P-ISSN: 1410-7783
E-ISSN: 2580-7110

Jurnal Saintis

Volume 26 Nomor 02, Oktober 2026 : 61-136

Karakteristik Beton Berpori dengan Pemanfaatan Limbah Serat Bambu sebagai Material Ramah Lingkungan 61 – 70
Reza Wahyu Rivando, Shanti Wahyuni Megasari*, Virgo Trisep Haris

Analisis Tingkat Kepuasan Pelanggan Layanan SPAM Karang Jaya di Kec. Karang Jaya Kabupaten Musi Rawas Utara 71 – 80
Nanda Prayoga*, Radha Krisnamurti Sigamura

Evaluasi Pencapaian Standar Pelayanan Minimum *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta sebagai Upaya Peningkatan Pelayanan Transportasi Umum 81 – 94
Ani Tjitra Handayani*, Agus Erwansyah

Pengaruh Porositas Beton Agregat Batu Apung Terhadap Kuat Tekan dan Permeabilitas Menggunakan Analisa X-ray CT 95 – 108
Ivan Sandi Darma*, Dimas Agustiana Putra, Husnah

Komparasi Produktivitas Tenaga Kerja Pada Pekerjaan Kolom Menggunakan Metode *Time Study* Terhadap Permen PUPR No. 8 Tahun 2023 109 – 118
Yudi Fitra*, Sapitri

Effect of Shear Wall Configuration on Torsional Response and Seismic Performance of Irregular Buildings 119-136
Ayu Sinta Aprilia*, Andi S., Rahmat Kurniawan, Kirtinanda P., Siska Apriwelni, Ahmad Auliadi Yufrizal

Jurnal Saintis	Vol. 26	No. 02	Halaman 61-136	Pekanbaru Oktober 2026	P-ISSN :1410-7783 E-ISSN : 2580-7110

P-ISSN: 1410-7783
E-ISSN: 2580-7110

Jurnal Saintis

Volume 26 Nomor 02, Oktober 2026 : 61-136

Karakteristik Beton Berpori dengan Pemanfaatan Limbah Serat Bambu sebagai Material Ramah Lingkungan 61 – 70
Reza Wahyu Rivando, Shanti Wahyuni Megasari*, Virgo Trisep Haris

Analisis Tingkat Kepuasan Pelanggan Layanan SPAM Karang Jaya di Kec. Karang Jaya Kabupaten Musi Rawas Utara 71 – 80
Nanda Prayoga*, Radha Krisnamurti Sigamura

Evaluasi Pencapaian Standar Pelayanan Minimum *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta sebagai Upaya Peningkatan Pelayanan Transportasi Umum 81 – 94
Ani Tjitra Handayani*, Agus Erwansyah

Pengaruh Porositas Beton Agregat Batu Apung Terhadap Kuat Tekan dan Permeabilitas Menggunakan Analisa X-ray CT 95 – 108
Ivan Sandi Darma*, Dimas Agustiana Putra, Husnah

Komparasi Produktivitas Tenaga Kerja Pada Pekerjaan Kolom Menggunakan Metode *Time Study* Terhadap Permen PUPR No. 8 Tahun 2023 109 – 118
Yudi Fitra*, Sapitri

Effect of Shear Wall Configuration on Torsional Response and Seismic Performance of Irregular Buildings 119-136
Ayu Sinta Aprilia*, Andi S., Rahmat Kurniawan, Kirtinanda P., Siska Apriwelni, Ahmad Auliadi Yufrizal

Jurnal Saintis	Vol. 26	No. 02	Halaman 61-136	Pekanbaru Oktober 2026	P-ISSN :1410-7783 E-ISSN : 2580-7110

This page is intentionally blank

Jurnal Saintis

ISSN (Print) : 1410-7783
ISSN (Online) : 2580-7110

Focus and Scope

Saintis is devoted to research on civil engineering-related fields, including geotechnics, transportation, structures, water resources and other topics related to civil engineering.

Subject areas include (but are by no means limited to):

- Structural mechanics and engineering
- Structural design and construction management
- Structural analysis and computational mechanics
- Construction technology and implementation
- Construction materials design and engineering
- Highway and transport engineering
- Bridge and tunnel engineering
- Municipal and urban engineering
- Coastal, harbour and offshore engineering
- Geotechnical and earthquake engineering
- Engineering for water, waste, energy, and environmental applications
- Hydraulic engineering and fluid mechanics
- Surveying, monitoring, and control systems in construction
- Health and safety in a civil engineering setting

Saintis is expected to publish research result based on experiment, qualitative and quantitative method as well as literature study which may develop the quality of research and new invention in civil engineering field.

Address of Secretariat and Paper Submission
Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Universitas Islam Riau
Jl. Kaharuddin Nasution, No. 113, Pekanbaru, Riau 28284
Email: saintis@journal.uir.ac.id

Editor-in-Chief
Dr. Ir. Elizar, ST., MT.

Journal Manager
Ir. Sapitri, ST., MT

Editorial Member
Ferly Oktavia, ST., MT
Mahadi Kurniawan, ST., MT
Sy. Sarah Alawiah, ST., MT
Ir. Sapitri, ST., MT
Nugraha Bintang Wirawan, ST., MT
Widya Apriani, ST., MT
Azaria Andreas, ST., MT

Copyeditor:
Qorina Adhisty, ST.

This page is intentionally blank

Jurnal Saintis

ISSN (Print) : 1410-7783
ISSN (Online) : 2580-7110

PREFACE

For over 15 years, *Jurnal Saintis* has been published various Scientific and engineering research papers in Civil, Planning and Environmental Engineering. Our mission has always focused on bridging the knowledge of academia/researcher and delivering innovation to the world. We have a strong commitment to strengthening the ties between academia and society.

In October 2026, *Jurnal Saintis* published Volume 26, Number 02 to show our commitment to contributing to Civil, Planning and Environmental Engineering. We collaborate with authors and reviewers from various universities to ensure that we deliver high-quality publications. We also updated our system to cope with the latest publishing developments.

As an Editor In-Chief of *Jurnal Saintis*, I would like to express my highest appreciation to author, reviewer and editor that has contributed to the development of *Jurnal Saintis*. I openly invite academia, researchers, and engineering societies to use *Jurnal Saintis* as a dissemination tool for research and to propose solutions for many engineering problems. Our journal is accessible to readers worldwide and has been indexed by DOAJ since August 2019. Jurnal Saintis has also been accredited by the Ministry of Research and Technology / National Research and Innovation Agency of the Republic of Indonesia, as 3th rank, SINTA (Science and Technology Index) S3, No.355/DST/D.D1/HM.01.01/2026, since July 2026.

Thank you very much for your cooperation. We would like to invite you to contribute to our further publications.

Regards,

Editor-in-Chief.

This page is intentionally blank

Jurnal Saintis

ISSN (Print) : 1410-7783
ISSN (Online) : 2580-7110

VOLUME 26, NO. 02, OKTOBER 2026 : 61 – 136

LIST OF CONTENTS

Karakteristik Beton Berpori dengan Pemanfaatan Limbah Serat Bambu sebagai Material Ramah Lingkungan 61 – 70
Reza Wahyu Rivando, Shanti Wahyuni Megasari*, Virgo Trisep Haris

Analisis Tingkat Kepuasan Pelanggan Layanan SPAM Karang Jaya di Kec. Karang Jaya Kabupaten Musi Rawas Utara 71 – 80
Nanda Prayoga*, Radha Krisnamurti Sigamura

Evaluasi Pencapaian Standar Pelayanan Minimum *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta sebagai Upaya Peningkatan Pelayanan Transportasi Umum 81 – 94
Ani Tjitra Handayani*, Agus Erwansyah

Pengaruh Porositas Beton Agregat Batu Apung Terhadap Kuat Tekan dan Permeabilitas Menggunakan Analisa X-ray CT 95 – 108
Ivan Sandi Darma*, Dimas Agustiana Putra, Husnah

Komparasi Produktivitas Tenaga Kerja Pada Pekerjaan Kolom Menggunakan Metode *Time Study* Terhadap Permen PUPR No. 8 Tahun 2023 109 – 118
Yudi Fitra*, Sapitri

Effect of Shear Wall Configuration on Torsional Response and Seismic Performance of Irregular Buildings 119 – 136
Ayu Sinta Aprilia*, Andi S., Rahmat Kurniawan, Kirtinanda P., Siska Apriwelni, Ahmad Auliadi Yufrizal

This page is intentionally blank

Jurnal Saintis

ISSN (Print) : 1410-7783
ISSN (Online) : 2580-7110

AUTHOR GUIDELINE

1. Paper Title

Include a separate title page with:

1) Title (maximum 85 characters)
2) All authors names and full addresses
3) Corresponding author's postal, Fax, Phone number and email address
4) A minimum of four keywords describing the manuscript
5) Word count of the full article, excluding references and figure legends

2. Abstract

1) Information abstract for research article, It should set out briefly and clearly the main objectives and results/conclusions of the work; it should give the reader a clear idea of what has been achieved
2) Indicative abstract for review article/short communication includes review of the research/technology in a period of comprehensive development or in the current level of development, and future prospects briefly.
3) The length of the abstract words.
4) Avoid abbreviations and references in this section.

3. Introduction

Introduction provides adequate background or context (problem and its significance) of the study. The subject should not be written extensively. It is expected that rational or purpose of the study (gap analysis), the objective in general and specific, and hypothesis (if any) should be expressed clearly. Present a clear "state of the art" of the subject, which discussed literature and theoretical concepts behind it. A concise general background may be included in the article.

Divide your article into several headings: Introduction, Method, Results and Discussion, and Conclusions, References, and Appendices (if necessary). You must follow how headings are written in this template by selecting Heading 1 in the available styles. Authors must guarantee that their article is free from plagiarism. Article that has been submitted or published elsewhere cannot be submitted to *Jurnal Saintis*. Please read our policy on the issue.

4. Section Heading

The way chapter titles and other headings are displayed in these instructions, is meant to be followed in your manuscript. *Second level heading* must be written boldface and italics using upper and lower cases with 10 pt and Cambria Italic-Bold. You must set your second level heading left aligned. *Third level heading* follows 10 pt Cambria Italic. Avoid the use of headings that have more than three levels.

Use reference manager such as Mendeley or EndNote in citing works of others. Use the **IEEE style**. Citations put in the beginning of a sentence are also written using numbers within brackets [ ]. *Jurnal Saintis* highly recommends the use of Mendeley in preparing references. EndNote is preferred since Journal Saintis prepared guidance using EndNote as a referencing tool.

5. Method

Methods section provides sufficient details to allow the work to be reproduced by an independent researcher. Methods that are already published should be summarized and indicated by a reference. If quoting directly from a previously published method, use quotation marks and also cite the source. Any modifications to existing methods should also be described. Indicate the participants observed, including demographic data, number of respondents, the rationale of respondents selection, etc. Describe the design of the experiment, such as the experiment procedures, surveys, interviews, observation characteristics, etc. Write the complete research procedure. Be sure that explanations made in the article will allow other researchers reproduce the work, or make future work out of it.

6. Footnote

It is requested not to us any of footnotes. All references should be in the References. Explanations should be preferably included in the text.

7. Equation

Equations must be presented using consecutive numbers starting with (1). Continue the numbering until the end of the article including appendices. The number must be made inside parenthesis and right aligned. You also need to put spacing before and after an equation.

$$\alpha = \frac{\vec{S}}{J_S(T = \text{const.}) \cdot \left(P \cdot \left(\frac{\vec{S}}{S_C} \right)^m + (1 - P) \right)} \qquad (1)$$

Nomenclature for your equations must be presented after the References section of your article.

8. Symbol and Unit

Greek symbols and special characters often undergo formatting changes and get corrupted or lost during preparation of a manuscript for publication. To ensure that all special characters used are embedded in the text, these special characters should be inserted as a symbol but should not be a result of any format styling (Symbol font face) otherwise they will be lost during conversion to PDF/XML2. Authors are encouraged to use SI units, but use of SI units is not mandatory if other units are more appropriate.

9. Tables

Title of a table, must be put above the table. In writing the title of a table, you must capitalize each word. All tables and figures must be consecutively numbered. Figures must be made center-align and left-align for tables. In presenting your tables, please follow Table 1. If the content of a table is from a particular source, mention the source below the table using font with the size of 9pt.

Table 1. Example on How to Present Your Table

Column Title	**Column A (*t*)**	**Column B (*t*)**
First row	1	2
Second row	3	4
Next row	5	6

Tables should be typed and included in the main body of the article. The position of tables should be inserted in the text as close to the point of reference as possible. Ensure that any superscripts or asterisks are shown next to the relevant items and have corresponding explanations displayed as footnotes to the table, figure or plate.

10. Figures

Figures (charts, diagrams, line drawings, web pages/screenshots, and photographic images) should be submitted in electronic form. Graphics may be supplied in colour to facilitate their appearance on the online database. Figures created in *MS Word, MS PowerPoint, MS Excel* should be supplied in their native formats. Electronic figures created in other applications should be copied from the origination software and pasted into MS Word template document. Photographic images should be inserted in the main body of the article and of high quality. Please follow Figure 1 in preparing pictures. If a figure is from a particular source, you must mention the source. Title of a figure must be put below the figure. Do not put border on the figures.



Figure 1. Example on How to Put Caption for a Figure

11. Acknowledgment

Acknowledgment is optional. The author/s is encouraged to acknowledge any parties that give contribution to the research. It is not same as dedication chapter in thesis/dissertation. Please provide the grant number(s) and the name of supported foundation items correctly for identification purposes.

12. References

Jurnal Saintis prefers articles which refer mainly to journal articles, research reports, and conference proceedings, rather than rely heavily on textbooks or handbooks to demonstrate articles' novelty in the subject discussed. The use of **EndNote** as a tool in referencing is preferable and encouraged. References

should be carefully checked for completeness, accuracy, and consistency. When referring to a reference in the text of the document, put the number of the reference in square brackets. Eg: [1]. References must be prepared according to the ***IEEE style*** as the following examples:

Chapter or Article in Edited Book

[1] G.J Foschini, : Layered space-time architecture for wireless communication in fading environment when using multi-element antennas," *Bell Lab*, Tech,. vol. 1. Pp. 41-59, 1996.

Book: Two or More Authors

[2] Bell, A. Graham, "Performance Tuning", in Theory and Practise – Four Stroke, First Edition, United of Kingdom : Haynes Publishing, 1981. .

Book: Editor

[3] D. Sarunyagate, Ed., Lasers. New York: McGraw-Hill, 1996.

Book: Different Editions

[4] K. Schwalbe, Information Technology Project Management, 3rd ed. Boston: Course Technology, 2004.

Scientific/Technical Report

[5] K. E. Elliott and C.M. Greene, "A local adaptive protocol," Argonne National Laboratory, Argonne, France, Tech. Rep. 916-1010-BB, 1997.

Conference Proceedings

[6] T. J. van Weert and R. K. Munro, Eds., Informatics and the Digital Society: Social, ethical and cognitive issues: IFIP TC3/WG3.1&3.2 Open Conf.e on Social, Ethical and Cognitive Issues of Informatics and ICT, July 22-26, 2002, Dortmund, Germany. Boston: Kluwer Academic, 2003.

E-book

[7] L. Bass, P. Clements, and R. Kazman, Software Architecture in Practice, 2nd ed. Reading, MA: Addison Wesley, 2003. [Online] Available: Safari e-book.

Journal Article from a Full Text Database

[8] H. Ayasso and A. Mohammad-Djafari, "Joint NDT Image Restoration and Segmentation Using Gauss–Markov–Potts Prior Models and Variational Bayesian Computation," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 19, no. 9, pp. 2265-77, 2010. [Online]. Available: IEEE Xplore, http://www.ieee.org. [Accessed Sept. 10, 2010].

Journal Article from the Internet

[9] P. H. C. Eilers and J. J. Goeman, "Enhancing scatterplots with smoothed densities," Bioinformatics, vol. 20, no. 5, pp. 623-628, March 2004. [Online]. Available: www.oxfordjournals.org. [Accessed Sept. 18, 2004].

Government Publication

[10] Australia. Department of Education, Employment and Workplace Relations, Survey on Changes in Awareness and Understanding of Science, Engineering and Technology: Report on findings. Canberra: The Department; 2008. [Online]. Available: http://www.dest.gov.au/NR/rdonlyres/241263CF-8585-4EEC-B104-C947C6C18029/23713/SurveyonChangesinawarenessunderstandingofSET.pdf. [Accessed: Sept. 7, 2010].

Thesis

[11] M. W. Dixon, "Application of neural networks to solve the routing problem in communication networks," Ph.D. dissertation, Murdoch Univ., Murdoch, WA, Australia, 1999.

13. Nomenclature

Meaning of symbols used in the equations and other symbols presented in your article must be presented in this section.

E meaning of E
J_s meaning of J_s
β meaning of β

This page is intentionally blank

http://journal.uir.ac.id/index.php/saintis

Jurnal Saintis

ISSN (Print) : 1410-7783
ISSN (Online) : 2580-7110

Volume 26 Nomor 02, Oktober 2026 : 61-70

Karakteristik Beton Berpori dengan Pemanfaatan Limbah Serat Bambu sebagai Material Ramah Lingkungan

Characteristics of Pervious Concrete Utilizing Bamboo Fiber Waste as an Environmentally Sustainable Material

Reza Wahyu Rivando[1], Shanti Wahyuni Megasari[2]*, Virgo Trisep Haris[3],
[1,2,3] *Program Studi Teknik Sipil, Universitas lancang kuningJ jl.Yos Sudarso Km 8, Pekanbaru dan 28266, Indonesia*

* Penulis korespondensi : shanti@unilak.ac.id
Tel.: +62 812-7525-4771
Diterima: Jun 3, 2026; Direvisi: Okt 5, 2026; Disetujui: Okt 8, 2026.
DOI: 10.25299/saintis.2026.vol26(02).28462

Abstrak

Perkembangan material maju dengan pemanfaatan limbah serat alami berupa serat bambu memiliki potensi besar karena sifat mekaniknya yang baik, seperti peningkatan kekuatan tarik, ketersediaannya yang melimpah, sifat kembang-susut yang rendah, tidak berpotensi korosi, serta merupakan sumber daya alam yang mudah dibudidayakan dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik beton berpori dengan pemanfaatan limbah serat bambu. Metode penelitian berupa studi eksperimental di laboratorium dengan variasi penambahan serat sebesar 0%, 0,5%, 0,6%, 0,7%, 0,8%, dan 0,9% terhadap berat semen, dengan panjang serat 25 mm. Pengujian kuat tekan mengacu pada SNI 03-6825-2002, sedangkan pengujian laju infiltrasi mengacu pada ASTM C1701. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kuat tekan signifikan hingga variasi 0,8%, dengan nilai optimum sebesar 26,10 MPa, dibandingkan beton tanpa serat bambu. Namun, pada variasi 0,9% terjadi penurunan kuat tekan menjadi 23,98 MPa. Laju infiltrasi beton berpori menurun bertahap seiring bertambahnya kandungan serat, dari 65.833,69 mm/jam (0%) menjadi 47.201,56 mm/jam (0,9%), tetapi seluruh variasi tetap memenuhi standar kategori tinggi (>15.000 mm/jam). Uji statistik ANOVA satu arah menunjukkan bahwa variasi serat bambu berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan dan laju infiltrasi. Dengan demikian, pemanfaatan limbah serat bambu mampu meningkatkan kekuatan tekan beton berpori tanpa menghilangkan fungsi infiltrasinya secara drastis. Penelitian ini mendukung potensi serat bambu sebagai material alternatif berkelanjutan dalam pengembangan beton berpori untuk aplikasi perkerasan maupun saluran resapan.

Kata Kunci : *Beton Berpori, Kuat Tekan, Laju Infiltrasi, Serat Bambu*

Abstract

The development of advanced materials through the utilization of natural fiber waste, such as bamboo fiber, holds great potential due to its favorable mechanical properties, including improved tensile strength, abundant availability, low shrinkage–swelling behavior, non-corrosive nature, and ease of cultivation as a sustainable resource. This study aims to analyze the characteristics of pervious concrete incorporating bamboo fiber waste. The research method was an experimental laboratory study with fiber addition variations of 0%, 0.5%, 0.6%, 0.7%, 0.8%, and 0.9% by cement weight, with a fiber length of 25 mm. Compressive strength testing referred to SNI 03-6825-2002, while infiltration rate testing followed ASTM C1701. The results showed a significant increase in compressive strength up to the 0.8% variation, with an optimum value of 26.10 MPa, compared to concrete without bamboo fiber. However, at 0.9% variation, compressive strength decreased to 23.98 MPa. The infiltration rate of porous concrete gradually decreased with increasing fiber content, from 65,833.69 mm/h (0%) to 47,201.56 mm/h (0.9%), yet all variations still met the high-category standard (>15,000 mm/h). One-way ANOVA statistical analysis indicated that bamboo fiber variation had a significant effect on both compressive strength and infiltration rate. Thus, the utilization of bamboo fiber waste can enhance the compressive strength of porous concrete without drastically reducing its infiltration function. This study supports the potential of bamboo fiber as a sustainable alternative material in the development of porous concrete for pavement and infiltration channel applications.

Keywords : *Porous Concrete, Compressive Strength, Infiltration Rate, Bamboo Fiber*

PENDAHULUAN

Beton merupakan material utama dalam pembangunan infrastruktur yang semakin dibutuhkan seiring perkembangan zaman. Pemilihan beton sebagai bahan baku konstruksi sangat penting karena harganya relatif murah, mudah diperoleh, memiliki kuat tekan tinggi, serta tahan terhadap kondisi lingkungan [1], [2]. Kinerja beton sangat dipengaruhi oleh karakteristik material penyusunnya maupun material substitusi yang digunakan. Semakin baik interaksi kimiawinya maka karakteristik beton akan semakin baik.

Beton berpori dapat menjadi alternatif material untuk sumur resapan dengan biaya lebih terjangkau dan penggunaan material lebih efisien

[3]. Beton berpori memiliki porositas tinggi yang memungkinkan air melewatinya sehingga mengurangi limpasan air hujan dan membantu pengisian ulang air tanah [4]. Namun, kelemahan utama beton berpori adalah nilai kuat tekan yang relatif rendah sehingga membatasi aplikasinya pada konstruksi jalan [5], [6], [7].

Bambu dipilih sebagai bahan tambahan karena harganya rendah, mudah diperoleh, memiliki kuat tarik tinggi, serta ketersediaannya melimpah di Indonesia. Penggunaan bambu sebagai serat beton didasarkan pada pertimbangan bahwa pembuatan serat cukup mudah dan populasinya melimpah [8]. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penambahan serat bambu pada beton konvensional dapat meningkatkan sifat mekanik beton [9]. Sementara itu, penelitian tentang beton berpori lebih banyak berfokus pada variasi agregat [4], [5], [7], sehingga belum memberikan solusi terhadap kelemahan kuat tekan beton berpori.

Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis karakteristik beton berpori dengan pemanfaatan limbah serat bambu. Urgensi dari penelitian adalah dibutuhkannya pengembangan material maju yang ramah lingkungan dengan dapat memanfaatkan material limbah yang tidak termanfaatkan sebagai material konstruksi sehingga memiliki nilai guna dan mampu memperbaiki karakteristik beton berpori dengan spesifikasi yang dimiliki serat bambu. Kebaharuan penelitian merupakan penerapan beton berpori dengan pemanfaatan limbah serat bambu yang berkelanjutan dan lebih efisien, serta dapat diaplikasi pada saluran resapan atau perkerasan jalan.

METODOLOGI

Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian berupa data primer dan data sekunder yang telah dikumpulkan oleh peneliti untuk menyelesaikan permasalahan, adapun data yang diteliti:

1. Data Primer
   Data primer adalah data yang didapat melalui pengamatan langsung di laboratorium, yaitu :
   a. Data pengujian properties material
   b. Data pengujian kuat tekan beton berpori
   c. Data pengujian laju infiltrasi beton berpori
2. Data Sekunder
   Data sekunder adalah data pendukung yang diperoleh dari sumber yang relevan berupa peraturan dan artikel jurnal.

Material Penelitian

Material yang digunakan adalah:

1. Agregat kasar
   Agregar kasar berupa batu pecah dengan ukuran 0,95 – 1,90 cm.
2. Semen
   Semen yang digunakan adalah semen portland type I.
3. Air
4. Serat bambu
   Serat bambu berasal dari pengrajin bambu di Kota Pekanbaru. Pengolahan dilakukan dengan cara batang bambu dibelah, dijemur selama 7 hari, dipisahkan seratnya, lalu dijemur kembali hingga siap digunakan. Panjang serat yang digunakan adalah 25 mm. Serat bambu yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Serat Bambu

Pengujian Properties Material

Pengujian properties material agregat kasar terdiri dari :

1. Berat jenis dan penyerapan agregat kasar [10]
2. Kadar lumpur agregat kasar [11]
3. Analisa saringan agregat kasar [12]
4. Keausan agregat kasar [13]

Rancangan Benda Uji

Variasi serat bambu sebesar 0%, 0,5%, 0,6%, 0,7%, 0,8% dan 0,9% terhadap berat semen dengan panjang 25 mm. Benda uji kuat tekan berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm [14]. Untuk pengujian laju infiltrasi menggunakan pelat beton berpori dengan dimensi panjang 600 mm, lebar 400 mm dan tebal 50 mm serta cincin infiltrasi dengan diameter 300 mm dan tinggi 50 mm [3]. Jumlah benda uji sebanyak 3 buah pada setiap variasinya, total 36 buah benda uji. Adapun rancangan benda uji yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Mix Design Beton Berpori

Perencanaan komposisi beton pori dilakukan dengan perbandingan berat semen terhadap agregat kasar sebesar 1:4 dan faktor air semen sebesar 0,3 [2]. Variasi persentase penambahan serat bambu sebesar 0%, 0,5%, 0,6%, 0,7%, 0,8% dan 0,9%

terhadap berat semen. Untuk komposisi campuran dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Rancangan Benda Uji

Pengujian	Serat Bambu (%)	Jumlah Benda Uji
Kuat Tekan	0	3
	0,5	3
	0,6	3
	0,7	3
	0,8	3
	0,9	3
Laju Infiltrasi	0	3
	0,5	3
	0,6	3
	0,7	3
	0,8	3
	0,9	3
Total Benda Uji		36

Tabel 2. Komposisi Campuran Untuk 1m^3

Perbandingan		Semen	Agregat Kasar	Air
Semen	Agregat Kasar	(Kg)	(Kg)	(Lt)
1	4	375	1500	112,5

Perawatan Benda Uji

Untuk perawatan benda uji pada penelitian ini, benda uji akan direndam selama 28 hari untuk menjaga kelembaban beton berpori. Kemudian setelah berumur 28 hari beton dikeluarkan dari tempat perendaman dan dilakukan pengujian [14].

Pengujian Kuat Tekan Beton Berpori

Kuat tekan beton adalah kemampuan beton untuk menerima gaya tekan persatuan luas [14]. Pengujian kuat tekan dilakukan setelah benda uji berumur 28 hari. Benda uji kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 2. Kuat tekan beton berpori dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Keterangan :
σ = Kuat tekan beton berpori (MPa)
P = Beban maksimum (N)
A = Luas penampang benda uji (mm^2)



Gambar 2. Benda Uji Kuat Tekan

Pengujian Laju Infiltrasi Pada Beton Berpori

Nilai laju infiltrasi beton berpori diperoleh dari pengujian manual [15]. Pengujian bertujuan untuk mengetahui nilai laju infiltrasi setelah diberikan penambahan serat. Benda uji laju infiltrasi dapat dilihat pada Gambar 3. Nilai laju infiltrasi beton berpori dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$I = \frac{K.M}{D^2.t} \quad (2)$$

Keterangan :
I = Laju infiltrasi (mm/jam)
M = Massa infiltrasi air (kg)
D = Diameter dalam cincin infiltrasi (mm)
t = Waktu infiltrasi (detik)
k = Konstanta (mm/ jam)



Gambar 3. Benda Uji Laju Infiltrasi

Analysis of Variance (ANOVA)

ANOVA satu arah *(one way)* digunakan untuk melakukan uji rata-rata perlakuan dari sebuah percobaan yang menggunakan satu faktor yang memiliki tiga atau lebih kelompok.
Langkah uji hipotesis ANOVA satu arah :

1. Menyusun uji hipotesis :
   H0: $\mu 1 = \mu 2 = \cdots = \mu k$
   H1: $\mu 1 \neq \mu 2 \neq \cdots \neq \mu k$
2. Rancangan perlakuan ANOVA satu arah dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rancang Perlakuan ANOVA Satu Arah

No	% Serat Bambu	Kuat Tekan Benda Uji (MPa)			
		Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Total
1	0	$Y1_1$	$Y1_2$	$Y1_3$	$\sum_{j-1}^{p} Y_{ij}$
2	0,5	$Y2_1$	$Y2_2$	$Y2_3$	$\sum_{j-1}^{p} Y_{ij}$
3	0,6	$Y3_1$	$Y3_2$	$Y3_3$	$\sum_{j-1}^{p} Y_{ij}$
4	0,7	$Y4_1$	$Y4_2$	$Y4_3$	$\sum_{j-1}^{p} Y_{ij}$
5	0,8	$Y5_1$	$Y5_2$	$Y5_3$	$\sum_{j-1}^{p} Y_{ij}$

No	% Serat Bambu	Kuat Tekan Benda Uji (MPa)			
		Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Total
6	0,9	$Y6_1$	$Y6_2$	$Y6_3$	$\sum_{j=1}^{p} Y_{ij}$

3. Penyusunan tabel ANOVA satu arah dapat dilihat pada Tabel 4.
4. Kesimpulan uji hipotesis ANOVA satu arah untuk menerima atau menolak H0 dilakukan dengan membandingkan nilai statistik uji (F_{hitung}) dengan nilai F_{tabel}. Untuk membuat keputusan menggunakan dasar :
   a. Jika nilai $F_{hitung} < F_{tabel}$, maka hipotesis H0 diterima yang berarti bahwa tidak terdapat perbedaan nilai rata-rata antar kategori atau level faktor.
   b. Jika nilai $F_{hitung} > F_{tabel}$, maka hipotesis H0 ditolak yang berarti bahwa terdapat perbedaan dua nilai rata-rata antar kategori atau level faktor.

Tabel 4. ANOVA Satu Arah

SK	JK	KT	F_{hitung}
Perlakuan	JKp	KTp	$\frac{KT_p}{KT_g}$
Galat	JKg	KTg	
Total	JKt		

Keterangan :
JK_p = Jumlah kuadrat perlakuan
JK_g = Jumlah kuadrat galat
JK_t = Jumlah kuadrat total
KT_p = Kuadrat tengah perlakuan
KT_g = Kuadrat tengah galat

HASIL DAN DISKUSI

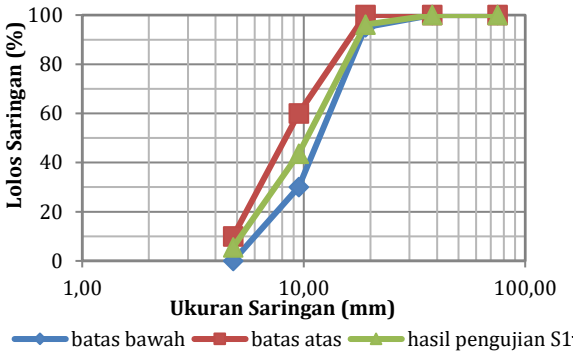
Hasil Pengujian Properties Material

Pengujian pendahuluan atau properties material yang dilaksanakan pada agregat kasar. Adapun hasil pengujian material adalah :

1. Analisa saringan agregat kasar
   Pengujian analisa saringan bertujuan untuk mengelompokkan atau memisahkan agregat sesuai dengan kebutuhan dengan menggunakan saringan atau ayakan. Hasil pengujian analisa saringan agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 5 dan Gambar 4.

Tabel 5. Hasil Analisa Saringan Agregat Kasar

Lubang Ayakan	Tertahan		Persentase Komulatif	
	Berat (gr)	Jumlah (gr)	Tertinggal (%)	Lolos (%)
75	0	0,00	0,0	100,0
38	0	0,00	0,0	100,0
19	115	115,00	3,9	96,1
9,5	1563	1678,0	56,3	43,7
4,8	1134	2812,0	94,4	5,6
PAN	166	2978,0	100,0	0,0
Total	2978,0			



Gambar 4. Grafik Analisa Saringan

Hasil pengujian analisa saringan pada Tabel 5 dan Gambar 4 diperoleh gradasi agregat kasar berada pada max 20 mm dan memenuhi spesifikasi [12].

2. Berat jenis dan penyerapan agregat kasar
   Pengujian berat jenis dan penyerapan dilakukan berdasarkan ketentuan [10] yang bertujuan untuk menentukan berat jenis dan penyerapan pada agregat kasar. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan pada agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Pemeriksaan	Hasil
Berat Jenis Kering	2,63
Berat Jenis SSD	2,65
Berat Jenis Semu	2,70
Penyerapan	0,97%

Hasil pengujian pada Tabel 6 diperoleh berat jenis SSD berada diantara nilai 2,58-2,83 dan penyerapan agregat kasar ≤ 2% serta memenuhi spesifikasi [10].

