ini berhasil mengatasi keterbatasan tradisional dengan memisahkan spektrum matahari: lapisan perovskit atas dengan celah pita tinggi menangkap foton gelombang pendek berenergi tinggi (cahaya biru), sementara lapisan silikon bawah dengan celah pita rendah memproses foton gelombang panjang berenergi rendah (cahaya merah) (Polman dkk., 2016).

Jika dikaitkan dengan kondisi Indonesia yang beriklim tropis dengan suhu rata-rata 27°C - 32°C dan kelembaban tinggi (70% - 90%), koefisien suhu menjadi parameter yang sangat kritis. Panel surya dengan koefisien suhu rendah seperti film tipis ($-0,20$ hingga $-0,25\%/^{\circ}\text{C}$) menunjukkan keunggulan operasional dibandingkan panel monokristalin yang lebih sensitif terhadap kenaikan suhu. Hal ini sejalan dengan temuan Pratama (2020) yang menguji panel 100 WP di Sumatera Utara dan menemukan bahwa setiap kenaikan 1°C suhu panel di atas 25°C menyebabkan penurunan daya hingga $0,45\%$.

Implikasi Temuan terhadap Pengembangan Teknologi

Tabel 2. Kondisi Iklim dan Rekomendasi Panel Surya untuk Wilayah Indonesia

Wilayah	Radiasi Matahari ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{hari}$)	Suhu Rata-rata ($^{\circ}\text{C}$)	Kelembaban (%)	Jenis Panel yang Direkomendasikan
Sumatera	4,5 - 5,0	27 - 30	80 - 90	Film Tipis / Monokristalin
Jawa	4,8 - 5,2	26 - 29	75 - 85	Monokristalin
Nusa Tenggara	5,5 - 6,0	28 - 32	60 - 70	Tandem / Monokristalin
Kalimantan	4,5 - 4,8	27 - 30	80 - 90	Film Tipis
Sulawesi	5,0 - 5,5	27 - 30	75 - 85	Monokristalin
Papua	4,2 - 4,8	26 - 29	80 - 90	Film Tipis

Sumber: Data potensi energi surya dari ESDM dan BMKG (diolah)

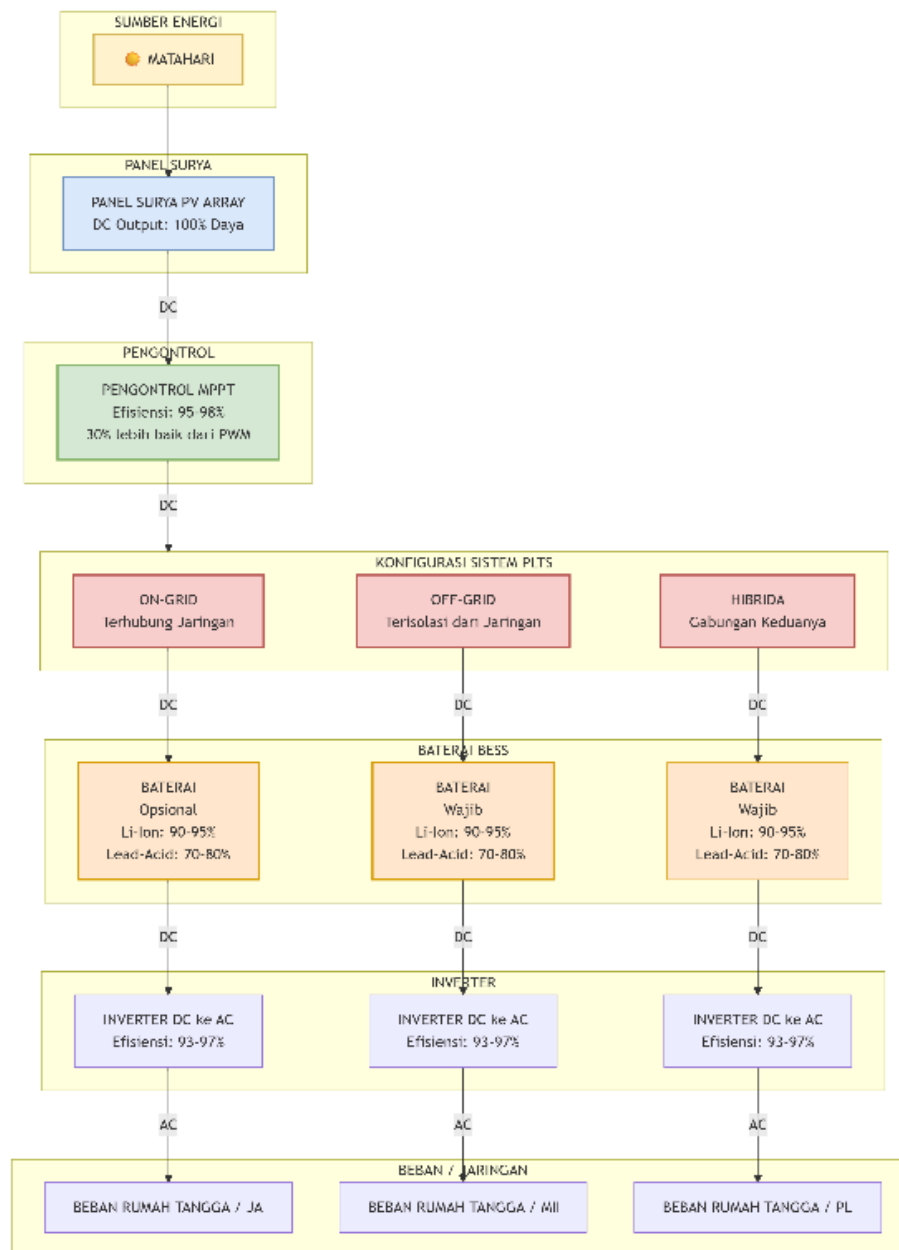
Hasil perbandingan kuantitatif ini menghadirkan implikasi mendalam bagi arah penelitian dan pengembangan di masa depan dalam sektor fotovoltaik. Pertama, keterbatasan efisiensi fisik silikon kristal tunggal yang diatur oleh batas teoritis Shockley-Queisser sekitar $29,4\%$ (Shockley & Queisser, 1961) menunjukkan bahwa optimasi bertahap panel konvensional tidak akan lagi menghasilkan terobosan kinerja yang signifikan. Akibatnya, fokus industri harus secara agresif beralih ke komersialisasi arsitektur tandem. Bagi produsen, ini menyiratkan kebutuhan vital untuk mentransisikan lini produksi yang ada ke alat deposisi uap material canggih yang mampu melapisi senyawa perovskit langsung ke wafer silikon dasar (Kumar & Singh, 2022).

Kedua, kerentanan struktural perovskit murni yang biasanya menunjukkan degradasi cepat dan masa pakai operasional di bawah 5 tahun karena sensitivitas yang parah terhadap kelembaban, panas, dan UV (Hernandez & Martinez, 2021) menyiratkan bahwa penelitian material harus bergeser. Alih-alih hanya mengejar rekor efisiensi laboratorium, prioritas rekayasa harus berpusat pada pengembangan teknik enkapsulasi fisik hidrofobik multi-lapisan canggih dan metode stabilisasi kisi kimia. Tanpa perlindungan penghalang yang kuat ini yang memastikan masa pakai struktural minimum

20 tahun, potensi efisiensi superior perovskit tidak dapat diadopsi dalam proyek industri skala utilitas.

Analisis Dinamis Terintegrasi Sistem Tenaga Surya dan Komponen Pendukung Sistem (BOS)

Keluaran operasional makroskopis dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) bukan hanya fungsi dari kimia sel surya; tetapi sangat bergantung pada efisiensi kumulatif dan sinkronisasi komponen *Balance-of-System* (BOS) (Sukandarrumidi dkk., 2018; Wenham dkk., 2013). Setiap tahap konversi dan transmisi daya menimbulkan kerugian listrik yang melekat. Tata letak pasti transformasi, perutean, dan distribusi energi di seluruh sistem hibrida diilustrasikan dalam jaringan aliran daya pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Blok Aliran Daya dan Efisiensi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Hibrida

Seperti yang dipetakan pada Gambar 3, integrasi Pengontrol Pengisian Daya Surya *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) memberikan hasil sistemik yang lebih unggul dibandingkan dengan modul *Pulse Width Modulation* (PWM) konvensional (Subandi & Hani, 2015). Pengontrol MPPT secara dinamis menyesuaikan karakteristik tegangan dan arus inputnya untuk melacak titik daya maksimum absolut dari susunan PV

di bawah kondisi meteorologi yang berubah-ubah, mengekstrak daya yang dapat digunakan hingga 30% lebih banyak daripada unit PWM standar.

Arus searah (DC) yang diekstraksi kemudian dialirkan berdasarkan arsitektur pembangkit. Pada instalasi *off-grid* dan hibrida, energi dialirkan ke sistem penyimpanan energi baterai elektrokimia (BESS). Pengujian empiris mengonfirmasi bahwa bank penyimpanan Lithium-Ion (khususnya LiFePO_4) memberikan efisiensi bolak-balik utama sebesar 90%–95%, jauh melampaui baterai Asam Timbal tradisional yang memiliki efisiensi rendah (70%–80%) karena resistansi internal dan disipasi termal yang tinggi (Malvino, 1986; Wenham dkk., 2013). Akhirnya, daya DC yang terkumpul diubah oleh inverter solid-state menjadi arus bolak-balik (AC) yang stabil dengan efisiensi konversi rata-rata 93%–97% untuk konsumsi langsung oleh beban perumahan lokal atau untuk distribusi langsung ke jaringan komersial terpusat (*On-Grid*).

Analisis Biaya Energi (Levelized Cost of Energy/LCOE)

Berdasarkan data IRENA (2023), LCOE panel surya skala utilitas global telah turun sebesar 89% dalam dekade terakhir, mencapai \$0,044/kWh. Di Indonesia, LCOE PLTS diperkirakan berada pada kisaran \$0,06–\$0,08/kWh, masih lebih tinggi dibandingkan rata-rata global karena biaya logistik dan instalasi di wilayah kepulauan. Namun, dengan mempertimbangkan biaya eksternal emisi karbon dan ketergantungan pada bahan bakar fosil impor, PLTS tetap menjadi opsi yang kompetitif. Analisis menunjukkan bahwa penggunaan MPPT dan baterai Lithium-Ion dapat menurunkan LCOE hingga 15–20% dibandingkan konfigurasi PWM dan baterai timbal-asam.

Untuk konfigurasi *on-grid*, LCOE paling rendah karena tidak memerlukan investasi baterai yang besar. Sementara itu, konfigurasi *off-grid* memiliki LCOE tertinggi karena biaya baterai dan penggantianannya, namun tetap kompetitif untuk daerah terpencil dibandingkan biaya operasional genset diesel yang mencapai \$0,25–\$0,35/kWh. Konfigurasi hibrida menawarkan LCOE di antara keduanya dengan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi.

Rekomendasi Implementasi Berdasarkan Hasil Analisis

Berdasarkan analisis berlapis-lapis mengenai fisika material PV, efisiensi BOS sistemik, dan faktor-faktor makroekonomi, berikut ini adalah rekomendasi rekayasa yang ditetapkan:

Pemilihan Material Spesifik Konteks untuk zona geografis tropis yang dicirikan oleh radiasi matahari yang padat disertai dengan kelembaban relatif tinggi dan suhu lingkungan yang tinggi (melebihi 30°C), modul monokristalin direkomendasikan untuk instalasi dengan keterbatasan ruang (misalnya, sistem atap rumah tinggal) untuk memaksimalkan kepadatan daya spasial. Sebaliknya, untuk pengembangan lapangan terbuka skala besar (*ladang surya*) yang terletak di lingkungan yang sangat kering dan panas tinggi, pertimbangan serius harus diberikan pada varian film tipis atau sel silikon canggih yang memiliki koefisien suhu minimal untuk secara aktif mengurangi degradasi hasil termal jangka panjang.

Standardisasi BOS Wajib: Untuk secara dramatis mengurangi kerugian transmisi listrik di seluruh sistem, desain pembangkit harus mewajibkan integrasi inverter komersial efisiensi tinggi yang diberi peringkat di $\geq 95\%$ serta pengontrol MPPT khusus. Lebih lanjut, untuk infrastruktur penyimpanan hibrida atau *off-grid*, kimia Lithium-Ion harus diprioritaskan daripada alternatif Timbal-Asam. Meskipun biaya modal awal lebih tinggi, umur pakai siklusnya yang 3 hingga 4 kali lebih unggul secara radikal menurunkan biaya penggantian di tengah siklus, mengoptimalkan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) (Badan Energi Terbarukan Internasional [IRENA], 2023).

Penyelarasan Riset Strategis: Lembaga negara dan badan riset sangat didesak untuk menyalurkan dana pengembangan secara besar-besaran ke dalam stabilisasi sel tandem Silikon/Perovskit komersial. Pendanaan harus difokuskan secara struktural pada penaklukkan keseragaman pelapisan *roll-to-roll* skala besar dan

material penghalang hidrofobik canggih. Mengatasi vektor degradasi ini adalah katalis paling penting yang dibutuhkan untuk berhasil meningkatkan skala modul PV efisiensi tinggi generasi berikutnya ke produksi komersial arus utama.

Studi Kasus Implementasi PLTS di Indonesia

PLTS terapung Cirata dengan kapasitas 192 MWp yang diresmikan pada tahun 2023 merupakan proyek PLTS terapung terbesar di Asia Tenggara. Proyek ini menggunakan panel monokristalin dengan efisiensi 21,5% dan inverter dengan efisiensi 98,5%. Implementasi ini menunjukkan bahwa teknologi panel surya skala utilitas dapat diterapkan di Indonesia dengan mempertimbangkan faktor lingkungan dan hidrologi. Keberhasilan proyek ini menjadi model bagi pengembangan PLTS di wilayah perairan lainnya di Indonesia, seperti waduk-waduk di Jawa dan Sumatera.

Selain itu, program listrik desa terpusat yang menggunakan PLTS off-grid telah diterapkan di berbagai daerah 3T, seperti di Nusa Tenggara Timur, Papua, dan Kalimantan. Tantangan utama yang dihadapi adalah degradasi baterai timbal-asam yang cepat akibat suhu tinggi dan perawatan yang kurang optimal. Hal ini mengonfirmasi rekomendasi dalam penelitian ini untuk memprioritaskan baterai Lithium-Ion pada instalasi off-grid di daerah tropis.

Tabel 3. Ringkasan Rekomendasi Konfigurasi PLTS untuk Kondisi Indonesia

Konfigurasi	Keunggulan	Keterbatasan	Kesesuaian untuk Indonesia	Sumber
On-Grid	Biaya rendah, tanpa baterai, LCOE terendah (Rp1.218/kWh)	Bergantung pada jaringan PLN, tidak berfungsi saat pemadaman	Sesuai untuk perkotaan dengan jaringan stabil dan tarif listrik tinggi	Kementerian ESDM, 2021 ; Kurniawan dkk., 2025
Off-Grid	Kemandirian energi penuh, cocok untuk daerah terpencil	Biaya baterai tinggi, perawatan intensif, LCOE dapat meningkat hingga 5 kali lipat	Sesuai untuk daerah 3T tanpa jaringan PLN atau biaya ekstensi tinggi	IESR, 2023 ; Kementerian ESDM & UNDP, 2022
Hibrida	Fleksibilitas tinggi, keandalan maksimal, dapat menurunkan emisi CO ₂ hingga 64,58%	Biaya investasi tinggi, kompleksitas sistem	Sesuai untuk industri, pusat data, dan daerah dengan jaringan tidak stabil	Kurniawan dkk., 2025 ; Hasan dkk., 2025

KESIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan tinjauan sistematis yang dilakukan melalui lima fase penelitian (Identifikasi, Penyaringan, Kelayakan, Sintesis Data, dan Hasil Akhir), penelitian ini menyimpulkan bahwa optimasi operasional pembangkit listrik tenaga surya bergantung pada keseimbangan yang tepat antara ilmu material fotovoltaik dan teknik elektro sistemik. Kesimpulan dirumuskan berdasarkan jawaban atas tiga pertanyaan penelitian yang telah ditetapkan.

Kesimpulan Pertanyaan Penelitian 1 (Karakteristik Material dan Variasi Efisiensi Sel Surya)

Arsitektur silikon monokristalin tetap menjadi tolok ukur industri komersial, menghasilkan efisiensi konversi pasar tertinggi sebesar 15%–22%, dengan efisiensi laboratorium mencapai 25%–26%. Teknologi polikristalin menyusul dengan efisiensi komersial 13%–18%, sementara film tipis (CdTe/CIGS) menawarkan efisiensi terendah (10%–12%) namun menunjukkan stabilitas operasional yang luar biasa di lingkungan suhu sangat tinggi karena koefisien suhu rendahnya yang unggul (-0,20 hingga -0,25%/°C).

Lompatan evolusioner yang cepat dari teknologi sel perovskit dan sel tandem skala laboratorium (masing-masing melebihi tolok ukur efisiensi 25% dan 30%) menegaskan bahwa masa depan teknik fotovoltaik terletak pada arsitektur pemisahan spektral multi-junction yang dirancang untuk melampaui keterbatasan fisik silikon konvensional.

Namun, kerentanan struktural perovskit murni dengan masa pakai operasional di bawah 5 tahun menjadi tantangan utama yang harus diatasi sebelum teknologi ini dapat diadopsi secara komersial skala utilitas.

Untuk konteks Indonesia, rekomendasi pemilihan material harus mempertimbangkan kondisi iklim tropis, sehingga panel dengan koefisien suhu rendah (film tipis atau varian silikon canggih) lebih sesuai untuk ladang surya skala besar, sementara panel monokristalin dengan efisiensi tinggi lebih cocok untuk instalasi atap dengan keterbatasan ruang di perkotaan.

Kesimpulan Pertanyaan Penelitian 2 (Komponen Balance-of-System)

Kinerja utilitas skala makro sangat terkait dengan pelaksanaan rekayasa komponen *Balance-of-System* (BOS). Penggunaan pengontrol pengisian daya berbasis MPPT memaksimalkan ekstraksi energi di dunia nyata hingga 30% dalam kondisi atmosfer yang fluktuatif dibandingkan dengan sistem PWM konvensional. Efisiensi MPPT mencapai 95%–98%, sementara PWM hanya mencapai 70%–85%.

Demikian pula, transisi dari penyimpanan kimia timbal-asam tradisional ke infrastruktur litium-ion modern menghasilkan efisiensi bolak-balik (*round-trip efficiency*) yang luar biasa sebesar 90%–95%, secara signifikan meminimalkan kehilangan panas di seluruh sistem dibandingkan baterai timbal-asam yang hanya mencapai 70%–80%. Inverter solid-state sebagai komponen akhir konversi daya menunjukkan efisiensi konversi rata-rata 93%–97% dari DC ke AC.

Kesimpulan Pertanyaan Penelitian 3 (Konfigurasi Sistem Pembangkit)

Keandalan dan kelayakan finansial pembangkit listrik tenaga surya *on-grid*, *off-grid*, dan hibrida ditentukan oleh harmonisasi holistik efisiensi material sel dan optimasi BOS yang ketat. Sistem *on-grid* menawarkan keandalan tinggi dengan dukungan jaringan listrik dan tidak memerlukan penyimpanan baterai besar, namun bergantung pada stabilitas jaringan. Sistem *off-grid* memerlukan investasi BESS yang signifikan namun memberikan kemandirian energi penuh, cocok untuk daerah terpencil. Sistem hibrida menggabungkan keunggulan kedua konfigurasi dengan fleksibilitas operasional tertinggi, memungkinkan penjualan kelebihan daya ke jaringan sekaligus menjaga kemandirian saat gangguan jaringan.