3. Kadar lumpur agregat kasar
   Pengujian kadar lumpur bertujuan untuk mengetahui kadar lumpur dari agregat kasar. Hasil pengujian kadar lumpur pada agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Kasar

Pemeriksaan	Hasil
Berat awal benda uji	500,0 gr
Berat kering benda uji	496,4 gr
Berat kering benda uji setelah pencucian	496,0 gr
Kadar lumpur	0,08 %

Hasil pengujian kadar lumpur agregat kasar pada Tabel 7 diperoleh ≤ 1% dan memenuhi spesifikasi [13].

4. Keausan agregat kasar
   Pengujian keausan agregat kasar bertujuan mengetahui ketahanan agregat kasar terhadap keausan dengan menggunakan mesin *Los angeles* di laboratorium. Hasil pengujian keausan pada agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian Keausan Agregat Kasar

Pemeriksaan	Hasil
Berat awal benda uji	5000 gr
Berat akhir benda uji	4025 gr
Keausan	19,5 %

Hasil pengujian keausan agregat kasar pada Tabel 8 dengan menggunakan mesin *Los angeles* diperoleh ≤ 40% sesuai dengan spesifikasi [13].

Rekapitulasi hasil pengujian properties agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 9. Berdasarkan Tabel 9 hasil pengujian properties agregat kasar yang telah dilakukan diperoleh bahwa agregat kasar memenuhi standar spesifikasi sehingga material dapat digunakan sebagai bahan campuran beton.

Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Pengujian Agregat Kasar

No.	Pengujian	Hasil Pemeriksaan	Standar	Syarat
1.	Analisa Saringan	Max 20 mm	Max 10, Max 20, dan Max 40	Memenuhi
2.	Berat jenis SSD	2,65	2,58-2,83	Memenuhi
3.	Penyerapan	0,97 %	≤ 2%	Memenuhi
4.	Kadar lumpur	0,08%	1%	Memenuhi
5.	Keausan agregat	19,5%	≤ 40%	Memenuhi

Hasil Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton berpori dilakukan pada umur 28 hari. Rumus yang digunakan untuk perhitungan nilai kuat tekan beton pori sesuai dengan Persamaan (1). Hasil kuat tekan beton berpori dapat dilihat pada Tabel 10 dan Gambar 5.

Pada Tabel 10 terdapat hasil kuat tekan rata-rata yang mengalami peningkatan seiring dengan penambahan persentase limbah serat bambu pada beton berpori. Adapun nilai kuat tekan optimum diperoleh pada variasi penambahan serat bambu 0,8% sebesar 26,10 MPa dengan peningkatan kuat tekan sebesar 59,54% dibandingkan dengan beton berpori tanpa penambahan limbah serat bambu. Kemudian terjadi penurunan kuat tekan pada persentase 0,9% dengan nilai kuat tekan sebesar 23,98 MPa, namun nilai kuat tekan masih lebih tinggi 46,64% dibandingkan dengan beton berpori tanpa penambahan limbah serat bambu. Kuat tekan rata-rata terendah pada variasi tanpa penambahan limbah serat bambu (0%) yaitu 16,36 MPa. Seluruh nilai kuat tekan memenuhi persyaratan yang berkisar antara 2,8 – 28 MPa [5].

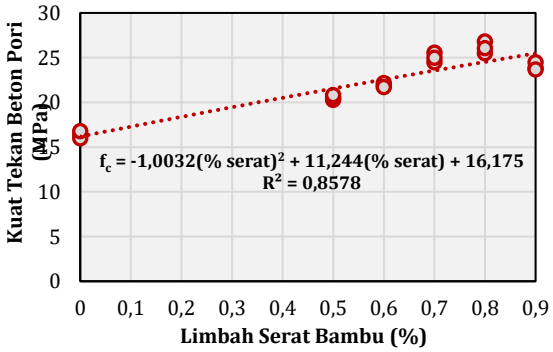
Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu:

1. [9] melaporkan kuat tekan optimum beton konvensional dengan serat bambu sebesar 28,86 MPa pada 0,6% serat. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan penelitian ini (26,10 MPa pada 0,8%), tetapi pola peningkatan hingga titik optimum dan penurunan setelahnya konsisten.
2. [5] menemukan kuat tekan beton berpori dengan variasi agregat berkisar 12–20 MPa, lebih rendah dibandingkan hasil penelitian ini. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan serat bambu mampu meningkatkan kuat tekan beton berpori hingga melampaui hasil berbasis variasi agregat.
3. [14] melaporkan kuat tekan beton berpori untuk perkerasan jalan rendah lalu lintas berkisar 15–22 MPa, sedangkan penelitian ini mencapai 26,10 MPa, sehingga lebih layak untuk aplikasi perkerasan dengan beban lebih tinggi.

Peningkatan kekuatan tekan dengan adanya penambahan serat bambu dapat dijelaskan oleh fungsi serat yang memperkuat ikatan antar partikel serta menahan retakan mikro [9]. Namun, pada kadar serat yang terlalu tinggi terjadi penurunan kuat tekan karena pencampuran menjadi kurang homogen. Perlu ditegaskan bahwa penelitian ini tidak melakukan pengukuran kuantitatif terhadap *workability* atau homogenitas campuran. Homogenitas dikontrol melalui prosedur pencampuran dengan waktu *mixing* yang seragam, penggunaan pengaduk mekanis, serta pengaturan rasio air-semen agar pasta tetap terdistribusi merata. Penambahan serat bambu dilakukan secara bertahap untuk meminimalkan gumpalan serat. Dengan cara ini, kondisi *fresh concrete* tetap dijaga agar mendekati homogen meskipun kadar serat tinggi cenderung menurunkan *workability*.

Tabel 10. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Berpori

Limbah Serat Bambu (%)	Kode Benda Uji	Berat Benda Uji (gr)	Beban (KN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
	1	9400	289	16,36	
0	2	9730	282	15,97	16,36
	3	9890	296	16,76	
0,5	1	9921	358	20,27	20,51
	2	9983	362	20,50	
	3	9892	367	20,78	
0,6	1	9976	386	21,85	21,90
	2	9923	391	22,14	
	3	9945	383	21,68	
0,7	1	9921	432	24,46	24,98
	2	9847	461	26,10	
	3	9894	441	24,97	
0,8	1	9913	450	25,48	26,10
	2	9893	473	26,78	
	3	9921	460	26,04	
0,9	1	9873	421	23,84	23,99
	2	9943	432	24,46	
	3	9928	418	23,67	



Gambar 5. Kuat Tekan Beton Berpori

Berdasarkan Gambar 5, grafik hubungan kuat tekan rata-rata beton berpori dengan persentase limbah serat bambu dapat diprediksi melalui persamaan kuadrat *fc* = -1,0032 (% serat)^2 + 11,244 (% serat) + 16,175. Persamaan ini menunjukkan kecenderungan peningkatan kuat tekan hingga kadar optimum 0,8% dan penurunan pada kadar 0,9%. Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8578 menandakan bahwa 85,78% variasi kuat tekan dapat dijelaskan oleh variabel bebas, yaitu persentase serat bambu. Sementara itu, nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,9262 menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara penambahan serat bambu dan kuat tekan beton berpori, karena nilai r berada pada rentang 0,8–1,0 [16]. Nilai positif dari R^2 dan r menegaskan bahwa hubungan antara persentase serat bambu dan kuat tekan beton berpori bersifat berbanding lurus. Artinya, semakin tinggi persentase serat bambu maka kuat tekan beton berpori juga meningkat, namun hanya sampai kadar optimum tertentu. Peningkatan kuat tekan hingga 0,8% terjadi karena serat bambu mampu memperkuat ikatan antar partikel dan menahan retakan mikro. Sebaliknya, pada kadar 0,9% terjadi penurunan akibat pencampuran yang kurang homogen sehingga distribusi beban terganggu. Selain itu, penambahan serat juga mempengaruhi porositas dan infiltrasi. Serat mengisi sebagian rongga beton berpori sehingga porositas berkurang, yang berdampak pada penurunan laju infiltrasi. Meski demikian, nilai infiltrasi tetap memenuhi standar >15.000 mm/jam, sehingga beton berpori masih berfungsi sebagai media resapan air.

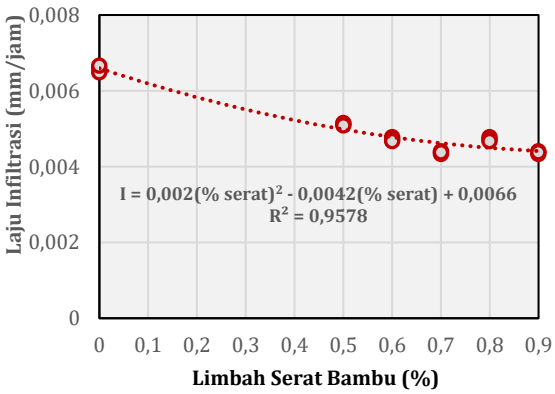
Hasil Pengujian Laju Infiltrasi

Laju infiltrasi merupakan kecepatan air saat meresap melalui rongga beton berpori pada waktu tertentu. Besarnya laju infiltrasi sangat dipengaruhi oleh jumlah rongga pada beton berpori. Semakin banyak rongga yang dimiliki, laju infiltrasi akan semakin tinggi, sedangkan semakin sedikit rongga maka laju infiltrasi akan semakin rendah [9]. Rumus yang digunakan untuk perhitungan nilai laju infiltrasi beton pori sesuai dengan Persamaan (2). Hasil laju infiltrasi beton berpori dapat dilihat pada Tabel 11 dan Gambar 6.

Tabel 11. Persentase Penambahan Serat Bambu

Limbah Serat Bambu (%)	Kode Benda Uji	Konstanta, k	Waktu *Prewetting* (detik)	Waktu Lolos Air, t (detik)	Laju Infiltrasi, I (mm/jam)	Rata-rata (mm/jam)
	1	4,584	2,87	13,89	65.999,51	
0	2	4,584	2,92	14,13	64.878,50	65.833,69
	3	4,584	2,76	13,76	66.623,05	

Limbah Serat Bambu (%)	Kode Benda Uji	Konstanta, k	Waktu *Prewetting* (detik)	Waktu Lolos Air, t (detik)	Laju Infiltrasi, I (mm/jam)	Rata-rata (mm/jam)
	1	4,584	4,14	17,79	51.530,82	
0,5	2	4,584	4,25	17,89	51.242,77	51.215,56
	3	4,584	4,31	18,02	50.873,10	
	1	4,584	4,43	19,20	47.746,52	
0,6	2	4,584	4,52	19,43	47.181,33	47.201,56
	3	4,584	4,62	19,64	46.676,84	
	1	4,584	5,19	20,82	44.031,37	
0,7	2	4,584	5,34	21,14	43.364,86	43.725,09
	3	4,584	5,27	20,94	43.779,04	
	1	4,584	5,87	19,20	47.746,52	
0,8	2	4,584	6,12	19,43	47.181,33	47.201,56
	3	4,584	5,93	19,64	46.676,84	
	1	4,584	6,21	20,82	44.031,37	
0,9	2	4,584	6,13	21,14	43.364,86	43.725,09
	3	4,584	6,42	20,94	43.779,04	



Gambar 6. Laju Infiltrasi Beton Berpori

Pada Tabel 11 terdapat hasil laju infiltrasi rata-rata yang mengalami penurunan seiring dengan penambahan persentase limbah serat bambu pada beton berpori. Adapun nilai laju infiltrasi rata-rata tertinggi diperoleh pada benda uji tanpa penambahan serat bambu 0% sebesar 65.833,69 mm/jam. Laju infiltrasi rata-rata terendah didapat pada variasi penambahan limbah serat bambu 0,9% yaitu 43.725,09 mm/jam.

Berdasarkan Gambar 6 grafik hubungan hubungan laju infiltrasi rata-rata beton berpori dengan persentase limbah serat bambu diperoleh persamaan diperoleh persamaan $I = 0{,}002$ (% serat)^2 - 0,0042(% serat) + 0,0066. Nilai koefisien determinasi (r^2) sebesar 0,9578 dan koefisien korelasi (r) sebesar 0,9787. Nilai koefisien korelasi (r) menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara penambahan limbah serat bambu dengan penurunan nilai laju infiltrasi beton berpori karena koefisien korelasi (r) berada diantara 0,8 sampai 1,0 [16].

Sebagai perbandingan kuantitatif:

1. [9] hanya menjelaskan secara teoritis bahwa laju infiltrasi dipengaruhi oleh jumlah rongga, dengan kisaran 40.000–60.000 mm/jam. Hasil penelitian ini konsisten, bahkan nilai awal tanpa serat (65.833,69 mm/jam) lebih tinggi dari kisaran tersebut.
2. [17] melaporkan laju infiltrasi beton berpori untuk perkerasan jalan rendah lalu lintas berkisar 20.000–50.000 mm/jam. Penelitian ini menunjukkan nilai lebih tinggi, yaitu hingga 65.833,69 mm/jam pada variasi tanpa serat, dan tetap di atas 43.725,09 mm/jam pada variasi 0,9%.
3. [3] menetapkan bahwa laju infiltrasi beton berpori harus lebih dari 15.000 mm/jam. Seluruh variasi benda uji dalam penelitian ini memenuhi standar tersebut.

Penurunan laju infiltrasi terjadi karena serat bambu yang tersebar dalam campuran beton mengisi dan menutup sebagian pori-pori terbuka, sehingga kemampuan beton dalam menyerap dan meloloskan air menjadi berkurang. Hal ini menunjukkan adanya hubungan terbalik antara kekuatan mekanik dan sifat permeabilitas beton, di mana peningkatan kuat tekan cenderung disertai dengan penurunan laju infiltrasi. Namun seluruh variasi benda uji memenuhi standar dengan kategori tinggi dengan nilai laju infiltrasi >15.000 mm/jam [3].

Hasil Analysis Of Variance (ANOVA)

Untuk metode *analysis of variance* (ANOVA) satu arah pada nilai kuat tekan dengan variabel bebas (x) berupa variasi persentase serat bambu dan variabel terikat (y) berupa nilai kuat tekan beton berpori, yaitu :

1. Membuat hipotesis
   H0 : Tidak ada pengaruh variasi persentase serat bambu terhadap kuat tekan beton berpori
   H1 : Terdapat pengaruh variasi serat bambu terhadap kuat tekan beton berpori.
2. Tabel rancang perlakuan dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Rancangan Perlakuan

No	% Serat Bambu	Kuat Tekan Benda Uji (MPa)			Jumah
		Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	
1	0	16,36	15,97	16,76	49,09
2	0,5	20,27	20, 50	20,78	61,54
3	0,6	21,86	22,14	21,68	65,68
4	0,7	24,46	25,53	24,97	74,96
5	0,8	25,48	26,78	26,04	78,30
6	0,9	23,84	24,46	23,67	71,96
			Total		401,53

Hasil rancangan perlakuan pada Tabel 12 diperoleh nilai jumlah dan total yang akan dipergunakan untuk perhitungan faktor koreksi (FK), jumlah kuadrat (JK), kuadrat tengah (KT) dan F_{hitung}.

3. Rekapitulasi perhitungan ANOVA satu arah dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Rekapitulasi ANOVA

SK	JK	DB	KR	F_{hitung}
Perlakuan	189,74	5	37,87	195,07
Galat	2,33	12	0,19	
Total	191,66	17	38,06	-

Hasil analisis ANOVA menunjukkan nilai Fhitung = 195,07 lebih besar daripada F_{tabel} = 2,85, sehingga H0 ditolak. Hal ini berarti variasi persentase serat bambu berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton berpori. Nilai p-value < 0,05 semakin menegaskan bahwa pengaruh tersebut nyata secara statistik. Untuk mengetahui kadar serat bambu yang berbeda signifikan, dilakukan uji lanjut (*post-hoc*) dengan metode Tukey HSD. Hasil uji menunjukkan bahwa beton berpori tanpa serat (0%) berbeda nyata dengan seluruh variasi penambahan serat. Variasi 0,5% dan 0,6% tidak berbeda signifikan satu sama lain, sedangkan variasi 0,7% dan 0,8% membentuk kelompok yang berbeda nyata dibandingkan kadar rendah. Variasi 0,9% berada di antara kelompok 0,6% dan 0,8%, sehingga tidak berbeda signifikan dengan keduanya. Dengan demikian, komposisi 0,8% dapat dipastikan sebagai kadar optimum karena memberikan perbedaan signifikan terhadap kuat tekan sekaligus menghasilkan nilai tertinggi..

4. Kesimpulan uji hipotesis ANOVA satu arah diperoleh nilai $F_{hitung} > F_{tabel}$ dimana F_{Tabel} = 2,85, maka hipotesis H0 ditolak yang berarti interaksi atau perlakuan yang nyata antara persentase limbah serat bambu dengan kuat tekan beton berpori.

Sehingga hasil analisis statistik dengan metode ANOVA membuktikan bahwa terdapat pengaruh variasi persentase penambahan limbah serat bambu dengan kuat tekan beton berpori.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa kuat tekan beton berpori meningkat dengan penambahan limbah serat bambu hingga kadar tertentu, dengan nilai optimum pada variasi 0,8% sebesar 26,10 MPa. Laju infiltrasi mengalami penurunan seiring bertambahnya persentase serat bambu, namun seluruh variasi tetap memenuhi standar kategori tinggi (>15.000 mm/jam). Komposisi 0,8% serat bambu merupakan titik optimum karena menghasilkan kuat tekan maksimum sekaligus laju infiltrasi yang masih memenuhi fungsi dasar beton berpori sebagai media resapan air. Pemanfaatan limbah serat bambu pada beton berpori mendukung pengembangan material konstruksi yang lebih kuat secara mekanis, tetap permeabel, dan ramah lingkungan, sehingga layak digunakan pada saluran resapan air maupun perkerasan jalan.

REFERENSI

[1] M. A. Syahran, "*Beton ringan berbahan fly ash dan bottom ash"*, Tugas Akhir, Universitas Sriwijaya, Palembang, 2021.

[2] ACI Committee 211, *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete (ACI 211.1-91)*, American Concrete Institute, 1991.

[3] ACI Committee 522, *Report on pervious concrete (ACI 522R-10)*, American Concrete Institute, 2010.

[4] R. J. Putra and R. Pertiwi, "Pengaruh penggunaan agregat terhadap beton porous," *Jurnal Sipil Statik*, 2019.

[5] M. F. Khonado, H. Manalip, and S. E. Wallah, "Kuat tekan dan permeabilitas beton porous dengan variasi ukuran agregat," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 7, no. 3, pp. 351–358, 2019.

[6] M. R. Ramadhon, "Mechanical properties of porous concrete and design recommendation for low traffic road pavement in Indonesia," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 794, p. 012003, 2021.

[7] C. Wijaya, "Studi eksperimental kuat tekan beton porous menggunakan variasi ukuran agregat kasar batu pecah pasca dibakar", Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, vol. 15 No. 1 pp.50-57, 2020.

[8] A. Javadian et al., "Banana stem fiber reinforced concrete," *Int. J. GEOMATE*, vol. 14, no. 44, pp. 166–175, 2019.

[9] M. E. Hidayat, Ismeddiyanto, A. Kurniawandy, "Pengaruh penambahan serat kulit bambu terhadap sifat mekanik beton". Jom FTEKNIK, vol. 3 No. 1 pp. 1-7.

[10] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1969:2016: Metode uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar*, BSN, 2016.

[11] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-4142-1996: Metode pengujian jumlah bahan dalam agregat yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm)*, BSN, 1996.

[12] ASTM International, *ASTM C136/C136M-12: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*, ASTM, 2012.

[13] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2417:2008: Uji keausan agregat*, BSN, 2008.

[14] ASTM International, *ASTM C39/C39M-18: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*, ASTM, 2018.

[15] ASTM International, *ASTM C1701/C1701M: Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete*, ASTM, 2009.

[16] R. Ananda, and M. Fadhli, "Statistik pendidikan teori dan praktik dalam pendidikan", Medan : CV Widya Puspita, 2018.

[17] K. Hariadi, "Penggunaan limbah kaca sebagai filler pada campuran perkerasan aspal panas," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 26, no. 3, pp. 265–272, 2019.

This page is intentionally blank

http://journal.uir.ac.id/index.php/saintis

Jurnal Saintis

ISSN (Print) : 1410-7783
ISSN (Online) : 2580-7110

Volume 26 Nomor 02, Oktober 2026 : 71-80

Analisis Tingkat Kepuasan Pelanggan Layanan SPAM Karang Jaya di Kec. Karang Jaya Kabupaten Musi Rawas Utara

Analysis of Customer Satisfaction Level of Karang Jaya Spam Service in Karang Jaya District, Musi Rawas Utara Regency

Nanda Prayoga[1,*], Radha Krisnamurti Sigamura[2]

[1] *Program Studi Teknik Sipil, Universitas Musi Rawas , Muara Beliti, Musi Rawas, Sumatera Selatan, Indonesia,*
[2] *Program Studi Ilmu Komputer, Universitas Musi Rawas , Muara Beliti, Musi Rawas, Sumatera Selatan, Indonesia,*

* Penulis korespondensi : nandaprayoga007@gmail.com
Tel.: +62-8121-465-68032
Diterima: Sep 22, 2026; Direvisi: Okt 14, 2026; Disetujui: Okt 15, 2026.
DOI: 10.25299/saintis.2026.vol26(02).29573

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menggambarkan tingkat kepuasan pelanggan terhadap layanan SPAM Karang Jaya di Kecamatan Karang Jaya, Kabupaten Musi Rawas Utara, berdasarkan persepsi pelanggan. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan survei terhadap 96 pelanggan yang dipilih secara purposive. Data dikumpulkan melalui kuesioner, observasi, wawancara, dan dokumentasi. Persepsi diukur menggunakan skala Likert empat tingkat. Untuk mengatasi ketidaksesuaian antara skor minimum skala dan interval kategori, indeks dinormalisasi dengan mengurangkan skor minimum yang mungkin dari skor aktual, kemudian membaginya dengan rentang skor teoritis. Berdasarkan skor indikator yang tercantum dalam naskah, indeks rata-rata ternormalisasi adalah 72,78% dan termasuk kategori puas menurut interval interpretasi yang digunakan. Aspek ekonomi memperoleh indeks rata-rata tertinggi (94,10%), diikuti persepsi karakteristik air (82,29%), sedangkan aspek pelayanan memiliki indeks terendah (50,49%). Indikator terendah adalah jam operasional (33,33%), diikuti kecukupan aliran air (37,50%) dan informasi pelayanan (44,10%). Hasil ini menunjukkan perlunya prioritas perbaikan pada jadwal dan kontinuitas distribusi, kecukupan aliran di titik pelanggan, serta penyampaian informasi. Penilaian karakteristik air dalam penelitian ini merupakan persepsi pelanggan dan bukan hasil uji kualitas air secara laboratorium.

Kata kunci : *kepuasan pelanggan; SPAM; persepsi pelanggan; layanan air minum; skala Likert.*

Abstract

This study aims to describe the level of customer satisfaction with SPAM Karang Jaya services in Karang Jaya District, Musi Rawas Utara Regency, based on customer perceptions. The study uses a descriptive quantitative approach with a survey of 96 customers selected purposively. Data were collected through questionnaires, observation, interviews, and documentation. Perceptions were measured using a four-level Likert scale. To address the mismatch between the minimum scale score and category intervals, the index was normalized by subtracting the minimum possible score from the actual score, then dividing it by the theoretical score range. Based on the indicator scores listed in the manuscript, the normalized average index is 72.78% and falls into the satisfied category according to the interpretation interval used. The economic aspect obtained the highest average index (94.10%), followed by the perception of water characteristics (82.29%), while the service aspect had the lowest index (50.49%). The lowest indicators were operating hours (33.33%), followed by the adequacy of water flow (37.50%) and service information (44.10%). These results indicate the need to prioritize improvements in scheduling and distribution continuity, the adequacy of flow at customer points, and the delivery of information. The assessment of water characteristics in this study represents customer perception and not the results of laboratory water quality testing.

Keywords: *customer satisfaction; SPAM; customer perception; drinking water services; Likert scale.*

PENDAHULUAN

Air minum merupakan layanan dasar yang berkaitan langsung dengan kesehatan, aktivitas rumah tangga, dan keberlanjutan kegiatan sosial ekonomi masyarakat. Dalam penyelenggaraan layanan air minum, penilaian pelanggan tidak hanya dipengaruhi oleh mutu air yang diterima, tetapi juga oleh kontinuitas, kuantitas, respons terhadap keluhan, keterjangkauan biaya, serta kualitas interaksi dengan penyedia layanan. Penelitian mengenai layanan air minum menunjukkan bahwa persepsi terhadap rasa, bau, kejernihan, kualitas layanan, dan sistem pembayaran dapat membentuk kepuasan pelanggan [1], [2]. Dengan demikian, pengukuran kepuasan pelanggan dapat digunakan sebagai salah satu dasar evaluasi kinerja penyedia layanan.

Pada konteks Indonesia, sejumlah penelitian menunjukkan bahwa kualitas pelayanan air minum berkaitan erat dengan kepuasan pelanggan. Dewi

dan Mursyidah [3] menunjukkan bahwa kualitas pelayanan PDAM dapat dinilai melalui dimensi keandalan, daya tanggap, jaminan, empati, dan bukti fisik. Putri dan Mursyidah [4] juga menunjukkan bahwa permasalahan kontinuitas aliran, kuantitas, dan kualitas air masih menjadi aspek yang perlu diperhatikan pada layanan air minum. Penelitian lain pada perusahaan air minum menunjukkan bahwa kepuasan pelanggan dipengaruhi oleh kombinasi kualitas air, kualitas pelayanan, harga, ketepatan penanganan gangguan, serta profesionalitas petugas [5], [6]. Pendekatan penilaian dari perspektif pelanggan juga semakin penting dalam evaluasi kinerja utilitas air karena dapat membantu penyedia layanan menemukan area yang memerlukan perbaikan [7].

SPAM Karang Jaya merupakan unit pelayanan air minum yang dikelola oleh BLUD UPT SPAM Dinas Pekerjaan Umum Cipta Karya dan Tata Ruang Kabupaten Musi Rawas Utara. Sistem ini dibangun pada tahun 2016 dengan kapasitas distribusi 20 liter/detik dan melayani Desa Karang Jaya, Desa Terusan, Desa Muara Tiku, dan Desa Embacang Baru. Sumber air baku berasal dari Sungai Rupit dan sistem pengaliran menggunakan pompa dengan jam operasi yang pada saat penelitian berlangsung tercatat 08.00–16.00. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kualitas air, kontinuitas aliran, tekanan/debit, jam operasional, respons pengaduan, informasi, dan aspek biaya merupakan komponen yang relevan untuk dievaluasi dari sudut pandang pelanggan.

Penelitian terdahulu pada SPAM dan PDAM di Indonesia juga memperlihatkan pentingnya evaluasi teknis dan persepsi pelanggan secara bersamaan. Harmiyati [1] menunjukkan bahwa kualitas air hasil pengolahan dan kondisi fasilitas pengolahan menjadi bagian penting dalam kinerja SPAM. Ningsih, Fitriani, dan Hadinata [8] menunjukkan bahwa evaluasi teknis layanan air bersih dapat dikaitkan dengan kepuasan pelanggan pada PDAM di Sumatera Selatan. Sementara itu, Nafi'ah dan Tukiman [9] memperlihatkan bahwa unsur waktu pelayanan, biaya, perilaku petugas, dan penanganan pengaduan merupakan bagian penting dalam penilaian kualitas pelayanan pelanggan PDAM.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kebutuhan untuk memperoleh gambaran spesifik mengenai persepsi pelanggan SPAM Karang Jaya. Penelitian ini diarahkan untuk: (1) mengidentifikasi indikator pelayanan yang dinilai pelanggan; dan (2) menghitung tingkat kepuasan pelanggan berdasarkan indeks skala Likert. Penelitian ini tidak dimaksudkan untuk membuktikan hubungan kausal antarvariabel, tetapi untuk memberikan gambaran deskriptif mengenai indikator pelayanan yang memperoleh penilaian tinggi maupun rendah. Hasilnya diharapkan menjadi dasar evaluasi dan penentuan prioritas perbaikan pelayanan SPAM Karang Jaya.

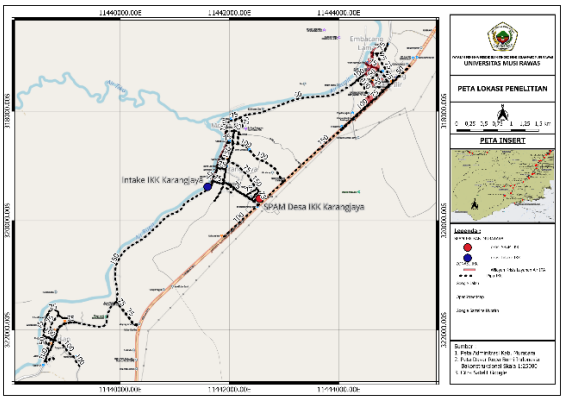
METODOLOGI

Jenis Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode survei. Pendekatan ini dipilih karena tujuan penelitian adalah mengubah persepsi pelanggan terhadap atribut pelayanan menjadi skor numerik sehingga dapat dibandingkan antarindikator. Metode survei dengan kuesioner juga lazim digunakan dalam penelitian kepuasan pelanggan layanan air minum [3], [5], [10]. Tahapan penelitian dilakukan secara ringkas dan sistematis melalui identifikasi permasalahan, studi literatur, penentuan indikator, penyusunan dan penyebaran kuesioner, pengumpulan data, pengujian instrumen, penghitungan indeks kepuasan, interpretasi hasil, dan penyusunan rekomendasi. Bagan alir tidak ditampilkan agar bagian metodologi tetap ringkas sesuai karakter artikel jurnal.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada wilayah pelayanan SPAM Karang Jaya, Kecamatan Karang Jaya, Kabupaten Musi Rawas Utara, Sumatera Selatan. Wilayah pelayanan meliputi Desa Karang Jaya, Desa Terusan, Desa Muara Tiku, dan Desa Embacang Baru. SPAM Karang Jaya memiliki kapasitas distribusi 20 liter/detik dan memanfaatkan Sungai Rupit sebagai sumber air baku. Objek penelitian adalah persepsi pelanggan aktif terhadap kualitas air, pelayanan operasional, respons pengelola, informasi, dan aspek ekonomi pelayanan.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Populasi dan Sampel

Populasi penelitian adalah seluruh pelanggan aktif SPAM Karang Jaya pada wilayah pelayanan yang mencakup Desa Karang Jaya, Desa Terusan, Desa Muara Tiku, dan Desa Embacang Baru. Sebanyak 96 pelanggan menjadi responden dengan teknik *purposive sampling*. Responden dipilih berdasarkan kriteria telah menggunakan layanan SPAM Karang Jaya dan bersedia menjawab pertanyaan mengenai layanan yang diterima. Untuk transparansi dan agar kecukupan serta keterwakilan sampel dapat dinilai, naskah final harus mencantumkan jumlah populasi pelanggan aktif pada saat survei (N), periode pengumpulan data, cara perekrutan responden, serta jumlah responden dari masing-masing desa: [lengkapi berdasarkan daftar pelanggan dan catatan lapangan]. Karena teknik yang digunakan adalah purposive sampling dan proporsi sampel per desa belum tersedia dalam data yang diperiksa, hasil penelitian ditafsirkan sebagai gambaran persepsi 96 responden, bukan estimasi yang otomatis mewakili seluruh pelanggan SPAM Karang Jaya.

Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder.

a. Data Primer
   Data primer diperoleh secara langsung melalui penyebaran kuesioner kepada pelanggan SPAM Karang Jaya, observasi lapangan, serta wawancara dengan pihak pengelola SPAM Karang Jaya. Data primer digunakan untuk mengetahui persepsi pelanggan terhadap kualitas pelayanan air minum yang diterima.
b. Data Sekunder
   Data sekunder diperoleh dari instansi terkait, antara lain data pelanggan, data wilayah pelayanan, peta lokasi, dokumentasi kegiatan, serta data teknis operasional SPAM Karang Jaya yang mendukung pelaksanaan penelitian.

Variabel dan Instrumen Penelitian

Indikator penelitian dikelompokkan menjadi tiga aspek. Aspek kualitas air terdiri atas suhu, rasa, kekeruhan, bau, dan warna. Aspek pelayanan terdiri atas respons terhadap keluhan, pelayanan petugas, jam operasional, tekanan/debit aliran, dan kemudahan memperoleh informasi. Aspek ekonomi terdiri atas proses pemasangan sambungan baru, biaya pemasangan sambungan baru, dan tarif air minum. Pengelompokan tersebut mempertahankan indikator yang digunakan pada penelitian awal, tetapi istilah "pelayanan petugas" digunakan untuk merujuk pada kinerja petugas yang memberikan layanan, sedangkan istilah "pelayanan" digunakan untuk merujuk pada kegiatan atau sistem layanan.

Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Observasi Lapangan, yaitu pengamatan secara langsung terhadap kondisi operasional dan sistem distribusi SPAM Karang Jaya.
2. Kuesioner, yaitu penyebaran daftar pertanyaan kepada pelanggan menggunakan skala Likert untuk mengetahui tingkat kepuasan pelanggan terhadap pelayanan yang diberikan.
3. Wawancara, yaitu pengumpulan informasi melalui diskusi langsung dengan pihak pengelola SPAM Karang Jaya terkait kondisi pelayanan dan operasional sistem.
4. Dokumentasi, yaitu pengumpulan data berupa laporan, arsip pelanggan, data teknis, serta dokumentasi kegiatan yang berkaitan dengan penelitian.