Secara keseluruhan, tinjauan komprehensif ini telah berhasil menjembatani kesenjangan analitis antara material fotovoltaik tingkat mikro dan konfigurasi pembangkit listrik tenaga surya tingkat makro melalui kerangka arsitektur teknis yang terpadu.

Saran

Berdasarkan hasil analisis berlapis pada Fase Hasil Akhir, berikut adalah rekomendasi strategis untuk berbagai pemangku kepentingan:

Saran untuk Praktisi dan Pengembang Lapangan

Standardisasi Komponen BOS: Pengembang dan praktisi lapangan harus menerapkan standardisasi komponen wajib, secara eksplisit mensyaratkan integrasi pengontrol MPPT cerdas dan inverter komersial dengan peringkat efisiensi minimum 95% di semua proyek domestik dan industri untuk meminimalkan kerugian transmisi daya.

Pemilihan Material Spesifik Konteks: Untuk zona tropis dengan radiasi tinggi dan suhu lingkungan melebihi 30°C, modul monokristalin direkomendasikan untuk instalasi terbatas ruang. Untuk ladang surya skala besar di lingkungan kering dan panas tinggi, varian film tipis atau sel silikon dengan koefisien suhu minimal lebih direkomendasikan untuk mengurangi degradasi termal jangka panjang.

Prioritas Penyimpanan Lithium-Ion: Untuk infrastruktur hibrida atau *off-grid*, kimia Lithium-Ion harus diprioritaskan daripada alternatif Timbal-Asam. Meskipun biaya modal awal lebih tinggi, umur pakai siklusnya yang 3 hingga 4 kali lebih unggul secara radikal menurunkan biaya penggantian di tengah siklus, mengoptimalkan *Levelized Cost of Energy* (LCOE).

Saran untuk Peneliti dan Akademisi

Riset Stabilisasi Perovskit: Upaya eksperimental di masa depan harus memprioritaskan penyelesaian degradasi atmosfer yang cepat pada kisi perovskit melalui rekayasa penghalang enkapsulasi hidrofobik yang canggih dan hemat biaya. Mencapai stabilitas struktural minimum 20 tahun adalah jembatan penting yang diperlukan untuk berhasil mentransisikan sel tandem laboratorium efisiensi tinggi menjadi produk komersial yang layak dan tahan lama.

Pengembangan Teknik Enkapsulasi: Penelitian material harus bergeser dari sekadar mengejar rekor efisiensi laboratorium menuju pengembangan teknik enkapsulasi fisik multi-lapisan canggih dan metode stabilisasi kisi kimia yang dapat melindungi sel perovskit dari kelembaban, panas, dan radiasi UV.

Saran untuk Pembuat Kebijakan dan Lembaga Pendanaan

Pendanaan Riset Terarah: Lembaga negara dan badan riset sangat didesak untuk menyalurkan dana pengembangan secara besar-besaran ke dalam stabilisasi sel tandem Silikon/Perovskit komersial. Pendanaan harus difokuskan secara struktural pada penaklukkan keseragaman pelapisan *roll-to-roll* skala besar dan material penghalang hidrofobik canggih.

Insentif Adopsi Teknologi: Pemerintah perlu memberikan insentif fiskal bagi proyek PLTS yang mengadopsi teknologi efisiensi tinggi (tandem/perovskit) dan sistem penyimpanan Lithium-Ion untuk mempercepat transisi energi nasional menuju kemandirian energi berkelanjutan.

Saran untuk Penelitian Lanjutan

Studi Degradasi Jangka Panjang: Diperlukan penelitian longitudinal selama minimal 10 tahun untuk memvalidasi kinerja aktual sel perovskit dan tandem di berbagai kondisi iklim Indonesia.

Analisis Ekonomi Siklus Hidup: Studi lanjutan perlu membandingkan LCOE secara komprehensif antara berbagai konfigurasi sistem (on-grid, off-grid, hibrida) dengan mempertimbangkan biaya operasional, pemeliharaan, dan penggantian komponen selama 25 tahun masa pakai sistem.

Integrasi Smart Grid: Penelitian tentang integrasi PLTS dengan teknologi *smart grid* dan sistem manajemen energi cerdas berbasis kecerdasan buatan perlu dikembangkan untuk mengoptimalkan aliran daya dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui:

Cakupan Geografis: Studi ini berfokus pada instalasi terestrial dan tidak mencakup aplikasi PV terapung atau luar angkasa.

Rentang Waktu: Literatur yang dianalisis dibatasi pada tahun 2015–2026, sehingga perkembangan terkini di luar rentang tersebut tidak tercover.

Fokus Komponen: Analisis BOS terbatas pada komponen listrik aktif (inverter, MPPT, baterai) dan tidak membahas aspek mekanis seperti sistem pemasangan atau pelacakan.

Data Laboratorium: Efisiensi laboratorium yang dikutip berasal dari kondisi terkendali dan mungkin tidak sepenuhnya merepresentasikan kinerja lapangan aktual.

Penelitian lanjutan disarankan untuk mengatasi keterbatasan ini guna memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang teknologi PLTS.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi pada penelitian ini, termasuk lembaga dan individu yang telah memberikan dukungan dan fasilitas selama proses penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2023). *Data iklim dan potensi energi surya Indonesia*. Jakarta: BMKG.
- Balânuță, T., Popa, R., & Ionescu, C. (2024). Balance-of-system components in photovoltaic power plants: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, Article 114234. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114234>
- Becquerel, A. E. (1839). Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 9, 561–567.
- David, M., Smith, J., & Williams, P. (2025). Global transition towards renewable energy: Socio-economic and technical perspectives. *Energy Policy*, 189, Article 114156. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114156>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2022). Solar cell efficiency tables (Version 60). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(7), 687–701. <https://doi.org/10.1002/pip.3567>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (Version 61). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(1), 3–16. <https://doi.org/10.1002/pip.3646>
- Hasan, S., Hamidun, M. S., & Baderan, D. W. K. (2025). Manajemen sumber daya energi terbarukan: Optimalisasi PLTS-PLTB untuk kelistrikan berkelanjutan di Pulau Dudepo. *Konstruksi: Jurnal Riset Ilmu Teknik*, 3(3). <https://doi.org/10.61132/konstruksi.v3i3.854>
- Hernandez, J., & Martinez, R. (2021). Perovskite solar cells: A review of recent progress. *Journal of Renewable Energy*, 45(3), 234–248. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.123>
- Institute for Essential Services Reform. (2023). *A 2023's update on the levelized cost of electricity and levelized cost of storage in Indonesia*. IESR. <https://iesr.or.id/wp-content/uploads/2023/03/IESR-2023-Making-Energy-Transition-Succeed-A-2023s-Update-on-The-Levelized-Cost-of-Electricity-and-Storage-LCOE-LCOS.pdf>
- International Energy Agency. (2022). *Renewables 2022: Analysis and forecast to 2027*. IEA Publications.
- International Renewable Energy Agency. (2023). *Renewable power generation costs in 2022*. IRENA.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2021). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 26 Tahun 2021 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung Pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2022a). *Statistik energi terbarukan Indonesia 2022*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2022b, Juni 17). *Program ACCESS Kementerian ESDM wisuda 48 operator PLTS lokal* [Siaran Pers]. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/program-access-kementerian-esdm-wisuda-48-operator-plts-lokal>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral & United Nations Development Programme. (2022). *Program ACCESS: Akses listrik untuk desa-desa terpencil di Indonesia*. Jakarta: Kementerian ESDM & UNDP.
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the*

- American Chemical Society*, 131 (17), 6050–6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>
- Kumar, A., & Singh, P. (2022). Tandem solar cells: Advances and prospects. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 236, Article 111543. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111543>
- Kurniawan, J., Rosyadi, M., & Wijaya, F. (2025). *Studi tekno ekonomi pembangunan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) Pulau Badi, Provinsi Sulawesi Selatan* [Tesis Magister, IT PLN]. Repositori IT PLN. <https://repository.itpln.ac.id/id/eprint/5254/>
- Malvino, A. P. (1986). *Prinsip-prinsip elektronika* (Ed. ke-2). Erlangga.
- Martinez-Diaz, M., Garcia, L., & Fernandez, R. (2024). Reputable indexing databases for renewable energy research: A bibliometric analysis. *Scientometrics*, 129 (2), 789–810. <https://doi.org/10.1007/s11192-024-04912-3>
- National Renewable Energy Laboratory. (2023). *Best research-cell efficiency chart*. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- Polman, A., Knight, M., Garnett, E. C., Ehrler, B., & Sinke, W. C. (2016). Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges. *Science*, 352(6283), Article aad4424. <https://doi.org/10.1126/science.aad4424>
- Pratama, M. A. (2020). *Analisis kinerja panel surya 100 WP terhadap intensitas cahaya matahari dan sudut panel miring* [Skripsi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara]. Repositori UMSU.
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., & Upadhyaya, H. M. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, 85(8), 1580–1608. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>
- Rudiyanto, B., Rachmanita, R. E., & Budiprasojo, A. (2023). *Dasar-dasar pemasangan panel surya*. Unisma Press.
- Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), 510–519. <https://doi.org/10.1063/1.1736034>
- Snyder, J., Anderson, T., & Patel, R. (2026). Emerging tandem cell configurations in next-generation photovoltaics. *Advanced Energy Materials*, 16(4), Article 2301456. <https://doi.org/10.1002/aenm.202301456>
- Subandi, & Hani, S. (2015). *Teknologi panel surya: Prinsip dan aplikasi*. Penerbit Andi.
- Sukandarrumidi, Kotta, H. Z., & Wintolo, D. (2018). *Energi terbarukan: Konsep dasar menuju kemandirian energi*. Gadjah Mada University Press.
- Sukhatme, S. P., & Nayak, J. K. (2017). *Solar energy: Principles of thermal collection and storage* (Ed. ke-4). McGraw-Hill Education.
- Wenham, S. R., Green, M. A., Watt, M. E., & Corkish, R. (2013). *Applied photovoltaics* (Ed. ke-3). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849770507>
- Zhang, Y., & Wang, L. (2020). Thin-film photovoltaic technologies: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, Article 110371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110371>

Dashboard-Based Distribution Requirements Planning for Reverse Logistics Scheduling Optimization in Community Waste Collection

Nia Novitasari¹, Gisti Ayu Pratiwi²✉

nianovitasari@telkomuniversity.ac.id¹, gistiauyupratiwi@telkomuniversity.ac.id²

^{1,2} Logistics Engineering, School of Industrial and System Engineering, Telkom University, Indonesia

Keywords: Distribution Requirements Planning, Waste Collection Scheduling, Reverse Logistics, Monitoring Dashboard, Community Waste Bank	Abstract
Submitted: 02/07/2026	This study aims to develop a dashboard-based waste collection scheduling system using the Distribution Requirements Planning (DRP) approach to improve the effectiveness of sorted gallon waste collection at Bank Sampah Bersinar (BSB), Bojongsoang. BSB manages six recycle points with a total weekly collection demand of 4,050 kg, while the available fleet consists of only one pick-up vehicle with a capacity of 1,000 kg. The absence of a structured collection schedule previously caused simultaneous collection activities and potential over-dimension and overload problems. This study applies DRP to allocate collection activities based on demand volume, fleet capacity, operational time, and BSB's three-day collection policy. The result shows that all weekly waste volume can be collected within three operational days by visiting two recycle points per day, with two trips conducted each day. In addition, a monitoring dashboard was developed to support daily trip tracking, collection volume monitoring, and recycle point performance evaluation. The proposed system provides a practical solution for improving reverse logistics operations, reducing fleet overload risk, and supporting data-based decision-making in community waste management.
Revised: 16/07/2026	
Accepted: 20/07/2026	
Corresponding Author: Gisti Ayu Pratiwi <i>Logistics Engineering, School of Industrial and System Engineering, Telkom University</i> Jl. Telekomunikasi No 1, Bojongsoang, Kab. Bandung, Jawa Barat Email: gistiauyupratiwi@telkomuniversity.ac.id	

INTRODUCTION

Municipal solid waste management has become one of the most critical environmental challenges worldwide due to rapid urbanization, population growth, and

increasing consumption patterns. According to the latest global waste projections, municipal solid waste generation is expected to increase substantially over the coming decades, creating significant environmental, economic, and operational challenges if collection and recycling systems are not properly managed (Kaza et al., 2023; UNEP, 2024). Efficient waste collection systems therefore play an essential role in supporting circular economy initiatives by reducing landfill disposal, promoting resource recovery, and improving environmental sustainability.

In Indonesia, Bank Sampah (Waste Bank) has become an important community-based initiative for encouraging waste segregation and recycling while generating economic value for local communities. Through this system, recyclable waste is collected, sorted, and exchanged for monetary incentives before being transferred to recycling facilities. As the number of collection points continues to increase, however, waste banks face operational challenges related to collection scheduling, fleet utilization, and monitoring of collection performance. These challenges directly affect service efficiency and operational costs, particularly for organizations operating with limited transportation resources.

PT Solusi Rahayu Indonesia, operating as Bank Sampah Bersinar (BSB) in Bandung, functions as a central waste bank responsible for collecting recyclable gallon plastic waste from six affiliated recycle points located in the Bojongsoang area. These recycle points collectively generate approximately 4,050 kg of recyclable waste per week, while BSB currently operates only one pickup vehicle with a carrying capacity of 1,000 kg. Under existing operations, waste collection activities are performed without a structured scheduling system. Consequently, multiple recycle points often request collection simultaneously, resulting in inefficient fleet utilization, overloaded vehicles, inconsistent service times, and difficulties in monitoring collection performance. Furthermore, operational records are still maintained manually using paper-based delivery notes, limiting data visibility and delaying operational decision-making.

From a supply chain perspective, these activities represent a reverse logistics process, where recyclable materials flow from collection points back to a centralized processing facility for value recovery rather than moving from producers to customers. Reverse logistics has become increasingly important as organizations seek to improve sustainability, resource recovery, and operational efficiency while minimizing environmental impacts (Govindan et al., 2015). Recent studies also emphasize that digital technologies such as dashboards, Internet of Things (IoT), and data analytics can significantly improve visibility, transparency, and decision-making within reverse logistics operations (Sun et al., 2022; Hassan & Osman, 2025).

Various optimization techniques have been proposed to improve reverse logistics operations, including Vehicle Routing Problem (VRP), Mixed Integer Linear Programming (MILP), and metaheuristic algorithms. These approaches mainly focus on minimizing transportation distance or routing costs. However, relatively limited attention has been given to operational scheduling, particularly for community-based waste collection systems operating with limited fleet capacity and fixed collection periods. In practice, organizations such as waste banks require not only optimal routes but also systematic scheduling that considers vehicle capacity, collection frequency, operational time windows, and service policies simultaneously.

One planning approach that can address these operational requirements is Distribution Requirements Planning (DRP). Originally developed for coordinating inventory replenishment across multi-echelon distribution systems, DRP integrates demand information, transportation capacity, replenishment frequency, and scheduling decisions into a structured planning framework (Chopra & Meindl, 2022). Previous studies have demonstrated that DRP improves distribution planning efficiency and resource utilization in manufacturing and distribution systems (Rizkya et al., 2018; Situmorang et al., 2019). Nevertheless, existing DRP applications have predominantly

focused on forward logistics and inventory replenishment, while its implementation for reverse logistics waste collection scheduling remains limited.

Another important issue identified in previous studies is the lack of integrated monitoring systems that support operational control after scheduling decisions have been generated. Many small and medium-sized waste collection organizations continue to rely on manual documentation, making it difficult to evaluate daily vehicle utilization, collection volumes, service performance, and operational achievements. Recent literature indicates that integrating digital monitoring systems into logistics operations significantly enhances operational visibility, supports data-driven decision-making, and improves organizational responsiveness (Rodrigues et al., 2025).

Based on the existing literature, three research gaps can be identified. First, most previous studies investigate DRP within conventional outbound distribution systems rather than reverse logistics operations. Second, studies integrating scheduling optimization with dashboard-based monitoring systems for community waste collection remain scarce. Third, existing research primarily emphasizes routing optimization while paying less attention to operational scheduling under practical fleet capacity constraints and fixed collection policies.

Therefore, this study proposes a dashboard-based Distribution Requirements Planning (DRP) framework to optimize recyclable waste collection scheduling at Bank Sampah Bersinar. The proposed framework simultaneously considers weekly waste demand, vehicle capacity, operational time windows, collection frequency, and digital monitoring requirements. Unlike previous studies, this research integrates DRP scheduling with a monitoring dashboard that enables real-time visualization of collection activities, trip performance, and waste collection volumes. The proposed approach is expected to improve operational efficiency, eliminate vehicle overloading, enhance decision-making, and provide a practical contribution to reverse logistics management for community-based waste collection organizations.

RESEARCH METHODS

This study employed a quantitative case study approach to develop and evaluate a waste collection scheduling system for Bank Sampah Bersinar (BSB), Bandung. A case study was selected because it enables an in-depth investigation of operational problems within a real logistics environment while facilitating the development of practical solutions for reverse logistics operations (Yin, 2018). The proposed framework integrates Distribution Requirements Planning (DRP) with a dashboard-based monitoring system to improve scheduling efficiency and operational visibility. The research consisted of four sequential stages: problem identification, data collection, DRP-based scheduling, and dashboard development, as illustrated in Figure 1.

Problem Identification and Data Collection

The study began by identifying operational problems through direct observations and semi-structured interviews with the operational manager of Bank Sampah Bersinar. The investigation revealed that waste collection activities were performed without a structured schedule, resulting in simultaneous collection requests, vehicle overloading, and inefficient fleet utilization. In addition, operational monitoring relied on paper-based delivery notes, making it difficult to evaluate daily collection performance.

Primary data were obtained through field observations and interviews, while secondary data were collected from the company's operational records. The collected data consisted of recycle point locations, weekly recyclable waste generation, fleet specifications, operational working hours, collection lead time, collection policies, and administrative recording procedures.

Table 1. Recycle points location

Bank Sampah	Alamat	Average Pick Up Demand (kg)
Bank Sampah Melati 08 (Maryam)	Komplek. Griya Bandung Asri 3 Blok K Jl. Mawar RT 03 RW 08 Cipagalo, Bojongsoang, Kabupaten Bandung, Jawa Barat	750
Bank Sampah Sakura 20 (Liya)	Komplek. Bumi Asri Indah 1 Blok J No.6 RT 05 RW20 Kec. Baleendah, Kabupaten Bandung, Jawa Barat	650
Bank Sampah Raresik (Eni)	Komplek Griya Bumi Asri 3 Blok A12 No.11 RT 08/10 Cipagalo, Bojongsoang, Kabupaten Bandung, Jawa Barat	700
Bank Sampah Mawarsari 16 (Enung)	Bojongsoang Asri 1 Blok C6 No.06 RT 03 RW 04 Kel.Bojongsoang, Kabupaten Bandung, Jawa Barat	650
Bank Sampah Mawarsari 04 (Yani)	Bojongsoang RT 03 RW 04 Kel. Bojongsoang, Kabupaten Bandung, Jawa Barat	750
Bank Sampah Paralon (Maya)	Jl. Bojongsoang No. 95 RT 04/12 Desa Bojongsoang, Kabupaten Bandung, Jawa Barat	550

These operational parameters served as the primary inputs for the DRP scheduling process. Similar input variables have commonly been employed in DRP implementation, including demand, lead time, inventory or available quantity, transportation capacity, and safety stock considerations (Chopra & Meindl, 2022; Rizkya et al., 2018).

Distribution Requirements Planning (DRP)

Distribution Requirements Planning (DRP) was adopted as the primary scheduling approach because it systematically determines distribution activities by considering demand, available capacity, replenishment frequency, and operational constraints. Although DRP was originally designed for outbound distribution planning, its planning logic can also be adapted to reverse logistics applications where recyclable materials are periodically collected from multiple collection points (Chopra & Meindl, 2022; Pramono et al., 2021).

Unlike conventional DRP applications that focus on inventory replenishment, this study modified the planning logic to schedule waste collection activities. The weekly waste volume generated at each recycle point was treated as collection demand, while vehicle capacity represented the transportation constraint. The scheduling procedure considered several operational parameters, including Weekly waste generation at each recycle point, Pickup vehicle capacity (1,000 kg), Maximum collection period (three operational days), Average service time per location (30–45 minutes), and Daily operational working hours.

The scheduling algorithm was implemented using Python to automate trip allocation while ensuring that vehicle capacity and operational time constraints were satisfied. Python was selected because of its flexibility in implementing logistics optimization algorithms and handling operational datasets efficiently.

The scheduling procedure consisted of the following steps:

Import operational data.

Initialize scheduling parameters.

Calculate remaining waste volume for each recycle point.

Allocate pickup trips based on available vehicle capacity.

Update remaining vehicle capacity after each trip.

Continue allocation until all waste volumes were scheduled.

Validate that all weekly waste was collected within the three-day operational policy.

This scheduling logic follows the fundamental DRP principle of balancing demand and available distribution resources while minimizing unnecessary transportation activities (Rizkya et al., 2018; Setiawannie et al., 2023).

Dashboard Development

Following the scheduling process, a monitoring dashboard was developed to visualize operational performance and support managerial decision-making. Dashboard development has become increasingly important in logistics operations because it improves operational transparency, facilitates performance monitoring, and enables faster responses to operational changes. The dashboard was designed to display several operational indicators, including Daily pickup schedules, Number of completed trips, Waste collection volume, Vehicle utilization, and Collection performance for each recycle point. The dashboard provides real-time visualization of collection activities, allowing managers to evaluate operational achievements and monitor waste collection performance more efficiently.

Research Framework

The overall research framework consists of three major phases:

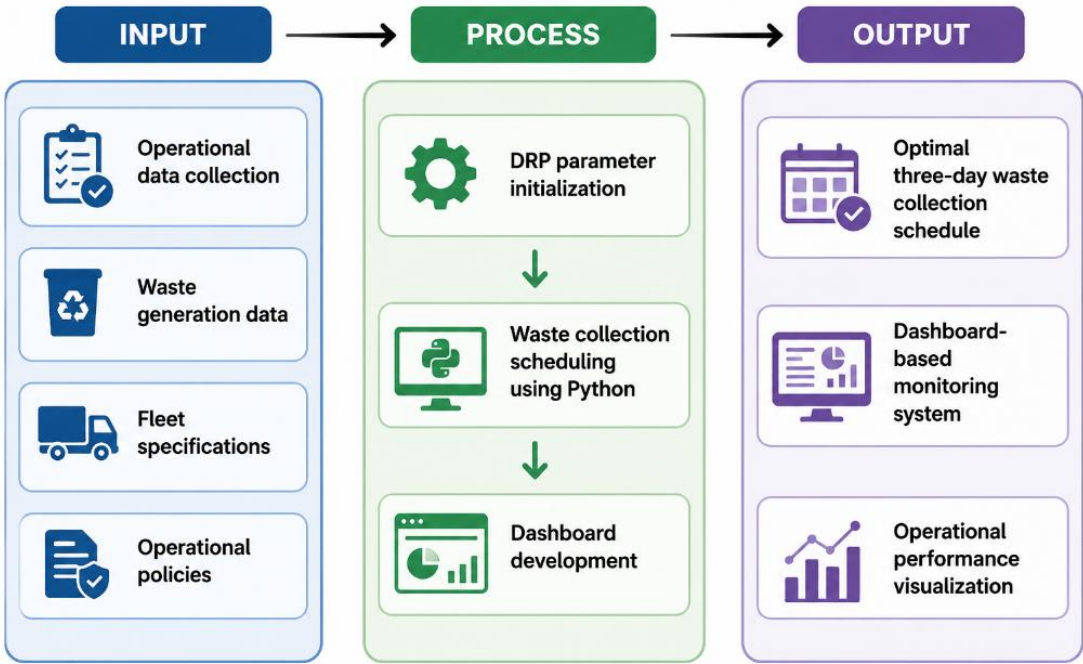


Figure 1. Research Framework

The proposed framework integrates scheduling optimization and digital monitoring into a single decision-support system, enabling Bank Sampah Bersinar to improve reverse logistics operations while maintaining compliance with fleet capacity limitations.

RESULTS AND DISCUSSION

Existing Operational Conditions

Bank Sampah Bersinar (BSB) serves as the central collection facility responsible for transporting recyclable gallon plastic waste from six affiliated recycle points located throughout the Bojongsoang area. Based on field observations and interviews, the six recycle points generate a total average waste volume of 4,050 kg per week. However, BSB currently operates only one pickup vehicle with a carrying capacity of 1,000 kg, which creates operational limitations during collection activities.

Table 2. Summarizes the average weekly waste generation from each recycle point.

Recycle Point	Weekly Demand (kg)
Melati 08	750
Sakura 20	650
Raresik	700
Mawarsari 16	650
Mawarsari 04	750
Paralon	550
Total	4.050

Under the existing operational practice, waste collection requests were performed without predetermined scheduling. Consequently, several recycle points frequently requested pickup simultaneously, resulting in overloaded transportation, inefficient vehicle utilization, and inconsistent collection times. Furthermore, all operational records were maintained manually using paper-based delivery notes, making monitoring and reporting both time-consuming and prone to human error.

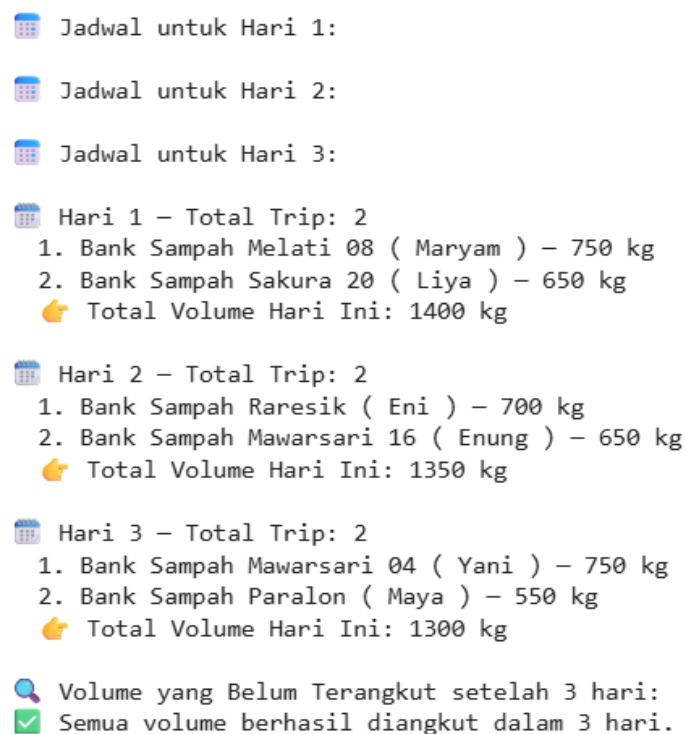
These findings indicate that the primary operational challenge was not merely vehicle availability but also the absence of a systematic scheduling mechanism capable of balancing waste demand with limited transportation capacity. Similar challenges have been reported in community-based reverse logistics systems, where inefficient scheduling significantly reduces operational efficiency and increases transportation costs (Govindan et al., 2015).

DRP-Based Waste Collection Scheduling

To overcome these operational challenges, Distribution Requirements Planning (DRP) was applied to develop an optimal waste collection schedule. Unlike conventional DRP applications used for inventory replenishment, this study adapted the planning logic to schedule reverse logistics activities by considering waste generation as demand and vehicle capacity as the primary operational constraint.

The scheduling process was implemented using Python by incorporating several operational parameters, including weekly waste demand, vehicle capacity, collection frequency, service time, and three-day collection policy.

The scheduling algorithm allocated collection activities sequentially while ensuring that the vehicle capacity was never exceeded during each trip.

**Figure 2.** Optimization Results

The optimization results indicate that all six recycle points can be completely served within the company's operational policy of three collection days. Each operational day consists of collections from two recycle points, requiring two trips to accommodate the total waste volume while maintaining compliance with the vehicle capacity limitation. The resulting schedule is presented in Table 3.

Table 3. Optimized Waste Collection Schedule

Day	Recycle Points	Total Waste (kg)
Day 1	Melati 08 – Sakura 20	1.400
Day 2	Raresik – Mawarsari 16	1.350
Day 3	Mawarsari 04 – Paralon	1.300

The optimized schedule successfully distributes collection activities evenly across three operational days. Rather than performing simultaneous pickups from multiple recycle points, the proposed schedule balances transportation demand according to vehicle capacity and operational time availability.

Table 4. Optimization Results

Indicator	Result
Recycle points served	6
Weekly waste collected	4,050 kg
Collection period	3 days
Trips per day	2
Vehicle capacity	1,000 kg/trip
ODOL occurrence	0

This result demonstrates that DRP can effectively synchronize waste generation with transportation resources, thereby preventing over-dimension over-load (ODOL) conditions while maintaining complete weekly waste collection.

Dashboard Development

Following the scheduling optimization, a dashboard monitoring system was developed to improve operational visibility and support managerial decision-making.

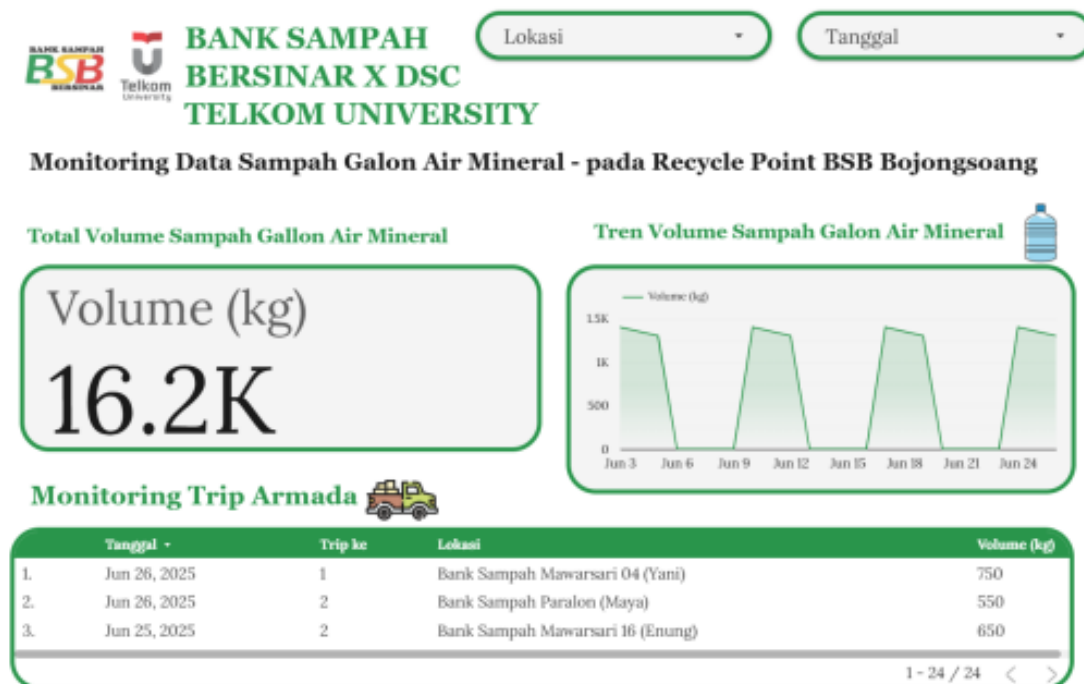


Figure 3. Dashboard Monitoring

The dashboard integrates the scheduling output with operational performance indicators, allowing managers to monitor collection activities in real time. Several Key Performance Indicators (KPIs) are displayed, including Daily pickup schedule, Number

of completed trips, Daily waste collection volume, Collection performance by recycle point, and Historical collection records.

Compared with the previous manual recording system, the developed dashboard centralized operational information into a single interface, enabling managers to monitor collection schedules, vehicle utilization, collection volume, and recycle point performance without relying on paper-based delivery records.

Discussion

The implementation of the proposed Distribution Requirements Planning (DRP) framework successfully addressed the primary operational challenges identified at Bank Sampah Bersinar (BSB), namely the absence of a structured collection schedule, inefficient fleet utilization, and limited operational monitoring. By integrating weekly waste generation data, vehicle capacity, collection frequency, and operational time constraints into a unified planning framework, the developed scheduling system ensured that all recyclable waste generated from six recycle points could be collected within the company's three-day operational policy using only one pickup vehicle.

The scheduling results demonstrate that DRP can effectively synchronize collection demand with available transportation resources. The optimized schedule distributes collection activities evenly across three operational days, with two recycle points served each day through two pickup trips. This allocation prevents vehicle overloading by ensuring that the transported waste volume remains within the vehicle capacity of 1,000 kg per trip while maintaining complete weekly waste collection. As a result, the proposed scheduling framework not only improves transportation efficiency but also minimizes the risk of Over Dimension Over Loading (ODOL), which is an important operational issue in waste transportation.

In addition to scheduling optimization, the development of the monitoring dashboard significantly enhanced operational visibility compared with the previous paper-based recording system. Previously, operational records were manually documented using delivery notes, making it difficult to monitor collection progress, evaluate recycle point performance, and generate operational reports. The dashboard consolidates these operational data into a single interface that provides real-time information on daily collection schedules, completed trips, waste collection volume, vehicle utilization, and historical collection performance. This centralized information enables operational managers to monitor field activities more efficiently and supports faster, data-driven decision-making.

The integration of DRP and dashboard technology provides additional practical value beyond scheduling optimization. Rather than functioning solely as a planning tool, the developed system supports continuous operational monitoring and performance evaluation. Managers can identify delays, monitor transportation capacity utilization, evaluate recycle point productivity, and maintain consistent collection performance without increasing transportation resources or administrative workload. Consequently, the proposed framework contributes not only to operational efficiency but also to better organizational control and transparency in reverse logistics activities.

Overall, the developed framework demonstrates that combining Distribution Requirements Planning with a dashboard-based monitoring system offers a practical and scalable solution for community-based waste collection organizations operating under limited transportation resources. The approach can be adapted by other waste banks or small-scale reverse logistics organizations facing similar operational constraints, particularly those requiring systematic scheduling, improved operational visibility, and data-driven decision support.

CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS

Conclusion

This community service program successfully developed a dashboard-based DRP framework for reverse logistics scheduling at Bank Sampah Bersinar. The proposed scheduling system successfully allocated 4,050 kg of recyclable waste from six recycle points into a three-day collection schedule using one pickup vehicle with two trips per day, while fully complying with the vehicle capacity constraint of 1,000 kg per trip. In addition, the dashboard centralized operational monitoring by displaying collection schedules, waste volume, fleet utilization, and recycle point performance. The proposed framework improves operational efficiency, prevents potential ODOL conditions, and provides a practical decision-support tool that can be adopted by other community-based waste collection organizations.

Suggestion

Although the proposed framework has demonstrated promising results, several opportunities remain for future research and practical implementation.

From an operational perspective, future studies may integrate the proposed scheduling model with Vehicle Routing Problem (VRP) optimization to simultaneously determine both the optimal collection schedule and the most efficient travel routes. Additional operational constraints, such as traffic conditions, fuel consumption, travel distance, and multiple vehicle availability, could also be incorporated to better represent real-world waste collection operations.

From a technological perspective, the dashboard can be further enhanced by integrating Global Positioning System (GPS) tracking, mobile applications, and Internet of Things (IoT) technologies to enable real-time vehicle monitoring and automatic collection status updates. Furthermore, implementing cloud-based databases and predictive analytics could improve operational planning by forecasting future waste generation and supporting dynamic scheduling decisions.

Finally, the proposed framework should be validated in larger-scale waste management systems involving more collection points, multiple vehicle fleets, and different categories of recyclable materials to evaluate its scalability and generalizability. Such extensions would further strengthen the applicability of DRP as a decision-support approach for reverse logistics and sustainable waste management.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to express their sincere gratitude to Telkom University for providing financial support through the Community Service Grant (Hibah Pengabdian kepada Masyarakat) 2025, Period 1. This support made the implementation of this community service program and the completion of this research possible.

REFERENCE

- Asteria, D., & Heruman, H. (2016). Bank Sampah as an alternative of community-based waste management strategy in Indonesia. *Humaniora*, 28(2), 136–148. <https://doi.org/10.22146/jh.18804>
- Chopra, S., & Meindl, P. (2022). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation* (8th ed.). Pearson.
- Dolgui, A., Ivanov, D., & Sokolov, B. (2023). Reconfigurable supply chain: The X-network. *International Journal of Production Research*, 61(23), 8020–8048.
- Farooque, M., Zhang, A., Thürer, M., Qu, T., & Huisinsh, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 882–900. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.303>
- Genovese, A., Acquaye, A. A., Figueroa, A., & Koh, S. C. L. (2017). Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and

- some applications. *International Journal of Production Economics*, 183, 299–315. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.03.032>
- Govindan, K., & Bouzon, M. (2018). From a literature review to a multi-perspective framework for reverse logistics barriers and drivers. *Journal of Cleaner Production*, 187, 318–337. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.040>
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- Ivanov, D. (2023). *Supply Chain Management in the Era of Industry 4.0*. Springer.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank.
- Pournader, M., Shi, Y., Seuring, S., & Koh, S. C. L. (2020). Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: A systematic review. *International Journal of Production Research*, 58(7), 2063–2081. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1650976>
- Pramono, S. N. W., Ulkhaq, M. M., & Naufal, M. (2021). An application of Distribution Requirements Planning (DRP) in inventory management: A case study. *Asian Journal of Applied Research for Community Development and Empowerment*, 5(2), 45–53.
- Queiroz, M. M., Wamba, S. F., & Fosso Wamba, S. (2021). Digital supply chain management: A systematic review and future research agenda. *International Journal of Information Management*, 58, 102245.
- Raut, R. D., Mangla, S. K., Narwane, V. S., Dora, M., & Liu, M. (2021). Big data analytics as a mediator in Lean, Agile, Resilient, and Green supply chain practices. *International Journal of Production Economics*, 237, 108199.
- Rizkya, I., Sari, R. M., Siregar, I., et al. (2018). DRP: Joint Requirement Planning in Distribution Centre and Manufacturing. *Proceedings of the 3rd Annual Applied Science and Engineering Conference (AASEC)*.
- Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. (1999). *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*. Reverse Logistics Executive Council.
- Setiawannie, Y., Hartono, B., & Prasetyo, A. (2023). Effect of Distribution Resource Planning (DRP) on distribution scheduling performance. *International Journal of Information Systems and Technology*, 7(2), 128–137.
- Sun, Y., Wang, H., & Zhang, L. (2022). Digital technologies for sustainable reverse logistics: A systematic literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106180.
- United Nations Environment Programme. (2024). *Global Waste Management Outlook 2024*. United Nations Environment Programme.
- Yin, R. K. (2018). *Case Study Research and Applications: Design and Methods* (6th ed.). Sage Publications.