Skala Pengukuran

Pengukuran tingkat kepuasan pelanggan dilakukan menggunakan skala Likert dengan empat tingkat penilaian, yaitu:

Tabel 1. Skor Pengukuran Tingkat Kepuasan Pelanggan

Pilihan Jawaban	Skor
Sangat Tidak Puas	1
Tidak Puas	2
Puas	3
Sangat Puas	4

Selanjutnya dilakukan interpretasi tingkat kepuasan berdasarkan persentase skor sebagai berikut:

Tabel 2. Persentase Skoring Berdasarkan Interpretasi Tingkat Kepuasan

Persentase Skor	Kategori
0 – 20%	Sangat Tidak Puas
21-40 %	Tidak Puas
41 – 60%	Cukup Puas
61 – 80 %	Puas
81 – 100%	Sangat Puas

Indeks Kepuasan Yang Dinormalisasi

Untuk setiap indikator, skor minimum teoritis adalah 1 × 96 = 96 dan skor maksimum teoritis adalah 4 × 96 = 384. Persentase skor terhadap skor maksimum (skor/384 × 100%) memiliki batas bawah 25%, sehingga tidak konsisten apabila dipadankan dengan kategori yang dimulai dari 0%. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan indeks ternormalisasi dengan rumus:

$$IK\ (\%) = [(S - Smin) / (Smaks - Smin)] \times 100\% \quad (1)$$

dengan S = skor aktual indikator; Smin = 96; dan Smaks = 384. Indeks ini memetakan skor minimum yang mungkin menjadi 0% dan skor maksimum menjadi 100%. Kategori interpretasi ditetapkan: 0–20% sangat tidak puas; >20–40% tidak puas; >40–60% cukup puas; >60–80% puas; dan >80–100% sangat puas. Batas interval ditulis tanpa tumpang tindih agar setiap nilai hanya masuk ke satu kategori.

Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan melalui langkah-langkah berikut:

1. Identifikasi permasalahan penelitian;
2. Studi literatur dan pengumpulan referensi;
3. Penentuan variabel penelitian;
4. Penyusunan kuesioner;
5. Pengumpulan data primer dan sekunder;
6. Uji validitas dan reliabilitas instrumen;
7. Analisis data menggunakan skala Likert;
8. Interpretasi hasil penelitian;
9. Penyusunan kesimpulan dan rekomendasi.

Tahapan tersebut dilakukan secara sistematis untuk memperoleh hasil analisis yang akurat mengenai tingkat kepuasan pelanggan terhadap pelayanan SPAM Karang Jaya.

HASIL DAN DISKUSI

Sistem Distribusi SPAM Karang Jaya

Air pada sistem jaringan air bersih bermula dari sumber air baku lalu diolah pada instalasi pengolahan air. Air yang telah diolah lalu dialirkan melalui pipa transmisi dan distribusi sehingga dapat melayani pelanggan dengan tekanan air yang cukup sehingga bisa melayani secara kontinyu ditingkat pelanggan. Sumber air baku yang digunakan oleh SPAM Karang Jaya berasal dari Sungai Rupit.Kapasitas intake di Sungai Rupit adalah 20 ltr/dtk (sumber lapangan). Sistem pengaliran air menggunakan cara pemompaan dengan tenaga penggerak PLN dengan jam operasi 8 jam dimulai dari jam 08:00 –16:00.



Gambar 2. *Reservoir* SPAM Karang Jaya



Gambar 3. *Intake* SPAM Karang Jaya

Karateristik Responden

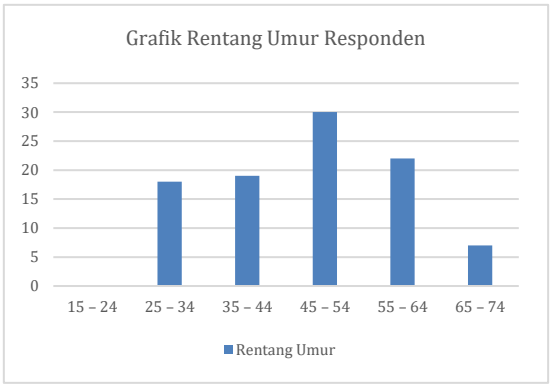
Dari hasil penelitian ini ada beberapa karakteristik responden yang berhubungan dengan konsep partisipasi yaitu terdiri dari kelompok umur, jenis kelamin, pendidikan, pekerjaan dan pendapatan.

a. Karakteristik responden pelanggan berdasarkan kelompok umur dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 3. Jumlah Responden Berdasarkan Kelompok Umur

Rentang Umur	Jumlah (Responden)	Persentase (%)
15 – 24 Tahun	0	0,0
25 – 34 Tahun	18	18,8
35 – 44 Tahun	19	19,8
45 – 54 Tahun	30	31,3
55 – 64 Tahun	22	22,9
65 – 74 Tahun	7	7,3
Total	**96**	**100,0**

Berikut ini grafik jumlah responden berdasarkan kelompok umur :



Gambar 4. Grafik Jumlah Responden Pelanggan Berdasarkan Kelompok Umur

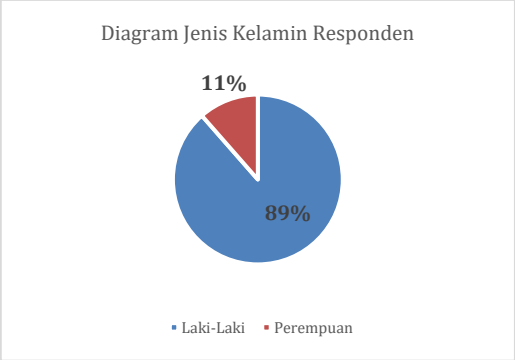
Dari diagram dapat dilihat bahwa sebagian besar pelanggan adalah yang berusia 45-54 tahun yaitu sebesar 31,3% sehingga sudah dianggap dewasa dan mampu menyatakan pendapat dan mengambil keputusan.

b. Karakteristik responden pelanggan berdasarkan jenis kelamin dapat dilihat dari tabel di bawah ini:

Tabel 4. Jumlah Responden Berdasarkan Jenis Kelamin

Jenis Kelamin	Jumlah (Responden)	Persentase (%)
Laki-Laki	85	88,5
Perempuan	11	11,5
Total	**96**	**100,0**

Berikut ini diagram jumlah responden berdasarkan jenis kelamin :



Gambar 5. Diagram Jumlah Responden Pelanggan Berdasarkan Jenis Kelamin

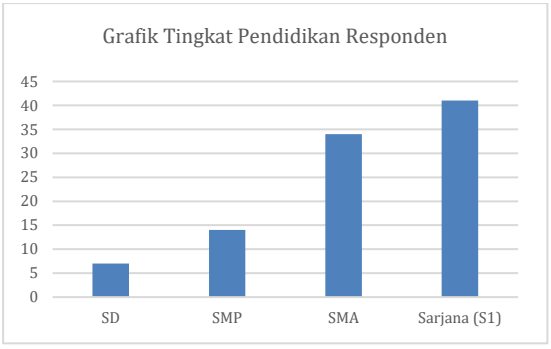
Dari diagram dapat dilihat bahwa sebagian besar pelanggan yang menjadi responden adalah laki-laki sebanyak 85 responden atau jika dipersentasikan sebanyak 88,5% sedangkan responden perempuan sebanyak 11 responden atau 11,5%. Hal ini menunjukkan bahwa kebanyakan pelanggan yang ditemui peneliti sebagian besar berjenis kelamin laki-laki dan informasi yang diberikan dapat dipertangungjawabkan.

c. Karakteristik responden pelanggan berdasarkan tingkat pendidikan yang ditempuh oleh sebagian pelanggan SPAM Karang Jaya dapat dilihat dari tabel ini :

Tabel 5. Jumlah Responden Berdasarkan Tingkat Pendidikan

Pendidikan	Jumlah (Responden)	Persentase (%)
SD	7	7,3
SMP	14	14,6
SMA	34	35,4
Sarjana (S1)	41	42,7
Total	**96**	**100,0**

Berikut ini grafik jumlah responden berdasarkan pendidikan :



Gambar 6. Grafik Jumlah Responden Pelanggan Berdasarkan Tingkat Pendidikan

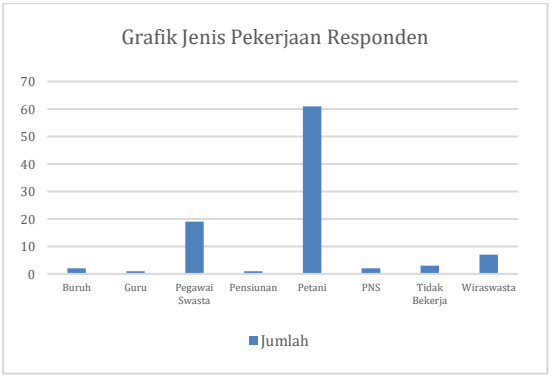
Dari diagram dapat dilihat bahwa sebagian besar pelanggan yang menjadi responden pendidikan terakhirnya yaitu Sarjana (S1) sebanyak 42,7 %. Dengan rata – rata pendidikan yang cukup tinggi sehingga memberikan informasi tentang kualitas air minum, kuantitas air minum, kontinuitas air minum dan pelayanan terhadap pelanggan dengan akurat.

d. Karakteristik responden pelanggan berdasarkan jenis pekerjaan dapat dilihat dari tabel di bawah ini:

Tabel 6. Jumlah Responden Berdasarkan Jenis Pekerjaan

Jenis Pekerjaan	Jumlah (Responden)	Persentase (%)
Buruh	2	2,1
Guru	1	1,0
Pegawai Swasta	19	19,8
Pensiunan	1	1,0
Petani	61	63,5
PNS	2	2,1
Tidak Bekerja	3	3,1
Wiraswasta	7	7,3
Total	**96**	**100,0**

Berikut ini grafik jumlah responden berdasarkan pekerjaan :



Gambar 7. Grafik Jumlah Responden Pelanggan Berdasarkan Jenis Pekerjaan

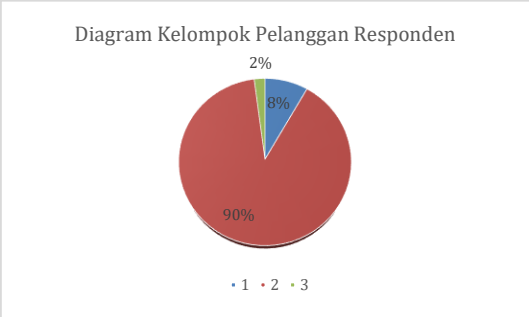
Dari diagram dapat dilihat bahwa sebagian besar pelanggan yang menjadi responden memiliki pekerjaan sebagai Petani yaitu sebanyak 63,5 %. Dengan tingginya pelanggan yang memiliki pekerjaan sebagai Petani yang beberapa membutuhkan air dengan jumlah yang banyak.

e. Karakteristik responden pelanggan berdasarkan kelompok pelanggan dapat dilihat dari tabel ini:

Tabel 7. Jumlah Responden Berdasarkan Kelompok Pelanggan

Kelompok Pelanggan	Jumlah (Responden)	Persentase (%)
1	8	8,3
2	86	89,6
3	2	2,1
Total	**96**	**100,0**

Berikut ini diagram jumlah responden berdasarkan kelompok pelanggan :



Gambar 8. Diagram Jumlah Responden Pelanggan Berdasarkan Kelompok Pelanggan

Dari grafik responden yang banyak diambil adalah yang termasuk kelompok 2 yaitu Rumah Tangga Non MBR, Sekolah Swasta/Negeri, Niaga Kecil, Industri Rumah Tangga, Puskesmas di Tingkat Kecamatan/Kelurahan, Instansi Pemerintah, TNI/Polri tingkat Kecamatan/Kelurahan.

Hasil Analisa Tingkat Kepuasan Pelanggan Distribusi Pelayanan Air Minum

Dari hasil survei didapatkan data sebanyak 96 responden. Selanjutnya diolah data menjadi tingkat kepuasan pelanggan. Secara terperinci interprestasi skor dapat dilihat pada **Tabel 2.** Untuk Pembobotan hasil kuesioner responden dengan penilaian sikap skala likert dapat dijelaskan pada tabel-tabel berikut ini :

a. Kualitas Air Bersih

Kualitas air minum yang disurvei secara visual dilapangan meliputi suhu, rasa, kekeruhan, bau, dan warna. Berdasarkan hasil survei diketahui sebagai berikut :

Tabel 8. Hasil Jawaban Responden Pelanggan Berdasarkan Suhu Air

Pilihan Jawaban	Skor Jawaban	Jumlah Responden	Jumlah
1	1	0	0
2	2	4	8
3	3	30	90
4	4	62	248
Total		**96**	**346**

Keterangan:
X= Skor tertinggi likert x jumlah responden = 4 x 96 = 384
Y= Skor terendah likert x jumlah responden = 1 x 96 = 96

Dari tabel dapat dilihat bahwa pelanggan yang menjadi responden bedasarkan suhu air adalah 346. Skor tertinggi 384 dan terendah adalah 96. Presentase penilaian sikap dengan skala likert untuk indikator adalah =346/384 x 100% = 90,10% (dapat dikatagorikan bahwa pelanggan sangat puas terhadap suhu air) yang didistribusikan oleh SPAM Karang Jaya.

Tabel 9. Hasil Jawaban Responden Pelanggan Berdasarkan Kualitas Rasa

Pilihan Jawaban	Skor Jawaban	Jumlah Responden	Jumlah
1	1	0	0
2	2	2	4
3	3	9	27
4	4	85	340
Total		**96**	**371**

Keterangan:
X= Skor tertinggi likert x jumlah responden = 4 x 96 = 384
Y= Skor terendah likert x jumlah responden = 1 x 96 = 96

Dari tabel dapat dilihat bahwa pelanggan yang menjadi responden bedasarkan suhu air adalah 371. Skor tertinggi 384 dan terendah adalah 96. Presentase penilaian sikap dengan skala likert untuk indikator adalah = 371/384 x 100% = 96,61% (dapat dikatagorikan bahwa pelanggan sangat puas terhadap rasa) yang didistribusikan oleh SPAM Karang Jaya.

Tabel 10. Hasil Jawaban Responden Pelanggan Berdasarkan Kualitas Kekeruhan

Pilihan Jawaban	Skor Jawaban	Jumlah Responden	Jumlah
1	1	0	0
2	2	4	8
3	3	86	258
4	4	6	24
Total		**96**	**290**

Keterangan:
X= Skor tertinggi likert x jumlah responden = 4 x 96 = 384
Y= Skor terendah likert x jumlah responden = 1 x 96 = 96

Dari tabel dapat dilihat bahwa pelanggan yang menjadi responden bedasarkan kekeruhan adalah 290. Skor tertinggi 384 dan terendah adalah 96. Presentase penilaian sikap dengan skala likert untuk indikator adalah = 290/384 x

100% = 75,52% (dapat dikatagorikan bahwa pelanggan puas terhadap kekeruhan) yang didistribusikan oleh SPAM Karang Jaya.

Tabel 11. Hasil Jawaban Responden Pelanggan Berdasarkan Bau

Pilihan Jawaban	Skor Jawaban	Jumlah Responden	Jumlah
1	1	0	0
2	2	3	6
3	3	24	72
4	4	69	276
Total		**96**	**354**

Keterangan:
X= Skor tertinggi likert x jumlah responden = 4 x 96 = 384
Y= Skor terendah likert x jumlah responden = 1 x 96 = 96

Dari tabel dapat dilihat bahwa pelanggan yang menjadi responden bedasarkan bau adalah 354. Skor tertinggi 384 dan terendah adalah 96. Presentase penilaian sikap dengan skala likert untuk indikator adalah = 354/384 x 100% = 92,18% (dapat dikatagorikan bahwa pelanggan sangat puas terhadap bau) yang didistribusikan oleh SPAM Karang Jaya.

Tabel 12. Hasil Jawaban Responden Pelanggan Berdasarkan Warna Air

Pilihan Jawaban	Skor Jawaban	Jumlah Responden	Jumlah
1	1	0	0
2	2	5	10
3	3	70	210
4	4	21	84
Total		**96**	**304**

Keterangan:
X= Skor tertinggi likert x jumlah responden = 4 x 96 = 384
Y= Skor terendah likert x jumlah responden = 1 x 96 = 96

Dari tabel dapat dilihat bahwa pelanggan yang menjadi responden bedasarkan warna air adalah 304. Skor tertinggi 384 dan terendah adalah 96. Presentase penilaian sikap dengan skala likert untuk indikator adalah = 304/384 x 100% = 79,17% (dapat dikatagorikan bahwa pelanggan puas terhadap warna air) yang didistribusikan oleh SPAM Karang Jaya.

b. Pelayanan Kepuasan Pelanggan.

Pelayanan kepuasan pelanggan yang disurvei yaitu respon terhadap pelanggan, pelayanan petugas, jam operasional, Tekanan Air, dan kecukupan informasi. Berdasarkan hasil survei dapat diketahui sebagai berikut :

Tabel 13. Hasil Jawaban Responden Pelanggan Berdasarkan Respon Terhadap Keluhan

Pilihan Jawaban	Skor Jawaban	Jumlah Responden	Jumlah
1	1	0	0
2	2	6	12
3	3	89	267
4	4	1	4
Total		**96**	**283**

Keterangan:
X= Skor tertinggi likert x jumlah responden = 4 x 96 = 384
Y= Skor terendah likert x jumlah responden = 1 x 96 = 96

Dari tabel dapat dilihat bahwa pelanggan yang menjadi responden bedasarkan keluhan adalah 283. Skor tertinggi 384 dan terendah adalah 96. Presentase penilaian sikap dengan skala likert untuk indikator adalah = 283/384 x 100% = 73,70% (dapat dikatagorikan bahwa pelanggan puas terhadap keluhan) yang didistribusikan oleh SPAM Karang Jaya.

Tabel 14. Hasil Jawaban Responden Pelanggan Berdasarkan Pelayanan Petugas

Pilihan Jawaban	Skor Jawaban	Jumlah Responden	Jumlah
1	1	0	0
2	2	3	6
3	3	73	219
4	4	20	80
Total		**96**	**305**

Keterangan:
X= Skor tertinggi likert x jumlah responden = 4 x 96 = 384
Y= Skor terendah likert x jumlah responden = 1 x 96 = 96

Dari tabel dapat dilihat bahwa pelanggan yang menjadi responden bedasarkan pelayanan petugas adalah 305. Skor tertinggi 384 dan terendah adalah 96. Presentase penilaian sikap dengan skala likert untuk indikator adalah = 305/384 x 100% = 79,43% (dapat dikatagorikan bahwa pelanggan puas terhadap layanan petugas) yang didistribusikan oleh SPAM Karang Jaya.

Tabel 15. Hasil Jawaban Responden Pelanggan Berdasarkan Jam Operasional

Pilihan Jawaban	Skor Jawaban	Jumlah Responden	Jumlah
1	1	0	0
2	2	96	192
3	3	0	0
4	4	0	0
Total		**96**	**192**

Keterangan:
X= Skor tertinggi likert x jumlah responden = 4 x 96 = 384
Y= Skor terendah likert x jumlah responden = 1 x 96 = 96

Dari tabel dapat dilihat bahwa pelanggan yang menjadi responden bedasarkan jam operasional adalah 192. Skor tertinggi 384 dan terendah adalah 96. Presentase penilaian sikap dengan skala likert untuk indikator adalah = 192/384 x 100% = 50% (dapat dikatagorikan bahwa pelanggan cukup puas terhadap jam operasional) yang didistribusikan oleh SPAM Karang Jaya.

Tabel 16. Hasil Jawaban Responden Pelanggan Berdasarkan Tekanan Air

Pilihan Jawaban	Skor Jawaban	Jumlah Responden	Jumlah
1	1	51	51
2	2	2	4
3	3	23	69
4	4	20	80
Total		**96**	**204**

Keterangan:
X= Skor tertinggi likert x jumlah responden = 4 x 96 = 384
Y= Skor terendah likert x jumlah responden = 1 x 96 = 96

Dari tabel dapat dilihat bahwa pelanggan yang menjadi responden bedasarkan Tekanan Air adalah 204. Skor tertinggi 384 dan terendah adalah 96. Presentase penilaian sikap dengan skala likert untuk indikator adalah = 204/384 x 100% = 53,13% (dapat dikatagorikan bahwa pelanggan cukup puas terhadap Tekanan Air) yang didistribusikan oleh SPAM Karang Jaya.

Tabel 17. Hasil Jawaban Responden Pelanggan Berdasarkan Kecukupan Informasi

Pilihan Jawaban	Skor Jawaban	Jumlah Responden	Jumlah
1	1	0	0
2	2	78	156
3	3	5	15
4	4	13	52
Total		**96**	**223**

Keterangan:
X= Skor tertinggi likert x jumlah responden = 4 x 96 = 384
Y= Skor terendah likert x jumlah responden = 1 x 96 = 96

Dari tabel dapat dilihat bahwa pelanggan yang menjadi responden bedasarkan kecukupan informasi adalah 223. Skor tertinggi 384 dan terendah adalah 96. Presentase penilaian sikap dengan skala likert untuk indikator adalah = 223/384 x 100% = 58,07% (dapat dikatagorikan bahwa pelanggan cukup puas terhadap kecukupan informasi)yang didistribusikan oleh SPAM Karang Jaya.

c. Ekonomi

Tingkat Ekonomi sendiri yang disurvei adalah Proses Pemasangan Sambungan Baru, Biaya Sambungan Baru, dan Tarif. Berdasarkan hasil survei dapat diketahui sebagai berikut :

Tabel 18. Hasil Jawaban Responden Pelanggan Berdasarkan Proses Pemasangan Sambungan Baru

Pilihan Jawaban	Skor Jawaban	Jumlah Responden	Jumlah
1	1	0	0
2	2	7	14
3	3	23	69
4	4	66	264
Total		**96**	**347**

Keterangan:
X= Skor tertinggi likert x jumlah responden = 4 x 96 = 384
Y= Skor terendah likert x jumlah responden = 1 x 96 = 96

Dari tabel dapat dilihat bahwa pelanggan yang menjadi responden bedasarkan pemasangan sambungan baru adalah 347. Skor tertinggi 384 dan terendah adalah 96. Presentase penilaian sikap dengan skala likert untuk indikator adalah =347/384 x 100% = 90,36% (dapat dikatagorikan bahwa pelanggan sangat puas terhadap pemasangan sambungan baru) yang didistribusikan oleh SPAM Karang Jaya.

Tabel 19. Hasil Jawaban Responden Pelanggan Berdasarkan Harga Pemasangan Sambungan Baru

Pilihan Jawaban	Skor Jawaban	Jumlah Responden	Jumlah
1	1	0	0
2	2	2	4
3	3	4	12
4	4	90	360
Total		**96**	**376**

Keterangan:
X= Skor tertinggi likert x jumlah responden = 4 x 96 = 384
Y= Skor terendah likert x jumlah responden = 1 x 96 = 96

Dari tabel dapat dilihat bahwa pelanggan yang menjadi responden bedasarkan Biaya sambungan baru adalah 376. Skor tertinggi 384 dan terendah adalah 96. Presentase penilaian sikap dengan skala likert untuk indikator adalah =376/384 x 100% = 97,92% (dapat dikatagorikan bahwa pelanggan sangat puas terhadap Biaya sambungan baru) yang didistribusikan oleh SPAM Karang Jaya.

Tabel 20. Hasil Jawaban Responden Pelanggan Berdasarkan Tarif

Pilihan Jawaban	Skor Jawaban	Jumlah Responden	Jumlah
1	1	0	0
2	2	1	2
3	3	4	12
4	4	91	364
Total		**96**	**378**

Keterangan:
X= Skor tertinggi likert x jumlah responden = 4 x 96 = 384
Y= Skor terendah likert x jumlah responden = 1 x 96 = 96

Dari tabel dapat dilihat bahwa pelanggan yang menjadi responden bedasarkan Tarif adalah 378. Skor tertinggi 384 dan terendah adalah 96. Presentase penilaian sikap dengan skala likert untuk indikator adalah = 378/384 x 100% = 98,44% (dapat dikatagorikan bahwa pelanggan sangat puas terhadap Tarif) yang didistribusikan oleh SPAM Karang Jaya.

Tabel 21. Rekapitulasi Penilaian Sikap Untuk Kuesioner Responden Pelanggan

Kriteria	Atribut	Total	%	Ket
Kualitas Air Minum	Suhu	346	90.10	Sangat Puas
	Rasa	371	96.61	Sangat Puas
	Kekeruhan	290	75.52	Puas
	Bau	354	92.19	Sangat Puas
	Warna	304	79.17	Puas
Pelayanan Kepuasan Pelanggan	Keluhan Responden	283	73.70	Puas
	Pelayanan Petugas	305	79.43	Puas
	Operasional	192	50.00	Cukup Puas
	Debit	204	53.13	Cukup Puas
	Informasi	223	58.07	Cukup Puas
Ekonomi	Pemasangan	347	90.36	Sangat Puas
	Harga Baru	376	97.92	Sangat Puas
	Tarif	378	98.44	Sangat Puas

Berdasarkan tabel dapat diketahui bahwa rata-rata persentase yaitu 79,59%. Jika dilihat pada skala likert, maka diketahui bahwa rentang kepuasan berada pada tingkat "Puas" dengan kriteria tertinggi pada kualitas air minum dan pelayanan terhadap pelanggan.

Implikasi dan Prioritas Perbaikan

Berdasarkan hasil penelitian, prioritas peningkatan layanan dapat diarahkan pada tiga kelompok indikator dengan indeks terendah, yaitu jam operasional, tekanan/debit, dan informasi. Prioritas pertama adalah evaluasi jam operasi dan kontinuitas distribusi. Prioritas kedua adalah pemeriksaan tekanan dan kecukupan debit pada jaringan, terutama pada titik pelayanan yang dilaporkan pelanggan mengalami aliran rendah. Prioritas ketiga adalah penguatan sistem informasi dan pengaduan agar pelanggan mengetahui jadwal pelayanan, gangguan, dan tindak lanjut laporan. Pendekatan berbasis prioritas pelanggan sejalan dengan gagasan bahwa evaluasi kualitas utilitas air sebaiknya mampu menunjukkan area yang perlu diperbaiki secara spesifik [7].

Sebaliknya, indikator yang sudah memperoleh nilai sangat tinggi, seperti tarif, biaya sambungan baru, rasa, bau, dan proses pemasangan sambungan, dapat dipertahankan sambil tetap dilakukan pemantauan berkala. Strategi tersebut lebih tepat daripada melakukan perbaikan secara merata pada seluruh indikator, karena sumber daya pengelola dapat diarahkan terlebih dahulu pada aspek dengan kesenjangan kepuasan paling besar.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, jumlah responden sebanyak 96 pelanggan dan teknik purposive sampling membatasi generalisasi hasil ke seluruh populasi pelanggan di luar wilayah dan periode penelitian. Kedua, pengukuran didasarkan pada persepsi pelanggan sehingga belum dipadukan secara langsung dengan pengukuran teknis seperti tekanan jaringan, kontinuitas aktual, kualitas air laboratorium, atau data kehilangan air. Ketiga, penelitian menggunakan analisis deskriptif sehingga belum menguji hubungan atau pengaruh antarvariabel. Penelitian berikutnya dapat menggabungkan data persepsi dan data teknis serta menggunakan analisis inferensial untuk mengetahui indikator yang paling kuat memengaruhi kepuasan pelanggan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kepuasan pelanggan layanan SPAM Karang Jaya dapat digambarkan melalui tiga aspek utama, yaitu kualitas air, pelayanan, dan ekonomi. Berdasarkan 96 responden, seluruh indikator penelitian dinyatakan valid dan reliabel, sedangkan indeks kepuasan rata-rata mencapai 79,59% dan termasuk kategori **Puas**. Aspek ekonomi memperoleh rata-rata tertinggi sebesar 95,57%, diikuti kualitas air sebesar 86,72%, sedangkan aspek pelayanan memperoleh rata-rata terendah sebesar 62,87%. Indikator dengan penilaian tertinggi adalah tarif air sebesar 98,44%, sementara jam operasional memperoleh nilai terendah sebesar 50,00%. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk mengidentifikasi indikator pelayanan dan mengukur tingkat kepuasan pelanggan telah tercapai. Secara praktis, pengelola SPAM Karang Jaya perlu memprioritaskan evaluasi jam operasional dan kontinuitas distribusi, tekanan/debit aliran, serta sistem informasi dan penanganan keluhan, sementara indikator yang telah memperoleh penilaian tinggi perlu dipertahankan melalui pemantauan berkala.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada pengelola SPAM Karang Jaya Kecamatan Karang Jaya Kabupaten Musi Rawas Utara yang telah memberikan izin penelitian serta menyediakan data dan informasi yang diperlukan selama proses pengumpulan data dan seluruh pelanggan SPAM Karang Jaya yang telah bersedia menjadi responden, sehingga penelitian dapat terlaksana dengan baik. Selain itu, penulis

menyampaikan apresiasi kepada rekan-rekan dosen Fakultas Teknik Universitas Musi Rawas, Keluarga, serta semua pihak yang telah memberikan masukan, arahan, dan dukungan selama proses penyusunan penelitian hingga terselesaikannya artikel ini.

REFERENSI

[1] H. Harmiyati, "Tinjauan Proses Pengolahan Air Baku (*Raw Water*) Menjadi Air Bersih Pada Sarana Penyediaan Air Minum (SPAM) Kecamatan Rangsang Kabupaten Kepulauan Meranti," J. Saintis, vol. 18, no. 1, pp. 1–15, 2018.

[2] J. Denantes and G. Donoso, "*Factors influencing customer satisfaction with water service quality in Chile*," Utilities Policy, vol. 73, Art. no. 101295, 2021, doi: 10.1016/j.jup.2021.101295.

[3] I. M. Dewi and L. Mursyidah, "*The Influence of Service Quality on Customer Satisfaction of Regional Drinking Water Company* (PDAM) 'Delta Tirta'," *Indonesian Journal of Public Policy Review*, vol. 17, pp. 1–10, 2022, doi: 10.21070/ijppr.v17i0.1243.

[4] D. D. Putri and L. Mursyidah, "*Quality of Drinking Water Supply Services in Sidoarjo Regency*," Indonesian Journal of Public Policy Review, vol. 15, 2021, doi: 10.21070/ijppr.v15i0.1134.

[5] A. K. S. Ong, Y. T. Prasetyo, M. C. C. Sacro, A. L. Artes, M. P. M. Canonoy, G. K. D. Onda, S. F. Persada, R. Nadlifatin, and K. P. E. Robas, "*Determination of factors affecting customer satisfaction towards 'Maynilad' water utility company: A structural equation modeling-deep learning neural network hybrid approach*," Heliyon, vol. 9, no. 3, Art. no. e13798, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13798.

[6] S. Mulyani, R. H. Kurniasih, and J. Heikal, "*The Effect of Quality, Quantity, Continuity, and Service of* Sistem *Penyediaan Air Minum (SPAM) Products on Customer Satisfaction and Its Impact on Piped Water Absorption Using SEM-PLS Methods*," Journal Research of Social Science, Economics, and Management, vol. 5, no. 8, pp. 1542–1557, 2025, doi: 10.59141/jrssem.v5i8.1348.

[7] H. Vilarinho, M. A. Pereira, G. D'Inverno, H. Nóvoa, and A. S. Camanho, "*Water Utility Service Quality Index: A customer-centred approach for assessing the quality of service in the water sector*," Socio-Economic Planning Sciences, vol. 92, Art. no. 101797, 2024, doi: 10.1016/j.seps.2023.101797.

[8] W. Ningsih, H. Fitriani, and F. Hadinata, "*Analysis of technical evaluation and customer satisfaction of clean water services (case study: PDAM Lematang Enim at Muara Enim Regency, South Sumatra, Indonesia)*," Scientific Review Engineering and Environmental Sciences, vol. 32, no. 3, pp. 255–269, 2023, doi: 10.22630/srees.4856.

[9] Z. Nafi'ah and Tukiman, "Kualitas Pelayanan Pelanggan di Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM)," Jurnal Kebijakan Publik, vol. 13, no. 3, pp. 252–260, 2022, doi: 10.31258/jkp.v13i3.8022.

[10] N. Aulia and W. Syarvina, "*Analysis of Clean Water Distribution Network System and Service Quality on Customer Satisfaction (Case Study of PDAM Tirtanadi, Cemara Branch, Medan City, North Sumatra Province)*," Jurnal Fokus Manajemen, vol. 2, no. 1, pp. 79–86, 2022, doi: 10.37676/jfm.v2i1.2160.

[11] T. Leticia, "*Effects of Customer Satisfaction on Water Utility Business Performance: A Case Study of Mbinga Urban Water Supply and Sanitation Authority*," International Journal of Engineering, Business and Management, vol. 6, no. 5, pp. 33–42, 2022, doi: 10.22161/ijebm.6.5.5.