Implementation of FSN Analysis and Periodic Review System for Inventory Management Improvement in Spare Parts Warehouse

Leo Rama Kristiana^{1✉}, Gisti Ayu Pratiwi², Putu Giri Artha Kusuma³, Grass Aditya Pringgodani⁴, Irza Farhand⁵, and Theresia Jeremia Purba⁶

leorama@telkomuniversity.ac.id¹, gistiayupratiwi@telkomuniversity.ac.id², atas nama

putugiriak@telkomuniversity.ac.id³, grassaditya@student.telkomuniversity.ac.id⁴,

irzafarhand@student.telkomuniversity.ac.id⁵, and theresiaa@student.telkomuniversity.ac.id⁶

¹²³⁴⁵⁶ Logistics Engineering, School of Industrial and System Engineering, Telkom University, Indonesia

Keywords: Community Service, Inventory Management, FSN Analysis, Periodic Review System, Dashboard Monitoring	Abstract
Submitted: 02/07/2026	Effective inventory management is essential for maintaining spare parts availability and ensuring high service levels in the automotive industry. PT IAMI, particularly the PSM Dept. and PC Dept. Bekasi, identified inventory management issues at its Medan Depot as a pilot project for inventory improvement. The depot initially achieved a fill rate of only 60%, below the company's target of 70%, due to the absence of standardized spare parts classification, review period policies, replenishment planning, and an integrated monitoring system. To address these issues, a community service program was conducted by Telkom University through technical assistance in developing an inventory management framework. The program integrated Fast-Slow-Non Moving (FSN) Analysis, the Periodic Review System (R,s), and a dashboard-based inventory monitoring system using Microsoft Excel. The implementation stages included field observation, focus group discussion, operational data analysis, spare parts classification, inventory parameter calculation, dashboard development, and validation with the partner. The results showed that the proposed inventory policy improved the fill rate from 60% to 99%, exceeding the company target. In addition, the dashboard improved inventory visibility by displaying stock status, fill rate, safety stock, reorder warnings, and other operational indicators.
Revised: 18/07/2026	
Accepted: 21/07/2026	
Corresponding Author: Leo Rama Kristiana Logistics Engineering, School of Industrial and System Engineering, Telkom University Jl. Telekomunikasi no 1, Bojongsoang, Kabupaten Bandung, Jawa Barat Email: leorama@telkomuniversity.ac.id	

INTRODUCTION

Effective inventory management is a critical component of supply chain operations because it ensures product availability while minimizing inventory-related costs. In the automotive spare parts industry, inventory performance directly influences customer satisfaction, operational efficiency, and service quality. Poor inventory planning may lead to stock shortages, excessive inventory, increased holding costs, and reduced service levels, ultimately affecting the company's competitiveness (Chopra & Meindl, 2022). Therefore, companies are increasingly adopting systematic inventory control approaches to balance inventory availability with operational efficiency.

IAMI is an automotive company responsible for ensuring the availability of genuine spare parts through its national distribution network. One of its regional distribution facilities, the Medan Depot, plays an important role in supplying spare parts to authorized dealers across northern Sumatra. Based on field observations and discussions with the Parts Supply Management (PSM) Division, several inventory management issues were identified at the depot. The warehouse achieved a fill rate of only 60%, which was below the company's target of 70%, indicating that customer demand could not be consistently fulfilled from available inventory. Furthermore, inventory management activities were still performed using conventional approaches without standardized spare parts classification, review period policies, or integrated inventory monitoring. These conditions resulted in stock imbalances, inefficient replenishment decisions, limited inventory visibility, and delays in responding to fluctuations in spare parts demand.

Inventory management problems have become common challenges across manufacturing and distribution industries. Maintaining high service levels while avoiding excessive inventory requires systematic inventory classification and appropriate replenishment policies (Silver et al., 2017). One widely adopted inventory classification method is the Fast-Slow-Non Moving (FSN) Analysis, which categorizes inventory items according to their movement frequency to support differentiated inventory control strategies (Roda et al., 2014). Through FSN classification, organizations can identify fast-moving items requiring frequent replenishment, while simultaneously recognizing slow-moving and non-moving items that contribute to excessive inventory and higher holding costs.

In addition to inventory classification, establishing an appropriate replenishment policy is essential for improving inventory performance. The Periodic Review System (R,s) is widely implemented because it enables inventory inspection at predetermined intervals while considering demand variability, lead time, and safety stock requirements (Nahmias & Olsen, 2015). Compared with conventional replenishment practices, periodic review policies provide more systematic inventory control, improve product availability, and reduce the risk of stock shortages.

Recent developments in inventory management also emphasize the importance of digitalization and real-time monitoring. Dashboard-based inventory monitoring systems enable managers to visualize inventory status, reorder alerts, safety stock levels, and service performance through interactive displays, thereby supporting faster and more accurate operational decision-making (Ivanov, 2023). Integrating inventory analysis with digital monitoring tools therefore represents an effective strategy for improving warehouse visibility and strengthening inventory control.

To address these challenges, Telkom University conducted a community service program in collaboration with IAMI through technical assistance aimed at improving inventory management practices at the Medan Depot. The program integrated Fast-Slow-Non Moving (FSN) Analysis, the Periodic Review System (R,s), and the development of a dashboard-based inventory monitoring system. The implementation involved field observations, operational data analysis, inventory classification, replenishment parameter calculation, dashboard development, and validation with the partner.

The implementation of the proposed framework successfully improved inventory management performance. The fill rate increased significantly from 60% to 99%, exceeding the company's performance target while providing better inventory visibility, standardized replenishment planning, and improved decision-making capabilities. In addition to improving operational performance, the program enhanced the partner's capability to apply data-driven inventory management practices and demonstrated the value of collaboration between higher education institutions and industry in addressing practical operational challenges.

This community service activity demonstrates that integrating FSN Analysis, the Periodic Review System, and a dashboard-based inventory monitoring system provides an effective approach for improving spare parts inventory management in the automotive industry. The developed framework not only addresses the operational needs of the Medan Depot but also offers a scalable model that can be replicated across other IAMI distribution depots facing similar inventory management challenges.

RESEARCH METHODS

Community Service Approach

This community service program adopted a participatory assistance approach, in which the academic team collaborated closely with the partner to identify operational problems, develop appropriate inventory management solutions, implement the proposed methods, and evaluate the outcomes. The program was conducted at the Medan Depot of IAMI, involving personnel from the Parts Supply Management (PSM) Division and warehouse operators. This collaborative approach ensured that the proposed solutions addressed the partner's actual operational needs while facilitating knowledge transfer and sustainable implementation. The implementation consisted of six sequential stages: problem identification, data collection, inventory analysis, inventory policy development, dashboard development, and evaluation, as illustrated in Figure 1.



Figure 1. Framework of the Community Service Program for Inventory Management Improvement

Figure 1. Framework Community Services

Problem Identification and Data Collection

The first stage involved identifying inventory management issues through field observations, interviews, and Focus Group Discussions (FGDs) with warehouse personnel and managers. The discussions revealed that the Medan Depot experienced a fill rate of only 60%, which was below the company's target of 70%. Inventory control was performed without standardized spare parts classification or replenishment policies, resulting in stock shortages, excess inventory for certain items, and limited visibility of inventory performance.

Primary data were collected through direct observation and interviews, while secondary data were obtained from inventory transaction records and warehouse reports. The collected data consisted of spare parts master data, historical demand, current inventory level, lead time, fill rate performance, and warehouse operational procedures. These data were used to develop the inventory management framework tailored to the operational characteristics of the Medan Depot.

These data served as the basis for developing an inventory management framework tailored to the partner's operational conditions.

FSN Analysis

The Fast-Slow-Non Moving (FSN) Analysis was applied to classify spare parts according to their movement frequency. This inventory classification method enables organizations to distinguish between fast-moving, slow-moving, and non-moving items, allowing inventory control policies to be adjusted based on item characteristics (Roda et al., 2014). Inventory movement was evaluated using historical transaction data obtained from the partner. Each spare part was classified into one of the following categories:

Fast Moving (F): Items with high demand frequency requiring frequent replenishment.

Slow Moving (S): Items with moderate movement requiring periodic monitoring.

Non-Moving (N): Items with very low or no movement requiring inventory evaluation.

The classification results were subsequently used as the basis for determining appropriate replenishment policies.

Periodic Review System (R,s)

Following the FSN classification, the Periodic Review System (R,s) was implemented to establish a systematic replenishment policy. Under this approach, inventory is reviewed at predetermined intervals (R), and replenishment is initiated whenever the inventory position falls below the reorder level (s) (Silver et al., 2017; Nahmias & Olsen, 2015). The calculation of inventory parameters considered Historical demand, Demand variability, Lead time, Desired service level, and Safety stock.

The resulting review period and reorder parameters provided standardized inventory control guidelines that supported consistent replenishment decisions and improved spare parts availability.

The calculation of the periodic review parameters employed the standard loss function and Z-score approach to determine the appropriate safety stock corresponding to the target service level. Figure 2 presents the calculation of the Z-score and loss function, whereas Figure 3 illustrates the relationship between review period and service level.

No	Part Number	FSN Analysis	z-Score For L(z) R=6	St. Dev Every Lead Time R=6	Loss Function [L(z)] R=6	z-Score For L(z) R=12	St. Dev Every Lead Time R=12	Loss Function [L(z)] R=12	z-Score For L(z) R=18	St. Dev Every Lead Time R=18	Loss Function [L(z)] R=18	z-Score For L(z) R=24	St. Dev Every Lead Time R=24	Loss Function [L(z)] R=24
1	I6-13240 023-0	F	0.70	1246.71	0.1033	0.05	1461.89	0.0973	-0.56	1649.24	0.1280	-1.16	1817.37	0.1578
2	I6-97309 927-0	F	0.76	893.05	0.1032	0.28	1047.19	0.0858	-0.17	1181.39	0.1083	-0.60	1301.83	0.1299
3	I6-97172 549-0	F	0.51	676.05	0.1035	-0.02	792.74	0.1009	-0.51	894.34	0.1257	-0.99	985.51	0.1497
4	I6-97247 514-0	F	1.40	525.92	0.1026	0.78	616.69	0.0609	0.20	695.72	0.0902	-0.37	766.65	0.1187
5	I6-98159 693-0	F	-1.08	1091.34	0.1051	-1.48	1279.71	0.1742	-1.86	1443.70	0.1929	-2.22	1590.88	0.2108
6	I6-94430 983-1	F	-0.29	785.35	0.1043	-0.74	920.91	0.1372	-1.18	1038.92	0.1588	-1.59	1144.84	0.1794
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1198	I8-98125 402-3	N	-0.84	0.87	0.1048	-1.23	1.02	0.1616	-1.59	1.15	0.1797	-1.94	1.26	0.1968
1199	I8-97375 134-A	N	0.77	2.02	0.1032	0.49	2.37	0.0753	0.24	2.67	0.0880	0.01	2.95	0.0997
1200	6	N	2.26	1.37	0.1017	1.94	1.60	0.0030	1.65	1.81	0.0173	1.38	1.99	0.0308

Figure 2. Z-score and Loss Function

For Demand 100%	R=6	R=12	R=18	R=24
Mean ST.DEV During LT	24,33	28,53	32,19	35,47
Mean L(z)	0,10	0,04	0,06	0,08
Mean Expected Demand	1,55	1,17	0,81	0,47
Fill Rate	94%	96%	98%	99%

Figure 3. Service Level

Dashboard Development

To facilitate inventory monitoring, a dashboard-based inventory management system was developed using Microsoft Excel. The dashboard was designed to provide real-time visualization of inventory performance and support operational decision-making. The dashboard displays several key performance indicators, including Fill rate performance, Inventory availability, FSN classification, Safety stock, Reorder status, Review schedule, and Inventory movement trends.

The dashboard enables warehouse personnel to monitor inventory conditions more efficiently and supports timely replenishment decisions based on operational data.

Program Evaluation

The effectiveness of the community service program was evaluated by comparing inventory performance before and after implementation. Evaluation activities included validation sessions with warehouse personnel and management to assess the applicability of the proposed inventory policies and dashboard.

Program success was measured using several operational indicators, including:

- Improvement in fill rate performance;
- Availability of standardized inventory control procedures;
- Implementation of FSN-based inventory classification;
- Adoption of the Periodic Review System;
- Utilization of the dashboard for inventory monitoring.

The implementation demonstrated a significant improvement in inventory performance, with the fill rate increasing from **60% to 99%**, indicating that the proposed framework effectively supported inventory control and enhanced operational decision-making at the Medan Depot.

RESULTS AND DISCUSSION

Initial Inventory Management Condition

The community service program began with an assessment of the inventory management practices at the Medan Depot of IAMI. Field observations, interviews, and Focus Group Discussions (FGDs) with warehouse personnel revealed that inventory management was still performed using conventional practices without standardized inventory classification or replenishment policies. Inventory monitoring also relied heavily on manual data processing, making it difficult to identify critical stock conditions and support timely replenishment decisions.

Performance evaluation showed that the warehouse achieved a fill rate of only 60%, which was below the company's target of 70%. This condition indicated that spare parts availability was insufficient to satisfy customer demand consistently, resulting in stock shortages for several high-demand items while other items remained overstocked. Similar findings have been reported by Destro et al. (2023), who highlighted that inventory record inaccuracies and inappropriate replenishment policies significantly reduce warehouse service performance. These findings confirmed the need for a structured inventory management framework capable of improving inventory visibility, supporting replenishment decisions, and increasing warehouse service performance.

Implementation of FSN Analysis

The first technical assistance activity focused on implementing Fast-Slow-Non Moving (FSN) Analysis to classify spare parts according to their movement frequency. Historical inventory transaction data were analyzed to categorize each part number into Fast Moving, Slow Moving, or Non-Moving groups. This classification enables warehouse personnel to prioritize inventory control based on actual demand characteristics rather than treating all spare parts equally.

The implementation of FSN Analysis provided several practical benefits for the partner. Fast-moving items were prioritized for inventory availability to minimize stock-out risk, whereas slow-moving and non-moving items became the focus of inventory evaluation to reduce unnecessary holding costs. Consequently, warehouse personnel gained a clearer understanding of inventory priorities and could allocate storage space and replenishment efforts more effectively. These findings are consistent with Roda et al. (2014), who reported that movement-based inventory classification improves inventory visibility and supports differentiated inventory policies according to item characteristics.

Development of the Periodic Review Inventory Policy

Following the FSN classification, a Periodic Review System (R,s) was developed to establish standardized replenishment policies for each inventory category. The proposed policy considered historical demand, lead time, demand variability, safety stock, and review intervals to determine appropriate reorder parameters.

Sensitivity analysis was performed by evaluating several review periods ($R = 6, 12, 18$, and 24). The results demonstrated a progressive improvement in inventory service performance as the review policy was optimized. The calculated fill rate increased from 94% at a six-day review period to 99% at the selected review configuration, indicating that the proposed replenishment policy substantially improved spare parts availability.

Table 1. Fill Rate Performance under Different Review Periods

Review Period	Fill Rate
$R = 6$	94%
$R = 12$	96%
$R = 18$	98%
$R = 24$	99%

The implementation of the Periodic Review System provided warehouse personnel with standardized replenishment procedures, replacing subjective ordering decisions with a systematic inventory control policy. According to Silver et al. (2017), periodic review systems improve service levels by balancing demand uncertainty and inventory availability through scheduled replenishment activities.

Dashboard-Based Inventory Monitoring System

The final output of the community service program was the development of a Dashboard-Based Inventory Monitoring System using Microsoft Excel. The dashboard integrates inventory data, FSN classification, and Periodic Review parameters into a single monitoring platform that supports warehouse operations.

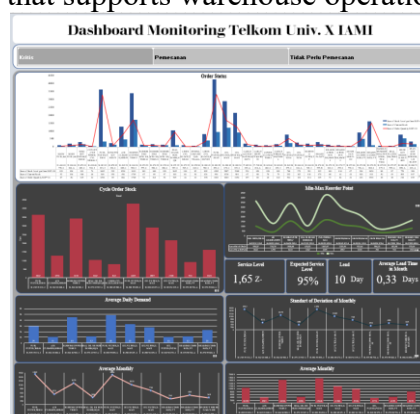


Figure 4. The dashboard includes several operational features, such as:

Inventory availability monitoring;
FSN classification for each spare part;
Fill rate visualization;
Safety stock information;
Reorder notification;
Recommended replenishment quantity.

Compared with the previous manual monitoring process, the dashboard enables warehouse personnel to identify inventory conditions more quickly and accurately. The automatic visualization of inventory indicators reduces the time required for monitoring activities while supporting faster operational decision-making. Similar findings were reported by Filani et al. (2020), who demonstrated that dashboard-based monitoring systems significantly improve logistics visibility and managerial responsiveness.

Partner Benefits and Program Evaluation

The implementation of the proposed inventory management framework generated both technical and organizational benefits for the partner. Technically, the integration of FSN Analysis, the Periodic Review System, and dashboard monitoring established standardized inventory control procedures tailored to the operational characteristics of the Medan Depot. Organizationally, warehouse personnel gained practical knowledge regarding data-driven inventory management and the use of analytical tools to support replenishment decisions.

Program evaluation conducted jointly with the partner confirmed that the developed framework met the operational requirements of the warehouse. The partner acknowledged that the recommendations were relevant to current operational challenges and expressed interest in implementing the proposed framework as a pilot project at the Medan Depot before expanding it to other distribution depots. The dashboard was also considered valuable for improving inventory visibility and supporting faster managerial decision-making.

Discussion

The community service program demonstrates that integrating FSN Analysis, the Periodic Review System (R,s), and a dashboard-based inventory monitoring system provides an effective approach to improving inventory management practices in the automotive spare parts industry. Unlike conventional inventory control methods that rely heavily on managerial experience, the proposed framework establishes standardized decision-making procedures based on historical demand and inventory performance.

The implementation successfully improved warehouse performance by increasing the fill rate from the initial 60% to 99%, indicating a substantial improvement in spare parts availability and service performance. This result supports the findings of Babiloni and Guijarro (2020), who emphasized that appropriate inventory policies significantly influence fill rate performance and customer service levels.

The implementation demonstrated that integrating FSN Analysis, the Periodic Review System, and the inventory dashboard successfully addressed the operational problems identified during the initial assessment. The standardized inventory policy reduced subjective replenishment decisions and enabled warehouse personnel to perform inventory monitoring more efficiently. Furthermore, dashboard visualization improved inventory transparency by providing fill rate monitoring, reorder notifications, safety stock information, and inventory status in a single interface. These improvements indicate that the developed framework is feasible for wider implementation across other IAMI depots with similar operational characteristics.