[12] R. Jannah, A. Ramli, M. I. W. Haeruddin, S. Hasbiah, and M. I. Musa, "Analisis Kualitas Layanan Daerah Air Minum terhadap Kepuasan Pelanggan: Studi pada PDAM Bersujud Kabupaten Tanah Bumbu Kalimantan Selatan," EBISMAN eBisnis Manajemen, vol. 2, no. 4, pp. 1–15, 2024, doi: 10.59603/ebisman.v2i4.586.

[13] R. Apriyana, T. T. Andari, and Yulianingsih, "*Customer Satisfaction Based on Service Quality at the Regional Drinking Water Company (PDAM) Tirta Jaya Mandiri Sukabumi District Palabuhan Ratu Branch*," International Journal of Management and Business Intelligence, vol. 2, no. 4, pp. 427–436, 2024, doi: 10.59890/ijmbi.v2i4.2441.

[14] M. H. Maulana and M. Nuruddin, "*Analysis of Customer Satisfaction with Packaged Drinking Water Products Using Service Quality (SERVQUAL) and Importance Performance Analysis (IPA) Methods*," Jurnal Teknik Industri: Jurnal Hasil Penelitian dan Karya Ilmiah dalam Bidang Teknik Industri, vol. 10, no. 1, pp. 100–108, 2024, doi: 10.24014/jti.v10i1.29570.

[15] M. Indrasari, Pemasaran dan Kepuasan Pelanggan. Surabaya: Unitomo Press, 2019.

[16] Sugiyono, Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D, 3rd ed. Bandung: Alfabeta, 2023.

http://journal.uir.ac.id/index.php/saintis

Jurnal Saintis

ISSN (Print) : 1410-7783
ISSN (Online) : 2580-7110

Volume 26 Nomor 02, Oktober 2026 : 81-94

Evaluasi Pencapaian Standar Pelayanan Minimum *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta sebagai Upaya Peningkatan Pelayanan Transportasi Umum

Evaluation of Minimum Service Standard Achievement at Park and Ride Facilities in the Special Region of Yogyakarta to Improve Public Transportation Services

Ani Tjitra Handayani [1,*], Agus Erwansyah[2]

[1] *Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Jl. Babarsari, Depok, Sleman, Yogyakarta, Indonesia*

[2] *Program Studi Manajemen Konstruksi, Politeknik Madyathika, Jl. Letnan Jendral S.Parman No.47, Purbalingga, Jawa Tengah, Indonesia*

* Penulis korespondensi : handayanianitjitra@gmail.com
Tel.: +6282-22550-1378; fax.: +6282-22550-1378
Diterima: Sep 22, 2026; Direvisi: Okt 14, 2026; Disetujui: Okt 22, 2026.
DOI: 10.25299/saintis.2026.vol26(02).30318

Abstrak

Park and Ride merupakan fasilitas pendukung integrasi transportasi yang berperan dalam menghubungkan perjalanan kendaraan pribadi dengan transportasi umum. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pencapaian Standar Pelayanan Minimum (SPM) serta mengidentifikasi prioritas peningkatan pelayanan *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-komparatif dengan pengumpulan data melalui observasi, dokumentasi, dan kuesioner pengguna. Evaluasi pencapaian SPM mengacu pada Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 24 Tahun 2021, sedangkan persepsi pengguna dianalisis menggunakan metode *Importance Performance Analysis* (IPA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pencapaian SPM *Park and Ride* secara keseluruhan mencapai 98,99%, sedangkan indeks rata-rata kepuasan pengguna sebesar 87%, yang menunjukkan bahwa pengguna berada pada kategori sangat puas terhadap pelayanan dan fasilitas *Park and Ride*. Hasil pemetaan *Importance Performance Analysis* (IPA) menunjukkan bahwa sebagian besar atribut pelayanan berada pada Kuadran II (Pertahankan Kinerja). Atribut pada Kuadran I (Prioritas Utama) ditemukan pada *Park and Ride* Ngabean, Gamping, dan Prambanan, yang menunjukkan adanya atribut dengan tingkat kepentingan tinggi tetapi kinerja masih perlu ditingkatkan. Temuan ini menunjukkan bahwa pencapaian SPM yang tinggi belum sepenuhnya menghilangkan kebutuhan peningkatan kualitas berdasarkan persepsi pengguna. Oleh karena itu, peningkatan pelayanan perlu difokuskan pada atribut prioritas dengan tetap mempertahankan kinerja atribut yang telah memenuhi harapan pengguna.

Kata Kunci: *Park and Ride, Standar Pelayanan Minimum, Kepuasan Pengguna, Importance Performance Analysis (IPA)*

Abstract

Park and Ride facilities are an important component of transport integration, serving to connect private vehicle trips with public transportation. This study aims to evaluate the achievement of Minimum Service Standards (MSS) and identify priorities for improving Park and Ride services in the Special Region of Yogyakarta, Indonesia. A descriptive-comparative quantitative approach was employed, with data collected through observation, documentation, and user questionnaires. The evaluation of MSS achievement refers to Minister of Transportation Regulation No. 24 of 2021, while user perceptions were analyzed using the Importance Performance Analysis (IPA) method. The results indicate that the overall achievement of the MSS for Park and Ride facilities reached 98.99%, while the average user satisfaction index was 87%, indicating a very high level of user satisfaction with the services and facilities provided. The Importance Performance Analysis (IPA) results show that most service attributes were located in Quadrant II (Keep Up the Performance). Attributes in Quadrant I (Top Priority) were identified at the Ngabean, Gamping, and Prambanan Park and Ride facilities, indicating attributes that are considered highly important by users but whose performance still requires improvement. These findings indicate that a high level of MSS achievement does not entirely eliminate the need for service improvements based on user perceptions. Therefore, service improvement should focus on priority attributes while maintaining the performance of attributes that have already met user expectations.

Keywords: *Park and Ride, Minimum Service Standards, User Satisfaction, Importance Performance Analysis (IPA)*

PENDAHULUAN

Daerah Istimewa Yogyakarta merupakan salah satu pusat pendidikan, pariwisata, dan kegiatan ekonomi di Indonesia yang memiliki mobilitas masyarakat cukup tinggi. Peningkatan aktivitas masyarakat dan pertumbuhan ekonomi mendorong meningkatnya penggunaan kendaraan pribadi sebagai moda transportasi utama. Kondisi tersebut berimplikasi pada meningkatnya volume lalu lintas, kemacetan, serta menurunnya kinerja sistem transportasi perkotaan. Di sisi lain, minat masyarakat untuk menggunakan angkutan umum

masih relatif rendah sehingga diperlukan strategi yang mampu mendorong peralihan penggunaan kendaraan pribadi menuju transportasi umum [1] [2].

Salah satu strategi yang dapat diterapkan adalah penyediaan fasilitas *Park and Ride*. Fasilitas ini merupakan sistem parkir yang memungkinkan pengguna memarkir kendaraan pribadi di lokasi tertentu, kemudian melanjutkan perjalanan menggunakan angkutan umum sehingga mendukung integrasi antarmoda [3]. Keberadaan *Park and Ride* diharapkan mampu mengurangi penggunaan kendaraan pribadi di pusat kota, meningkatkan penggunaan angkutan umum, mengurangi kemacetan, serta meningkatkan efisiensi sistem transportasi perkotaan [4] [5].

Keberhasilan fasilitas transportasi tidak hanya ditentukan oleh ketersediaannya, tetapi juga oleh kualitas fasilitas dan pelayanan yang dirasakan oleh pengguna. Evaluasi kualitas pelayanan transportasi perlu mempertimbangkan perspektif pengguna untuk mengetahui tingkat kinerja pelayanan serta aspek yang perlu menjadi prioritas dalam peningkatan kualitas pelayanan. Pendekatan *Importance Performance Analysis* (IPA) dapat digunakan untuk mengidentifikasi atribut pelayanan berdasarkan tingkat kepentingan dan kinerja sehingga dapat diketahui aspek pelayanan yang memerlukan perhatian dan peningkatan [6]. Selain itu, aspek aksesibilitas, keamanan, kenyamanan, pelayanan petugas, ketersediaan fasilitas, dan ketepatan waktu merupakan beberapa komponen yang dapat memengaruhi persepsi pengguna terhadap kualitas pelayanan transportasi umum [7].

Sebagai bagian dari upaya meningkatkan pelayanan transportasi publik, Pemerintah Daerah Istimewa Yogyakarta telah menyediakan beberapa fasilitas *Park and Ride* yang mendukung operasional Trans Jogja, diantaranya *Park and Ride* Ngabean, Gamping, dan Prambanan. Namun demikian, penyediaan fasilitas tersebut perlu diimbangi dengan evaluasi terhadap kualitas pelayanan yang diberikan agar sesuai dengan Standar Pelayanan Minimum (SPM) sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 24 Tahun 2021 [8]. Evaluasi tidak hanya dilakukan terhadap aspek kinerja fasilitas secara kuantitatif dan kualitatif, tetapi juga terhadap tingkat kepuasan pengguna sebagai indikator keberhasilan penyelenggaraan pelayanan transportasi [9].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja *Park and Ride* Ngabean, Gamping, dan Prambanan di Daerah Istimewa Yogyakarta, tingkat kepuasan pengguna terhadap pelayanan yang diberikan, serta kesesuaian standar pelayanan kuantitatif dan kualitatif berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 24 Tahun 2021 menggunakan metode *Importance Performance Analysis* (IPA). Analisis ini dilakukan untuk mengidentifikasi aspek pelayanan yang perlu dipertahankan dan ditingkatkan berdasarkan kondisi fasilitas serta persepsi pengguna. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi bahan evaluasi bagi pengelola dan pemerintah daerah dalam menetapkan prioritas perbaikan, meningkatkan kualitas pelayanan *Park and Ride*, serta mendukung peningkatan penggunaan angkutan umum Trans Jogja.

METODOLOGI

Secara keseluruhan, penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan, dimulai dari pengumpulan data, pengolahan data, analisis kinerja *Park and Ride* berdasarkan Standar Pelayanan Minimum (SPM) sesuai Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 24 Tahun 2021, analisis tingkat kepuasan pengguna menggunakan metode *Importance Performance Analysis* (IPA), hingga pembahasan hasil penelitian dan penyusunan rekomendasi.

Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan deskriptif komparatif dan metode *Importance Performance Analysis* (IPA). Penelitian kuantitatif digunakan untuk memperoleh data yang bersifat objektif dan dianalisis secara statistik [10] [11]. Pendekatan deskriptif komparatif bertujuan untuk menggambarkan kondisi eksisting sekaligus membandingkan pencapaian Standar Pelayanan Minimum (SPM) *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta dengan standar yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 24 Tahun 2021. Selanjutnya, metode *Importance Performance Analysis* (IPA) digunakan untuk menganalisis tingkat kepentingan dan tingkat kepuasan pengguna terhadap pelayanan *Park and Ride* sebagai dasar penentuan prioritas peningkatan pelayanan transportasi umum. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan, penyebaran kuesioner, dan dokumentasi untuk memperoleh informasi sesuai dengan tujuan penelitian [12].

Metode Pengumpulan Data

Data penelitian terdiri atas data primer dan sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi, dokumentasi, dan kuesioner kepada pengguna *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta. Observasi dan dokumentasi digunakan untuk mengidentifikasi kondisi fasilitas serta mengevaluasi pemenuhan Standar Pelayanan Minimum (SPM) berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 24 Tahun 2021, sedangkan kuesioner digunakan untuk mengukur tingkat kepentingan dan kepuasan pengguna yang dianalisis dengan metode *Importance Performance Analysis* (IPA). Data sekunder diperoleh dari instansi terkait, meliputi data lokasi *Park and Ride*, trayek Trans Jogja, jumlah penumpang, dan dokumen SPM sebagai data pendukung analisis. Sumber data sekunder disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sumber Data Sekunder

Jenis Data	Sumber
Trayek Trans Jogja	DISHUB DIY
Peta Lokasi *Park and Ride* DIY	DISHUB DIY
Data fasilitas *Park and Ride*	DISHUB DIY
Jumlah Penumpang	PT Anindya Mitra Internasional

Data Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan dengan teknik *simple random sampling*, sehingga setiap pengguna *Park and Ride* memiliki peluang yang sama untuk terpilih sebagai responden. Teknik ini digunakan untuk memperoleh sampel yang merepresentasikan populasi pengguna *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta. Karena jumlah populasi tidak diketahui secara pasti, ukuran sampel ditentukan menggunakan rumus Lemeshow untuk populasi tidak diketahui [13], sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$n = \frac{Z^2 x\, P(1-P)}{d^2} \quad (1)$$

Dimana:

n = jumlah sampel

Z = nilai sesuai tingkat kepercayaan

P = proporsi populasi

d = batas kesalahan yang ditoleransi.

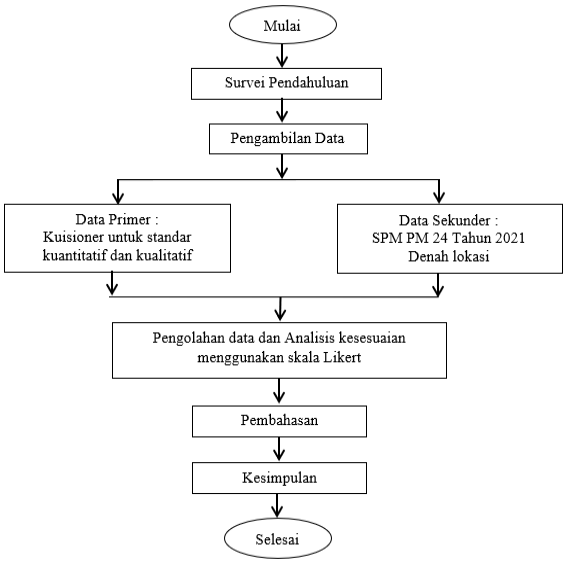
Berdasarkan Persamaan (1), jumlah sampel minimum yang diperoleh adalah sebagai berikut.

$$n = \frac{(1{,}96)^2 x\ 0{,}5(1-0{,}5)}{(0{,}10)^2} = 96{,}04$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh jumlah minimum sampel sebanyak 97 responden.

Tahapan Penelitian

Penelitian dilaksanakan melalui tahapan studi literatur, penentuan objek, pengumpulan, pengolahan dan analisis data, serta penyusunan kesimpulan. Studi literatur mencakup penelusuran teori, regulasi, dan penelitian terdahulu terkait evaluasi Standar Pelayanan Minimum (SPM) *Park and Ride*. Objek penelitian terdiri atas tiga lokasi *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta, yaitu Ngabean, Gamping, dan Prambanan. Data dikumpulkan melalui observasi, dokumentasi, wawancara, kuesioner pengguna, dan data sekunder dari instansi terkait. Analisis menggunakan pendekatan deskriptif komparatif untuk mengevaluasi pemenuhan SPM berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 24 Tahun 2021 serta metode *Importance Performance Analysis* (IPA) untuk menganalisis tingkat kepentingan dan kinerja pelayanan berdasarkan persepsi pengguna. Tahapan penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Kuesioner penelitian disusun menggunakan skala Likert lima tingkat untuk mengukur tingkat kepentingan (*importance*) dan tingkat kinerja (*performance*) sebagaimana dikembangkan oleh Martilla dan James [14]. Skala penilaian yang digunakan dalam penelitian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Skala Penilaian Tingkat Kepentingan dan Tingkat Kepuasan

Skor	Tingkat Kepentingan	Tingkat Kepuasan
1	Sangat Tidak Penting	Sangat Tidak Puas
2	Tidak Penting	Tidak Puas
3	Cukup Penting	Cukup Puas
4	Penting	Puas
5	Sangat Penting	Sangat Puas

Atribut Penelitian

Atribut penelitian disusun berdasarkan karakteristik fasilitas *Park and Ride* dan tujuan analisis persepsi pengguna. Meskipun Standar Pelayanan Minimum (SPM) dalam Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 24 Tahun 2021 mencakup berbagai aspek pelayanan, analisis *Importance Performance Analysis* (IPA) dibatasi pada tiga aspek, yaitu keselamatan (SLM), keamanan (AMN), dan kenyamanan (NYM). Pemilihan aspek tersebut didasarkan pada fokus penelitian terhadap kondisi fasilitas, perlindungan pengguna dan kendaraan, serta kenyamanan pelayanan berdasarkan persepsi pengguna.

Observasi lapangan dan analisis analisis *Importance Performance Analysis* (IPA) digunakan sebagai pendekatan yang saling melengkapi. Observasi dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi aktual fasilitas berdasarkan parameter yang diamati, sedangkan analisis *Importance Performance Analysis* (IPA) digunakan untuk menganalisis tingkat kepentingan dan kinerja atribut berdasarkan persepsi pengguna. Observasi mencakup aspek keamanan, kenyamanan, dan kemudahan, sedangkan analisis *Importance Performance Analysis* (IPA) berfokus pada aspek keselamatan, keamanan, dan kenyamanan. Keterkaitan kedua pendekatan ditentukan berdasarkan kesesuaian substansi parameter, dengan tetap mempertahankan perbedaan cakupan pengukuran masing-masing metode.

Perumusan atribut dilakukan dengan mengacu pada aspek pelayanan yang dikaji dan parameter yang relevan dalam PM 24 Tahun 2021. Indikator pada *Park and Ride* Ngabean, Gamping, dan Prambanan dipetakan berdasarkan kesetaraan substansi agar indikator yang memiliki makna sama menggunakan kode dasar dan deskripsi yang konsisten. Perbedaan indikator dipertahankan apabila memiliki substansi yang berbeda dan relevan dengan karakteristik fasilitas atau kondisi operasional lokasi. Pendekatan ini digunakan untuk menjaga konsistensi instrumen dan memastikan bahwa perbandingan hasil analisis *Importance Performance Analysis* (IPA) didasarkan pada indikator yang setara. Atribut pelayanan pada ketiga lokasi tersebut disajikan pada Tabel 3–5.

Tabel 3. Atribut Pelayanan *Park and Ride* Ngabean

No	Kode Pernyataan	Pernyataan
Aspek Keselamatan		
1	NGB-SLM1	Lokasi pintu masuk/keluar ditempatkan sejauh mungkin dari persimpangan
2	NGB-SLM2	Lebar jalan masuk/keluar sesuai dengan dimensi kendaraan dan kapasitas parkir
3	NGB-SLM3	Kendaraan dijamin aman selama berada di area parkir
4	NGB-SLM4	Lahan parkir terlihat kokoh dan terawat
5	NGB-SLM5	Lokasi parkir berdekatan dengan halte Trans Jogja
6	NGB-SLM6	Lokasi pintu masuk/keluar meminimalkan konflik dengan pengguna Trans Jogja
7	NGB-SLM7	Kemudahan keluar dan masuk area parkir
8	NGB-SLM8	Tempat parkir cukup luas sehingga tanpa ada kendaraan berdempetan
9	NGB-SLM9	Tidak memberikan dampak visual yang negatif terhadap bentuk fisik dan struktur kota
10	NGB-SLM10	Kemudahan mendapatkan parkir
Aspek Keamanan		
11	NGB-AMN1	Tersedia rambu jalan sebagai petunjuk bagi pengemudi pada saat parkir
12	NGB-AMN2	Sudah tersedia nomor lokasi parkir
13	NGB-AMN3	Tersedia lampu yang memadai di area parkir
14	NGB-AMN4	Sudah tersedia fasilitas lengkap untuk menjaga kebersihan lingkungan parkir
15	NGB-AMN5	Adanya peringatan untuk tidak meninggalkan barang di area parkir
16	NGB-AMN6	Tersedia kamera pengaman (CCTV)
17	NGB-AMN7	Area parkir sudah dikelilingi pagar pengaman
18	NGB-AMN8	Petugas parkir menjaga keamanan di area parkir
19	NGB-AMN9	Pemeriksaan tiket parkir di pintu keluar
20	NGB-AMN10	Tiket parkir sebagai indentitas parkir
Aspek Kenyamanan		
21	NGB-NYM1	Kondisi jalan dari *Park and Ride* ke Trans Jogja sudah terjamin nyaman
22	NGB-NYM2	Ketersediaan toilet bagi pengguna parkir
23	NGB-NYM3	Pola parkir mempermudah kendaraan
24	NGB-NYM4	Jarak tempuh parkir tidak terlalu jauh
25	NGB-NYM5	Kondisi tempat parkir bersih
26	NGB-NYM6	Kenyamanan berlalu lintas di area parkir
27	NGB-NYM7	Biaya parkir murah, terjangkau, dan tidak bersifat progresif
28	NGB-NYM8	Udara di area parkir membuat nyaman
29	NGB-NYM9	Penampilan tempat parkir terlihat modern
30	NGB-NYM10	Memaksimalkan perjalanan dengan Trans Jogja

Tabel 4. Atribut Pelayanan *Park and Ride* Gamping

No	Kode Pernyataan	Pernyataan
Aspek Keselamatan		
1	GMP-SLM1	Lokasi pintu masuk /keluar ditempatkan sejauh mungkin dari persimpangan
2	GMP-SLM2	Lebar jalan masuk/keluar sesuai dengan dimensi kendaraan dan kapasitas parkir
3	GMP-SLM3	Kendaraan dijamin aman selama berada di area parkir
4	GMP-SLM4	Lahan parkir terlihat kokoh dan terawat
5	GMP-SLM5	Lokasi parkir berdekatan dengan halte Trans Jogja
6	GMP-SLM6	Lokasi pintu masuk/keluar meminimalkan konflik dengan pengguna Trans Jogja
7	GMP-SLM7	Kemudahan keluar dan masuk area parkir
8	GMP-SLM8	Tempat parkir cukup luas sehingga tanpa ada kendaraan berdempetan
9	GMP-SLM9	Tidak memberikan dampak visual yang negatif terhadap bentuk fisik dan struktur kota
10	GMP-SLM10	Kemudahan mendapatkan parkir
Aspek Keamanan		
11	GMP-AMN1	Tersedia rambu jalan sebagai pentunjuk bagi pengemudi pada saat parkir
12	GMP-AMN2	Sudah tersedia nomor lokasi parkir
13	GMP-AMN3	Tersedia lampu yang memadai di area parkir
14	GMP-AMN4	Sudah tersedia fasilitas lengkap untuk menjaga kebersihan lingkungan parkir
15	GMP-AMN5	Adanya peringatan untuk tidak meninggalkan barang di area parkir
16	GMP-AMN6	Tersedia kamera pengaman (CCTV)
17	GMP-AMN7	Area parkir sudah dikelilingi pagar pengaman
18	GMP-AMN8	Petugas parkir menjaga keamanan di area parkir
19	GMP-AMN9	Pemeriksaan tiket parkir di pintu keluar
20	GMP-AMN10	Tiket parkir sebagai indentitas parkir
Aspek Kenyamanan		
21	GMP-NYM1	Kondisi jalan dari *Park and Ride* ke Trans Jogja sudah terjamin nyaman
22	GMP-NYM2	Ketersediaan toilet bagi pengguna parkir
23	GMP-NYM3	Pola parkir mempermudah kendaraan
24	GMP-NYM4	Jarak tempuh parkir tidak terlalu jauh
25	GMP-NYM5	Kondisi tempat parkir bersih
26	GMP-NYM6	Kenyamanan berlalu lintas di area parkir
27	GMP-NYM7	Biaya parkir murah, terjangkau, dan tidak bersifat progresif
28	GMP-NYM8	Udara di area parkir membuat nyaman
29	GMP-NYM9	Penampilan tempat parkir terlihat modern
30	GMP-NYM10	Memaksimalkan perjalanan dengan Trans Jogja

Tabel 5. Atribut Pelayanan *Park and Ride* Prambanan

No	Kode Pernyataan	Pernyataan
Aspek Keselamatan		
1	PRB-SLM1	Lokasi pintu keluar memudahkan kendaraan memasuki arus lalu lintas
2	PRB-SLM2	Lokasi pintu masuk/keluar berada jauh dari persimpangan
3	PRB-SLM3	Lokasi pintu masuk/keluar tidak mengganggu pergerakan Trans Jogja
4	PRB-SLM4	Penempatan fasilitas parkir tidak mengganggu bentuk fisik dan struktur kota
5	PRB-SLM5	Akses keluar masuk area parkir mudah
6	PRB-SLM6	Kendaraan terjamin aman selama berada di area parkir
7	PRB-SLM7	Jarak lokasi parkir berdekatan dengan terminal
8	PRB-SLM8	Tempat parkir cukup luas sehingga tanpa ada kendaraan berdempetan
9	PRB-SLM9	Kemudahan mendapatkan parkir
10	PRB-SLM10	Lahan parkir terlihat kokoh dan terawat
Aspek Keamanan		
11	PRB-AMN1	Area parkir dilengkapi dengan pagar pengaman
12	PRB-AMN2	Keamanan area parkir didukung oleh petugas parkir
13	PRB-AMN3	Area parkir memiliki penerangan yang memadai pada malam hari
14	PRB-AMN4	Tiket parkir digunakan sebagai identitas kendaraan
15	PRB-AMN5	Pemeriksaan tiket dilakukan di pintu keluar
16	PRB-AMN6	Tersedia kamera pengaman (CCTV)
17	PRB-AMN7	Area parkir dilengkapi dengan penanda lokasi parkir
18	PRB-AMN8	Area parkir dilengkapi dengan fasilitas penunjang kebersihan
19	PRB-AMN9	Area parkir dilengkapi dengan rambu petunjuk bagi pengemudi
20	PRB-AMN10	Tersedia peringatan untuk tidak meninggalkan barang bawaan di area parkir
Aspek Kenyamanan		
21	PRB-NYM1	Biaya parkir terjangkau dan tidak bersifat progresif
22	PRB-NYM2	Area parkir dalam kondisi bersih
23	PRB-NYM3	Tata letak area parkir memudahkan pergerakan pengguna
24	PRB-NYM4	Area parkir memiliki tampilan yang modern
25	PRB-NYM5	Perjalanan dengan Trans Jogja lebih cepat, aman, dan lancar
26	PRB-NYM6	Biaya perjalanan dengan Trans Jogja terjangkau
27	PRB-NYM7	Toilet tersedia dalam kondisi bersih dan nyaman
28	PRB-NYM8	Suhu udara di area parkir nyaman

No	Kode Pernyataan	Pernyataan
29	PRB-NYM9	Kondisi lalu lintas memberikan kenyamanan bagi pengguna
30	PRB-NYM10	Fasilitas parkir mendukung penggunaan Trans Jogja

Uji Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian berupa kuesioner diuji validitas dan reliabilitas sebelum digunakan. Uji validitas dilakukan untuk menilai ketepatan butir dalam mengukur variabel penelitian, sedangkan uji reliabilitas untuk menilai konsistensi instrumen. Pengujian menggunakan IBM SPSS, dengan validitas diuji melalui metode *Pearson Product Moment* sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$r_{xy} = \frac{n(\sum XY) - (\sum X \sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X^2)][n\sum Y^2 - (\sum Y^2)]}} \quad (2)$$

Dimana:
r_{xy} = koefisien korelasi antara variabel X dan Y
n = jumlah sampel
$\sum XY$ = jumlah perkalian dari nilai X dan Y
$\sum X$ = total jumlah dari semua nilai X
$\sum Y$ = total jumlah dari semua nilai Y
$\sum X^2$ = jumlah dari setiap nilai X yangdikuadratkan
$\sum Y^2$ = jumlah dari setiap nilai Y yang dikuadratkan.

Suatu butir pertanyaan dinyatakan valid apabila nilai r-hitung lebih besar daripada r-tabel pada tingkat signifikansi 5% [15]. Uji reliabilitas dilakukan menggunakan metode *Cronbach's Alpha* untuk mengukur tingkat konsistensi instrumen penelitian, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3). Instrumen penelitian dinyatakan reliabel apabila memiliki nilai *Cronbach's Alpha* > 0,60 yang menunjukkan bahwa instrumen memiliki tingkat konsistensi yang dapat diterima untuk digunakan dalam penelitian.

$$r11 = \left(\frac{k}{k-1}\right)\left(1 - \frac{\sum ab^2}{at^2}\right) \quad (3)$$

Dimana:
r_{11} = koefisien reliabilitas instrumen
k = jumlah atribut yang dianalisis
$\sum ab^2$ = jumlah varians dari setiap item
at^2 = varians total skor keseluruhan

Analisis Data

Analisis data menggunakan metode *Importance Performance Analysis* (IPA) untuk mengevaluasi kesesuaian antara tingkat kepentingan dan kinerja pelayanan *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta. Hasil analisis digunakan untuk mengidentifikasi atribut pelayanan yang perlu diprioritaskan dalam peningkatan kualitas berdasarkan persepsi pengguna [16] [17]. Tingkat kesesuaian diperoleh dari perbandingan antara skor rata-rata tingkat kinerja dan tingkat kepentingan pada setiap atribut pelayanan, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$Tki = \frac{x_i}{Y_i} x100\% \quad (4)$$

Dimana:
Tki = tingkat Kesesuaian responden
x_i = skor penilaian kinerja (*performance*)
y_i = skor penilaian kepentingan (*importance*)
100% = faktor pengali menjadi persentase (%).

Selanjutnya, rata-rata tingkat kinerja (*performance*) dan kepentingan (*importance*) dihitung untuk setiap atribut sebagai dasar penyusunan Diagram Kartesius. Perhitungan rata-rata tersebut menggunakan Persamaan (5).

$$\overline{X} = \frac{\sum Xi}{n}, \quad \overline{Y} = \frac{\sum Yi}{n} \quad (5)$$

Dimana:
$\overline{X}$ = rata-rata hitung dari variabel X
$\overline{Y}$ = rata-rata hitung dari variabel Y
$\sum Xi$ = jumlah nilai data variabel X ke-i
$\sum Yi$ = jumlah nilai data variabel Y ke-i
n = jumlah sampel.

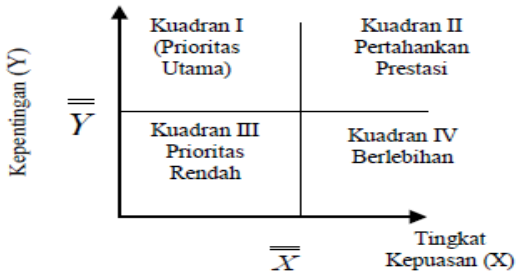
Rata-rata keseluruhan tingkat kinerja dan kepentingan digunakan sebagai titik potong sumbu pada Diagram Kartesius, masing-masing dinyatakan sebagai $\bar{\bar{X}}$ untuk kinerja dan $\bar{\bar{Y}}$ untuk kepentingan. Nilai tersebut dihitung dengan Persamaan (6).

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum \overline{xi}}{k} \quad , \quad \bar{\bar{Y}} = \frac{\sum \overline{yi}}{k} \quad (6)$$

Dimana:
$\bar{\bar{X}}$ = rata-rata dari keseluruhan variabel X
$\bar{\bar{Y}}$ = rata-rata dari keseluruhan variabel Y
$\sum \overline{xi}$ = jumlah rata-rata skor variabel X
$\sum \overline{yi}$ = jumlah rata-rata skor variabel Y
k = jumlah atribut yang dianalisis.

Selanjutnya, nilai rata-rata diplot pada Diagram Kartesius menggunakan IBM SPSS untuk memetakan atribut berdasarkan tingkat kepentingan dan kinerja. Hasil pemetaan digunakan untuk mengidentifikasi atribut yang menjadi prioritas perbaikan dan atribut yang perlu dipertahankan dalam peningkatan kualitas pelayanan *Park and Ride* di Daerah Istimewa

Yogyakarta. Diagram Kartesius disajikan pada Gambar 2.



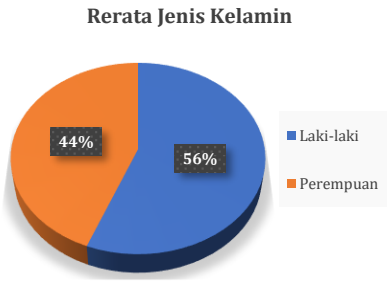
Gambar 2. Diagram Kartesius Berdasarkan *Importance Performance Analysis* (IPA)

Diagram Kartesius membagi atribut pelayanan ke dalam empat kuadran berdasarkan tingkat kepentingan dan kinerja. Kuadran I (Prioritas Utama) menunjukkan atribut dengan kepentingan tinggi dan kinerja rendah sehingga menjadi prioritas perbaikan. Kuadran II (Pertahankan Prestasi) menunjukkan atribut dengan kepentingan dan kinerja tinggi yang perlu dipertahankan. Kuadran III (Prioritas Rendah) mencakup atribut dengan kepentingan dan kinerja rendah sehingga bukan menjadi prioritas utama. Kuadran IV (Berlebihan) menunjukkan atribut dengan kepentingan rendah dan kinerja tinggi sehingga relatif tidak menjadi prioritas peningkatan [18].