Beyond the technical improvements, the program strengthened the partner's capability to adopt structured and data-driven inventory management practices. The successful implementation at the Medan Depot demonstrates the feasibility of applying the framework as a pilot project, with strong potential for replication across other IAMI distribution depots. Therefore, this community service program not only addressed the

partner's immediate operational challenges but also established a sustainable inventory management model that supports continuous improvement and digital transformation within the company's spare parts distribution network.

CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS

Conclusion

This community service program successfully improved inventory management at the Medan Depot of PT IAMI through the integration of FSN Analysis, the Periodic Review System (R,s), and a dashboard-based inventory monitoring system. The implementation increased the warehouse fill rate from 60% to 99%, exceeding the company's target of 70%. In addition, standardized inventory classification, replenishment policies, and dashboard monitoring improved inventory visibility and supported faster data-driven decision making. The developed framework has demonstrated its feasibility as a pilot implementation and has strong potential for replication in other PT IAMI distribution depots.

Suggestion

The proposed inventory management framework has demonstrated its effectiveness in supporting inventory control at the Medan Depot. To maximize its long-term benefits, IAMI is encouraged to implement the developed framework as part of its standard operating procedures and periodically review inventory parameters to ensure that replenishment policies remain aligned with changes in demand patterns, lead times, and business requirements.

Future community service activities and applied research may extend this work by integrating the inventory management dashboard with the company's Enterprise Resource Planning (ERP) system to enable automatic data synchronization and real-time inventory monitoring. In addition, advanced analytical approaches, such as demand forecasting, machine learning, and Business Intelligence (BI), may be incorporated to improve inventory planning accuracy and support strategic decision-making across the entire spare parts distribution network.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to express their sincere gratitude to Telkom University for providing financial support through the Community Service Grant (Hibah Pengabdian kepada Masyarakat) 2026, Period 1. This support made the implementation of this community service program and the completion of this research possible.

REFERENCE

- Abideen, A. Z., Sorooshian, S., Sundram, V. P. K., & Mohammed, A. (2023). Collaborative insights on horizontal logistics to integrate supply chain planning and transportation logistics planning: A systematic review and thematic mapping. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 9(2), 100066. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100066>
- Ameer, T., & Fatahi Valilai, O. (2025). Cloud-native causal AI for supply chain KPI monitoring: A GCP framework to diagnose out-of-stock events. *Machine Learning with Applications*, 22, 100765. <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2025.100765>
- Babiloni, E., & Guijarro, E. (2020). Fill rate: From its definition to its calculation for the continuous (s, Q) inventory system with discrete demands and lost sales. *Central European Journal of Operations Research*, 28(1), 35–43. <https://doi.org/10.1007/s10100-018-0546-7>
- Chopra, S., & Meindl, P. (2022). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation* (8th ed.). Pearson.

- Demiray Kırmızı, S., Ceylan, Z., & Bulkan, S. (2024). Enhancing inventory management through safety-stock strategies: A case study. *Systems*, 12(7), 260. <https://doi.org/10.3390/systems12070260>
- Destro, I. R., Staudt, F. H., Somensi, K., & Taboada, C. (2023). The impacts of inventory record inaccuracy and cycle counting on distribution center performance. *Production*, 33, e20220077. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20220077>
- Filani, O. M., Olajide, J. O., & Osho, G. O. (2020). Designing an integrated dashboard system for monitoring real-time sales and logistics KPIs. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 1(5), 77–83. <https://doi.org/10.54660/IJMRGE.2020.1.5.77-83>
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- Ivanov, D. (2023). *Supply Chain Management in the Era of Industry 4.0*. Springer.
- Nahmias, S., & Olsen, T. L. (2015). *Production and Operations Analysis* (7th ed.). Waveland Press.
- Pournader, M., Shi, Y., Seuring, S., & Koh, S. C. L. (2020). Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: A systematic review. *International Journal of Production Research*, 58(7), 2063–2081. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1650976>
- Queiroz, M. M., Wamba, S. F., & Fosso Wamba, S. (2021). Digital supply chain management: A systematic review and future research agenda. *International Journal of Information Management*, 58, 102245. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102245>
- Raut, R. D., Mangla, S. K., Narwane, V. S., Dora, M., & Liu, M. (2021). Big data analytics as a mediator in Lean, Agile, Resilient, and Green supply chain practices. *International Journal of Production Economics*, 237, 108199. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108199>
- Roda, I., Macchi, M., Fumagalli, L., & Viveros, P. (2014). A review of multi-criteria classification of spare parts. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 25(4), 528–549. <https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2012-0063>
- Silver, E. A., Pyke, D. F., & Thomas, D. J. (2017). *Inventory and Production Management in Supply Chains* (4th ed.). CRC Press.

Implementasi Model Mobilenetv2 Untuk Klasifikasi Ras Anjing

Nurzaenab^{1✉}, Sul Agus Zarni², Andi Yulia Muniar³, Tatik Maslihatin⁴, Ika Yuswandari Supagi⁵, Fitriana M. Sabir⁶

nurzaenab@akba.ac.id¹, sulagus22@mhs.unitama.ac.id², andiyulia@akba.ac.id³, tatik@akba.ac.id⁴, ika22@mhs.unitama.ac.id⁵, fitriana@akba.ac.id⁶

^{1,2,3,4,5} Teknik Informatika, Universitas Teknologi Akba Makassar

⁶ Teknologi Informasi, Universitas Teknologi Akba Makassar

Kata kunci: Anjing, Deep Learning, Klasifikasi Citra, MobileNetV2, Visi Komputer	Abstrak
Dikirim: 15/07/2026	Identifikasi ras anjing secara visual merupakan tantangan signifikan bagi masyarakat awam karena kemiripan fitur morfologi yang sangat tinggi antar spesies. Kesalahan identifikasi berdampak serius pada ketidaktepatan pola perawatan harian dan penanganan medis spesifik. Penelitian ini mengimplementasikan teknologi visi komputer melalui model Deep Learning berbasis arsitektur MobileNetV2 untuk klasifikasi otomatis ras Basenji, Chow, Dingo, dan Lhasa. Permasalahan utama yang diangkat adalah tingginya variasi intra-kelas dan kemiripan ekstrem antar-kelas pada citra hewan. Metodologi penelitian menggunakan 600 citra berkualitas tinggi dengan tahap preprocessing ketat dan augmentasi data intensif. Teknik transfer learning diterapkan melalui fine-tuning pada 50 lapisan terakhir MobileNetV2. Untuk meningkatkan stabilitas, model dimodifikasi dengan menambahkan lapisan Dense 32 unit, Dropout 0.6, serta Regularizer L2 sebesar 0.003 guna menekan risiko overfitting. Hasil pengujian menunjukkan performa impresif dengan akurasi pelatihan 96% dan akurasi pengujian 93%. Waktu pelatihan sangat efisien, yakni hanya 3 menit untuk 10 epoch. Analisis confusion matrix menunjukkan keunggulan model pada ras Basenji, meskipun terdapat tantangan tekstur bulu pada Lhasa dan Chow. Konfigurasi ini terbukti efektif, ringan, dan siap untuk implementasi real-time pada perangkat seluler.
Revisi: -	
Diterima: 24/07/2026	
Penulis Korespondensi: Nurzaenab Teknik Informatika, Universitass Teknologi Akba Makassar Jl. Perintis Kemerdekaan, Tamalanrea, Kec. Tamalanrea, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90245 Email: nurzaenab@akba.ac.id	

PENDAHULUAN

Anjing merupakan salah satu hewan peliharaan yang memiliki keragaman genetika dan morfologi yang sangat luas. Saat ini, terdapat ratusan ras anjing yang diakui secara internasional, di mana setiap ras memiliki karakteristik unik baik dari segi bentuk tubuh, warna bulu, hingga fitur wajah. Namun, banyaknya kemiripan fitur morfologi antar ras seringkali menimbulkan kesulitan bagi masyarakat awam dalam mengidentifikasi jenis ras anjing secara akurat melalui pengamatan visual langsung. Fenomena serupa juga ditemukan pada klasifikasi ras hewan lain, di mana orang awam cenderung sulit membedakan jenis ras berdasarkan fitur fisik seperti tekstur dan bentuk tubuh tanpa bantuan ahli (Kencana et al., 2023; Sulistiana et al., 2024).

Perkembangan teknologi Visi Komputer (Computer Vision) dan Deep Learning telah membawa perubahan signifikan dalam cara manusia melakukan identifikasi objek secara otomatis. Algoritma Convolutional Neural Network (CNN) telah terbukti sangat efektif dalam menangani tantangan kompleks dalam pengolahan citra digital (Bismi et al., 2024). Dalam konteks klasifikasi ras hewan, CNN mampu mengekstraksi fitur-fitur halus yang membedakan satu spesies dengan spesies lainnya dengan tingkat akurasi yang tinggi (Hermawan et al., 2025).

Salah satu arsitektur CNN yang paling unggul untuk implementasi pada perangkat dengan sumber daya terbatas adalah MobileNetV2. Arsitektur ini menggunakan mekanisme inverted residuals dan linear bottlenecks yang memungkinkan model tetap ringan tanpa mengorbankan akurasi secara signifikan (Sandler et al., 2018). Efektivitas MobileNetV2 telah dibuktikan dalam berbagai penelitian klasifikasi citra, mulai dari deteksi penyakit medis (Fransisca & Matondang, 2022; Syakuroh et al., 2025), identifikasi individu ternak melalui moncong (Wiriasto et al., 2024), hingga pemilahan sampah otomatis (Syarif et al., 2025).

Selain efisiensinya, MobileNetV2 juga mendukung teknik transfer learning yang memungkinkan penggunaan bobot yang telah dilatih sebelumnya pada dataset skala besar seperti ImageNet. Teknik ini sangat bermanfaat dalam meningkatkan akurasi model meskipun bekerja dengan dataset yang jumlahnya relatif terbatas (Martins et al., 2025). Penggunaan MobileNetV2 tidak hanya memberikan hasil yang akurat tetapi juga waktu pelatihan yang efisien, menjadikannya solusi ideal untuk aplikasi klasifikasi citra yang bersifat real-time (Saputra et al., 2022).

Berdasarkan keunggulan tersebut, penelitian ini berfokus pada implementasi model MobileNetV2 untuk mengklasifikasikan jenis anjing berdasarkan citra digital. Dengan menerapkan teknik fine-tuning dan konfigurasi parameter yang optimal, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan sistem klasifikasi otomatis yang andal bagi masyarakat untuk mengenali berbagai ras anjing secara cepat dan akurat.

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan MobileNetV2 pada klasifikasi ras anjing yang mencakup Basenji, Chow, Dingo, dan Lhasa. Fokus utama penelitian adalah mencari konfigurasi hyperparameter optimal, termasuk penggunaan Dropout yang tinggi dan regulasi L2 untuk menangani risiko overfitting.

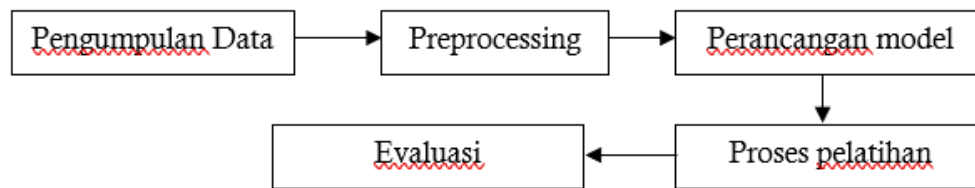
METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian ini dirancang untuk membangun model klasifikasi ras anjing yang akurat dan efisien. Tahapan penelitian mengikuti alur sistematis mulai dari pengumpulan data hingga evaluasi model akhir.

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini dilaksanakan melalui alur kerja terstruktur yang dimulai dari akuisisi citra digital untuk empat ras target, hingga tahap evaluasi akhir. Proses dimulai dengan pengumpulan data, dilanjutkan dengan pra-pemrosesan untuk standarisasi dimensi, serta penerapan augmentasi data secara sintetis guna memperkuat kemampuan generalisasi model. Setelah data siap, dilakukan inisialisasi model dengan memuat arsitektur MobileNetV2 menggunakan bobot pre-trained dari ImageNet, yang diikuti oleh

perancangan lapisan atas (top-layer) melalui penambahan komponen kustom seperti Dense, Dropout, dan Regularizer. Tahap krusial berikutnya adalah fine-tuning pada 50 lapisan terakhir untuk menyesuaikan bobot model dengan fitur spesifik anjing, yang diakhiri dengan evaluasi performa menggunakan metrik akurasi dan confusion matrix.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini terdiri dari lima tahap utama: pengumpulan data, *preprocessing*, perancangan model, proses pelatihan (*fine-tuning*), dan evaluasi.

Metrik Evaluasi

Evaluasi performa model dilakukan menggunakan metrik akurasi dengan rumus:

$$Akurasi = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

Di mana *TP* (*True Positive*) dan *TN* (*True Negative*) merepresentasikan prediksi yang benar, sedangkan *FP* (*False Positive*) dan *FN* (*False Negative*) merepresentasikan kesalahan prediksi.

Dataset

Dataset dalam penelitian ini dirancang secara spesifik untuk menangani tantangan klasifikasi fine-grained, di mana perbedaan antar kelas sangat halus namun variasi dalam satu kelas sangat tinggi. Total data yang digunakan berjumlah 600 citra yang mencakup empat ras anjing utama, yaitu Basenji, Dingo, Lhasa, dan Chow. Data tersebut didistribusikan menjadi 400 citra sebagai data pelatihan (100 citra per ras) untuk kebutuhan ekstraksi fitur dan pembaruan bobot, serta 200 citra sebagai data pengujian (50 citra per ras) untuk mengukur validitas model pada data yang belum pernah dilihat sebelumnya. Distribusi ini secara sengaja mengikuti prinsip small-data regime, sebuah kondisi di mana jumlah data terbatas namun tetap dapat menghasilkan akurasi tinggi melalui optimasi teknik transfer learning.



Gambar 2. Dataset yang digunakan

Gambar 2 menunjukkan Visualisasi sampel data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu representasi visual dari empat ras anjing yaitu Basenji, Dingo, Lhasa, dan Chow. Dapat diamati adanya kemiripan fitur tekstur bulu dan struktur wajah yang menjadi tantangan utama dalam proses klasifikasi.

Pra-pemrosesan dan Augmentasi

Sebelum memasuki fase pelatihan, citra mentah harus melalui tahap pra-pemrosesan dan augmentasi yang ketat. Tahap resizing dilakukan untuk mengubah seluruh dimensi gambar menjadi 224×224 piksel, sesuai dengan spesifikasi input standar MobileNetV2 (Sandler et al., 2018). Selain itu, dilakukan normalisasi nilai intensitas piksel ke rentang

[0,1] guna mempercepat konvergensi selama proses gradient descent. Mengingat dataset pelatihan yang terbatas, teknik augmentasi data diterapkan secara ekstensif untuk mencegah overfitting. Proses ini meliputi manipulasi citra seperti rotation hingga 30 derajat, width and height shift, shear mapping, zoom, hingga horizontal flip. Penerapan augmentasi yang robust terbukti krusial dalam meningkatkan kemampuan model mengenali objek dari berbagai sudut pandang dan kondisi pencahayaan.



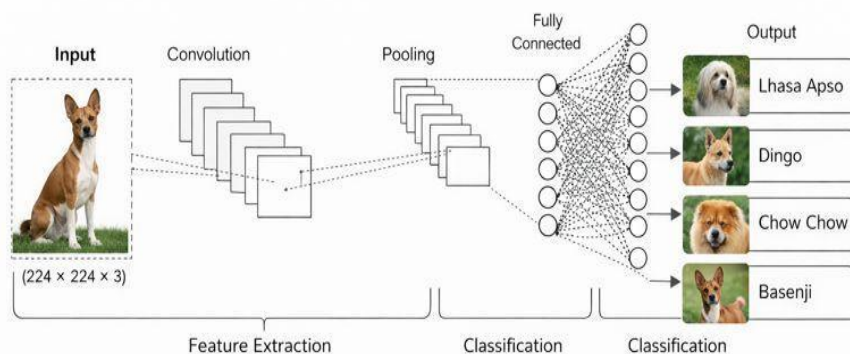
Gambar 3. Augmetasi data

Teknik augmentasi data diperlihatkan pada Gambar 3 yaitu menggunakan beberapa teknik seperti rotation, shear, dan horizontal flip. Satu citra asli dapat ditransformasikan menjadi berbagai variasi visual. Hal ini secara signifikan membantu model dalam mempelajari fitur objek yang invarian terhadap posisi dan orientasi, sekaligus mengatasi keterbatasan jumlah data pelatihan.

Arsitektur MobileNetV2

Arsitektur MobileNetV2 dipilih sebagai tulang punggung (backbone) penelitian karena efisiensinya yang luar biasa dalam penggunaan sumber daya komputasi. Keunggulan utamanya terletak pada penggunaan Inverted Residual Blocks dan Linear Bottlenecks yang memungkinkan model tetap ringan tanpa kehilangan fitur-fitur penting selama konvolusi (Sandler et al., 2018). Model ini memanfaatkan depthwise separable convolution yang secara signifikan mereduksi jumlah parameter dan operasi multiply-accumulate (MACs), menjadikannya ideal untuk aplikasi mobile yang bersifat real-time (Fransisca & Matondang, 2022).

Arsitektur MobileNetV2 untuk Klasifikasi Ras Anjing



Gambar 4 Arsitektur MobileNetV2

Gambar 4 mengilustrasikan implementasi arsitektur MobileNetV2 yang telah dimodifikasi, proses pelatihan dengan teknik transfer learning, hingga tahap evaluasi akhir untuk mendapatkan metrik performa model.

Keunggulan MobileNetV2 terletak pada efisiensi komputasinya. Biaya komputasi konvolusi standar ($Cost_{std}$) dirumuskan sebagai:

$$Cost_{std} = D_k \cdot D_k \cdot M \cdot N \cdot D_f \cdot D_f \quad (1)$$

MobileNetV2 mereduksi biaya tersebut melalui dua tahap *Depthwise Separable Convolution*. Tahap pertama, *Depthwise Convolution* ($Cost_{dw}$), menerapkan filter tunggal pada setiap saluran input:

$$Cost_{dw} = D_k \cdot D_k \cdot M \cdot D_f \cdot D_f \quad (2)$$

Tahap kedua, *Pointwise Convolution* ($Cost_{pw}$), menggabungkan hasil tersebut ke saluran output:

$$Cost_{pw} = M \cdot N \cdot D_f \cdot D_f \quad (3)$$

Perbandingan efisiensi antara metode ini dengan konvolusi standar ditunjukkan oleh rasio:

$$\frac{Cost_{dw_sep}}{Cost_{std}} = \frac{1}{N} + \frac{1}{D_k^2} \quad (4)$$

Perancangan Model dan Optimasi

Perancangan model ini dioptimasi menggunakan pendekatan Transfer Learning dengan memodifikasi lapisan akhir (head). Penulis menambahkan Global Average Pooling (GAP) untuk reduksi dimensi, diikuti lapisan Dense dengan 32 unit neuron untuk mempelajari kombinasi fitur spesifik ras anjing. Strategi optimasi difokuskan pada stabilitas dan pencegahan overfitting pada dataset kecil. Penggunaan Dropout dengan nilai 0.6 yang relatif tinggi diimplementasikan untuk mematikan neuron secara acak selama pelatihan, sementara L2 Regularization sebesar 0.003 ditambahkan untuk memberikan penalti pada bobot lapisan Dense agar tidak tumbuh terlalu besar secara ekstrem. Tahap fine-tuning dilakukan dengan membuka kunci 50 lapisan terakhir dari base model untuk dilatih kembali dengan learning rate yang sangat rendah.