HASIL DAN DISKUSI

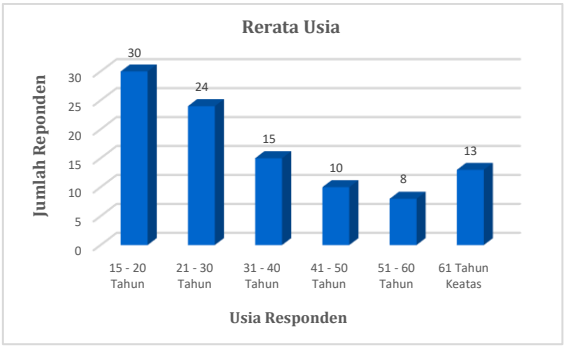
Karakteristik Responden Sosial-Ekonomi

Karakteristik responden disajikan untuk menggambarkan profil sosial-demografis pengguna *Park and Ride* sebagai konteks dalam menginterpretasikan hasil penelitian. Karakteristik yang dianalisis mencakup aspek demografis dan perjalanan untuk memberikan gambaran mengenai keragaman latar belakang serta kebutuhan pengguna terhadap fasilitas dan pelayanan *Park and Ride*.



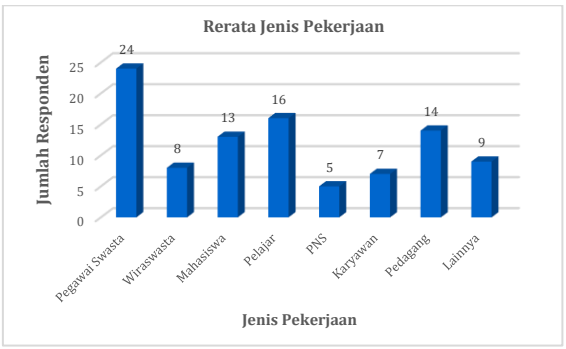
Gambar 3. Jenis Kelamin Pengguna *Park and Ride* Yogyakarta

Berdasarkan Gambar 3, responden didominasi laki-laki sebesar 56%, sedangkan perempuan sebesar 44%. Komposisi yang relatif beragam ini menunjukkan bahwa evaluasi pelayanan *Park and Ride* mencakup perspektif kedua kelompok gender. Distribusi usia responden selanjutnya digunakan untuk mengidentifikasi kelompok umur pengguna yang terlibat dalam penelitian, sehingga dapat memberikan konteks dalam menginterpretasikan hasil evaluasi pelayanan dan merumuskan upaya peningkatan fasilitas yang sesuai dengan kebutuhan pengguna.



Gambar 4. Distribusi Usia Pengguna *Park and Ride* Yogyakarta

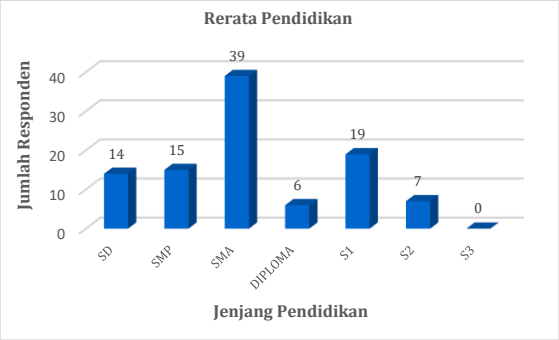
Gambar 4 menunjukkan bahwa kelompok usia 15–20 tahun merupakan kelompok responden terbanyak, yaitu 30 orang, diikuti kelompok usia 21–30 tahun sebanyak 24 orang. Sebaliknya, kelompok usia 51–60 tahun memiliki jumlah responden paling sedikit, yaitu 8 orang. Distribusi ini menunjukkan bahwa hasil evaluasi pelayanan *Park and Ride* lebih banyak merepresentasikan persepsi pengguna berusia muda. Komposisi usia tersebut menjadi konteks penting dalam menginterpretasikan hasil evaluasi, terutama terkait kebutuhan pelayanan yang mendukung kemudahan akses dan kenyamanan perjalanan. Selanjutnya, karakteristik pekerjaan dianalisis untuk memberikan konteks mengenai latar belakang aktivitas responden dalam penggunaan fasilitas *Park and Ride*.



Gambar 5. Distribusi Jenis Pekerjaan Pengguna *Park and Ride* Yogyakarta

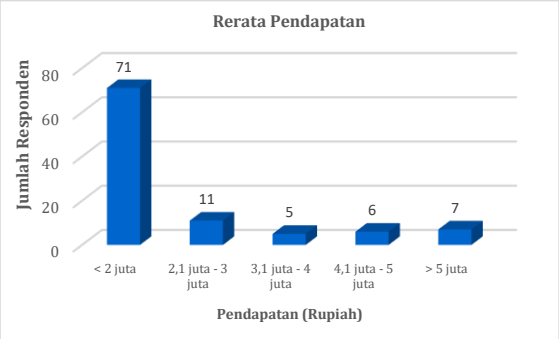
Berdasarkan Gambar 5, responden didominasi oleh pegawai swasta sebanyak 24 orang, diikuti pelajar berjumlah 16 orang, pedagang dengan

14 orang, dan mahasiswa berjumlah 13 orang. Distribusi ini menunjukkan bahwa pengguna *Park and Ride* memiliki latar belakang pekerjaan yang beragam, sehingga fasilitas ini relevan bagi berbagai kelompok dengan kebutuhan mobilitas yang berbeda. Karakteristik pendidikan responden selanjutnya disajikan untuk menggambarkan latar belakang akademik pengguna yang menjadi sampel penelitian.



Gambar 6. Distribusi Tingkat Pendidikan Pengguna Park and Ride Yogyakarta

Berdasarkan Gambar 6, responden didominasi oleh pengguna berpendidikan SMA sebanyak 39 orang, diikuti lulusan S1 sebanyak 19 orang. Distribusi ini menunjukkan bahwa responden berasal dari latar belakang pendidikan menengah hingga perguruan tinggi, sehingga memperkaya perspektif dalam evaluasi pelayanan *Park and Ride*. Selanjutnya, karakteristik pendapatan dianalisis untuk menggambarkan kondisi ekonomi responden sebagai konteks dalam memahami profil pengguna fasilitas tersebut.

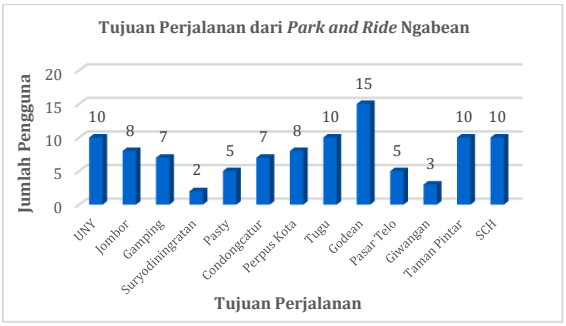


Gambar 7. Distribusi Pendapatan Pengguna *Park and Ride* Yogyakarta

Berdasarkan Gambar 7, mayoritas responden memiliki pendapatan kurang dari Rp2.000.000 sebanyak 71 orang, sedangkan kelompok berpendapatan Rp3.100.000 – Rp4.000.000 merupakan kelompok paling sedikit, yaitu 5 orang. Temuan ini menunjukkan bahwa profil responden didominasi kelompok berpendapatan relatif rendah, sehingga keterjangkauan biaya dan efisiensi perjalanan menjadi aspek yang relevan untuk dipertimbangkan dalam peningkatan pelayanan *Park and Ride*.

Karakteristik Responden Berdasar Perjalanan Tujuan Perjalanan

Karakteristik tujuan perjalanan dianalisis untuk mengidentifikasi pola pergerakan pengguna pada setiap lokasi *Park and Ride*. Hasil menunjukkan adanya perbedaan distribusi tujuan antar lokasi yang mencerminkan karakteristik kawasan pelayanan. Distribusi tujuan perjalanan di *Park and Ride* Ngabean, Gamping, dan Prambanan disajikan pada Gambar 8 hingga Gambar 10.



Gambar 8. Distribusi Tujuan Perjalanan Pengguna *Park and Ride* Ngabean

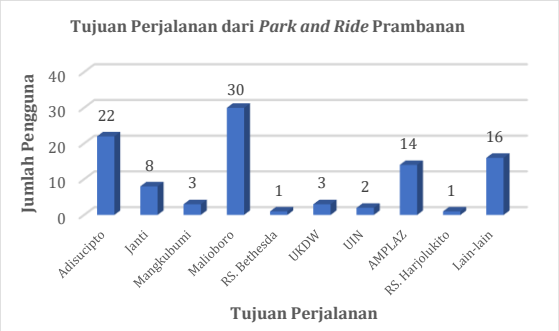
Berdasarkan Gambar 8, tujuan perjalanan pengguna *Park and Ride* Ngabean didominasi oleh kawasan Godean sebanyak 15 responden. Temuan ini mengindikasikan perlunya peningkatan kemudahan akses dan integrasi *Park and Ride* Ngabean dengan transportasi umum untuk mendukung kelancaran perpindahan moda menuju kawasan tujuan. Selain itu, keterhubungan antarmoda dan ketersediaan informasi perjalanan perlu diperhatikan guna meningkatkan efisiensi perjalanan pengguna. Dengan demikian, pengembangan pelayanan *Park and Ride* perlu mempertimbangkan pola tujuan perjalanan responden agar fasilitas yang disediakan semakin mendukung mobilitas yang terintegrasi.



Gambar 9. Distribusi Tujuan Perjalanan Pengguna *Park and Ride* Gamping

Berdasarkan Gambar 9, tujuan perjalanan pengguna *Park and Ride* Gamping didominasi oleh

kawasan Malioboro sebanyak 42 responden, sedangkan Taman Pintar, UMY, dan Alun-Alun memiliki jumlah responden paling sedikit. Perbedaan ini menunjukkan bahwa Malioboro merupakan tujuan perjalanan yang paling menonjol dalam distribusi responden. Temuan tersebut mengindikasikan pentingnya integrasi *Park and Ride* Gamping dengan transportasi umum menuju kawasan tujuan, terutama melalui kemudahan akses dan informasi perjalanan. Sementara itu, variasi tujuan lainnya menunjukkan perlunya pelayanan yang tetap mendukung konektivitas menuju berbagai kawasan aktivitas.

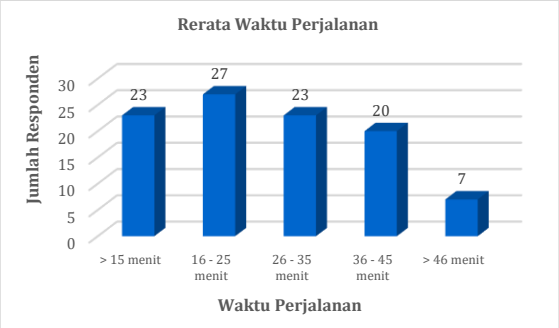


Gambar 10. Distribusi Tujuan Perjalanan Pengguna *Park and Ride* Prambanan

Berdasarkan Gambar 10, tujuan perjalanan pengguna *Park and Ride* Prambanan didominasi oleh kawasan Malioboro sebanyak 30 responden, sedangkan RS Bethesda dan RS Harjolukito merupakan tujuan dengan jumlah responden paling sedikit. Distribusi ini menunjukkan adanya konsentrasi tujuan perjalanan pada kawasan Malioboro dibandingkan tujuan lainnya. Kondisi tersebut menegaskan pentingnya keterhubungan layanan *Park and Ride* dengan transportasi umum menuju kawasan tujuan.

Waktu Perjalanan

Karakteristik waktu perjalanan responden digunakan untuk menggambarkan pola durasi perjalanan pengguna *Park and Ride* pada masing-masing lokasi penelitian. Distribusi waktu perjalanan responden disajikan pada Gambar 11.

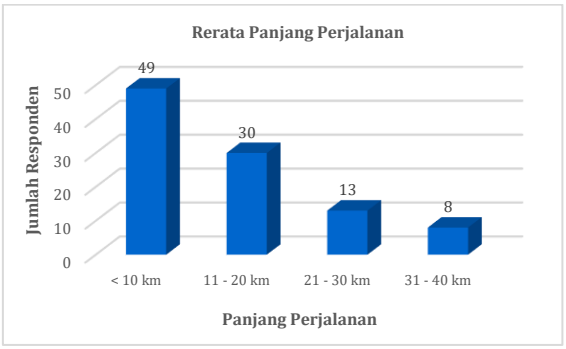


Gambar 11. Distribusi Waktu Perjalanan Pengguna *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta

Berdasarkan Gambar 11, durasi perjalanan responden paling banyak berada pada rentang 16–25 menit, yaitu 27 responden, sedangkan durasi lebih dari 46 menit merupakan kategori paling sedikit, yaitu 7 responden. Temuan ini menunjukkan bahwa pengguna memiliki variasi durasi perjalanan dalam memanfaatkan fasilitas *Park and Ride*. Implikasinya, pelayanan *Park and Ride* perlu mendukung efisiensi waktu melalui proses parkir yang praktis dan kemudahan melanjutkan perjalanan, sehingga fasilitas ini dapat memberikan nilai tambah bagi pengguna dalam menunjang mobilitas sehari-hari.

Panjang Perjalanan

Karakteristik panjang perjalanan responden dianalisis untuk menggambarkan jarak tempuh pengguna *Park and Ride* pada masing-masing lokasi penelitian. Distribusi panjang perjalanan responden disajikan pada Gambar 12.



Gambar 12. Panjang Perjalanan Pengguna *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta

Berdasarkan Gambar 12, mayoritas responden menempuh perjalanan kurang dari 10 km, yaitu sebanyak 49 responden, sedangkan jarak 31–40 km merupakan kategori dengan jumlah responden paling sedikit, yaitu 8 responden. Distribusi ini menunjukkan bahwa penggunaan *Park and Ride* dalam penelitian didominasi oleh pengguna dengan jarak perjalanan relatif pendek. Temuan ini mengindikasikan pentingnya penyediaan fasilitas *Park and Ride* yang mudah dijangkau dan praktis digunakan untuk mendukung kelancaran perpindahan moda serta efisiensi perjalanan pengguna.

Hasil Pelayanan Park and Ride Berdasarkan SPM

Evaluasi pencapaian Standar Pelayanan Minimum (SPM) dilakukan melalui observasi pada tiga lokasi *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta. Observasi bertujuan mengidentifikasi kondisi aktual fasilitas dan pelayanan berdasarkan indikator yang diamati, meliputi aspek keamanan, kenyamanan, dan kemudahan. Penilaian dilakukan

dengan memeriksa ketersediaan dan kondisi fasilitas serta fungsi pelayanan pada setiap lokasi. Hasil observasi digunakan untuk mengidentifikasi pemenuhan indikator dan aspek pelayanan yang masih memerlukan perbaikan, sebagaimana disajikan pada Tabel 6–8.

Tabel 6. Hasil Observasi Pemenuhan SPM pada Aspek Keamanan

Paramater	Hasil Observasi	Ketercapaian
Lampu penerangan	Seluruh lokasi *Park and Ride* memiliki lampu penerangan yang berfungsi dengan baik.	100%
CCTV	Seluruh lokasi telah dilengkapi CCTV yang berfungsi dengan baik.	100%
Pagar area parkir	Seluruh area parkir telah dilengkapi pagar pembatas.	100%

Tabel 7. Hasil Observasi Pemenuhan SPM pada Aspek Kenyamanan

Paramater	Hasil Observasi	Ketercapaian
Pendingin ruang tunggu	Seluruh ruang tunggu menggunakan kipas angin yang berfungsi dengan baik.	100%
Petugas penjaga	Petugas tersedia di *Park and Ride* Ngabean dan Prambanan, namun belum tersedia di Gamping	50%
Mushola	Fasilitas mushola belum tersedia pada seluruh lokasi.	50%
Kebersihan area parkir	Area parkir pada seluruh lokasi dalam kondisi bersih dan terawat.	100%
Toilet	Toilet pada seluruh lokasi dalam kondisi bersih dan berfungsi dengan baik.	100%
Kemiringan dan tekstur lantai	Seluruh lokasi menyediakan jalur landai dan tekstur pemandu untuk aksesibilitas.	100%

Tabel 8. Hasil Observasi Pemenuhan SPM pada Aspek Kemudahan

Paramater	Hasil Observasi	Ketercapaian
Transit center	Seluruh lokasi telah terintegrasi sebagai titik transit antarmoda.	100%
Sistem informasi	Sistem informasi tersedia dan berfungsi pada seluruh lokasi.	100%
Lokasi terhadap CBD	Seluruh *Park and Ride* berada pada kawasan sub-urban yang mendukung akses menuju pusat kota.	100%
Pusat aktivitas sosial	Seluruh lokasi berada pada kawasan pusat aktivitas sosial.	100%
Jalur pejalan kaki	Jalur pejalan kaki tersedia menuju halte atau titik keberangkatan bus.	100%
E-ticketing	Pembayaran *e-ticketing* tersedia pada tiga lokasi *Park and Ride*.	75%

Hasil observasi menunjukkan bahwa pemenuhan fasilitas *Park and Ride* telah mendukung penyelenggaraan pelayanan, khususnya melalui ketersediaan fasilitas keamanan seperti penerangan, CCTV, dan pagar pembatas. Namun, ketersediaan fasilitas fisik tersebut belum sepenuhnya merepresentasikan kualitas pelayanan secara menyeluruh. Pada aspek kenyamanan, belum meratanya ketersediaan petugas penjaga dan fasilitas musala mengindikasikan adanya kebutuhan pengguna yang belum terakomodasi secara optimal. Sementara itu, pada aspek kemudahan, ketersediaan sistem informasi dan jalur pejalan kaki mendukung aksesibilitas pengguna, tetapi belum meratanya fasilitas *e-ticketing* menunjukkan bahwa kemudahan transaksi masih perlu ditingkatkan. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan kualitas layanan perlu diarahkan pada pemenuhan kebutuhan pengguna secara berkelanjutan

Uji Validasi dan Reliabilitas

Kualitas instrumen penelitian diuji melalui uji validitas dan reliabilitas sebelum dilakukan analisis kualitas pelayanan *Park and Ride*. Pengujian dilakukan menggunakan IBM SPSS 25 dengan metode *Pearson Product Moment* dan *Cronbach's Alpha*. Instrumen dinyatakan valid apabila nilai *r* hitung > *r* tabel (0,1966) dan dinyatakan reliabel apabila nilai *Cronbach's Alpha* > 0,70. Hasil uji validitas instrumen penelitian sebagaimana disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Uji Validitas

Variabel	Jumlah Item	Rentang *r* hitung	*r* tabel	Keterangan
Kepuasan	28	0,197–0,478	0,1966	Valid
Kepentingan	28	0,378–0,807	0,1966	Valid

Berdasarkan Tabel 9, nilai *r* hitung pada variabel kepuasan berada pada rentang 0,197–0,478, sedangkan pada variabel kepentingan berada pada rentang 0,378–0,807. Secara umum, seluruh nilai *r* hitung lebih besar daripada *r* tabel (0,1966), sehingga instrumen penelitian dinyatakan valid.

Uji reliabilitas dilakukan untuk mengukur tingkat konsistensi instrumen penelitian dalam mengukur variabel yang diteliti. Hasil uji reliabilitas berdasarkan nilai *Cronbach's Alpha* disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Rekapitulasi Hasil Uji Reliabilitas

Variabel	Jumlah Item	Cronbach's Alpha	Kriteria	Keterangan
Kepuasan	28	0,920	> 0,70	Reliabel
Kepentingan	28	0,938	> 0,70	Reliabel

Berdasarkan Tabel 10, nilai *Cronbach's Alpha* pada variabel kinerja dan kepentingan masing-

masing sebesar 0,920 dan 0,938. Nilai tersebut lebih besar dari batas minimum 0,70, sehingga instrumen penelitian dinyatakan reliabel dan memiliki tingkat konsistensi yang baik untuk digunakan pada tahap analisis selanjutnya.

Tingkat Kesesuaian Fasilitas Park and Ride

Analisis tingkat kesesuaian dilakukan menggunakan metode *Importance Performance Analysis* (IPA) untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara kinerja (*performance*) dan tingkat kepentingan (*importance*) berdasarkan persepsi pengguna *Park and Ride*.

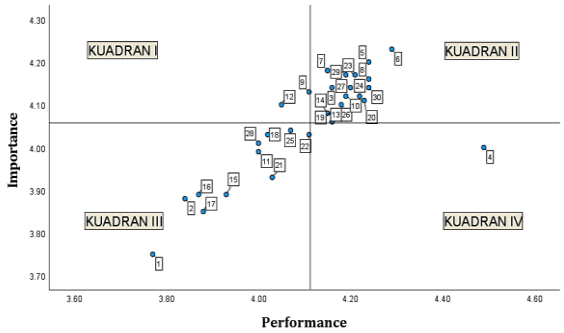
Park and Ride Ngabean

Tingkat kesesuaian pelayanan *Park and Ride* Ngabean dianalisis berdasarkan persepsi pengguna terhadap variabel keselamatan, keamanan, dan kenyamanan. Hasil analisis disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Tingkat Kesesuaian pada *Park and Ride* Ngabean

No	Kode Pernyataan	Kinerja (Xi)	Kepentingan (Yi)	Tki $\frac{Xi}{Yi}$x100%
Aspek Keselamatan				
1	NGB-SLM1	3,77	3,75	100,53%
2	NGB-SLM2	3,84	3,88	98,97%
3	NGB-SLM3	4,16	4,14	100,48%
4	NGB-SLM4	4,49	4,00	99,26%
5	NGB-SLM5	4,24	4,20	100,95%
6	NGB-SLM6	4,29	4,23	101,42%
7	NGB-SLM7	4,15	4,18	99,28%
8	NGB-SLM8	4,24	4,16	101,92%
9	NGB-SLM9	4,11	4,13	99,15%
10	NGB-SLM10	4,19	4,12	101,70%
Aspek Keamanan				
11	NGB-AMN1	4,00	3,99	100,25%
12	NGB-AMN2	4,05	4,10	98,78%
13	NGB-AMN3	4,16	4,06	102,46%
14	NGB-AMN4	4,15	4,08	101,71%
15	NGB-AMN5	3,93	3,89	101,03%
16	NGB-AMN6	3,87	3,89	99,48%
17	NGB-AMN7	3,88	3,85	100,78%
18	NGB-AMN8	4,02	4,03	99,75%
19	NGB-AMN9	4,16	4,08	101,96%
20	NGB-AMN10	4,23	4,11	102,92%
Aspek Kenyamanan				
21	NGB-NYM1	4,03	3,93	102,54%
22	NGB-NYM2	4,11	4,03	101,98%
23	NGB-NYM3	4,21	4,17	100,96%
24	NGB-NYM4	4,22	4,12	102,43%
25	NGB-NYM5	4,07	4,04	100,74%
26	NGB-NYM6	4,18	4,10	101,95%
27	NGB-NYM7	4,20	4,14	101,45%
28	NGB-NYM8	4,00	4,01	99,75%
29	NGB-NYM9	4,19	4,17	100,48%
30	NGB-NYM10	4,24	4,14	102,41%

Analisis *Importance Performance Analysis* (IPA) digunakan untuk memetakan tingkat kinerja dan tingkat kepentingan setiap indikator pelayanan ke dalam Diagram Kartesius. Analisis dilakukan menggunakan IBM SPSS *Statistic* 25 dengan pendekatan *scatter plot*, sehingga posisi masing-masing indikator dapat dipetakan berdasarkan nilai *performance* pada sumbu X dan *importance* pada sumbu Y. Pemetaan tersebut digunakan untuk mengidentifikasi indikator yang menjadi prioritas peningkatan maupun indikator yang perlu dipertahankan kualitas pelayanannya pada *Park and Ride* Ngabean. Hasil pemetaan berdasarkan empat kuadran *Importance Performance Analysis* (IPA) disajikan pada Gambar 13.



Gambar 13. Diagram Kartesius *Park and Ride* Ngabean

Berdasarkan Gambar 13, hasil *Importance Performance Analysis* (IPA) pada *Park and Ride* Ngabean menunjukkan bahwa sebagian besar atribut berada pada Kuadran II dan perlu dipertahankan. Sementara itu, dua atribut pada Kuadran I (*Prioritas Utama*) meliputi ketersediaan nomor lokasi parkir (NGB-AMN2) dan atribut tidak memberikan dampak visual negatif terhadap bentuk fisik dan struktur kota (NGB-SLM9). Posisi tersebut menunjukkan bahwa kedua atribut memiliki tingkat kepentingan relatif tinggi, tetapi kinerjanya masih perlu ditingkatkan. Oleh karena itu, perbaikan perlu difokuskan pada penyediaan penanda lokasi parkir yang jelas serta penataan kawasan parkir agar selaras dengan lingkungan dan struktur kota.

Park and Ride Gamping

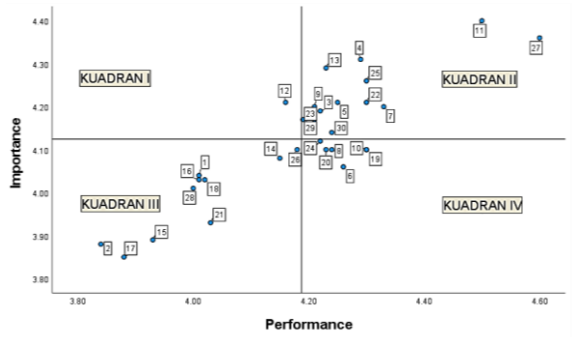
Tingkat kesesuaian pelayanan *Park and Ride* Gamping dianalisis berdasarkan persepsi pengguna terhadap aspek keselamatan, keamanan, dan kenyamanan. Hasil analisis disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. Tingkat Kesesuaian pada *Park and Ride* Gamping

No	Kode Pernyataan	Kinerja (Xi)	Kepentingan (Yi)	Tki $\frac{Xi}{Yi}$x100%
Aspek Keselamatan				
1	GMP-SLM1	4,01	4,04	99,45%
2	GMP-SLM2	3,84	3,88	99,97%
3	GMP-SLM3	4,22	4,19	100,48%
4	GMP-SLM4	4,29	4,31	99,33%

No	Kode Pernyataan	Kinerja (Xi)	Kepentingan (Yi)	Tki $\frac{Xi}{Yi}$x100%
5	GMP-SLM5	4,25	4,21	100,95%
6	GMP-SLM6	4,26	4,06	104,25%
7	GMP-SLM7	4,33	4,20	103,09%
8	GMP-SLM8	4,24	4,10	103,41%
9	GMP-SLM9	4,21	4,20	100,24%
10	GMP-SLM10	4,30	4,10	104,70%
Aspek Keamanan				
11	GMP-AMN1	4,50	4,40	102,27%
12	GMP-AMN2	4,16	4,21	98,78%
13	GMP-AMN3	4,23	4,29	98,46%
14	GMP-AMN4	4,15	4,08	101,71%
15	GMP-AMN5	3,93	3,89	101,03%
16	GMP-AMN6	4,01	4,03	99,48%
17	GMP-AMN7	3,88	3,85	100,78%
18	GMP-AMN8	4,02	4,03	99,75%
19	GMP-AMN9	4,30	4,10	104,96%
20	GMP-AMN10	4,23	4,10	102,92%
Aspek Kenyamanan				
21	GMP-NYM1	4,03	3,93	102,54%
22	GMP-NYM2	4,30	4,21	101,98%
23	GMP-NYM3	4,21	4,17	100,96%
24	GMP-NYM4	4,22	4,12	102,43%
25	GMP-NYM5	4,30	4,26	100,74%
26	GMP-NYM6	4,18	4,10	101,95%
27	GMP-NYM7	4,60	4,36	101,45%
28	GMP-NYM8	4,00	4,01	99,75%
29	GMP-NYM9	4,19	4,17	100,48%
30	GMP-NYM10	4,24	4,14	102,41%

Analisis *Importance Performance Analysis* (IPA) digunakan untuk memetakan tingkat kinerja dan tingkat kepuasan setiap indikator pelayanan pada *Park and Ride* Gamping menggunakan IBM SPSS *Statistic* 25 dengan pendekatan *scatter plot*. Hasil pemetaan digunakan untuk mengidentifikasi prioritas peningkatan dan mempertahankan kualitas pelayanan. Diagram Kartesius disajikan pada Gambar 14.



Gambar 14. Diagram Kartesius *Park and Ride* Gamping

Berdasarkan Gambar 14, hasil *Importance Performance Analysis* (IPA) pada *Park and Ride* Gamping menunjukkan bahwa sebagian besar atribut berada pada Kuadran II dan perlu dipertahankan. Sementara itu, atribut ketersediaan nomor lokasi parkir (GMP-AMN2) berada pada Kuadran I (*Prioritas Utama*), yang menunjukkan bahwa atribut tersebut dianggap penting oleh pengguna, tetapi kinerjanya masih perlu ditingkatkan. Oleh karena itu, pengelola perlu memprioritaskan penyediaan penanda lokasi parkir yang jelas dan mudah dikenali guna mempermudah identifikasi lokasi parkir serta meningkatkan keteraturan pelayanan.

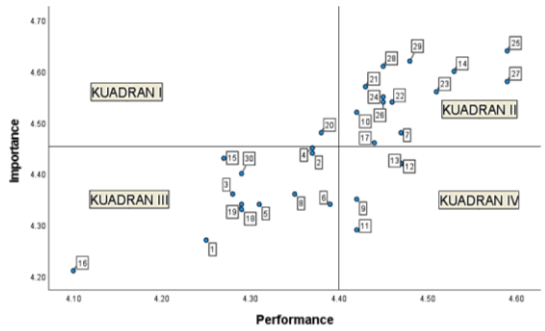
Park and Ride Prambanan

Tingkat kesesuaian pelayanan *Park and Ride* Prambanan berdasarkan persepsi pengguna terhadap aspek keselamatan, keamanan, dan kenyamanan. Hasil analisis disajikan pada Tabel 13.

Tabel 13. Tingkat Kesesuaian pada *Park and Ride* Prambanan

No	Kode Pernyataan	Kinerja (Xi)	Kepentingan (Yi)	Tki $\frac{Xi}{Yi}$x100%
Aspek Keselamatan				
1	PRB-SLM1	4,25	4,27	99,53%
2	PRB-SLM2	4,37	4,44	98,42%
3	PRB-SLM3	4,28	4,36	98,16%
4	PRB-SLM4	4,37	4,45	98,20%
5	PRB-SLM5	4,31	4,34	99,31%
6	PRB-SLM6	4,39	4,34	101,15%
7	PRB-SLM7	4,47	4,48	99,77%
8	PRB-SLM8	4,35	4,36	99,77%
9	PRB-SLM9	4,42	4,35	101,60%
10	PRB-SLM10	4,42	4,52	97,78%
Aspek Keamanan				
11	PRB-AMN1	4,42	4,29	103,03%
12	PRB-AMN2	4,47	4,42	101,13%
13	PRB-AMN3	4,47	4,42	101,13%
14	PRB-AMN4	4,53	4,60	98,48%
15	PRB-AMN5	4,27	4,43	96,39%
16	PRB-AMN6	4,10	4,21	97,39%
17	PRB-AMN7	4,44	4,46	99,55%
18	PRB-AMN8	4,29	4,33	99,07%
19	PRB-AMN9	4,29	4,34	98,84%
20	PRB-AMN10	4,38	4,48	97,76%
Aspek Kenyamanan				
21	PRB-NYM1	4,43	4,57	96,93%
22	PRB-NYM2	4,46	4,54	98,23%
23	PRB-NYM3	4,51	4,56	98,90%
24	PRB-NYM4	4,45	4,55	97,80%
25	PRB-NYM5	4,59	4,64	98,92%
26	PRB-NYM6	4,45	4,54	98,07%
27	PRB-NYM7	4,59	4,58	100,21%
28	PRB-NYM8	4,45	4,61	96,25%
29	PRB-NYM9	4,48	4,62	96,96%
30	PRB-NYM10	4,29	4,40	97,50%

Hasil pemetaan digunakan untuk mengidentifikasi prioritas peningkatan dan mempertahankan kualitas pelayanan. Diagram Kartesius disajikan pada Gambar 15.



Gambar 15. Diagram Kartesius *Park and Ride* Prambanan

Berdasarkan Gambar 15, hasil *Importance Performance Analysis* (IPA) pada *Park and Ride* Prambanan menunjukkan bahwa sebagian besar atribut berada pada Kuadran II dan perlu dipertahankan. Sementara itu, atribut pemeriksaan tiket di pintu keluar (PRB-AMN5) berada pada Kuadran I (*Prioritas Utama*), yang menunjukkan bahwa atribut tersebut dinilai penting oleh pengguna, tetapi kinerjanya masih perlu ditingkatkan. Secara manajerial, pengelola perlu memprioritaskan evaluasi dan konsistensi prosedur pemeriksaan tiket di pintu keluar guna memperkuat pengendalian kendaraan, sekaligus mempertahankan kinerja atribut pada Kuadran II.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, pencapaian Standar Pelayanan Minimum (SPM) fasilitas *Park and Ride* di Daerah Istimewa Yogyakarta secara keseluruhan mencapai 98,99%. Hasil *Importance Performance Analysis* (IPA) pada *Park and Ride* Ngabean, Gamping, dan Prambanan menunjukkan bahwa sebagian besar atribut pelayanan berada pada Kuadran II (*Pertahankan Kinerja*), sedangkan atribut pada Kuadran I (*Prioritas Utama*) masih memerlukan peningkatan. Temuan ini menunjukkan bahwa capaian SPM yang tinggi perlu diimbangi dengan evaluasi terhadap atribut pelayanan yang dianggap penting oleh pengguna, tetapi kinerjanya masih relatif rendah. Oleh karena itu, peningkatan pelayanan perlu difokuskan pada pemenuhan standar yang belum optimal dan perbaikan atribut prioritas berdasarkan persepsi pengguna, dengan tetap mempertahankan kinerja pelayanan yang telah baik. Hasil evaluasi ini dapat menjadi dasar bagi pengelola dan pemerintah daerah dalam menetapkan prioritas perbaikan fasilitas dan pelayanan *Park and Ride* guna mendukung integrasi antarmoda serta meningkatkan kualitas pelayanan transportasi umum di Daerah Istimewa Yogyakarta.