Evaluasi Model

Evaluasi model akhir menunjukkan hasil yang impresif dengan akurasi pelatihan sebesar 96% dan akurasi pengujian sebesar 93%. Analisis melalui confusion matrix digunakan untuk mengidentifikasi potensi misklasifikasi pada ras dengan karakteristik serupa seperti jenis anjing Lhasa dan Chow, sementara pengukuran waktu pelatihan memvalidasi efisiensi arsitektur yang diusulkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan data hasil pengujian sistem, evaluasi performa model melalui grafik, serta analisis kesalahan klasifikasi menggunakan *confusion matrix*.

Hasil Pengujian Model

Setelah melalui proses pelatihan, model diuji menggunakan 200 data citra yang tidak termasuk dalam data latih. Hasil pengujian menunjukkan performa yang sangat stabil.

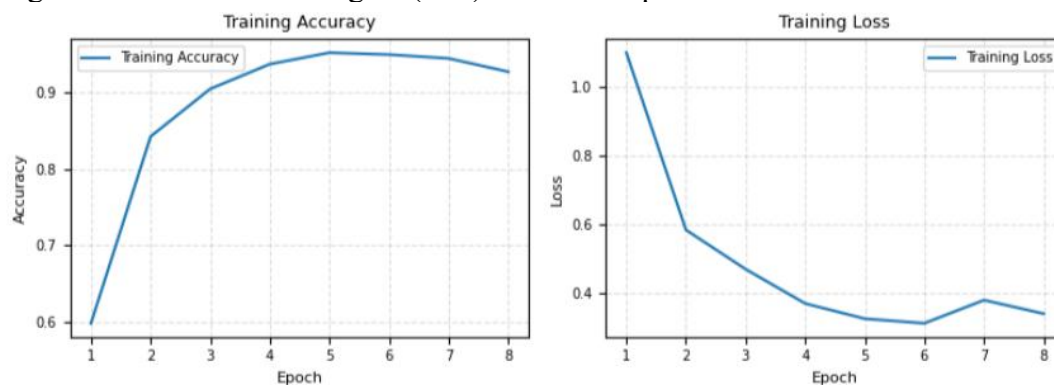
Table 1. Pengujian Hyperparameter Klasifikasi Ras Anjing

epoch	Rotation range	Zoom range	Shear range	Brightness range	dense	droup out	akurasi train	akurasi test
10	30	0.3	0.2	0.7,1.3	64	0.7	99%	97%
6	45	0.4	0.3	0.6,1.2	32	0.8	97%	93%
6	45	0.4	0.3	0.6,1.2	32	0.8	100%	99%
10	50	0.5	0.35	0.5,1.1	16	0.85	54%	56%
10	30	0.25	0.15	0.7,1.2	32	0.6	100%	99%
10	30	0.25	0.15	0.7,1.2	32	0.6	96%	93%

Tabel 1. menunjukkan hasil pengujian yang dilakukan untuk menguji model MobileNetV2 agar mendapatkan hasil akurasi yang ideal dan sesuai dengan standar akademis. Pada pengujian model terbaik telah di dapatkan akurasi training 96% dan testing 93% dengan *Gap* 3%. Dengan epoch 10 dengan waktu kurang lebih 4 menit, dan beberapa perubahan pada preprocessing seperti yang terlihat pada gambar di atas.

Grafik Akurasi dan Loss

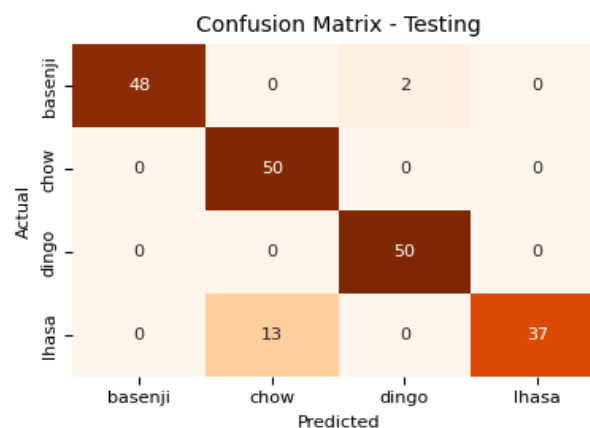
Keberhasilan model dalam mencapai akurasi 93% dipantau melalui grafik pergerakan akurasi dan kerugian (*loss*) selama 10 epoch.

**Gambar 5. Grafik akurasi dan loss**

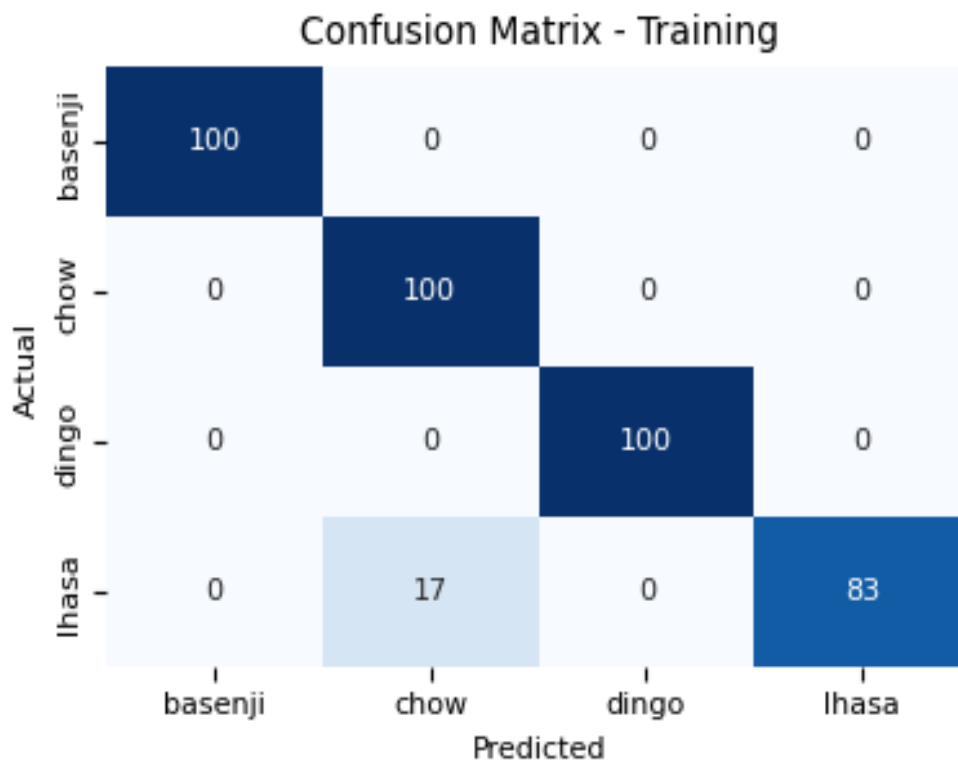
Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa akurasi meningkat secara signifikan pada 4 epoch pertama. Stabilitas kurva pelatihan dan pengujian yang berdekatan membuktikan bahwa penggunaan *Dropout* 0.6 dan *L2 Regularizer* 0.003 efektif dalam mencegah *overfitting* pada dataset berjumlah 600 citra ini.

Confusion Matrix

Untuk melihat distribusi kesalahan klasifikasi secara lebih mendalam, digunakan *Confusion Matrix*.

**Gambar 6. Confusion Matrix Testing**

Berdasarkan Gambar 6, pada confusion matrix testing terlihat bahwa terdapat 13 citra ras Lhasa yang salah diklasifikasikan sebagai ras Chow. Serta terdapat 2 citra ras Basenji yang diprediksi sebagai Dingo. Hal ini terjadi karena kemiripan tekstur bulu dan proporsi tubuh antara kedua ras tersebut. Temuan ini menjadi catatan penting untuk pengembangan model di masa depan.



Gambar 7. Confusion Matrix Training

Berdasarkan Gambar 7 pada confusion matrix training terlihat bahwa terdapat 17 citra ras Lhasa yang di prediksi sebagai Chow. Hal ini terjadi karena kemiripan tekstur bulu dan bentuk tubuh antara kedua ras tersebut ada kemiripan. Citra ras yang lain dapat diprediksi dengan benar. Hal ini membuktikan bahwa model mampu belajar memprediksi dengan baik.

KESIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan, penelitian ini menyimpulkan bahwa optimalisasi arsitektur MobileNetV2 melalui strategi fine-tuning pada 50 lapisan terakhir memberikan dampak signifikan terhadap performa klasifikasi ras anjing secara otomatis. Pendekatan ini, yang dikombinasikan dengan penerapan augmentasi data ekstensif—mencakup rotasi, shearing, dan penyesuaian skala—terbukti mampu memperkaya representasi fitur pada dataset dan meningkatkan ketahanan model terhadap variasi visual. Secara empiris, konfigurasi tersebut menghasilkan capaian akurasi pengujian sebesar 93%, yang merepresentasikan kemampuan generalisasi yang tinggi dalam mengenali pola morfologi antar ras anjing yang berbeda. Selain unggul dalam akurasi, model ini menunjukkan efisiensi komputasi yang luar biasa dengan durasi pelatihan hanya selama 4 menit. Hal ini menegaskan bahwa penggunaan teknik transfer learning yang tepat sasaran, dipadukan dengan manajemen preprocessing yang kuat, dapat menghasilkan model yang tidak hanya akurat dan andal, tetapi juga sangat efisien untuk diimplementasikan pada perangkat dengan sumber daya terbatas.

Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu menambah performa model dengan menambah kelas klasifikasi dan menguji hyperparameter dengan nilai lain untuk mencari akurasi terbaik.

DAFTAR PUSTAKA

- W. Bismi, D. Novianti, and M. Qomaruddin. (2024). "Analisis Perbandingan Klasifikasi Citra Genus Panthera dengan Pendekatan Deep learning Model MobileNet," *Jurnal Informatika dan Rekayasa Perangkat Lunak*, vol. 6, no. 1, pp. 1-9.
- P. S. Fransisca and N. Matondang. (2022). "Deteksi Citra Digital Penyakit Cacar Monyet menggunakan Algoritma Convolutional Neural Network dengan Arsitektur MobileNetV2," *JIKA*, vol. 10, no. 2, pp. 200-211.
- N. W. Kencana, R. Umar, and Murinto. (2023). "Implementasi Transfer Learning Untuk Klasifikasi Jenis Ras Ayam Menggunakan Arsitektur MobileNetV2," *JIP (Jurnal Informatika Polinema)*.
- G. W. Wiriasto et al. (2024). "Studi Pengembangan Sistem Pengenalan Individu Sapi Ternak dari Citra Muzzle Berbasis Model MobileNetV2," *J-COSINE*, vol. 8, no. 1, pp. 57-64.
- D. K. Sulistiana, M. A. D. Widyadara, and U. Mahdiyah. (2023). "Implementasi Algoritma Convolutional Neural Network (CNN) Untuk Klasifikasi Jenis Ras Kucing Dengan Metode Mobilenetv2," *INOTEK*, vol. 9, no. 1, pp. 2255-2264.
- R. A. Hermawan, I. Taufik, and Y. A. Gerhana. (2025). "Klasifikasi Citra Ras Kucing Berbasis CNN dengan Metode MobileNet-V2," *INTERNAL (Information System Journal)*, vol. 8, no. 1, pp. 70-84.
- Saputra, K. I. I., Muttaqin, M. R., & Hermanto, T. I. (2022). Klasifikasi Citra Mutu Kemasan Menggunakan Metode Convolutional Neural Network Dengan Arsitektur MobileNetV2. *Progresif: Jurnal Ilmiah Komputer*, 12(1), 613-622.
- Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L. C. (2018). MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 4510-4520.
- Syakuroh, A., Monado, F., Ariani, M., Hadi, Koriyanti, E., & Erni. (2025). Analisis Akurasi Model MobileNetV2 dalam Klasifikasi Citra X-Ray untuk Deteksi Kondisi Paru-Paru. *JoP (Journal of Physics)*, 10(3), 67-74.
- Syarif, M., Prasetyo, S., Az Zahra, E. O., Kristiawan, Y. I., & Irawan, R. D. (2025). Klasifikasi Sampah Organik dan Anorganik Menggunakan Transfer Learning MobileNetV2 pada Citra Digital. *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Bisnis (SENATIB)*, 1513-1520.
- Martins, O. O., Oosthuizen, C. C., & Desai, D. A. (2025). Evaluating unified training optimisations for MobileNetV2: Efficiency-accuracy trade-offs in fine-grained dog breed classification. *Discover Applied Sciences*, 7, 1240.

Pengembangan Sistem Pakar Diagnosis Tingkat Stres Menggunakan Metode *Certainty Factor*

Fairuz Desteah Hafsha Permanasari^{1✉}, Adi Fajaryanto Cobantoro², Rifqi Rahmatika Az-Zahra³

fairuzdesteah@gmail.com¹, adifajaryanto@umpo.ac.id², rifqirahmatika@umpo.ac.id³

¹²³ Informatics Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Muhammadiyah Ponorogo, Indonesia

Keywords: Sistem Pakar, *Certainty Factor*, DASS-42, Diagnosis Stres, Mahasiswa.

Abstrak

Dikirim: 10/07/2026

Direvisi: 31/07/2026

Diterima: 31/07/2026

Proses penyusunan skripsi sering menimbulkan stres pada mahasiswa akibat tuntutan akademik, keterbatasan waktu, dan berbagai kendala selama penelitian. Kondisi tersebut dapat memengaruhi motivasi dan konsentrasi sehingga diperlukan sistem untuk mendeteksi kondisi psikologis mahasiswa secara dini. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem pakar diagnosis tingkat stres mahasiswa menggunakan metode *Certainty Factor* (CF) di Institut Agama Islam Riyadlotul Mubajidin (IAIRM) Ngabar. Sistem dikembangkan berbasis web menggunakan framework Laravel, PHP, dan MySQL dengan basis pengetahuan yang mengacu pada instrumen *Depression Anxiety Stress Scales* (DASS-42) yang terdiri atas 42 gejala. Pengujian dilakukan menggunakan *white box testing* untuk memastikan fungsi dan alur logika sistem berjalan sesuai rancangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu menghitung nilai *Certainty Factor* berdasarkan nilai CF User dan CF Pakar serta menghasilkan diagnosis secara otomatis. Pada pengujian, kategori P01 (Stres Ringan) memperoleh nilai CF tertinggi sebesar 82,4%, sedangkan P02 (Kecemasan) sebesar 28% dan P03 (Depresi) sebesar 0%, sehingga sistem menetapkan diagnosis Stres Ringan dengan tingkat keyakinan 82,4%. Sistem yang dikembangkan dapat dimanfaatkan sebagai alat bantu deteksi dini tingkat stres mahasiswa selama proses penyusunan skripsi.

Penulis Korespondensi:

Fairuz Desteah Hafsha Permanasari

Informatics Engineering, Engineering Faculty, Universitas Muhammadiyah Ponorogo

University Address Jl. Budi Utomo No.10

Email: fairuzdesteah@gmail.com

PENDAHULUAN

Skripsi merupakan salah satu syarat utama yang harus dipenuhi oleh mahasiswa untuk menyelesaikan studi pada jenjang pendidikan tinggi (Marleni et al., 2024). Melalui skripsi, mahasiswa dituntut untuk mampu mengintegrasikan seluruh pengetahuan dan keterampilan yang telah diperoleh selama masa perkuliahan ke dalam bentuk penelitian

ilmiah yang sistematis, objektif, dan terstruktur (Reva Rahman et al., 2025). Namun, dalam praktiknya, proses penyusunan skripsi seringkali menimbulkan tekanan psikologis yang tinggi karena berbagai faktor, seperti kesulitan dalam menentukan topik penelitian, keterbatasan sumber data, bimbingan yang tidak optimal, hingga tuntutan penyelesaian tepat waktu (Widyassari et al., 2024). Secara umum, penyusunan skripsi mencakup beberapa tahapan mulai dari pemilihan topik, penyusunan proposal, pengumpulan serta analisis data, hingga penulisan laporan akhir sesuai pedoman akademik. Setiap tahapan memiliki tantangan tersendiri sehingga membutuhkan kemampuan manajemen waktu dan konsistensi yang baik. Kompleksitas proses tersebut seringkali menimbulkan kendala yang dapat berdampak pada keterlambatan penyelesaian studi mahasiswa. Pemeriksaan psikologis formal tidak selalu mudah diakses oleh mahasiswa karena keterbatasan waktu, biaya, dan ketersediaan tenaga profesional.

Namun, secara teknis penyusunan skripsi sering kali menjadi hal yang cukup berat bagi mahasiswa. Banyak mahasiswa mengalami kebingungan ketika harus menentukan topik yang sesuai (Karlina et al., 2023), mencari sumber data yang memadai, serta menyesuaikan diri dengan proses bimbingan (Wong & Li, 2023). Selain itu, adanya target waktu penyelesaian juga sering membuat mahasiswa merasa tertekan sehingga proses penyusunan skripsi terasa semakin sulit dijalani (Yunus & Rachmaningsih, 2023). Berdasarkan hasil pengamatan informal terhadap mahasiswa tingkat akhir di Institut Agama Islam Riyadlotul Mujahidin (IAIRM) Ngabar, ditemukan adanya gejala stres yang cukup signifikan selama proses penyusunan skripsi. Gejala tersebut meliputi kecemasan berlebihan, penurunan konsentrasi, kelelahan fisik dan mental, gangguan tidur, serta tekanan emosional terkait tuntutan akademik dan harapan keluarga maupun dosen. Selain itu, mahasiswa di IAIMR Ngabar memiliki tanggung jawab tambahan dalam kegiatan keagamaan dan pesantren yang padat (Wong & Li, 2023), sehingga harus membagi waktu antara kewajiban akademik dan aktivitas organisasi keagamaan (Al Yusran & Hasnawati, 2024). Kombinasi beban akademik dan non-akademik tersebut berpotensi meningkatkan stres yang berdampak pada penurunan motivasi, performa akademik, bahkan keterlambatan penyelesaian studi (Nurholis et al., 2021). Kondisi ini menunjukkan perlunya suatu mekanisme pendeteksi dini untuk membantu mahasiswa mengenali tingkat stres secara objektif sehingga dapat memperoleh penanganan yang tepat. Oleh karena itu, diperlukan sebuah solusi berbasis teknologi yang mampu membantu mahasiswa dalam mengenali tingkat stres secara mandiri dan *real-time* berdasarkan pakar.

Selain itu, penelitian oleh Nurjaman et al. (2025) yang berjudul “*Expert System in Analyzing Stress Levels in Factory Employees Using the Certainty Factor Method*” menunjukkan bahwa metode *Certainty Factor* mampu menganalisis tingkat stres karyawan dengan akurasi mencapai 85%, sehingga membuktikan bahwa pendekatan ini dapat memberikan hasil diagnosis yang cukup akurat meskipun terdapat ketidakpastian dalam gejala psikologis yang diinput (Rohman & Dinafa, 2025). Sejalan dengan itu, penelitian oleh Rahmawati et al. (2025) berjudul “*Expert System Diagnoses Mental Disorder Diseases Using The Certainty Factor Method Based On Android*” juga memperoleh akurasi sebesar 80% dari pengujian terhadap 10 sampel pasien, di mana sistem mampu mengidentifikasi kondisi psikologis berdasarkan tingkat keyakinan pakar terhadap setiap gejala (Darwisa et al., 2025). Hasil kedua penelitian tersebut menegaskan bahwa metode *Certainty Factor* memiliki kemampuan yang baik dalam mendukung diagnosis awal gangguan stres maupun kesehatan mental, sehingga sangat relevan untuk diterapkan dalam sistem pakar deteksi tingkat stres mahasiswa di lingkungan akademik.