REFERENSI

[1] S. E. Palupiningtyas, "Kriteria Fasilitas Park and Ride Sebagai Pendukung Angkutan Umum Massal Berbasis Jalan," Jakarta Pusat, Apr. 2015.

[2] A. G. Asapa, "Park and Ride Sebagai Bagian dari Pelayanan Kereta Api Perkotaan Bandung," *Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota*, vol. 25, no. 2, pp. 157–173, Aug. 2014, doi: https://doi.org/10.5614/jpwk.2015.25.2.5.

[3] B. Krisnady and T. Rahaju, "Implementasi Kebijakan Parkir Park and Ride Mayjend Sungkono Pada Dinas Perhubungan Kota Surabaya," Surabaya, Jun. 2020. doi: https://doi.org/10.26740/publika.v8n3.p%25p.

[4] M. N. B. Adi, S. Priyanto, and S. Malkhamah, "Evaluasi Kinerja Halte Bus dengan Metode SERVQUAL (Studi Kasus Halte Trans Jogja Trayek 1A, 1B, 2A, dan 2B)," *Jurnal Teknisia*, vol. 25, no. 1, pp. 10–20, May 2020, doi: https://doi.org/10.20885/teknisia.vol25.iss1.art2.

[5] F. A. Darmawan and W. Herijanto, "Perencanaan Gedung Park and Ride di Stasiun Maguwo Yogyakarta untuk Mendukung Beroperasinya KRL Solo–Yogyakarta," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 11, pp. E15–E20, 2022, doi: 10.12962/j23373539.v11i1.82290.

[6] P. Astuti, R. Marsela, Mardianto, and T. A. Putri, "Persepsi Masyarakat Terhadap Fasilitas Dan Pelayanan Angkutan Umum Trans Metro Pekanbaru," *Jurnal Saintis*, vol. 18, pp. 23–32, Oct. 2018, doi: https://doi.org/10.25299/saintis.2018.vol18(2).3149.

[7] M. Z. Muttaqin, "Kualitas Pelayanan Trans Metro Pekanbaru Sebagai Angkutan Komuter Mahasiswa (Studi Kasus: Kelompok Mahasiswa Komuter Fakultas Teknik Universitas Islam Riau," Apr. 2017. doi: https://doi.org/10.25299/saintis.2018.vol18(2).3149.

[8] T. Murtejo, A. Muhajir, A. Alimuddin, and N. Chayati, "Evaluasi Kinerja Angkutan Umum Trans Pakuan Trayek Terminal Bubulak via Cidangiang – Ciawi di Kota Bogor," *Jurnal Komposit*, vol. 7, no. 1, pp. 61–68, Feb. 2023, doi: 10.32832/komposit.v7i1.7367.

[9] S. Al Farisi and W. Herijanto, "Perencanaan Gedung Park and Ride di Stasiun Bojong

Gede Kecamatan Bojong Gede Kabupaten Bogor Jawa Barat," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 9, no. 1, pp. E20–E25, Jul. 2020, doi: 10.12962/j23373539.v9i1.50466.

[10] S. Siyoto and M. A. Sodik, *Dasar Metodologi Penelitian*. Yogyakarta: Literasi Media Publishing, 2015.

[11] S. Suryabrata, *Metodologi Penelitian*, 2nd ed. Jakarta: Rajawali Pers, 2005.

[12] S. Effendi, *Metode penelitian survei*, 3rd ed. Jakarta: LP3ES, 2012.

[13] S. Lemeshow, D. W. Hosmer, J. Klar, and S. K. Lwanga, *Besar Sampel dalam Penelitian Kesehatan*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 1997.

[14] J. A. Martilla and J. C. James, "Importance-Performance Analysis," *J. Mark.*, vol. 41, no. 1, pp. 77–79, Jan. 1977.

[15] I. Ghozali, *Aplikasi Analisis Multivariate dengan Program IBM SPSS 19*, 5th ed. Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro, 2011.

[16] L. Fajri, S. Sugiarto, and R. Anggraini, "Penerapan Metode IPA (Importance Performance Analysis) untuk Menganalisis Kepentingan dan Kepuasan Penumpang terhadap Kualitas Pelayanan Bus Trans Koetaradja (Studi Kasus: Koridor I Keudah–Darussalam)," *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil dan Perencanaan*, vol. 2, no. 2, pp. 164–173, Jun. 2019, doi: 10.24815/jarsp.v2i2.13453.

[17] Firdaus, "Aplikasi Metode Importance Performance Analysis (IPA) dan Customer Satisfaction Index (CSI) untuk Analisa Peningkatan Kualitas Pelayanan Berdasarkan Persepsi Pengguna Moda Transportasi Bus AKDP dan AKAP pada Terminal Type B (Studi Kasus pada Terminal Caruban – Kabupaten Madiun)," *Develop*, vol. 4, no. 1, pp. 63–84, 2020, doi: 10.25139/dev.v4i1.2277.

[18] J. Supranto, *Pengukuran Tingkat Kepuasan Pelanggan untuk Menaikkan Pangsa Pasar*. Jakarta: Rineka Cipta, 2006.

http://journal.uir.ac.id/index.php/saintis

Jurnal Saintis

ISSN (Print) : 1410-7783
ISSN (Online) : 2580-7110

Volume 26 Nomor 02, Oktober 2026 : 95-108

Pengaruh Porositas Beton Agregat Batu Apung Terhadap Kuat Tekan dan Permeabilitas Menggunakan Analisa X-ray CT

Effects of Porosity on the Compressive Strength and Permeability of Pumice Aggregate Lightweight Concrete Using X-ray Micro-CT

Ivan Sandi Darma [1,*], Dimas Agustiana Putra [2], Husnah [3]

[1,2] *Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No.10, Kota Bandung, Indonesia*

[3] *Program Studi Teknik Sipil, Universitas Abdurrab, Jalan Riau Ujung No.73, Kota Pekanbaru, Indonesia*

* Penulis korespondensi : ivansandi@itb.ac.id

Tel.: +62-82-251-005791

Diterima: Sep 25, 2026; Direvisi: Okt 01, 2026; Disetujui: Oktober 20, 2026.

DOI: 10.25299/saintis.2026.vol26(02).30343

Abstrak

Beton ringan dengan agregat batu apung memiliki struktur internal berpori yang dapat memengaruhi kuat tekan dan permeabilitas. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi hubungan antara distribusi porositas, kuat tekan, dan permeabilitas beton agregat batu apung melalui integrasi pengujian eksperimental dan analisis X-ray micro-computed tomography (micro-CT). Campuran beton dirancang dengan rasio air-semen (w/c) sebesar 0,35; 0,45; dan 0,60. Pengujian meliputi kuat tekan, penetrasi air bertekanan, serta karakterisasi porositas agregat dan mortar menggunakan X-ray micro-CT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sekitar 90% porositas terdeteksi berada di dalam agregat batu apung, dengan porositas total sebesar 17,68–18,62%. Peningkatan w/c dari 0,35 menjadi 0,60 menurunkan kuat tekan umur 28 hari sebesar 31,7%, dari 17,27 MPa menjadi 11,80 MPa, serta meningkatkan kedalaman penetrasi air dari 16,10 mm menjadi 19,88 mm. Estimasi koefisien permeabilitas menggunakan pendekatan Valenta dengan asumsi konektivitas pori menghasilkan rentang (1,18–1,30) × 10^{-12} m/s hingga (1,90–2,09) × 10^{-12} m/s. Pengamatan pola keruntuhan menunjukkan bahwa retak melintasi agregat batu apung, sedangkan evaluasi empiris berbasis porositas memperlihatkan keterbatasan penerapan model kuat tekan mortar pada beton ringan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dominasi volume pori agregat tidak secara langsung merepresentasikan kontribusinya terhadap kuat tekan maupun permeabilitas. Oleh karena itu, evaluasi kinerja beton agregat batu apung perlu mempertimbangkan distribusi porositas pada masing-masing fase material, karakteristik mekanis agregat, dan konektivitas jaringan pori.

Kata Kunci: *Beton ringan, Batu apung, X-ray micro-CT, Porositas, Kuat tekan, Permeabilitas*

Abstract

Pumice aggregate lightweight concrete contains a highly porous internal structure that may influence its compressive strength and permeability. This study investigates the relationships among pore distribution, compressive strength, and permeability through an integrated experimental and X-ray micro-computed tomography (micro-CT) approach. Concrete mixtures with water-to-cement (w/c) ratios of 0.35, 0.45, and 0.60 were evaluated using compressive strength tests, pressurized water penetration tests, and X-ray micro-CT characterization of aggregate and mortar porosity. The results showed that approximately 90% of the detected pore volume was located within the pumice aggregates, while the total CT-detectable porosity ranged from 17.68% to 18.62%. Increasing the w/c ratio from 0.35 to 0.60 reduced the 28-day compressive strength by 31.7%, from 17.27 MPa to 11.80 MPa, and increased the water penetration depth from 16.10 mm to 19.88 mm. Permeability coefficients estimated using the Valenta approach with assumed pore connectivity ranged from (1.18–1.30) × 10^{-12} m/s to (1.90–2.09) × 10^{-12} m/s. Failure observations revealed cracks propagating through pumice aggregates, while porosity-based empirical analysis highlighted the limitations of applying mortar strength models to lightweight aggregate concrete. These findings indicate that the dominant pore volume within pumice aggregates does not directly represent their contribution to compressive strength or water permeability. Therefore, evaluating pumice aggregate concrete requires consideration of phase-specific pore distributions, aggregate mechanical characteristics, and pore network connectivity.

Keywords: *Lightweight concrete; Pumice aggregate; X-ray micro-CT; Porosity; Compressive strength; Permeability*

PENDAHULUAN

Beton ringan merupakan salah satu alternatif material konstruksi yang dikembangkan untuk mengurangi berat sendiri struktur tanpa mengabaikan persyaratan kinerja mekanis dan durabilitas. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah mengganti agregat konvensional dengan agregat ringan alami, seperti batu apung (*pumice*). Batu apung memiliki struktur internal berpori dan berat jenis relatif rendah sehingga berpotensi menghasilkan beton dengan berat isi yang lebih kecil dibandingkan beton normal. Namun, karakteristik porositas agregat yang tinggi juga dapat memengaruhi kekuatan mekanis dan kemampuan beton dalam menahan penetrasi air. [1] melalui

kajian komprehensif menunjukkan bahwa penggunaan agregat batu apung dapat menurunkan berat isi beton, tetapi umumnya disertai penurunan sifat mekanis serta perubahan karakteristik penyerapan air dan durabilitas.

Pengaruh agregat batu apung terhadap karakteristik mekanis dan durabilitas beton telah dikaji oleh sejumlah peneliti. [2] mengevaluasi beton ringan berbasis batu apung melalui pengujian kuat tekan, kuat tarik, modulus elastisitas, permeabilitas air, serta karakterisasi pori menggunakan *mercury intrusion porosimetry* (MIP). Penelitian tersebut menunjukkan pentingnya mempertimbangkan sifat mekanis dan durabilitas secara bersamaan dalam pengembangan beton agregat batu apung. Selanjutnya, [3] mengevaluasi pengaruh variasi proporsi agregat batu apung terhadap karakteristik mekanis dan pola keruntuhan beton ringan. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa peningkatan proporsi agregat batu apung dapat mengubah karakteristik keruntuhan dan menurunkan performa mekanis beton. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa karakteristik agregat ringan merupakan salah satu faktor penting dalam menentukan respons mekanis beton.

Hubungan antara porositas dan kekuatan material berbasis semen juga telah dikembangkan melalui pendekatan empiris. [4] mengevaluasi hubungan porositas terhadap kuat tekan dan kuat tarik mortar serta menunjukkan bahwa perubahan porositas dapat direpresentasikan menggunakan model empiris kekuatan material berpori. Namun, penerapan hubungan tersebut pada beton agregat batu apung memerlukan pertimbangan tambahan karena beton merupakan material komposit yang terdiri atas mortar dan agregat dengan karakteristik porositas serta kekakuan yang berbeda. Pada beton agregat batu apung, keberadaan pori tidak hanya ditemukan pada matriks mortar, tetapi juga terkonsentrasi di dalam agregat kasar. Oleh karena itu, distribusi porositas pada masing-masing komponen perlu dipertimbangkan untuk memahami hubungan antara struktur internal dan kuat tekan beton.

Selain memengaruhi kekuatan mekanis, karakteristik jaringan pori juga berperan dalam menentukan kemampuan material terhadap penetrasi air. [5] menunjukkan bahwa permeabilitas mortar dipengaruhi oleh distribusi ukuran pori, konektivitas, dan tortuositas jalur aliran. Temuan tersebut menunjukkan bahwa porositas total tidak selalu dapat digunakan secara langsung untuk menggambarkan kemampuan air mengalir melalui material. Pada beton agregat batu apung, mekanisme ini menjadi lebih kompleks karena pori pada agregat dan mortar dapat memiliki karakteristik serta tingkat konektivitas yang berbeda. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mampu mengidentifikasi distribusi porositas pada masing-masing komponen beton sebagai dasar interpretasi karakteristik permeabilitas.

Perkembangan teknologi *X-ray micro-computed tomography* (micro-CT) memungkinkan pengamatan struktur internal material secara tiga dimensi tanpa merusak benda uji. Melalui proses rekonstruksi dan segmentasi citra, distribusi agregat, mortar, dan pori dapat diidentifikasi secara kuantitatif berdasarkan perbedaan karakteristik atenuasi sinar-X. [6] menunjukkan potensi penggunaan micro-CT dan nano-CT dalam karakterisasi jaringan pori material berbasis semen. Meskipun demikian, kemampuan metode ini sangat dipengaruhi oleh resolusi pemindaian dan proses segmentasi citra. Pada material heterogen seperti beton agregat batu apung, variasi densitas serta distribusi pori di dalam agregat juga dapat menimbulkan kesulitan dalam membedakan fase agregat, mortar, dan rongga.

Berdasarkan penelitian terdahulu, hubungan antara penggunaan agregat batu apung dengan karakteristik mekanis dan durabilitas beton telah banyak dibahas. Demikian pula, hubungan porositas dengan kekuatan dan permeabilitas material berbasis semen telah dikembangkan melalui berbagai pendekatan eksperimental maupun empiris. Namun, kajian yang mengintegrasikan kuantifikasi porositas agregat dan mortar secara terpisah melalui X-ray micro-CT dengan evaluasi kuat tekan serta estimasi permeabilitas pada beton agregat batu apung masih memerlukan pengembangan lebih lanjut. Secara khusus, diperlukan pemahaman mengenai bagaimana dominasi porositas internal agregat memengaruhi interpretasi kontribusi mekanis agregat dan estimasi karakteristik transport air dalam beton ringan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi hubungan antara karakteristik porositas, kuat tekan, dan permeabilitas beton agregat batu apung dengan variasi rasio air-semen (w/c) sebesar 0,35; 0,45; dan 0,60. Analisis dilakukan melalui pengujian kuat tekan, pengujian penetrasi air bertekanan, serta pemindaian X-ray micro-CT yang dilanjutkan dengan segmentasi citra untuk mengidentifikasi porositas agregat dan mortar. Hasil karakterisasi porositas digunakan sebagai dasar evaluasi empiris hubungan porositas dengan kuat tekan dan estimasi koefisien permeabilitas. Kontribusi penelitian ini

terletak pada pendekatan integratif yang menghubungkan karakteristik mikrostruktur agregat batu apung dengan respons mekanis dan permeabilitas beton ringan, sehingga dapat memberikan dasar ilmiah bagi evaluasi serta pengembangan campuran beton ringan berbasis agregat berpori.

METODOLOGI

Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental yang dikombinasikan dengan analisis mikrostruktur berbasis X-ray micro-computed tomography (micro-CT) untuk mengevaluasi hubungan antara porositas, kuat tekan, dan permeabilitas beton ringan menggunakan agregat batu apung. Penelitian difokuskan pada identifikasi distribusi porositas agregat dan mortar serta pengaruhnya terhadap respons mekanis dan karakteristik penetrasi air pada beton ringan.

Variabel utama penelitian adalah rasio air-semen (*water-to-cement ratio*, w/c), yang divariasikan sebesar 0,35; 0,45; dan 0,60. Parameter respons yang dievaluasi meliputi perkembangan kuat tekan beton pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari, kedalaman penetrasi air pada umur 28 hari, serta karakteristik porositas internal yang diperoleh melalui analisis citra X-ray CT. Hasil karakterisasi porositas selanjutnya digunakan sebagai dasar pendekatan empiris untuk mengevaluasi hubungan porositas dengan kuat tekan dan mengestimasi koefisien permeabilitas beton.

Material Penyusun Beton

Material penyusun beton terdiri atas semen, agregat halus berupa pasir, agregat kasar ringan berupa batu apung, dan air. Batu apung digunakan sebagai agregat kasar untuk menghasilkan beton dengan berat isi rencana kurang dari 1.800 kg/m^3.

Karakteristik fisik material diperoleh melalui pengujian berat jenis, penyerapan air, berat isi gembur, modulus kehalusan, kadar lumpur, serta porositas agregat batu apung. Hasil pengujian karakteristik material disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data material campuran

Data Material	Batu Apung	Pasir	Semen
Berat Jenis	1.23	2.43	3.14
Penyerapan (%)	67.31	2.35	-
Berat isi gembur kg/m^3	342	1280	-
Modulus kehalusan	7.68	3.51	-
Kadar lumpur (%)		4.0	-
Porositas (%)	45.26	-	-

Benda Uji

Perencanaan komposisi beton mengacu pada [7] untuk beton menggunakan agregat ringan. Campuran dirancang dengan mempertahankan jumlah air dan agregat kasar yang sama, sedangkan kadar semen dan pasir disesuaikan untuk menghasilkan tiga variasi rasio air-semen.

Agregat dinyatakan dalam kondisi saturated surface dry (SSD) pada perencanaan campuran. Nilai slump ditargetkan sebesar 9 ± 1 cm dengan bantuan bahan tambah *superplasticizer* untuk memperoleh tingkat kemudahan pengerjaan yang relatif seragam.

Komposisi campuran beton untuk setiap variasi w/c disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi campuran benda uji

Material (kg/m^3)	Rasio air-semen 0.35	0.45	0.6
Air	201.71	201.71	201.71
Semen	576.33	448.25	336.19
Agregat (SSD)	423.43	423.43	423.43
Pasir (SSD)	594.13	692.02	777.67
Superplasticizer	0.5% terhadap berat semen		
Berat total	**1795.59**	**1765.41**	**1739.0**

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2, perubahan rasio air-semen dilakukan dengan mengubah kadar semen, sementara jumlah air dipertahankan konstan. Penyesuaian kadar pasir dilakukan untuk menjaga proporsi volumetrik campuran. Dengan demikian, pengaruh variasi w/c terhadap karakteristik beton perlu diinterpretasikan dengan mempertimbangkan perubahan kadar semen dan rasio pasir-semen yang menyertainya.

Persiapan dan Perawatan Benda Uji

Pembuatan benda uji dilakukan menggunakan mesin pengaduk beton (concrete mixer) dengan kapasitas adukan yang disesuaikan terhadap jumlah benda uji. Setelah proses pencampuran, beton segar ditempatkan ke dalam cetakan sesuai jenis pengujian yang direncanakan.

Benda uji yang digunakan terdiri atas tiga kelompok, yaitu:

1. Silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm untuk pengujian kuat tekan.
2. Silinder berdiameter 45 mm dan tinggi 50 mm untuk pemindaian X-ray micro-CT, yang diperoleh melalui proses pengeboran inti (core drilling).
3. Benda uji berbentuk balok atau kubus untuk pengujian penetrasi air bertekanan.

Setelah pengecoran, benda uji dirawat melalui perendaman dalam air hingga mencapai umur pengujian yang ditentukan. Perawatan dilakukan

untuk menjaga ketersediaan kelembapan yang diperlukan selama proses hidrasi semen.

Uji Tekan

Pengujian kuat tekan beton dilakukan berdasarkan [8] menggunakan benda uji silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Pengujian dilaksanakan pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari untuk setiap variasi rasio air-semen (w/c) sebesar 0,35; 0,45; dan 0,60, dengan tiga benda uji pada setiap kombinasi variasi campuran dan umur pengujian, sehingga total benda uji yang digunakan sebanyak 36 silinder. Kuat tekan ditentukan berdasarkan beban maksimum yang mampu ditahan benda uji hingga mengalami keruntuhan, kemudian dinyatakan sebagai nilai rata-rata dari tiga hasil pengujian. Hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi perkembangan kuat tekan terhadap umur beton serta pengaruh variasi rasio air-semen terhadap kinerja mekanis beton ringan agregat batu apung. Selain itu, pola keruntuhan diamati secara visual untuk mengidentifikasi kecenderungan kegagalan pada agregat batu apung maupun matriks mortar.

Pengujian Penetrasi Air Bertekanan

Pengujian penetrasi air dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan beton terhadap masuknya air akibat perbedaan tekanan. Pengujian mengacu pada EN 12390-8, *Testing hardened concrete – Part 8: Depth of penetration of water under pressure* [9].

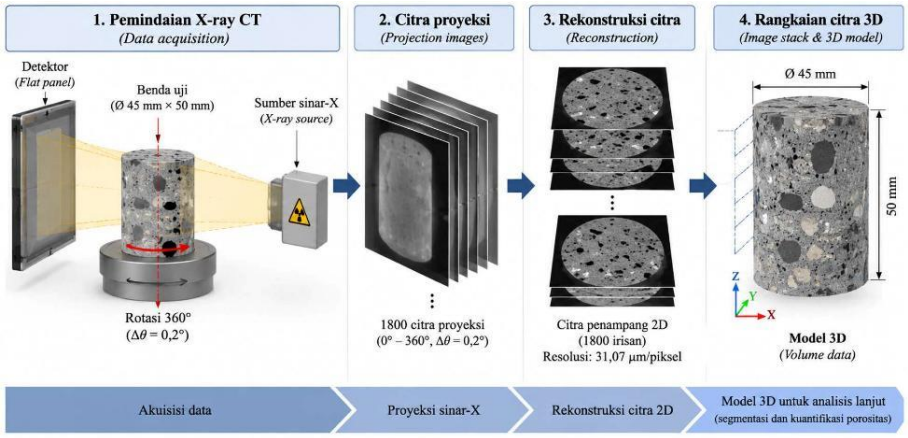
Pengujian dilakukan terhadap benda uji berumur 28 hari. Air bertekanan diaplikasikan pada salah satu permukaan benda uji sesuai prosedur standar pengujian. Setelah pengujian selesai, benda uji dibelah untuk mengamati kedalaman penetrasi air dari permukaan yang menerima tekanan.

Parameter utama yang diperoleh adalah kedalaman penetrasi air, yang dinyatakan dalam milimeter. Nilai tersebut digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi rasio air-semen terhadap ketahanan penetrasi air dan sebagai parameter masukan dalam estimasi koefisien permeabilitas.

Pemindaian X-ray Micro-Computed Tomography

Karakterisasi mikrostruktur beton ringan agregat batu apung dilakukan menggunakan metode *X-ray micro-computed tomography (micro-CT)* untuk mengidentifikasi distribusi agregat, mortar, dan pori secara tiga dimensi tanpa merusak benda uji selama proses pemindaian. Benda uji berupa silinder beton berdiameter 45 mm dan tinggi 50 mm yang diperoleh melalui proses pengeboran inti (core drilling). Pemindaian dilakukan dengan memancarkan sinar-X melalui benda uji pada interval rotasi sebesar 0,2°, sehingga diperoleh serangkaian citra proyeksi dari berbagai sudut pengamatan. Data proyeksi tersebut kemudian direkonstruksi menjadi citra penampang dua dimensi (cross-sectional images) dengan resolusi spasial yang dilaporkan sebesar 31,07 µm.

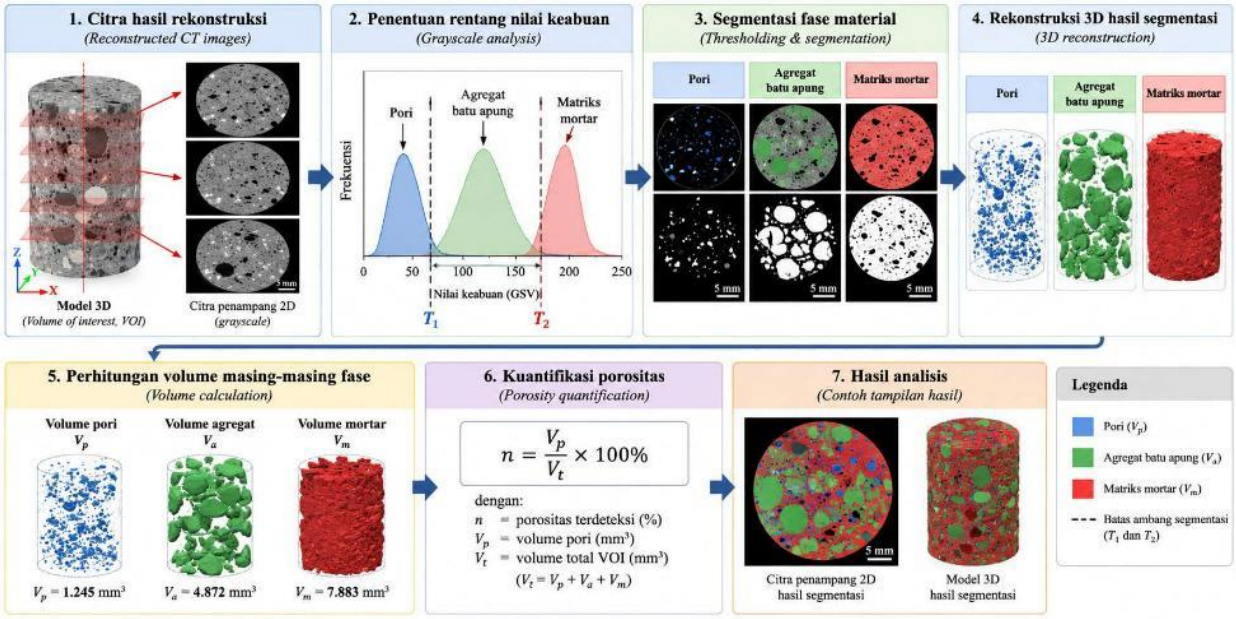
Sistematika perolehan data X-ray CT ditunjukkan pada Gambar 1, yang menggambarkan tahapan pemindaian benda uji, perolehan citra penampang, dan penyusunan rangkaian citra (image stack) untuk merepresentasikan struktur internal beton. Setiap citra penampang memperlihatkan variasi nilai keabuan (*grayscale value*) yang berkaitan dengan perbedaan karakteristik atenuasi sinar-X pada masing-masing komponen material. Rangkaian citra tersebut selanjutnya digunakan untuk membentuk model tiga dimensi sebagai dasar identifikasi distribusi agregat batu apung, matriks mortar, dan rongga internal. Data hasil rekonstruksi kemudian dianalisis melalui proses segmentasi citra untuk memperoleh informasi kuantitatif mengenai volume dan distribusi porositas pada masing-masing komponen beton.



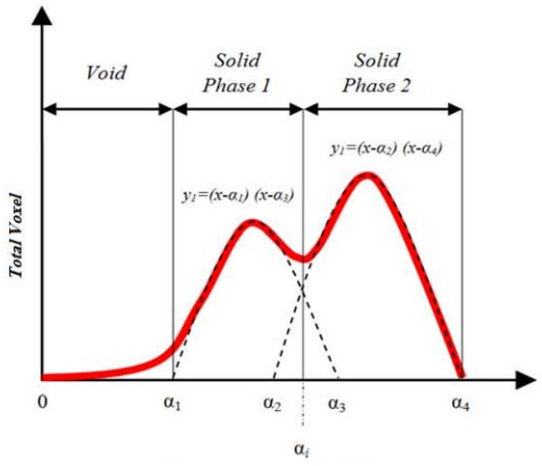
Gambar 1. Sistematika perolehan data *X-ray CT*

Pengolahan Citra dan Segmentasi Material

Tahapan pengolahan citra dan kuantifikasi porositas ditunjukkan pada Gambar 2. Dengan resolusi spasial pemindaian sebesar 31,07 µm, hasil analisis terbatas pada pori yang dapat diidentifikasi pada resolusi tersebut. Oleh karena itu, porositas hasil segmentasi dinyatakan sebagai porositas terdeteksi (*CT-detectable porosity*), bukan porositas total aktual material. Keterbatasan resolusi dan ketidakpastian segmentasi perlu diperhitungkan dalam interpretasi karakteristik mikrostruktur beton [6].



Gambar 2. Tahapan pengolahan citra X-ray micro-computed tomography (micro-CT) untuk segmentasi fase material dan kuantifikasi porositas beton agregat batu apung.



Gambar 3. Penentuan nilai ambang (*threshold*) untuk segmentasi fase material berdasarkan analisis histogram nilai keabuan (*grayscale value*, GSV).

Pengolahan citra X-ray *micro-computed tomography* (micro-CT) dilakukan untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi fase penyusun beton, meliputi agregat batu apung, matriks mortar, dan pori, berdasarkan distribusi nilai keabuan (*grayscale value*, GSV). Proses diawali dengan penentuan *volume of interest* (VOI), analisis histogram GSV, dan penetapan nilai ambang (*threshold*) untuk segmentasi fase material. Perbedaan GSV mencerminkan variasi atenuasi sinar-X yang dipengaruhi oleh densitas dan komposisi material. Ketepatan segmentasi menjadi faktor penting karena kesalahan klasifikasi dapat memengaruhi hasil kuantifikasi porositas [10].

Heterogenitas struktur internal agregat batu apung menyebabkan variasi GSV antarbutiran dan tumpang tindih intensitas dengan fase mortar maupun pori. Oleh karena itu, segmentasi agregat dilakukan secara individual pada setiap butiran untuk meminimalkan kesalahan klasifikasi akibat penggunaan *threshold* global [11]. Hasil segmentasi direkonstruksi menjadi model tiga dimensi untuk menentukan volume masing-masing fase serta distribusi pori pada agregat dan matriks mortar.

Identifikasi dan pemisahan fase material pada citra X-ray *micro-computed tomography* (micro-CT) dilakukan berdasarkan analisis distribusi nilai keabuan (*Grayscale Value*, GSV). Histogram GSV digunakan untuk mengidentifikasi tiga fase utama penyusun beton agregat batu apung, yaitu fase pori

(*void*), agregat batu apung (*solid phase 1*), dan matriks mortar (*solid phase 2*).

Penentuan nilai ambang (*threshold*) dilakukan dengan mengidentifikasi puncak-puncak distribusi histogram yang merepresentasikan masing-masing fase material. Distribusi pada fase padat didekati menggunakan dua persamaan polinomial orde dua. Titik perpotongan kedua kurva digunakan sebagai salah satu batas pemisahan fase padat, sedangkan batas fase pori ditentukan berdasarkan perubahan distribusi intensitas pada histogram.

Berdasarkan batas ambang tersebut, citra dikelompokkan menjadi tiga rentang GSV, yaitu fase pori pada rentang 0 hingga α_1, agregat batu apung pada rentang α_1 hingga α_i, dan matriks mortar pada rentang α_i hingga α_4, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3.

Untuk meminimalkan pengaruh efek tepi (*edge effect*) dan mengurangi kebutuhan komputasi, ditentukan daerah pengamatan (*Region of Interest*, ROI) dan volume analisis (*Volume of Interest*, VOI). Ukuran VOI dibatasi sebesar 1000 × 1000 × 1000 voxel. Selanjutnya, hasil segmentasi digunakan untuk mengidentifikasi distribusi spasial dan menghitung volume masing-masing fase material.

Kuantifikasi Porositas

Porositas beton dikuantifikasi berdasarkan hasil segmentasi citra X-ray micro-CT melalui perbandingan volume pori teridentifikasi terhadap volume total yang dianalisis (*volume of interest, VOI*). Analisis dilakukan secara terpisah terhadap pori di dalam agregat batu apung dan matriks mortar untuk mengevaluasi kontribusi masing-masing fase terhadap porositas beton. Porositas terdeteksi dihitung menggunakan persamaan:

$$n_{CT} = \frac{V_p}{V_{VOI}} \times 100\% \quad (1)$$

dimana:
n_{CT} = Porositas melalui X-ray CT (%)
V_p = Volume pori hasil segmentasi (mm^3)
V_{VOI} = Volume daerah analisis (mm^3)

Kuantifikasi porositas mempertimbangkan keterbatasan resolusi pemindaian sebesar 31,07 μm, sehingga pori dan konektivitas antarrongga pada skala yang lebih kecil tidak seluruhnya teridentifikasi [6].