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan, maka solusi dari penelitian ini berfokus pada perancangan sistem pakar berbasis web untuk mendiagnosa tingkat stres mahasiswa IAIMR Ngabar menggunakan metode inferensi *Certainty Factor* (Cf). Sistem ini tidak hanya akan menampilkan hasil diagnosis tingkat stres berdasarkan gejala yang dialami, tetapi juga memberikan saran penanganan berdasarkan rekomendasi ahli

psikologi dan pendekatan Islami yang relevan dengan karakter kampus. Dengan demikian, sistem ini diharapkan dapat menjadi alat bantu bagi mahasiswa untuk memahami kondisi psikologis mereka secara dini dan mengambil langkah yang tepat dalam mengelola stres selama proses akademik berlangsung.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode pengembangan sistem *Waterfall* Az-zahra et al., (2023) yang terdiri atas tahapan identifikasi masalah, pengumpulan data, analisis kebutuhan, desain, implementasi, dan pengujian. Penelitian dilaksanakan di Institut Agama Islam Riyadlotul Mujahidin (IAIRM) Ngabar dengan objek penelitian mahasiswa yang sedang menyusun skripsi. Tahap identifikasi masalah dilakukan untuk mengetahui faktor-faktor yang menyebabkan stres selama proses penyusunan skripsi. Selanjutnya, pengumpulan data dilakukan melalui observasi, wawancara dengan mahasiswa dan dua psikolog, serta studi literatur menggunakan instrumen *Depression Anxiety Stress Scales* 42 (DASS-42) sebagai dasar pembentukan basis pengetahuan sistem.

Analisis kebutuhan dilakukan untuk menentukan kebutuhan pengguna dan spesifikasi sistem. Sistem dirancang untuk dua jenis pengguna, yaitu admin yang mengelola data gejala, aturan diagnosis, dan basis pengetahuan, serta mahasiswa yang melakukan konsultasi dengan mengisi kuesioner untuk memperoleh hasil diagnosis. Sistem dikembangkan berbasis web menggunakan *PHP*, *Laravel*, dan *MySQL*, sedangkan mesin inferensi menerapkan metode *Certainty Factor* (CF) untuk menghitung tingkat keyakinan diagnosis berdasarkan gejala yang dipilih pengguna. Basis pengetahuan disusun dari hasil studi literatur dan validasi psikolog, yang terdiri atas gejala, kategori diagnosis, serta nilai CF pakar sehingga sistem mampu memberikan hasil diagnosis tingkat stres secara otomatis dan sesuai dengan pengetahuan pakar.

Tabel 1. Daftar Tingkatan Stres dan Penanganannya

No.	Kode Penyakit	Tingkatan Stres	Keterangan	Solusi Penanganan
1	P01	Stres ringan	Mahasiswa mengalami gejala stres ringan seperti mudah lelah atau kurang fokus, namun masih bisa menjalani aktivitas dengan baik.	Lakukan olahraga ringan, manajemen waktu yang baik, diskusi dengan teman, serta relaksasi secara rutin.
2	P02	Stres Sedang / Kecemasan	Mahasiswa mulai menunjukkan gangguan dalam konsentrasi, mudah cemas, atau kurang semangat dalam menyusun skripsi.	Konsultasi dengan dosen pembimbing, kurangi distraksi, buat jadwal harian, dan pertimbangkan sesi konseling awal.
3	P03	Stres Berat / Depresi	Mahasiswa mengalami gangguan psikologis yang signifikan seperti insomnia, kecemasan berlebihan, hingga kehilangan motivasi akademik.	Konsultasi segera dengan psikolog, hentikan aktivitas berlebihan, minta dukungan dari keluarga dan lingkungan, serta lakukan penanganan profesional.

Sumber : (Armalivia et al., 2024) (Marsidi, 2021)

Tabel 1 menjelaskan mengenai klasifikasi tingkatan stres mahasiswa beserta solusi penanganannya yang digunakan dalam sistem pakar diagnosis tingkat stres. Tingkatan stres dibagi menjadi tiga kategori, yaitu stres ringan (P01), stres sedang atau kecemasan (P02), dan stres berat atau depresi (P03). Masing-masing kategori memiliki karakteristik kondisi psikologis yang berbeda, mulai dari gejala ringan seperti kurang fokus hingga gangguan psikologis yang lebih serius seperti kehilangan motivasi dan insomnia. Selain itu, tabel ini juga memuat solusi penanganan yang dapat dilakukan sesuai tingkat stres

yang dialami, seperti relaksasi, manajemen waktu, konsultasi dengan dosen pembimbing, hingga penanganan profesional oleh psikolog. Tabel ini digunakan sebagai dasar dalam memberikan hasil diagnosis dan rekomendasi penanganan pada sistem.

Tabel 2. Data Gejala

No	Kode	Gejala	Kategori	CF Pakar
1	G001	Sulit tenang	P01	0.8
2	G002	Mulut kering	P01	0.6
3	G003	Tidak bisa merasakan positif	P03	0.9
4	G004	Sulit bernapas	P02	0.7
5	G005	Sulit memulai sesuatu	P02	0.7
6	G006	Reaksi berlebihan	P01	0.6
7	G007	Badan gemetar	P02	0.7
8	G008	Energi terkuras karena cemas	P02	0.7
9	G009	Khawatir berlebihan	P02	0.7
10	G010	Tidak ada harapan	P03	0.9
11	G011	Gelisah	P01	0.8
12	G012	Sulit bersantai	P01	0.8
13	G013	Sedih dan tertekan	P03	0.8
14	G014	Tidak sabar	P01	0.7
15	G015	Hampir panik	P02	0.8
16	G016	Tidak antusias	P03	0.8
17	G017	Tidak berharga	P03	0.8
18	G018	Mudah tersentuh	P01	0.6
19	G019	Detak jantung terasa	P02	0.7
20	G020	Takut tanpa alasan	P02	0.7
21	G021	Hidup tidak berarti	P03	0.9
22	G022	Tidak menikmati aktivitas	P03	0.8
23	G023	Tangan gemetar	P02	0.7
24	G024	Emosi tidak stabil	P02	0.8
25	G025	Gugup/cemas	P01	0.6
26	G026	Sulit mengambil keputusan	P02	0.7
27	G027	Merasa inferior	P03	0.8
28	G028	Kehilangan minat	P03	0.9
29	G029	Takut tanpa alasan kuat	P02	0.7
30	G030	Ketegangan otot	P01	0.6
31	G031	Kesulitan tidur	P02	0.8
32	G032	Hubungan sosial terganggu	P03	0.7
33	G033	Mudah tersinggung	P01	0.6
34	G034	Napas cepat	P02	0.7
35	G035	Sulit mengendalikan khawatir	P02	0.8
36	G036	Sensitif	P01	0.6
37	G037	Sulit konsentrasi	P02	0.8
38	G038	Menarik diri sosial	P03	0.8
39	G039	Kehilangan harapan masa depan	P03	0.9
40	G040	Takut di tempat umum	P02	0.7
41	G041	Kelelahan emosional	P03	0.8
42	G042	Tidak mampu tanggung jawab	P03	0.9

Sumber : (Pertiwi et al., 2021)(Marsidi, 2021)

Tabel 2 menjelaskan aturan (*rule*) yang digunakan sebagai dasar proses inferensi pada sistem pakar diagnosis tingkat stres mahasiswa dalam menyusun skripsi menggunakan metode *Certainty Factor* (CF). Setelah gejala-gejala yang berkaitan dengan tingkat stres diidentifikasi, setiap gejala dipetakan ke dalam kategori diagnosis

tertentu dan diberikan nilai *Certainty Factor* (CF) oleh pakar yang menunjukkan tingkat keyakinan terhadap hubungan antara gejala dan diagnosis. Pada proses diagnosis, sistem akan mencocokkan gejala yang dipilih pengguna dengan aturan yang telah ditentukan, kemudian menghitung nilai *Certainty Factor* menggunakan nilai CF User dan CF Pakar untuk memperoleh tingkat kepastian pada setiap kategori diagnosis. Selanjutnya, nilai-nilai tersebut dikombinasikan hingga diperoleh kategori dengan nilai *Certainty Factor* tertinggi sebagai hasil diagnosis. Dengan penerapan aturan tersebut, sistem mampu memberikan diagnosis tingkat stres secara otomatis beserta rekomendasi penanganan yang mengacu pada pengetahuan pakar. Seluruh aturan dan nilai CF yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh melalui studi literatur dan wawancara dengan pakar psikologi.

Tabel 3. Kisi-kisi kuesioner DASS 42

Variabel yang Diukur	Kode Gejala	Jumlah Soal	Keterangan
Stres	G001, G006, G008, G011, G012, G014, G018, G022, G027, G029, G032, G033, G035, G039	14	Hasil diagnosis Stres akan muncul apabila pengguna mengisi gejala pada kategori stres
Kecemasan	G002, G004, G007, G009, G015, G019, G020, G023, G025, G028, G030, G036, G040, G041	14	Hasil diagnosis Kecemasan akan muncul apabila pengguna mengisi gejala pada kategori kecemasan
Depresi	G003, G005, G010, G013, G016, G017, G021, G024, G026, G031, G034, G037, G038, G042	14	Hasil diagnosis Depresi akan muncul apabila pengguna mengisi gejala pada kategori depresi

Sumber : (Pertiwi et al., 2021)(Marsidi, 2021)

Tabel 3 menunjukkan kisi-kisi kuesioner DASS-42 yang digunakan sebagai dasar pengelompokan gejala dalam sistem diagnosis. Instrumen ini terdiri atas tiga variabel, yaitu stres, kecemasan, dan depresi, yang masing-masing memiliki 14 gejala dengan kode G001–G042. Setiap gejala dikelompokkan sesuai kategorinya untuk mempermudah proses identifikasi dan perhitungan menggunakan metode *Certainty Factor* (CF). Hasil diagnosis ditentukan berdasarkan kelompok gejala yang dipilih pengguna, sehingga sistem dapat mengidentifikasi kondisi stres, kecemasan, atau depresi beserta tingkat keyakinannya.

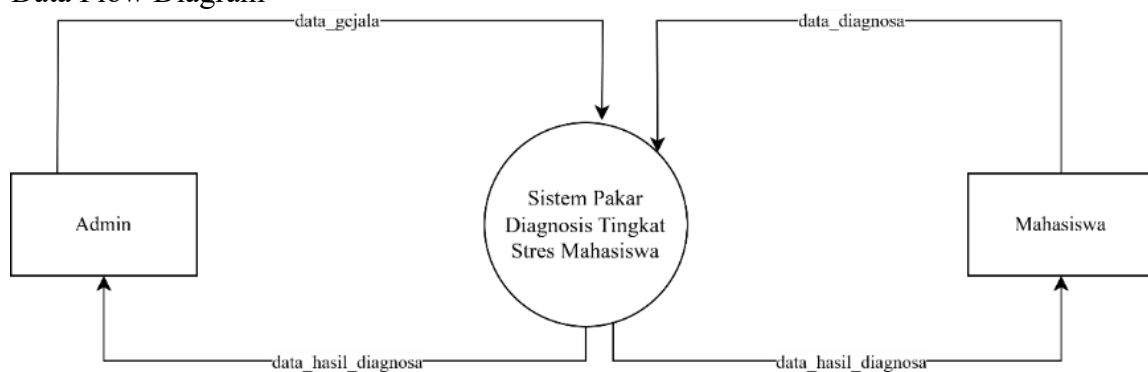
Tahap desain dilakukan dengan merancang arsitektur sistem, basis data, dan antarmuka pengguna. Perancangan sistem menggunakan *Use Case Diagram*, *Data Flow Diagram* (DFD) untuk menggambarkan hubungan antaraktor, aliran data, dan struktur basis data. Pada tahap ini juga dirancang mekanisme perhitungan menggunakan metode *Certainty Factor*, di mana setiap jawaban pengguna dikonversi menjadi nilai CF *User* dan dipadukan dengan CF Pakar untuk menghasilkan tingkat keyakinan diagnosis. *Usecase Diagram*.



Gambar 1. Usecase Diagram

Gambar 1. menunjukkan *Use Case Diagram* yang menggambarkan interaksi antara dua aktor utama, yaitu Admin dan Mahasiswa, dengan sistem diagnosis. Admin memiliki akses penuh untuk mengelola data, termasuk login, mengelola data gejala, data stres, dan data diagnosa melalui fitur tambah, edit, dan hapus, serta dapat menampilkan hasil diagnosa mahasiswa. Sementara itu, Mahasiswa berperan sebagai pengguna yang mengisi kuisoner untuk mendapatkan hasil diagnosa stres yang ditampilkan oleh sistem. Diagram ini memperlihatkan alur fungsi utama yang saling terhubung, menggambarkan batasan sistem serta hak akses masing-masing aktor secara jelas dan terstruktur (Pramudya et al., 2025).

Data Flow Diagram



Gambar 2. Data Flow Diagram

Gambar 2 menunjukkan diagram konteks sistem pakar diagnosis tingkat stres mahasiswa. Sistem melibatkan dua entitas utama, yaitu Admin dan Mahasiswa. Admin bertugas mengelola data gejala dan data diagnosis yang digunakan sebagai basis pengetahuan sistem, sedangkan mahasiswa melakukan proses konsultasi dengan memasukkan gejala yang dialami. Berdasarkan data tersebut, sistem mengolah informasi menggunakan metode Certainty Factor dan menghasilkan data hasil diagnosis yang ditampilkan kepada mahasiswa serta dapat dikelola oleh admin.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari rancang bangun aplikasi sistem pakar diagnosis tingkat stres mahasiswa dalam menyusun skripsi menggunakan metode *Certainty Factor* (CF) menunjukkan bahwa sistem berhasil diimplementasikan sesuai dengan rancangan yang telah disusun

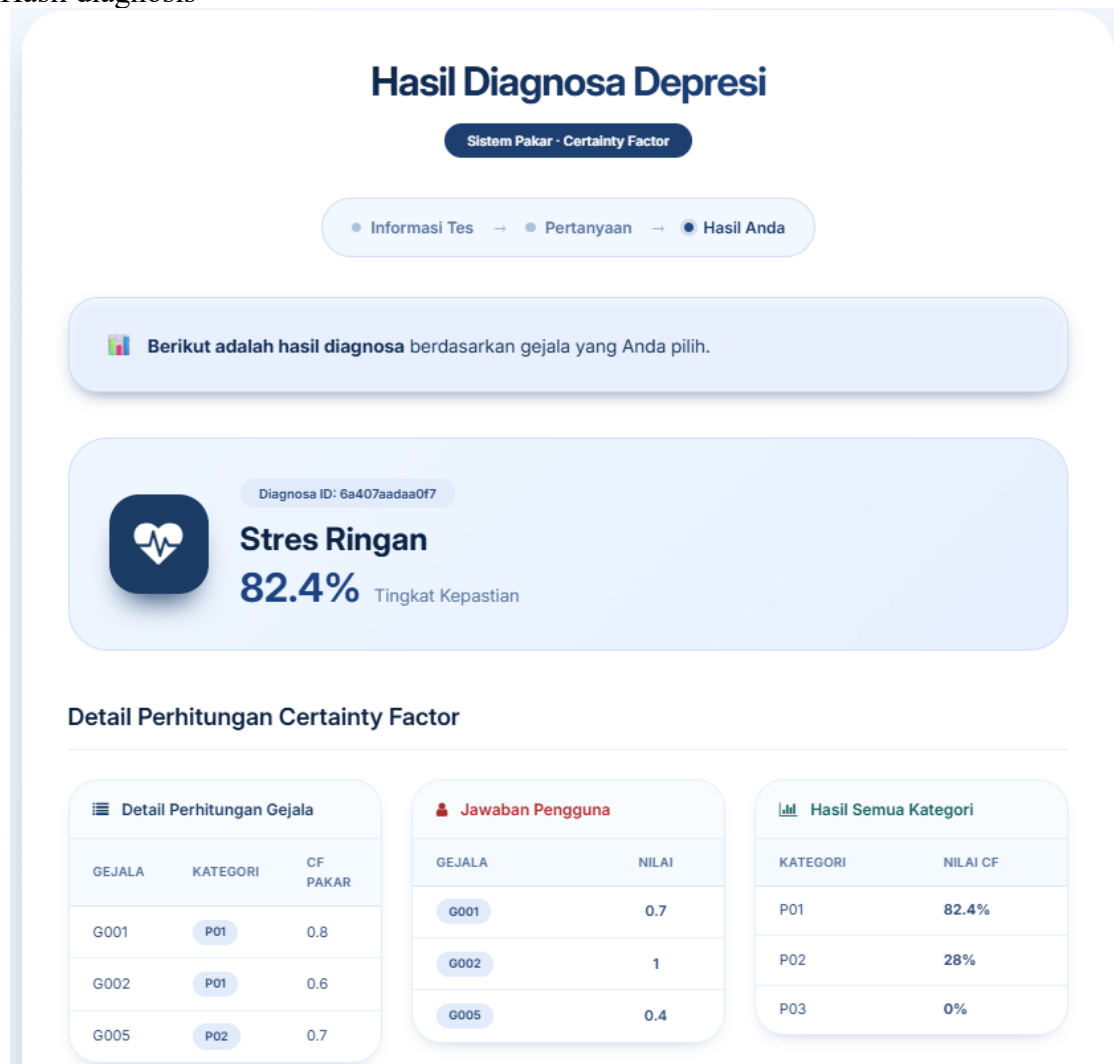
pada tahap analisis dan perancangan. Implementasi merupakan tahap penerapan desain sistem ke dalam bentuk perangkat lunak yang dapat dijalankan oleh komputer. Pada tahap ini, metode *Certainty Factor* diterapkan untuk mengolah data gejala yang dipilih oleh pengguna sehingga menghasilkan nilai tingkat keyakinan terhadap kondisi stres yang dialami mahasiswa.

Aplikasi dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman dan perangkat pengembangan yang telah ditetapkan sehingga mampu menjalankan seluruh fungsi utama sistem, mulai dari proses konsultasi, pengolahan data gejala, perhitungan nilai *Certainty Factor*, hingga penyajian hasil diagnosis kepada pengguna. Dengan demikian, aplikasi dapat digunakan sebagai media konsultasi awal untuk membantu mahasiswa mengetahui tingkat stres yang dialaminya selama proses penyusunan skripsi.

Implementasi Sistem

Implementasi sistem menjelaskan proses penerapan seluruh fitur yang telah dirancang pada aplikasi sistem pakar diagnosis tingkat stres mahasiswa. Setiap menu dan fitur memiliki fungsi yang saling terintegrasi sehingga mampu mendukung proses diagnosis secara sistematis. Pengguna terlebih dahulu memilih gejala yang dirasakan berdasarkan instrumen DASS-42, kemudian sistem mengolah setiap jawaban menggunakan metode *Certainty Factor* dan menampilkan hasil diagnosis beserta tingkat keyakinannya.

Hasil diagnosis



Gambar 3. Hasil Diagnosis

Gambar 3. menampilkan halaman hasil pada sistem Mental Health System yang menunjukkan diagnosa depresi berdasarkan gejala yang telah dipilih pengguna. Pada

tampilan tersebut terlihat bahwa sistem menggunakan metode *Certainty Factor* untuk menghitung tingkat keyakinan, dengan hasil akhir menunjukkan kategori “Stres Ringan” sebesar 82,4% tingkat kepastian. Informasi ini disajikan secara ringkas dan jelas sebagai kesimpulan dari proses konsultasi yang telah dilakukan pengguna.

Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan menggunakan *white box* testing dan pengujian metode *Certainty Factor* (CF). *White box* testing bertujuan untuk memastikan alur logika program, mulai dari proses input gejala, perhitungan nilai CF, hingga penyajian hasil diagnosis, berjalan sesuai dengan rancangan sistem tanpa kesalahan logika. Sementara itu, pengujian metode *Certainty Factor* dilakukan untuk memverifikasi ketepatan proses perhitungan nilai CF berdasarkan gejala yang dipilih pengguna menggunakan rumus $CF(H,E) = CF_{User} \times CF_{Pakar}$ dan proses kombinasi CFcombine hingga menghasilkan diagnosis akhir. Pengujian dilakukan menggunakan data kuesioner DASS-42 dari 30 mahasiswa IAIRM Ngabar untuk memastikan hasil diagnosis yang dihasilkan sistem sesuai dengan basis pengetahuan yang telah ditetapkan.

Pengujian Whitebox

Pengujian *white box* dilakukan untuk memastikan bahwa alur logika program dalam sistem pendukung keputusan berjalan sesuai dengan struktur kode yang telah dibangun. Fokus utama pengujian ini adalah pada integrasi fungsionalitas sistem, khususnya pada proses diagnosis penyakit berdasarkan data gejala yang dimasukkan oleh pengguna. Pada sistem ini, pengujian *white box* mencakup pemeriksaan alur eksekusi dari fungsi diagnosis, termasuk bagaimana sistem mengambil data gejala, mencocokkannya dengan aturan yang ada, hingga menampilkan hasil diagnosa pada antarmuka (Dwi Agustin et al., 2023). Selain itu, pengujian ini juga melibatkan verifikasi integrasi data gejala, data penyakit, dan hasil diagnosis yang tersimpan dalam basis data. Dengan pendekatan ini, setiap jalur eksekusi diuji untuk memastikan tidak ada kesalahan logika atau kekeliruan dalam proses pengambilan keputusan, sehingga sistem dapat berjalan secara konsisten dan dapat diandalkan (Dwi Agustin et al., 2023).

Tabel 4. Identifikasi dan Kasus Uji Pengujian Integrasi pada tb_diagnosis

No.	Class	Method	Keterangan
1	tb_diagnosis	createGejala()	Untuk menangkap dan menyimpan input gejala yang dipilih oleh pengguna sebelum dilakukan proses pencocokan dengan <i>rule</i> .
2		setRule()	Untuk menghitung nilai <i>Certainty Factor</i> berdasarkan gejala yang dipilih dan bobot aturan dalam basis pengetahuan.
3		getDiagnosis()	Untuk menentukan tingkat stres berdasarkan nilai CF tertinggi yang diperoleh dari hasil perhitungan
4		showResult()	Untuk menampilkan hasil diagnosis tingkat stres beserta nilai persentase keyakinan kepada pengguna.

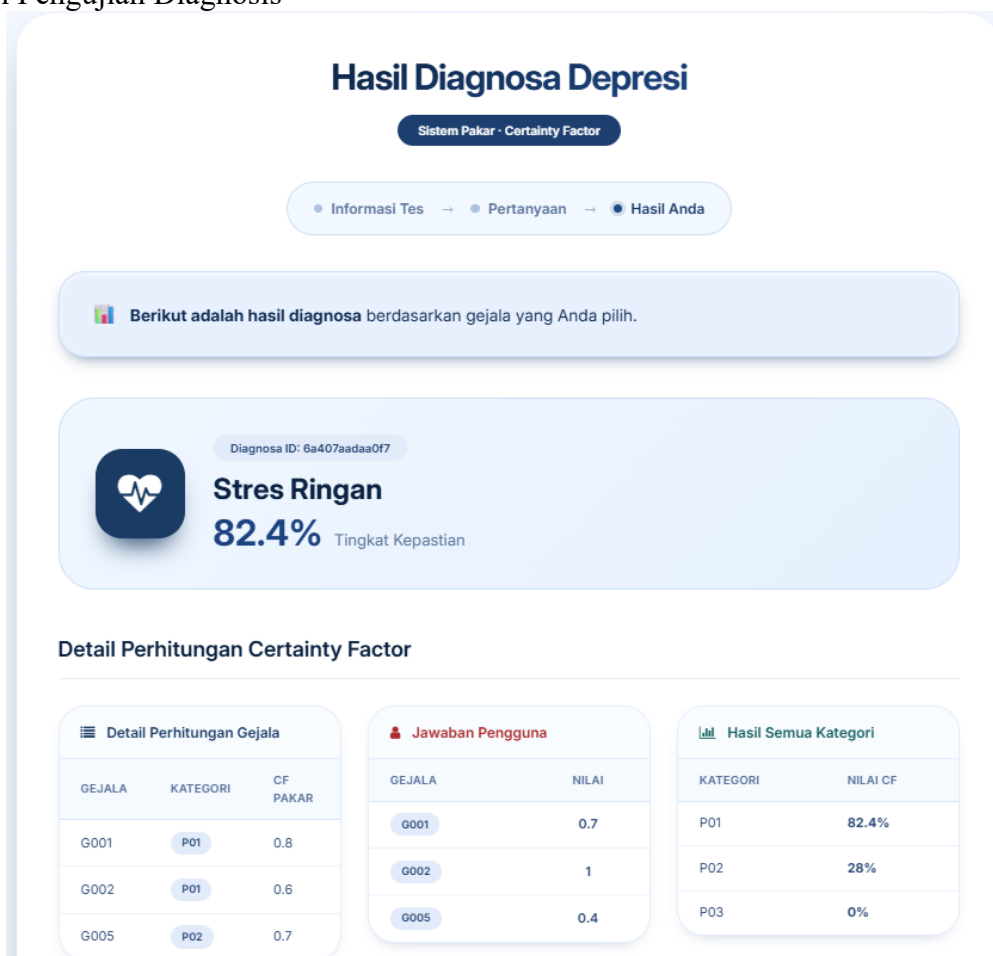
Berdasarkan hasil identifikasi pada Tabel 4, pengujian integrasi dilakukan untuk memastikan bahwa setiap metode pada modul tb_diagnosis dapat saling berinteraksi dan bekerja sesuai dengan fungsinya. Hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 5 menunjukkan bahwa seluruh proses, mulai dari penerimaan input gejala, perhitungan nilai *Certainty Factor*, penentuan hasil diagnosis, hingga penampilan hasil kepada pengguna, berjalan sesuai dengan skenario uji yang telah ditetapkan. Dengan demikian, integrasi antar metode pada sistem telah berfungsi dengan baik sehingga sistem mampu menghasilkan diagnosis yang tepat, konsisten, dan sesuai dengan rancangan yang telah dibuat.

Tabel 5. Hasil Pengujian Integrasi tb_diagnosis

Nama Uji	Keterangan
<i>Method dari class</i>	<i>createGejala()</i>
Input data gejala	Input data gejala: G001 (Sulit tenang) - Sering G002 (Mulut terasa kering) – Sangat Sering G005 (Sulit memulai sesuatu) – Kadang-Kadang
<i>Method dari class</i>	<i>setRule()</i>
Output Rule	Output Perhitungan CF: CF kombinasi = 0.824
<i>Method dari class</i>	<i>getDiagnosis()</i>
Output Diagnosis	Output Diagnosis: Stres Ringan
<i>Method dari class</i>	<i>showResult()</i>
Output Tampilan	Output Tampilan: Stres Ringan (82.4%), disertai saran penanganan
<i>Expected Result</i>	Sistem dapat memproses gejala dan menampilkan hasil diagnosis tingkat stress secara tepat dan cepat
<i>Result</i>	Sistem berhasil menampilkan diagnosis Stres Berat/Depresi dengan tingkat kepastian 82.4%
Status	Valid

Tabel 5 menunjukkan bahwa hasil pengujian integrasi pada modul tb_diagnosis, seluruh fungsi dalam proses diagnosis berhasil berjalan sesuai dengan rancangan sistem. Metode *createGejala()* mampu menerima input gejala dari pengguna, *setRule()* berhasil menghitung nilai *Certainty Factor* (CF) dengan nilai kombinasi sebesar 0,824, *getDiagnosis()* menentukan hasil diagnosis Stres Ringan, dan *showResult()* menampilkan hasil diagnosis beserta persentase tingkat keyakinan sebesar 82,4% serta saran penanganan. Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh proses integrasi antar metode telah berfungsi dengan baik dan sistem dinyatakan valid karena mampu menghasilkan diagnosis sesuai dengan aturan yang telah ditetapkan.

Hasil Pengujian Diagnosis

**Gambar 4. Hasil Pengujian Diagnosis**

Berdasarkan gambar 4 hasil diagnosis dan detail perhitungan *Certainty Factor* (CF), sistem melakukan proses diagnosis dengan mengombinasikan nilai bobot gejala dari pakar dan nilai keyakinan pengguna untuk setiap gejala yang dipilih menggunakan metode *Certainty Factor* hingga diperoleh nilai CF akhir pada setiap kategori diagnosis. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kategori P01 memperoleh nilai *Certainty Factor* tertinggi sebesar 82,4%, sedangkan kategori P02 memperoleh nilai 28% dan kategori P03 sebesar 0%, sehingga sistem menetapkan pengguna berada pada kategori Stres Ringan dengan tingkat kepastian sebesar 82,4%. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian oleh Kusumah et al., (2022) yang menunjukkan bahwa metode *Certainty Factor* efektif diterapkan untuk membantu diagnosis tingkat stres mahasiswa berdasarkan kombinasi bobot pakar dan tingkat keyakinan pengguna, namun penelitian tersebut belum menyajikan evaluasi kuantitatif berupa tingkat akurasi atau persentase kesesuaian hasil diagnosis. Penelitian lain yang dilakukan oleh Sari, (2023) juga menunjukkan bahwa penerapan metode *Certainty Factor* pada aplikasi pengukuran tingkat stres mahasiswa tingkat akhir memperoleh tingkat kesesuaian antara hasil sistem dan pakar sebesar 90%, sehingga metode ini dinilai mampu memberikan hasil diagnosis yang akurat dalam mengidentifikasi tingkat stres mahasiswa. Sementara itu, penelitian ini melengkapi hasil tersebut dengan menyajikan rincian proses perhitungan *Certainty Factor* beserta nilai kepastian pada setiap kategori diagnosis sehingga proses diagnosis lebih transparan, mudah dipahami, dan dapat digunakan sebagai dasar validasi hasil diagnosis. Selain menampilkan hasil diagnosis, sistem juga menyajikan rincian perhitungan gejala, jawaban pengguna, dan nilai *Certainty Factor* pada setiap kategori sehingga proses diagnosis dapat dipahami secara jelas serta sesuai dengan basis pengetahuan yang telah ditentukan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian, sistem pakar diagnosis tingkat stres mahasiswa dalam penyusunan skripsi menggunakan metode *Certainty Factor* (CF) berhasil dikembangkan dan mampu melakukan diagnosis berdasarkan gejala yang dipilih pengguna. Hasil pengujian *white box* menunjukkan bahwa seluruh fungsi sistem berjalan sesuai dengan rancangan tanpa ditemukan kesalahan logika. Proses diagnosis dilakukan dengan mengombinasikan nilai CF User dan CF Pakar pada setiap gejala yang dipilih, kemudian nilai *Certainty Factor* setiap gejala dikombinasikan menggunakan rumus CFcombine hingga diperoleh nilai CF akhir pada masing-masing kategori diagnosis. Pada pengujian yang dilakukan, kategori P01 (Stres Ringan) memperoleh nilai *Certainty Factor* tertinggi sebesar 82,4%, sedangkan kategori P02 (Kecemasan) memperoleh 28% dan kategori P03 (Depresi) memperoleh 0%. Berdasarkan hasil tersebut, sistem menetapkan pengguna berada pada kategori Stres Ringan dengan tingkat keyakinan sebesar 82,4%. Dengan demikian, sistem yang dibangun mampu memberikan hasil diagnosis beserta tingkat keyakinannya secara tepat dan transparan, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai alat bantu deteksi dini tingkat stres mahasiswa selama proses penyusunan skripsi.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, peneliti memberikan saran agar sistem pakar ini dapat dikembangkan dengan menambahkan lebih banyak data dan aturan dari pakar sehingga hasil diagnosis menjadi lebih akurat. Selain itu, penelitian selanjutnya diharapkan dapat menggunakan jumlah responden yang lebih banyak serta mengembangkan sistem dengan metode lain sebagai pembanding untuk meningkatkan kinerja dan keakuratan diagnosis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Agama Islam Riyadlotul Mujahidin (IAIRM) Ngabar yang telah memberikan izin dan dukungan selama pelaksanaan penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para pakar, yaitu Afitria Rizkiana, M.Psi., Psikolog dan Salsabila Nozul Nathaneila, Psikolog, atas masukan dan validasi yang diberikan dalam penyusunan basis pengetahuan sistem. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh mahasiswa IAIMR Ngabar yang telah berpartisipasi sebagai responden penelitian, serta kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, dan kontribusi sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Yusran, Y. A., & Hasnawati, H. (2024). Sistem Pakar Mendeteksi Tingkat Stres Mahasiswa Dalam Penyusunan Skripsi. *Jurnal Sintaks Logika*, 4(1), 42–50. <https://doi.org/10.31850/jsilog.v4i1.2786>
- Armalivia, S., Rahmat, M. A., Widyanti, P. C. A., & Nuraisyah, S. (2024). Early diagnosis of mental health disorders of final-year students of Almarisah Madani University using the forward chaining method. *INFOTECH: Jurnal Informatika Teknologi*, 5(2), 258–266. <https://doi.org/10.37373/infotech.v5i2.1402>
- Az-zahra, R. R., Ramadhani, T. A., & Nuryadin, R. A. (2023). Perancangan Sistem Informasi Geografis Pemetaan Layanan Kesehatan Kabupaten Ponorogo Berbasis Website “E-HEALTHY.” *Jurnal Riset Dan Aplikasi Mahasiswa Informatika (JRAMI)*, 04(04), 767–774. <https://doi.org/10.30998/jrami.v4i04.8670>
- Darwisa, H., Rahmasaria, P. A., & Irawatia. (2025). Expert System Diagnoses Mental Disorder Diseases Using The *Certainty Factor* Method Based On Android. *Buletin Sistem Informasi Dan Teknologi Islam*, 6(2), 47–57.
- Dwi Agustin, N., Fajaryanto Cobantoro, A., Bhanu Setyawan, M., & Nurfitri, K. (2023). Penerapan Algoritma Linear Search Di Aplikasi Secondhand. *Jurnal Ilmiah NERO*, 8(2), 2023. <https://doi.org/10.21107/nero.v8i2.21089>
- Karlina, E., Sutja, A., & Yusra, A. (2023). Stress Symptoms of Students Who Complete Late Thesis at The Faculty of Teacher and Education Jambi University. *SUJANA (Journal of Education and Learning Review)*, 2(1), 1–16.
- Kusumah, I. M. Y., Apriyanti, L., & Rafki, P. R. (2022). Sistem Pakar Diagnosa Stress Pada Mahasiswa Tingkat Akhir Dengan Menggunakan Metode *Certainty Factor* Berbasis Android(Studi Kasus: Mahasiswa Tingkat Akhir STMIK Bandung). *Jurnal Teknologi Informasi Dan Komunikasi*, 11(1), 9–18.
- Marleni, L., Zaim, M., & Thahar, H. E. (2024). Sikap Ilmiah Mahasiswa dalam Melakukan Penelitian: Investigasi pada Tugas Akhir. *Journal of Education Research*, 5(1), 1–8. <https://doi.org/10.37985/jer.v5i1.814>
- Marsidi, S. R. (2021). Identification Of Stress, Anxiety, And Depression Levels Of Students In Preparation For The Exit Exam Competency Test. *Journal of Vocational Health Studies*, 05, 87–93. <https://doi.org/10.20473/jvhs.V5.I2.2021.87-93>
- Nurholis, N., Fauziah, F., & Natashia, N. D. (2021). Perpaduan Metode *Certainty Factor* dan Forward Chaining untuk Menentukan Tingkat Stres Mahasiswa Tingkat Akhir Berbasis Android. *Jurnal JTIK (Jurnal Teknologi Informasi Dan Komunikasi)*, 5(3), 267. <https://doi.org/10.35870/jtik.v5i3.218>
- Pertiwi, S. T., Moeliono, M. F., & Kendhawati, L. (2021). Depresi, Kecemasan, dan Stres Remaja selama Pandemi Covid-19. *Jurnal AL-AZHAR INDONESIA SERI HUMANIORA*, 6(2), 72–77. <https://doi.org/10.36722/sh.v>
- Pramudya, H., Cobantoro, A. F., & Karaman, J. (2025). Implementasi Algoritma Selection Sort Dalam Sistem Absensi Siswa Untuk Pengurutan Keaktifan

- Berdasarkan Kehadiran (Studi Kasus : Sma Negeri 1 Nawangan Pacitan). *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 9(2), 2887–2895.
- Reva Rahman, Risqy, & Hali, A. (2025). Integrasi AI dalam penulisan karya ilmiah dan dampaknya terhadap kemampuan berpikir kritis. *Pendas : Jurnal Ilmiah Pendidikan Dasar*, 10(02), 301–316. <https://doi.org/10.15797/concom.2019..23.009>
- Rohman, A., & Dinafa, A. S. (2025). Expert System in Analyzing Stress Levels in Factory Employees Using the *Certainty Factor* Method. *Jurnal Inovtek Polbeng - Seri Informatika*, 10(3), 1381–1390.
- Sari, Y. (2023). Aplikasi Pengukuran Tingkat Stres Pada Mahasiswa Tingkat Akhir Dengan Metode *Certainty Factor*. *Jurnal Teknik Indonesia*, 2(1), 14–28.
- Widyassari, A. P., Carreon, J. R., Wahyusari, R., Tinggi, S., & Roggolawe, T. (2024). Systematic Review Of Expert System For Detecting Mental Health Disorders In College Students. *Jurnal Teknik Informatika (JUTIF)*, 5(6), 1737–1746.
- Wong, G. K. W., & Li, S. Y. K. (2023). An Exploratory Study of Helping Undergraduate Students Solve Literature Review Problems Using Litstudy and NLP. *Education Sciences*, 13(987), 1–19.
- Yunus, M., & Rachmaningsih, D. M. (2023). Students ' Conceptions of Challenges in Writing Thesis : A Case of Postgraduate Context. *AL-ISHLAH: Jurnal Pendidikan*, 15(1), 5627–5638. <https://doi.org/10.35445/alishlah.v15i4.4095>