Pendekatan Analisis Permeabilitas

Koefisien permeabilitas beton diestimasi menggunakan pendekatan Valenta [12] berdasarkan kedalaman penetrasi air bertekanan dan porositas efektif yang diasumsikan berkontribusi terhadap aliran. Estimasi dilakukan menggunakan persamaan:

$$k = \frac{\alpha d^2}{2Ht} \quad (2)$$

dengan (k) adalah koefisien permeabilitas (m/s), (α) adalah porositas efektif terkoneksi dalam bentuk fraksi volume beton, (d) adalah kedalaman penetrasi air (m), (H) adalah tinggi tekanan hidraulik ekuivalen (m), dan (t) adalah durasi pengujian (s).

Karena konektivitas pori belum dapat diidentifikasi secara langsung melalui hasil pemindaian, nilai (α) diestimasi berdasarkan kontribusi porositas agregat dan mortar serta asumsi fraksi pori terkoneksi masing-masing sebesar 72–78% dan 32–52%. Pendekatan pembobotan tersebut menghasilkan estimasi fraksi pori terkoneksi relatif sebesar 68–75% dari porositas terdeteksi. Koefisien permeabilitas kemudian dihitung sebagai rentang nilai untuk setiap variasi campuran. Hasil perhitungan diperlakukan sebagai estimasi berbasis asumsi konektivitas pori, bukan hasil pengukuran permeabilitas langsung [2].

Pendekatan Evaluasi Kontribusi Agregat terhadap Kuat Tekan

Pengaruh karakteristik agregat batu apung terhadap kuat tekan beton dievaluasi secara tidak langsung menggunakan model empiris hubungan porositas dan kuat tekan mortar yang dikembangkan oleh [4]. Analisis dilakukan dengan membandingkan kuat tekan eksperimental terhadap kuat tekan prediksi berdasarkan porositas hasil X-ray CT, termasuk skenario hipotetis ketika volume agregat batu apung diperlakukan sebagai rongga (*void-equivalent approach*).

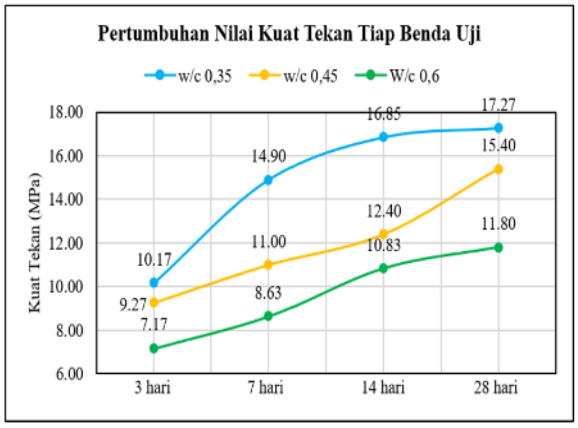
Perbandingan tersebut digunakan untuk mengevaluasi sensitivitas kuat tekan terhadap representasi porositas dan menginterpretasikan kemungkinan pengaruh agregat terhadap mekanisme keruntuhan beton. Mengingat model empiris dikembangkan untuk mortar dengan karakteristik campuran tertentu, hasil analisis digunakan sebagai pendekatan komparatif dan tidak ditafsirkan sebagai pengukuran langsung kontribusi mekanis agregat [4].

HASIL DAN DISKUSI

Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan sampel beton untuk masing-masing w/c disajikan pada Gambar 4. Dari Gambar 4, dapat dilihat bahwa kuat tekan beton ringan agregat batu apung meningkat seiring

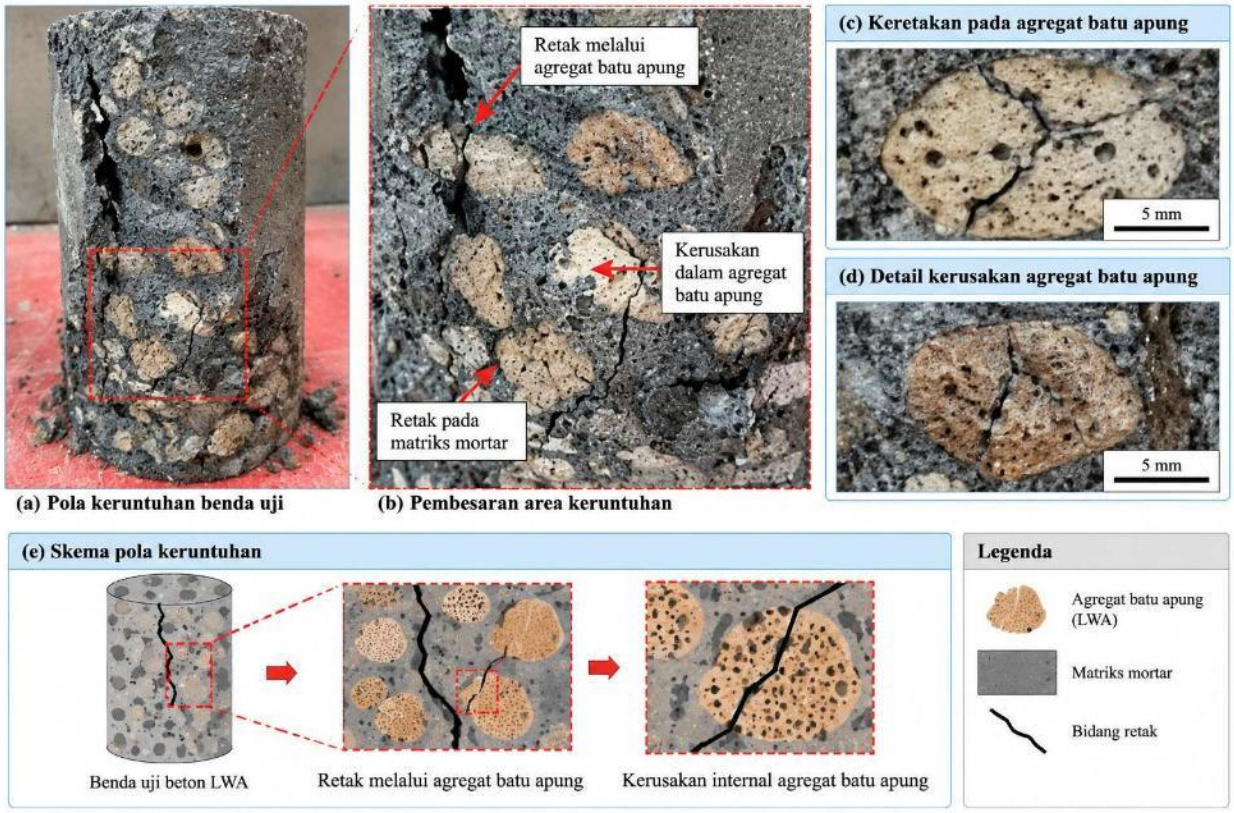
bertambahnya umur beton. Pada umur 3 hari, kuat tekan telah mencapai sekitar 60% dari kuat tekan umur 28 hari. Perkembangan tersebut mengindikasikan pembentukan kekuatan awal yang relatif besar, meskipun peningkatan kuat tekan masih berlangsung hingga umur pengujian 28 hari.



Gambar 4. Pertumbuhan nilai kuat tekan

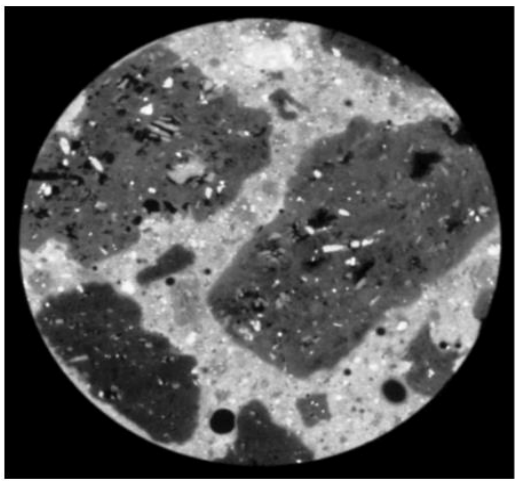
Pada umur 28 hari, kuat tekan rata-rata untuk rasio air-semen (w/c) 0,35; 0,45; dan 0,60 masing-masing sebesar 17,27 MPa; 15,40 MPa; dan 11,80 MPa. Penurunan w/c dari 0,60 menjadi 0,35 meningkatkan kuat tekan sebesar 46,4%. Kecenderungan ini menunjukkan bahwa pengurangan rasio air-semen meningkatkan kinerja mekanis matriks mortar. Namun, peningkatan kuat tekan beton secara keseluruhan juga dipengaruhi oleh karakteristik mekanis agregat batu apung yang memiliki struktur internal berpori.

Pengamatan pola keruntuhan pada Gambar 5 memperlihatkan bahwa bidang retak cenderung melintasi dan menyebabkan kerusakan pada butiran agregat batu apung, bukan hanya berkembang di sepanjang zona transisi antarmuka (interfacial transition zone, ITZ). Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa kekuatan agregat berpotensi menjadi salah satu faktor pembatas kapasitas tekan beton. Dengan demikian, peningkatan kekuatan matriks akibat penurunan w/c tidak selalu menghasilkan peningkatan kuat tekan beton secara proporsional apabila keruntuhan didominasi oleh kerusakan agregat.



Gambar 5. Pola keruntuhan agregat pada benda uji

Analisis 2 Dimensi Citra X-ray



Gambar 6. Identifikasi fase void, agregat batu apung (LWA), dan matriks mortar pada citra penampang dua dimensi X-ray CT.

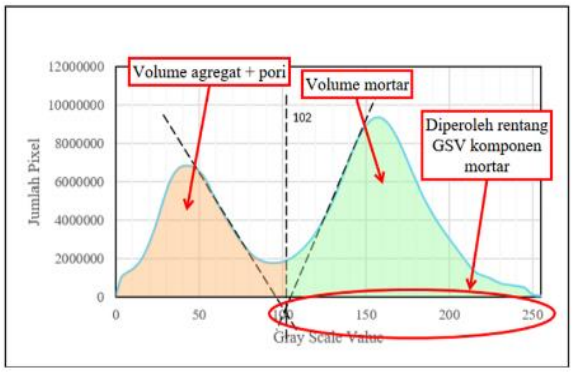
Gambar 6 menunjukkan tipikal citra 2D hasil X-ray CT. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, terdapat tiga fase utama penyusun beton, yaitu rongga (void), agregat batu apung (lightweight aggregate, LWA), dan matriks mortar. Fase void direpresentasikan oleh intensitas keabuan rendah (hitam), yang mencakup rongga udara terperangkap (*entrapped air void*) pada matriks mortar serta pori internal agregat batu apung. Fase LWA terlihat berwarna abu-abu gelap dengan distribusi pori internal yang heterogen, sedangkan matriks mortar memiliki intensitas keabuan relatif lebih tinggi (abu-abu terang).

Keberadaan pori internal pada LWA menunjukkan bahwa porositas total beton tidak hanya berasal dari rongga dalam matriks mortar, tetapi juga dipengaruhi oleh struktur berpori agregat batu apung. Dengan demikian, kuantifikasi porositas perlu membedakan kontribusi pori internal LWA dan pori matriks mortar terhadap volume pori keseluruhan. Perbedaan intensitas keabuan ketiga fase tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar segmentasi citra tiga dimensi untuk menentukan distribusi dan volume pori yang terdeteksi.

Analisis Histogram *Grey Scale Value (GSV)*

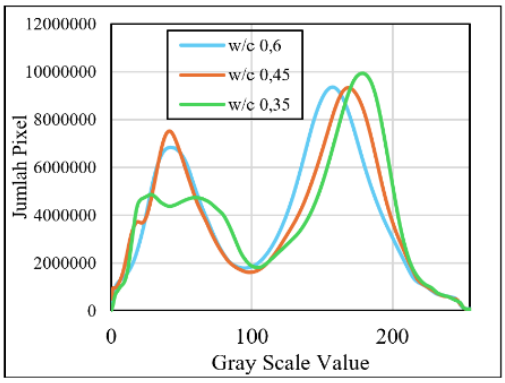
Analisis citra X-ray *micro-computed tomography* (micro-CT) dilakukan berdasarkan distribusi nilai keabuan (*grayscale value*, GSV) untuk mengidentifikasi tiga fase penyusun beton agregat batu apung, yaitu satu fase rongga (*void*) dan dua fase padat (*solid*), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Fase void merepresentasikan pori yang terdapat di dalam matriks mortar maupun agregat ringan batu apung (*lightweight aggregate*, LWA), dengan karakteristik GSV relatif rendah akibat rendahnya atenuasi sinar-X. Fase padat pertama merupakan agregat batu apung yang memiliki densitas dan tingkat atenuasi lebih rendah dibandingkan mortar, sehingga umumnya berada pada rentang GSV menengah. Sementara itu, fase padat kedua merupakan matriks mortar yang memiliki tingkat atenuasi relatif lebih tinggi dan direpresentasikan oleh GSV yang lebih besar.

Perbedaan distribusi GSV tersebut digunakan sebagai dasar penentuan nilai ambang (*threshold*) untuk segmentasi ketiga fase material. Namun, tumpang tindih rentang GSV akibat heterogenitas dan porositas internal agregat batu apung menyebabkan pemisahan fase tidak dapat sepenuhnya dilakukan menggunakan satu nilai ambang global. Oleh karena itu, identifikasi agregat dilakukan secara individual untuk meningkatkan ketepatan pemisahan pori, agregat batu apung, dan matriks mortar.



Gambar 7. Identifikasi fase void, agregat batu apung, dan matriks mortar berdasarkan distribusi *grayscale value* (GSV) hasil X-ray CT

Gambar 8 menunjukkan perbandingan distribusi *grayscale value* (GSV) beton agregat batu apung pada variasi rasio air-semen (w/c) 0,35; 0,45; dan 0,60. Ketiga histogram memperlihatkan distribusi multimodal dengan dua kelompok puncak utama, yaitu pada rentang GSV sekitar 20–80 dan 140–200. Kelompok intensitas rendah terutama berkaitan dengan keberadaan agregat batu apung berpori, sedangkan kelompok intensitas tinggi didominasi oleh matriks mortar. Tumpang tindih distribusi GSV antarfase mengindikasikan adanya heterogenitas karakteristik atenuasi sinar-X, terutama pada agregat batu apung.



Gambar 8. Hasil histogram masing-masing variasi

Heterogenitas tersebut juga teridentifikasi melalui analisis citra tiga dimensi, yang menunjukkan bahwa butiran agregat batu apung dalam campuran yang sama memiliki rentang GSV yang bervariasi. Fenomena ini berkaitan dengan perbedaan densitas, komposisi mineral, serta karakteristik porositas internal agregat batu apung [13], [14] . Selain volume pori, distribusi spasial pori turut memengaruhi nilai GSV yang terukur. Agregat dengan pori yang tersebar merata cenderung menunjukkan intensitas keabuan lebih rendah dibandingkan agregat dengan pori yang terkonsentrasi secara lokal, terutama akibat efek volume parsial (*partial volume effect*) pada resolusi pemindaian yang digunakan. Variasi tersebut menyebabkan rentang GSV agregat berpotensi tumpang tindih dengan fase void maupun mortar, sehingga segmentasi berdasarkan satu nilai ambang (*global threshold*) dapat menghasilkan kesalahan klasifikasi fase material.

Selanjutnya, dari Gambar 8 dapat dilihat bahwa peningkatan w/c menyebabkan pergeseran puncak dominan matriks mortar menuju nilai GSV yang lebih rendah. Pada w/c 0,35, puncak mortar berada di sekitar GSV 178, kemudian bergeser menjadi sekitar 170 pada w/c 0,45 dan 157 pada w/c 0,60. Pergeseran tersebut mengindikasikan penurunan atenuasi sinar-X relatif pada matriks mortar seiring meningkatnya rasio air-semen. Secara mikrostruktural, kecenderungan ini konsisten dengan kemungkinan meningkatnya porositas dan menurunnya kerapatan matriks mortar pada campuran dengan w/c lebih tinggi.

Pada rentang GSV rendah, campuran w/c 0,35 memperlihatkan distribusi yang lebih lebar dan cenderung memiliki beberapa puncak lokal dibandingkan kedua variasi lainnya. Kondisi tersebut mengindikasikan variasi karakteristik atenuasi antarbutiran agregat batu apung, yang dapat dipengaruhi oleh heterogenitas struktur internal dan distribusi porinya. Sementara itu, kemiripan posisi puncak intensitas rendah pada w/c 0,45 dan 0,60 menunjukkan bahwa perbedaan respons GSV kedua campuran lebih menonjol pada fase mortar dibandingkan fase agregat.

Secara keseluruhan, pergeseran puncak mortar ke GSV yang lebih rendah sejalan dengan kecenderungan penurunan kuat tekan beton dari 17,27 MPa pada w/c 0,35 menjadi 11,80 MPa pada w/c 0,60. Hubungan ini mengindikasikan bahwa perubahan karakteristik matriks mortar berkontribusi terhadap respons mekanis beton.

Porositas

Hasil rekonstruksi dan segmentasi *citra X-ray micro-computed tomography* (micro-CT) menunjukkan distribusi pori tiga dimensi pada beton agregat batu apung untuk variasi rasio air-semen (w/c) 0,35; 0,45; dan 0,60, ditunjukkan pada Gambar 9. Secara visual, pori terdeteksi tersebar secara heterogen dengan konsentrasi yang relatif tinggi pada agregat batu apung. Analisis dibatasi oleh resolusi spasial pemindaian sebesar 31,07 µm, sehingga pori berukuran kecil dan saluran penghubung antarpori yang berada di bawah kemampuan resolusi sistem tidak seluruhnya dapat diidentifikasi.

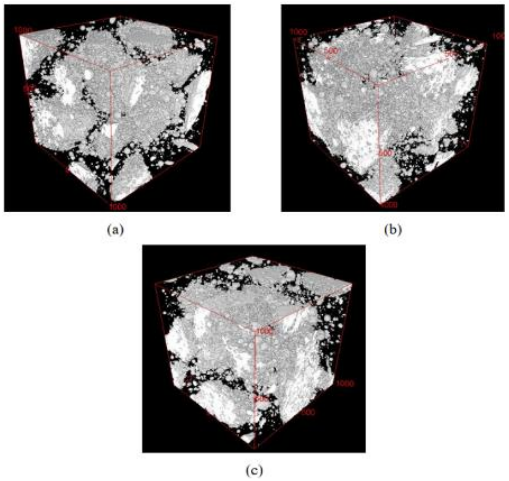
Kuantifikasi porositas pada Gambar 10 menunjukkan bahwa porositas total meningkat dari 17,68% pada w/c 0,35 menjadi 18,30% dan 18,62% masing-masing pada w/c 0,45 dan 0,60. Kontribusi pori internal agregat batu apung masing-masing sebesar 16,01%; 16,56%; dan 16,72%, atau sekitar 90% dari porositas total yang terdeteksi. Dominasi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik porositas beton ringan terutama dipengaruhi oleh struktur internal agregat batu apung.

Sementara itu, kontribusi porositas matriks mortar meningkat dari 1,67% pada w/c 0,35 menjadi 1,73% pada w/c 0,45 dan 1,89% pada w/c 0,60. Peningkatan sebesar 0,22 poin persentase tersebut menunjukkan kecenderungan bertambahnya volume pori mortar seiring peningkatan rasio air-semen. Fenomena ini konsisten dengan terbentuknya struktur matriks yang relatif lebih berpori pada campuran dengan w/c lebih tinggi, sebagaimana diindikasikan oleh pergeseran puncak *grayscale value* (GSV) mortar pada Gambar 8.

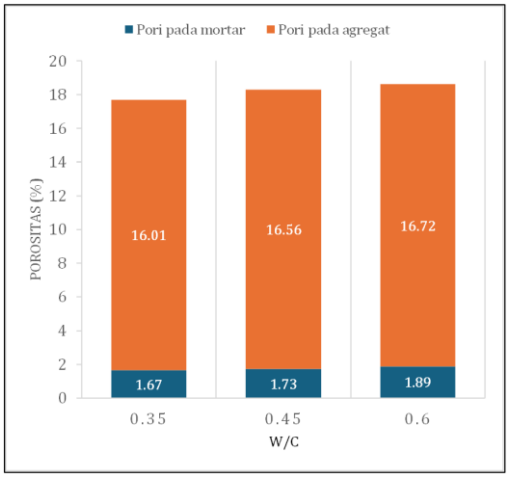
Meskipun porositas agregat batu apung relatif dominan, perubahan porositas total antarvariasi campuran tidak sepenuhnya ditentukan oleh matriks mortar. Kontribusi pori agregat juga mengalami variasi sebesar 0,71 poin persentase,

yang dapat berkaitan dengan heterogenitas internal agregat dan perbedaan distribusi butiran dalam volume citra yang dianalisis. Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa porositas agregat menentukan sebagian besar volume pori terdeteksi, sedangkan peningkatan w/c berkaitan dengan perubahan porositas matriks mortar.

Perlu diperhatikan bahwa porositas terdeteksi tidak secara langsung merepresentasikan porositas efektif yang berkontribusi terhadap aliran air. Konektivitas dan geometri jaringan pori merupakan parameter tambahan yang menentukan karakteristik permeabilitas beton. Oleh karena itu, hubungan antara porositas hasil X-ray CT dan permeabilitas perlu dievaluasi dengan mempertimbangkan keterhubungan pori serta keterbatasan resolusi pemindaian.



Gambar 9. Visualisasi tiga dimensi distribusi pori terdeteksi pada beton agregat batu apung dengan variasi rasio air-semen (w/c): (a) 0,35; (b) 0,45; dan (c) 0,60



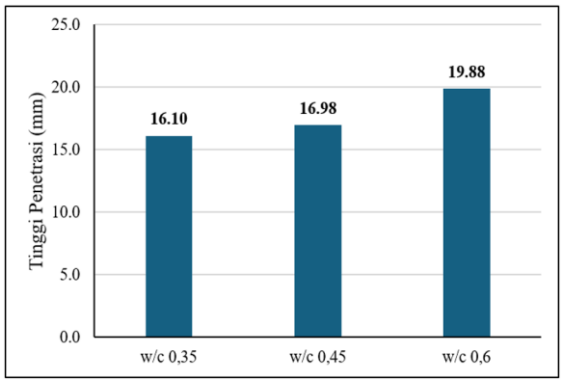
Gambar 10. Kontribusi porositas agregat batu apung dan matriks mortar terhadap porositas total beton berdasarkan analisis *X-ray micro*-CT pada berbagai rasio air-semen (w/c).

Permeabilitas

Gambar 11 menyajikan hasil pengujian penetrasi air bertekanan pada beton dengan agregat batu apung pada umur 28 hari. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11 peningkatan rasio air-semen (w/c) cenderung meningkatkan kedalaman penetrasi air. Kedalaman penetrasi rata-rata pada w/c 0,35; 0,45; dan 0,60 masing-masing sebesar 16,10 mm; 16,98 mm; dan 19,88 mm. Peningkatan w/c dari 0,35 menjadi 0,60 menghasilkan kenaikan kedalaman penetrasi sebesar 23,5%, yang mengindikasikan penurunan ketahanan beton terhadap masuknya air bertekanan.

Kecenderungan tersebut konsisten dengan peningkatan porositas matriks mortar hasil analisis X-ray micro-CT, yaitu dari 1,67% pada w/c 0,35 menjadi 1,89% pada w/c 0,60. Peningkatan rasio air-semen berpotensi menghasilkan struktur pori matriks yang lebih berkembang sehingga mempermudah penetrasi air. Meskipun demikian, karakteristik transport air tidak hanya ditentukan oleh volume pori, tetapi juga oleh konektivitas, ukuran, dan tortuositas jaringan pori [5].

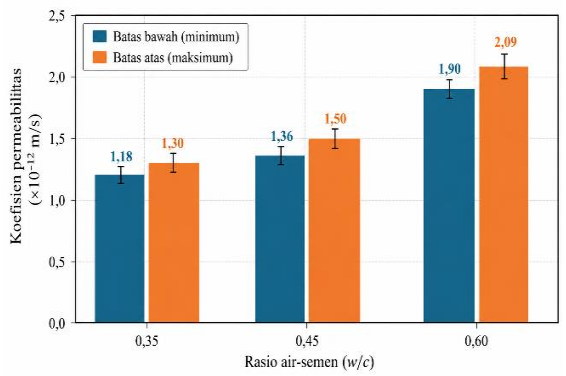
Estimasi koefisien permeabilitas dilakukan menggunakan pendekatan Valenta berdasarkan kedalaman penetrasi air dan porositas efektif yang diasumsikan berkontribusi terhadap aliran. Hasil analisis pada Gambar 12 menunjukkan bahwa koefisien permeabilitas meningkat dari (1,18–1,30) × 10^{-12} m/s pada w/c 0,35 menjadi (1,36–1,50) × 10^{-12} m/s pada w/c 0,45 dan (1,90–2,09) × 10^{-12} m/s pada w/c 0,60. Kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan rasio air-semen berkaitan dengan meningkatnya kemampuan air menembus struktur beton.



Gambar 11. Kedalaman penetrasi air rata-rata pada berbagai rasio air-semen

Hasil kuantifikasi X-ray CT menunjukkan bahwa sekitar 90% porositas terdeteksi berada di dalam agregat batu apung. Namun, dominasi volume

pori agregat tidak secara langsung menunjukkan kontribusi yang setara terhadap permeabilitas. Pori internal agregat yang terisolasi tidak membentuk jalur aliran kontinu, sedangkan pori yang terhubung melalui matriks mortar dan zona transisi antarmuka (interfacial transition zone, ITZ) berpotensi berkontribusi terhadap transport air. Oleh karena itu, estimasi permeabilitas mempertimbangkan asumsi konektivitas pori agregat sebesar 72–78% dan mortar sebesar 32–52% [5][15][16].



Gambar 12. Estimasi koefisien permeabilitas beton agregat batu apung menggunakan pendekatan Valenta pada berbagai rasio air-semen (w/c)

Untuk mengevaluasi kewajaran hasil perhitungan, koefisien permeabilitas pada w/c 0,45 dibandingkan dengan hasil penelitian Hossain et al. (2011). Nilai rata-rata estimasi penelitian ini sebesar $1{,}43 \times 10^{-12}$ m/s, sedangkan nilai pembanding dari [2] sebesar $3{,}00 \times 10^{-12}$ m/s. Hasil estimasi penelitian ini sekitar 52,3% lebih rendah dibandingkan penelitian terdahulu, meskipun keduanya berada pada orde besaran yang sama, yaitu 10^{-12} m/s. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh karakteristik agregat, komposisi campuran, struktur jaringan pori, serta kondisi pengujian. Dengan demikian, perbandingan ini menunjukkan kewajaran awal orde besaran koefisien permeabilitas.

Secara keseluruhan, peningkatan rasio air-semen diikuti oleh peningkatan kedalaman penetrasi air dan koefisien permeabilitas estimasi. Meskipun sekitar 90% porositas terdeteksi berasal dari agregat batu apung, kontribusinya terhadap permeabilitas bergantung pada konektivitas pori dengan matriks mortar. Oleh karena itu, porositas total hasil X-ray CT tidak dapat secara langsung disamakan dengan porositas efektif yang mengendalikan aliran air. Mengingat konektivitas pori belum diukur secara langsung, koefisien permeabilitas yang diperoleh tetap diinterpretasikan sebagai hasil estimasi berdasarkan asumsi model.

Peran Agregat Batu Apung terhadap Kuat Tekan Beton

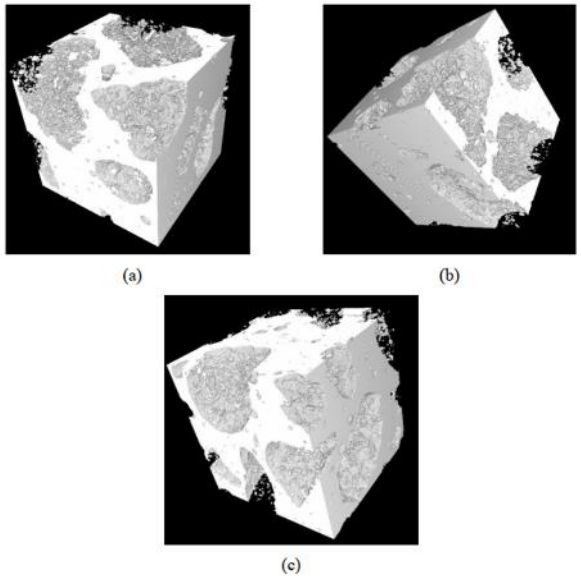
Pengamatan pola keruntuhan pada pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa retak tidak hanya berkembang pada matriks mortar dan zona transisi antarmuka (interfacial transition zone, ITZ), tetapi juga melintasi butiran agregat batu apung. Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa kekuatan agregat berpotensi menjadi salah satu faktor pembatas kapasitas tekan beton. Struktur internal batu apung yang berpori menyebabkan ketahanan mekanisnya berbeda dari agregat normal, sehingga peningkatan kekuatan matriks mortar akibat penurunan rasio air-semen (w/c) tidak selalu diikuti peningkatan kuat tekan beton secara proporsional.

Untuk mengevaluasi pengaruh keberadaan agregat terhadap respons kuat tekan, digunakan pendekatan empiris [4] yang menghubungkan porositas dengan kuat tekan mortar. Evaluasi dilakukan melalui skenario hipotetis dengan memperlakukan volume agregat batu apung sebagai rongga (*void-equivalent approach*). Berdasarkan hasil segmentasi X-ray CT, porositas ekuivalen pada *w/c* 0,35; 0,45; dan 0,60 masing-masing sebesar 36,70%; 37,80%; dan 38,56%, sebagaimana disajikan pada Tabel 3. Representasi tiga dimensi dari skenario tersebut ditunjukkan pada Gambar 13.

Tabel 3. Porositas masing-masing benda uji

w/c	Porositas (%)			
	Mortar	Agregat	Keseluruhan	Tanpa Agregat
0,35	1,67	16,01	17,68	36,70
0,45	1,73	16,56	18,30	37,80
0,6	1,89	16,72	18,62	38,56

Hasil penerapan persamaan Chen menghasilkan kuat tekan prediksi sekitar 18,20 MPa; 17,07 MPa; dan 16,30 MPa, sedangkan kuat tekan eksperimental masing-masing sebesar 17,27 MPa; 15,40 MPa; dan 11,80 MPa. Perbandingan pada Gambar 13 menunjukkan bahwa nilai prediksi lebih tinggi daripada hasil pengujian, dengan selisih yang meningkat seiring bertambahnya w/c. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa model berbasis porositas ekuivalen belum sepenuhnya merepresentasikan respons mekanis beton agregat batu apung.



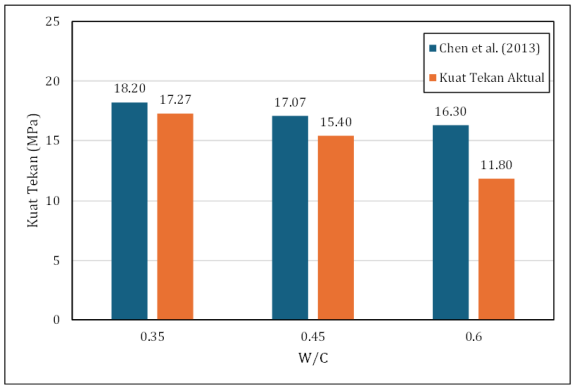
Gambar 13. Model 3D mortar w/c 0,35 (a); w/c 0,45 (b); & w/c 0,6 (c)

Ketidaksesuaian tersebut perlu ditinjau dengan mempertimbangkan karakteristik material dan batas penerapan model. Persamaan [4] dikembangkan untuk mortar dengan rasio pasir-semen sebesar 1,20, sedangkan campuran dalam penelitian ini memiliki rasio pasir-semen masing-masing sebesar 1,03; 1,54; dan 2,31. Selain itu, pendekatan yang memperlakukan agregat sebagai rongga mengabaikan kekakuan agregat, transfer tegangan antara agregat dan mortar, serta karakteristik ITZ. Oleh karena itu, selisih antara kuat tekan prediksi dan eksperimental tidak dapat diinterpretasikan secara langsung sebagai besarnya kontribusi mekanis agregat.

Secara keseluruhan, hasil pengujian kuat tekan, pengamatan pola keruntuhan, dan karakterisasi X-ray CT mengindikasikan bahwa agregat batu apung berperan penting dalam menentukan karakteristik mekanis beton ringan. Penggunaannya memungkinkan pengurangan berat isi beton, tetapi struktur agregat yang berpori berpotensi membatasi peningkatan kuat tekan. Dengan demikian, pengembangan beton agregat batu apung perlu mempertimbangkan keseimbangan antara berat isi, kekuatan matriks mortar, dan karakteristik mekanis agregat.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dan analisis mikrostruktur menggunakan X-ray micro-computed tomography (micro-CT), diperoleh kesimpulan sebagai berikut:



Gambar 14. Hasil pendekatan kuat tekan dengan persamaan regresi Chen [4]

1. Peningkatan rasio air-semen (w/c) dari 0,35 menjadi 0,60 menyebabkan penurunan kuat tekan beton agregat batu apung sebesar 31,7%, dari 17,27 MPa menjadi 11,80 MPa, disertai peningkatan kedalaman penetrasi air. Hasil ini menunjukkan bahwa rasio air-semen tetap berperan penting dalam menentukan kinerja mekanis dan ketahanan penetrasi air beton ringan, meskipun agregat memiliki struktur internal berpori.
2. Hasil X-ray micro-CT menunjukkan bahwa sekitar 90% porositas terdeteksi berasal dari agregat batu apung, dengan porositas total sebesar 17,68–18,62% dan kontribusi porositas mortar sebesar 1,67–1,89% terhadap volume beton. Temuan ini menegaskan bahwa karakteristik porositas beton agregat batu apung terutama didominasi oleh mikrostruktur internal agregat, sehingga evaluasi porositas perlu membedakan kontribusi agregat dan matriks mortar.
3. Dominasi porositas agregat tidak secara langsung menunjukkan dominasi kontribusinya terhadap permeabilitas. Koefisien permeabilitas estimasi meningkat dari (1,18–1,30) × 10^{-12} m/s pada w/c 0,35 menjadi (1,90–2,09) × 10^{-12} m/s pada w/c 0,60. Hasil ini mengindikasikan bahwa karakteristik transport air tidak hanya ditentukan oleh volume pori, tetapi juga oleh konektivitas jaringan pori. Namun, karena konektivitas belum diukur secara langsung, interpretasi permeabilitas tetap bergantung pada asumsi model Valenta.
4. Pengamatan pola keruntuhan menunjukkan bahwa retak berkembang melintasi agregat batu apung, yang mengindikasikan bahwa karakteristik mekanis agregat berpotensi membatasi kuat tekan beton. Pendekatan empiris Chen et al. (2013) menghasilkan perbedaan

prediksi terhadap kuat tekan eksperimental sebesar 5,4–38,1%. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan porositas–kuat tekan yang dikembangkan untuk mortar belum dapat secara langsung merepresentasikan respons mekanis beton agregat batu apung tanpa mempertimbangkan interaksi agregat dan matriks.

5. Integrasi hasil karakterisasi mikrostruktur X-ray micro-CT dengan pengujian kuat tekan dan penetrasi air menunjukkan bahwa evaluasi kinerja beton agregat batu apung tidak cukup hanya didasarkan pada porositas total. Distribusi pori pada masing-masing fase material perlu dipertimbangkan bersama karakteristik mekanis agregat dan keterhubungan jaringan pori. Pendekatan ini memberikan dasar bagi pengembangan desain campuran beton ringan yang mempertimbangkan keseimbangan antara berat isi, kuat tekan, dan ketahanan terhadap penetrasi air.

REFERENSI

[1] M. Tanyıldızı and İ. Gökalp, "Utilization of pumice as aggregate in the concrete: A state of art," May 09, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131102.

[2] K. M. A. Hossain, S. Ahmed, and M. Lachemi, "Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 3, pp. 1186–1195, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.036.

[3] Muhtar, "Performance-based experimental study into quality zones of lightweight concrete using pumice aggregates," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e01960.

[4] X. Chen, S. Wu, and J. Zhou, "Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 869–874, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072.

[5] J. Yu, H. Wang, X. Sun, Z. Chen, and W. Dong, "Characterizing connectivity and tortuosity of pore network based on LF-NMR method to assess the water permeability of white cement mortar," *Journal of Building Engineering*, vol. 93, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.109862.

[6] N. Bossa *et al.*, "Micro- and nano-X-ray computed-tomography: A step forward in the characterization of the pore network of a leached cement paste," *Cem. Concr. Res.*, vol. 67, pp. 138–147, 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2014.08.007.

[7] ACI Committe, "ACI 211.2-98, reapproved 2004," *ACI Committee*, vol. 211, 2004.

[8] SNI 1974:2011, "SNI 1974:2011".

[9] European Committee for Standardization, "EN 12390–8. Testing hardened concrete—Part 8: Depth of penetration of water under pressure," 2009.

[10] J. Liu, H. H. Khieu, M. Van Tran, and P. Tran, "Advancing microstructural insights in 3D-Printed cementitious materials via X-ray micro-computed tomography," Aug. 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jobe.2025.112675.

[11] D. F. T. Razakamandimby R., H. T. Kim, T. S. Han, Y. H. Lee, and K. Park, "Recursive aggregate segmentation by erosion and reconstitution (RASER) to characterize concrete microstructure using complementarity of X-ray and neutron computed tomography," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 148, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105437.

[12] O. Valenta, "The permeability and durability of concrete in aggressive conditions," in *Proceedings 10th International Congress on Large Dams*, 1970, pp. 103–117.

[13] A. Hammal and A. Sulaiman, "Green synthesis of Fe2O3-MnO2 nano-hybrids on pumice for complete degradation of pharmaceutical pollutants," *PLoS One*, vol. 20, no. 10 October, Oct. 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0334324.

[14] H. Paulick and G. Franz, "The color of pumice: case study on a trachytic fall deposit, Meidob volcanic field, Sudan," Springer-Verlag, 1997.

[15] H. M. N. Wright, J. J. Roberts, and K. V. Cashman, "Permeability of anisotropic tube pumice: Model calculations and measurements," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, no. 17, Sep. 2006, doi: 10.1029/2006GL027224.

[16] R. Noviandi, T. Gomi, H. S. Kharismalatri, R. C. Sidle, R. P. Ritonga, and K. Shiraki, "The Mobility of Landslides in Pumice: Insights from a Flume Experiment," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 19, Oct. 2022, doi: 10.3390/w14193083.

This page is intentionally blank

http://journal.uir.ac.id/index.php/saintis

Jurnal Saintis

ISSN (Print) : 1410-7783
ISSN (Online) : 2580-7110

Volume 26 Nomor 02, Oktober 2026 : 109-118

Komparasi Produktivitas Tenaga Kerja Pada Pekerjaan Kolom Menggunakan Metode *Time Study* Terhadap Permen PUPR No. 8 Tahun 2023

Comparison of Labor Productivity for Column Using Time Study Method and PUPR Regulation No. 8 of 2023

Yudi Fitra[1,*], Sapitri[2]

[1,2]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Riau, Jln Kaharudin Nasution No. 113, Pekanbaru, Riau, Indonesia*

* Penulis korespondensi : yudifitra@student.uir.ac.id
Tel.: +62-8238-356-3468
Diterima: 16 Juli 2026; Direvisi: 25 Oktober 2026, 2019; Disetujui: 27 Oktober 2026.
DOI: 10.25299/saintis.2026.Vol26(02).29517

Abstrak

Produktivitas tenaga kerja merupakan salah satu faktor utama yang menentukan keberhasilan proyek konstruksi karena berpengaruh terhadap efisiensi waktu, biaya, dan mutu pekerjaan. Perbedaan antara produktivitas aktual di lapangan dengan standar yang digunakan dalam perencanaan berpotensi menyebabkan ketidaktepatan estimasi sumber daya. Penelitian ini bertujuan menganalisis produktivitas aktual tenaga kerja pada pekerjaan kolom beton bertulang, membandingkannya dengan standar Permen PUPR Nomor 8 Tahun 2023, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya deviasi. Ruang lingkup penelitian meliputi pekerjaan penulangan, bekisting, dan pengecoran kolom K1 lantai 4 pada Proyek Pengembangan Rumah Sakit. Metode yang digunakan adalah penelitian deskriptif kuantitatif dengan pendekatan *Time Study* melalui observasi langsung di lapangan. Data hasil pengamatan diolah untuk memperoleh nilai *standard time*, produktivitas tenaga kerja aktual, dan koefisien tenaga kerja lapangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa produktivitas aktual pekerjaan penulangan sebesar 457,094 kg/OH, bekisting sebesar 2,891 m^2/OH, dan pengecoran sebesar 9,209 m^3/OH. Hasil komparasi menunjukkan koefisien tenaga kerja aktual lebih besar dibandingkan standar Permen PUPR Nomor 8 Tahun 2023, dengan deviasi pembengkakan waktu sebesar 37% pada penulangan, 5% pada bekisting, dan 9% pada pengecoran. Temuan ini menunjukkan bahwa produktivitas aktual tenaga kerja masih di bawah standar normatif Permen PUPR No. 8 Tahun 2023, di mana rata-rata koefisien lapangan untuk pekerjaan penulangan 0,00219 OH/Kg, bekisting 0,346 OH/m^2, dan pengecoran 0,109 OH/m^3, sedangkan standar normatif menetapkan koefisien sebesar 0,00160 OH/kg untuk penulangan, 0,3300 OH/m^2 untuk bekisting, dan 0,100 OH/m^3 untuk pengecoran. Faktor utama yang memengaruhi deviasi tersebut meliputi kerumitan detail penulangan, kelelahan fisik pekerja pada elevasi tinggi, kondisi cuaca, serta waktu tunggu material.

Kata Kunci: *Produktivitas Tenaga Kerja, Time Study, Kolom Beton Bertulang, Koefisien Tenaga Kerja, Permen PUPR No.08 Tahun 2023*

Abstract

Labor productivity is one of the main factors that determine the success of a construction project because it affects the efficiency of time, costs, and quality of work. The difference between actual productivity in the field and the standards used in planning has the potential to cause inaccurate resource estimates. This study aims to analyze the actual productivity of labor in reinforced concrete column work, compare it with the standards of the Minister of Public Works and Housing Regulation Number 8 of 2023, and identify the factors that cause deviations. The scope of the study includes reinforcement, formwork, and casting of the 4th-floor K1 column in the Hospital Development Project in Duri City. The method used is a quantitative descriptive study with a Time Study approach through direct observation in the field. The observation data are processed to obtain standard time values, actual labor productivity, and field labor coefficients. The results show that the actual productivity of reinforcement work is 457,094 kg/OH, formwork is 2,891 m^2/OH, and casting is 9,209 m^3/OH. The comparison results show that the actual labor coefficient is greater than the standard of PUPR Ministerial Regulation Number 8 of 2023, with a deviation of 37% in reinforcement, 5% in formwork, and 9% in casting. This finding indicates that the actual labor productivity is still below the normative standard of PUPR Ministerial Regulation No. 8 of 2023, where the average field coefficient for reinforcement work is 0.00219 OH/Kg, formwork 0.346 OH/m^2, and casting 0.109 OH/m^3, while the normative standard sets a coefficient of 0.00160 OH/kg for reinforcement, 0.3300 OH/m^2 for formwork, and 0.100 OH/m^3 for casting. The main factors influencing this deviation include the complexity of reinforcement details, physical fatigue of workers at high elevations, weather conditions, and waiting for material.

Keywords: *Labor Productivity, Time Study, Reinforced Concrete Columns, Labor Coefficient, PUPR Regulation No. 08 of 2023*

PENDAHULUAN

Industri konstruksi merupakan sektor yang berperan penting dalam mendukung pembangunan infrastruktur dan pertumbuhan ekonomi. Keberhasilan suatu proyek konstruksi tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis, tetapi juga dipengaruhi oleh kemampuan pengelolaan sumber daya yang tersedia, terutama tenaga kerja, untuk mencapai target biaya, mutu, dan waktu

pelaksanaan proyek [1]. Selain itu, penerapan manajemen proyek yang baik menjadi faktor penting dalam meningkatkan keberhasilan proyek konstruksi secara keseluruhan [2]. Oleh karena itu, pengelolaan tenaga kerja yang efektif menjadi salah satu aspek yang perlu diperhatikan dalam pelaksanaan proyek konstruksi [3].

Produktivitas tenaga kerja merupakan indikator yang digunakan untuk mengukur tingkat efisiensi tenaga kerja dalam menghasilkan output pekerjaan pada periode waktu tertentu. Tingkat produktivitas yang tinggi menunjukkan pemanfaatan sumber daya yang lebih efektif sehingga dapat meningkatkan kinerja proyek konstruksi [4]. Sebaliknya, rendahnya produktivitas tenaga kerja dapat menyebabkan keterlambatan pekerjaan, peningkatan biaya pelaksanaan, serta berkurangnya efisiensi proyek. Pada pekerjaan struktur beton bertulang, khususnya pekerjaan kolom, produktivitas tenaga kerja menjadi faktor penting karena pekerjaan penulangan, bekisting, dan pengecoran merupakan aktivitas yang memerlukan koordinasi tenaga kerja secara optimal.

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengukur produktivitas tenaga kerja adalah metode *Time Study*. Metode ini dilakukan melalui pengamatan langsung terhadap waktu yang dibutuhkan tenaga kerja dalam menyelesaikan suatu aktivitas pekerjaan sehingga dapat diperoleh tingkat produktivitas aktual di lapangan [5]. Metode *Time Study* dinilai mampu memberikan data yang representatif karena pengukuran dilakukan berdasarkan kondisi kerja yang sebenarnya [6]. Oleh karena itu, metode ini sering digunakan dalam penelitian produktivitas konstruksi untuk mengevaluasi kinerja tenaga kerja dan membandingkannya dengan standar yang berlaku [7].

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa produktivitas tenaga kerja aktual sering kali berbeda dengan produktivitas yang digunakan dalam perencanaan proyek. Sebagai contoh, produktivitas tenaga kerja pada pekerjaan pembesian kolom lebih tinggi sebesar 1,131 kali (13,12%) dibandingkan dengan nilai yang digunakan dalam standar perencanaan produktivitas SNI 2016 [8]. Hasil serupa juga ditemukan pada penelitian di mana produktivitas aktual pekerjaan pembesian kolom lebih tinggi sebesar 58,57% dan balok sebesar 20% dibandingkan dengan standar Peraturan Menteri PUPR No. 1 Tahun 2022 [9]. Adanya perbedaan produktivitas tersebut dipengaruhi oleh perubahan komposisi tenaga kerja, yang dapat meningkatkan efisiensi pekerjaan meskipun peningkatan produktivitas yang dihasilkan tidak terlalu signifikan [10]. Selain itu, produktivitas tenaga kerja juga dipengaruhi oleh kondisi pelaksanaan (metode kerja) dan karakteristik proyek yang berbeda-beda [11].

Untuk meningkatkan akurasi perencanaan biaya dan kebutuhan tenaga kerja konstruksi, pemerintah menerbitkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 8 Tahun 2023 sebagai pedoman terbaru dalam penyusunan Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) [12]. Beberapa penelitian telah mulai membandingkan produktivitas aktual dengan koefisien tenaga kerja berdasarkan AHSP 2023 dan menunjukkan adanya perbedaan antara produktivitas lapangan dengan nilai standar yang digunakan dalam perencanaan [13], [14]. Meskipun demikian, penelitian-penelitian terdahulu umumnya masih mengkaji produktivitas secara umum atau makro, serta belum memetakan secara spesifik besaran deviasi koefisien pada tiap tahapan subpekerjaan kolom (penulangan, bekisting, dan pengecoran) pada elevasi bangunan bertingkat**.** Keterbatasan ini menyebabkan belum terlihatnya secara jelas sub-pekerjaan mana yang paling rentan mengalami pembengkakan waktu serta faktor-faktor teknis spesifik lapangan yang menjadi penyebab utama deviasi tersebut.

Kebaruan dan kontribusi dari penelitian ini adalah menyajikan analisis komparasi kuantitatif berbasis *Time Study* untuk mengukur koefisien aktual secara rinci pada tiap elemen pekerjaan kolom K1 (penulangan, bekisting, dan pengecoran) di lantai 4 gedung medis, serta menguantifikasi persentase deviasinya terhadap standar terbaru, yaitu standar Permen PUPR Nomor 8 Tahun 2023 sekaligus mengidentifikasi faktor penyebab utamanya. Hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya memperkaya literatur ilmiah terkait efektivitas standar AHSP 2023 pada pekerjaan elevasi tinggi, tetapi juga memberikan acuan praktis bagi pelaksana proyek dalam menyusun alokasi tenaga kerja dan penjadwalan yang lebih realistis.

METODOLOGI

Penelitian ini difokuskan pada elemen pekerjaan kolom K1 yaitu penulangan, bekisting, dan pengecoran, Proyek Pengembangan Rumah Sakit.

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan deskriptif. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk mengukur

produktivitas tenaga kerja berdasarkan data waktu kerja aktual dan volume pekerjaan yang diperoleh dari hasil pengamatan lapangan. Pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi produktivitas tenaga kerja pada pekerjaan kolom serta membandingkannya dengan koefisien tenaga kerja yang tercantum dalam Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 8 Tahun 2023.

Pengumpulan data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Secara rinci, sumber data, teknik pengumpulan data, serta rincian data yang dikumpulkan dijelaskan sebagai berikut:

1. Data Primer:

   Data primer diperoleh langsung dari lokasi proyek melalui dua teknik utama, yaitu:

   1) Observasi Langsung (*Time Study*): Pengumpulan data waktu siklus kerja dilakukan melalui pengamatan langsung menggunakan *stopwatch* Subjek pengamatan difokuskan pada tenaga kerja inti (tukang) yang secara langsung melaksanakan aktivitas pekerjaan penulangan, bekisting, dan pengecoran kolom K1 di lantai 4. Data yang dicatat meliputi waktu penyelesaian pekerjaan, jumlah tenaga kerja yang terlibat, volume pekerjaan, serta kondisi pelaksanaan di lapangan untuk menentukan *rating factor* dan *allowance.*
   2) Wawancara : Wawancara dilakukan secara langsung dengan melibatkan narasumber kunci yang kompeten di proyek, yaitu mandor, *project manager*, dan pengawas lapangan. Wawancara ini bertujuan untuk menggali informasi kualitatif mengenai kendala teknis, faktor lingkungan, serta hambatan operasional yang memengaruhi produktivitas tenaga kerja.

2. Data Sekunder:

   Data sekunder diperoleh melalui studi dokumentasi dari pihak manajemen proyek dan peraturan normatif yang berlaku. Dokumen proyek yang digunakan meliputi gambar kerja (*shop drawing*) struktur kolom K1 lantai 4 untuk mengetahui dimensi serta volume pekerjaan, dan dokumen jadwal pelaksanaan (*time schedule*). Selain itu, standar normatif yang dijadikan sebagai acuan pembanding dalam penelitian ini adalah Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 8 Tahun 2023 untuk menentukan koefisien tenaga kerja.

Pengamatan dilakukan terhadap aktivitas tenaga kerja pada pekerjaan penulangan, bekisting, dan pengecoran. Data yang dikumpulkan meliputi:

1. Waktu penyelesaian pekerjaan
2. Jumlah tenaga kerja yang terlibat
3. Volume pekerjaan yang diselesaikan
4. Kondisi pelaksanaan pekerjaan di lapangan.

Analisis data

Analisis data diawali dengan pengamatan waktu kerja (*observasi time*) pada pekerjaan penulangan, bekisting, dan pengecoran kolom beton bertulang. Waktu hasil observasi kemudian disesuaikan dengan *Rating Factor* untuk memperoleh *Basic Time (BT)* menggunakan Persamaan 1 [15].

$$BT = OT \frac{RF}{Standar\ RF} \quad (1)$$

Selanjutnya, *Basic Time* dihitung menjadi *Standard Time* (ST) dengan mempertimbangkan faktor *allowance* sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 2.

$$ST = BT(1 + \frac{Allowance}{100}) \quad (2)$$

Nilai *Standard Time* (ST) yang diperoleh digunakan sebagai dasar dalam menghitung produktivitas tenaga kerja. Produktivitas awal dihitung berdasarkan perbandingan antara volume pekerjaan dengan waktu standar dalam satuan detik menggunakan Persamaan (3).

$$P = \frac{Output}{Input} \quad (3)$$

Hasil produktivitas Selanjutnya dikonversikan menjadi koefisien tenaga kerja aktual dan dibandingkan dengan koefisien tenaga kerja berdasarkan Permen PUPR Nomor 8 Tahun 2023 untuk mengetahui besarnya deviasi produktivitas, dengan rumus yang ada pada persamaan 4 dan 5.

$$Koefisien\ aktual = \frac{1}{Produktivitas} \quad (4)$$

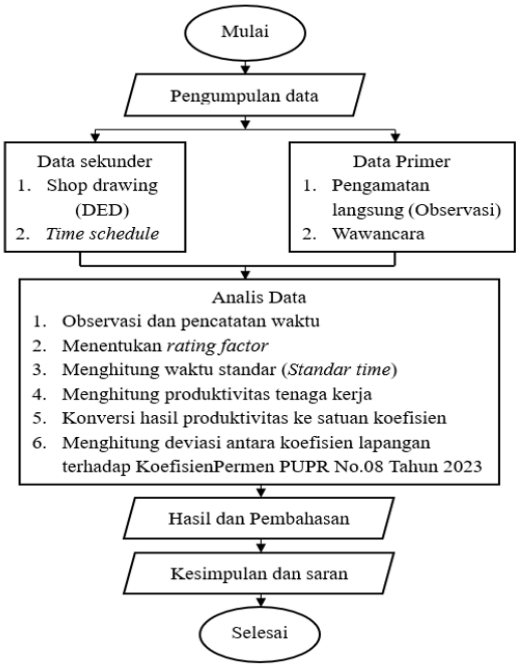
$$Deviasi = \frac{Koefisien\ aktual - Koefisien\ standar}{Koefisien\ standar} \times 100 \quad (5)$$

Selain analisis kuantitatif, dilakukan analisis deskriptif berdasarkan hasil observasi dan wawancara untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang menyebabkan deviasi produktivitas pada pekerjaan penulangan, bekisting, dan pengecoran kolom beton bertulang.

Tahapan penelitian

Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperoleh landasan teori yang berkaitan dengan produktivitas tenaga kerja konstruksi, metode *time study*, serta standar koefisien tenaga kerja berdasarkan Permen PUPR Nomor 8 Tahun 2023. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung di lapangan untuk mencatat durasi siklus kerja, jumlah tenaga kerja, volume pekerjaan, serta kondisi pelaksanaan pada tenaga kerja inti (tukang), dan wawancara mendalam dengan mandor, project manager, serta pengawas lapangan untuk menggali informasi terkait kendala teknis dan operasional, sedangkan data sekunder diperoleh dari dokumen proyek berupa *shop drawing* dan *time schedule*.

Data hasil observasi kemudian diolah melalui beberapa tahapan, yaitu pencatatan waktu kerja, penentuan *rating factor*, perhitungan *Basic Time* dan *Standard Time*, konversi *Standard Time* ke satuan Orang-Hari (OH), perhitungan produktivitas tenaga kerja, serta konversi produktivitas menjadi koefisien tenaga kerja aktual. Selanjutnya dilakukan analisis deviasi antara koefisien tenaga kerja aktual dengan koefisien standar Permen PUPR Nomor 8 Tahun 2023. Tahap akhir penelitian adalah mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi deviasi produktivitas serta menyusun kesimpulan dan saran berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan. Adapun tahapan penelitian secara keseluruhan dapat dilihat pada diagram alir penelitian pada Gambar 1.

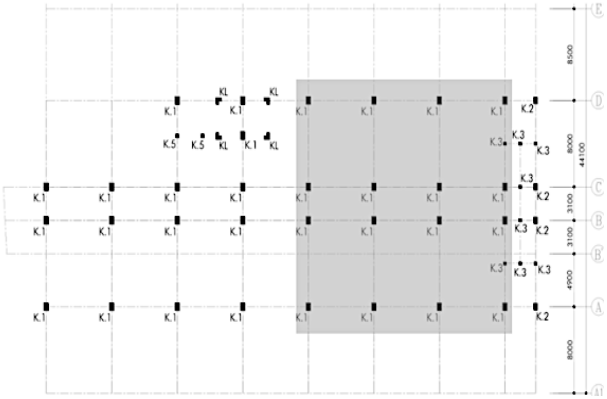


Gambar 1. Tahapan Penelitian

HASIL DAN DISKUSI

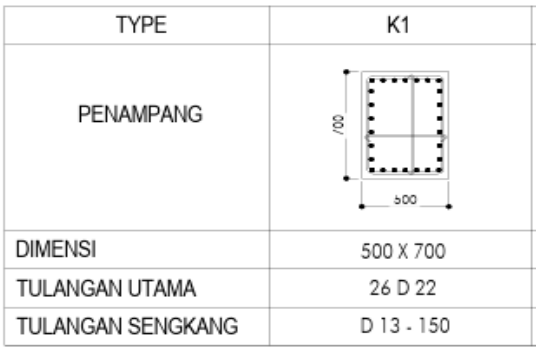
Penelitian dilakukan pada pekerjaan kolom beton bertulang tipe K1 di lantai 4, dengan jumlah sampel terdiri dari 16 kolom tipe K1 yang dipilih karena memiliki dimensi, metode pelaksanaan, dan karakteristik pekerjaan yang seragam sehingga dapat mewakili kondisi pekerjaan pada lokasi penelitian. Pengamatan difokuskan pada tenaga kerja inti (tukang) yang secara langsung terlibat dalam pelaksanaan pekerjaan kolom.

Adapun denah lokasi kolom yang diteliti terdapat pada Gambar 2.



Gambar 2. Denah Lokasi Penelitian

Untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai struktur kolom K1, detail penulangan dan komponen terkait dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Detail Kolom K1

Denah kolom serta detail kolom pada Gambar 2 dan Gambar 3 merupakan spesifikasi teknis yang menjadi objek pengamatan dalam penelitian ini. bertujuan untuk melihat sejauh mana efektivitas durasi pengerjaan struktur kolom dengan spesifikasi tersebut.

Detail mengenai komposisi dan jumlah tenaga kerja yang terlibat dalam pengamatan pada setiap item pekerjaan dipaparkan secara rinci pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Rekapitulasi Jumlah Tenaga Kerja Setiap Jenis Pekerjaan

Jenis pekerjaan	Jumlah Tenaga Kerja
Penulangan	6
Bekisting	4
Pengecoran	5

Pemilihan tenaga kerja inti dilakukan karena kelompok pekerja tersebut merupakan pelaksana utama yang secara langsung menghasilkan output pekerjaan sehingga produktivitas yang diperoleh dapat menggambarkan kondisi aktual pelaksanaan pekerjaan di lapangan.

Volume pekerjaan

Sebelum dilakukan analisis produktivitas, terlebih dahulu diidentifikasi volume pekerjaan yang menjadi objek pengamatan dalam penelitian ini, Volume pekerjaan diperoleh berdasarkan *shop drawing* kolom K1 lantai 4. Data volume ini digunakan sebagai dasar dalam perhitungan produktivitas tenaga kerja aktual pada setiap jenis pekerjaan yang diamati.

Tabel 2. Volume Pekerjaan Kolom

No	Jenis pekerjaan	Volume
1	Penulangan	537,575 Kg
2	Bekisting	10,868 m^2
3	Pengecoran	1,4 m^3

Setelah volume pekerjaan diketahui, tahap selanjutnya adalah menghitung produktivitas aktual tenaga kerja berdasarkan hasil pengamatan waktu kerja di lapangan menggunakan metode *Time Study*. Produktivitas dihitung dengan membandingkan volume pekerjaan yang dihasilkan terhadap kebutuhan tenaga kerja dalam satuan Orang-Hari (OH).

Produktivitas aktual tenaga kerja

Pengukuran produktivitas aktual dilakukan untuk mengetahui kemampuan tenaga kerja dalam menghasilkan *output* pekerjaan pada kondisi riil di lapangan. Nilai produktivitas ini dihitung berdasarkan keterkaitan yang komprehensif antara volume pekerjaan yang berhasil diselesaikan, durasi waktu kerja hasil pengamatan *Time Study*, serta jumlah tenaga kerja aktual yang terlibat.

Secara matematis, produktivitas awal dihitung dengan membandingkan volume pekerjaan terhadap waktu standar menggunakan Persamaan 3, di mana nilai *output* menyatakan volume pekerjaan yang diselesaikan, sedangkan *input* menyatakan waktu standar (*Standard Time*) dalam satuan detik.

Selanjutnya, hasil produktivitas tersebut dikonversikan ke dalam satuan Orang-Hari (OH) untuk mencerminkan kapasitas kerja harian tenaga kerja inti (tukang) pada setiap jenis pekerjaan. Konversi ini didasarkan pada ketentuan durasi jam kerja efektif di lapangan, yaitu 8 jam per hari kerja (1 hari = 8 jam = 28.800 detik). Satuan produktivitas akhir disesuaikan dengan karakteristik masing-masing subpekerjaan kolom, yaitu kg/OH untuk pekerjaan penulangan, m^2/OH untuk pekerjaan bekisting, dan m^3/OH untuk pekerjaan pengecoran.

Berikut merupakan contoh perhitungan produktivitas aktual pada penulangan :

Kolom 1

Volume pekerjaan : 537,575 Kg

Tenaga Kerja: 6

Standart time: 5.665 detik

Produktivitas = $\frac{v}{st}$

Produktivitas/detik = $\frac{537{,}575\ Kg}{5.665\ detik} = 0{,}0949$ Kg/detik

Produktivitas/menit = 0,0949 × 60 = 5,694 Kg/menit

Produktivitas/jam = 5,694 × 60 = 341,630 Kg/jam

Produktivitas/hari = 341,630 × 8 = 2733,043 Kg/hari

Produktivitas/OH = $\frac{2733{,}043\ Kg/hari}{Tenaga\ kerja}$

$= \frac{2733{,}043\ Kg/hari}{6} = 455{,}507$ Kg/OH

Melalui mekanisme perhitungan tersebut dengan basis waktu kerja 8 jam, diperoleh nilai produktivitas aktual penulangan pada Kolom 1 sebesar 457,507 kg/OH. Berdasarkan pengolahan data *Time Study* secara keseluruhan terhadap 16 sampel kolom K1 lantai 4, berikut disajikan rekapitulasi hasil perhitungan produktivitas aktual tenaga kerja.

Tabel 3. Rekapitulasi Perhitungan Produktivitas Tenaga Kerja Penulangan

No. Kolom	Produktivitas (detik)	Produktivitas (menit)	Produktivitas (Jam)	Produktivitas (Hari)	Produktivitas (OH)
1	0,0949	5,694	341,630	2733,043	455,507
2	0,0962	5,770	346,203	2769,620	461,603
3	0,0949	5,693	341,570	2732,562	455,427
4	0,0939	5,632	337,941	2703,528	450,588
5	0,0939	5,632	337,941	2703,528	450,588
6	0,0944	5,664	339,835	2718,681	453,114
7	0,0960	5,763	345,771	2766,165	461,028

No. Kolom	Produktivitas (detik)	Produktivitas (menit)	Produktivitas (Jam)	Produktivitas (Hari)	Produktivitas (OH)
8	0,0947	5,680	340,790	2726,322	454,387
9	0,0953	5,717	343,020	2744,157	457,360
10	0,0967	5,804	348,253	2786,026	464,338
11	0,0953	5,718	343,080	2744,642	457,440
12	0,0965	5,791	347,443	2779,540	463,257
13	0,0952	5,715	342,898	2743,187	457,198
14	0,0943	5,660	339,597	2716,778	452,796
15	0,0960	5,759	345,524	2764,194	460,699
16	0,0955	5,727	343,627	2749,017	458,170
Rata-rata	**0,0952**	**5,714**	**342,820**	**2742,562**	**457,094**

Hasil analisis menunjukkan produktivitas aktual pekerjaan penulangan sebesar 457,094 kg/OH. Nilai tersebut menunjukkan bahwa satu orang tenaga kerja mampu menyelesaikan pekerjaan penulangan rata-rata sebesar 457,094 kg dalam satu hari kerja. Produktivitas ini dipengaruhi oleh kompleksitas detail tulangan kolom, terutama pada bagian sengkang yang memiliki jarak relatif rapat sehingga membutuhkan waktu pemasangan yang lebih lama.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Produktivitas Aktual Tenaga Kerja Bekisting

No. Kolom	Produktivitas (detik)	Produktivitas (menit)	Produktivitas (Jam)	Produktivitas (Hari)	Produktivitas (OH)
1	0,000393	0,0236	1,416	11,327	2,832
2	0,000402	0,0241	1,448	11,587	2,897
3	0,000404	0,0242	1,453	11,623	2,906
4	0,000400	0,0240	1,440	11,522	2,880
5	0,000400	0,0240	1,439	11,513	2,878
6	0,000404	0,0243	1,455	11,643	2,911
7	0,000406	0,0244	1,462	11,698	2,925
8	0,000406	0,0243	1,461	11,686	2,921
9	0,000402	0,0241	1,447	11,580	2,895
10	0,000393	0,0236	1,415	11,319	2,830
11	0,000398	0,0239	1,434	11,473	2,868
12	0,000399	0,0240	1,438	11,504	2,876
13	0,000405	0,0243	1,457	11,654	2,913
14	0,000404	0,0242	1,453	11,624	2,906
15	0,000406	0,0243	1,461	11,684	2,921
16	0,000402	0,0241	1,449	11,590	2,897
Rata-rata	**0,000402**	**0,0241**	**1,446**	**11,564**	**2,891**

Produktivitas aktual pekerjaan bekisting sebesar 2,891 m^2/OH. Nilai ini menunjukkan luas bekisting yang dapat diselesaikan oleh satu orang tenaga kerja dalam satu hari kerja. Produktivitas pekerjaan bekisting dipengaruhi oleh proses pemasangan, penyetelan vertikalitas, dan penguatan sambungan bekisting yang membutuhkan ketelitian tinggi.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Produktivitas Aktual Tenaga Kerja Pengecoran

No. Kolom	Produktivitas (detik)	Produktivitas (menit)	Produktivitas (Jam)	Produktivitas (Hari)	Produktivitas (OH)
1	0,00163	0,0977	5,862	46,895	9,379
2	0,00163	0,0978	5,871	46,965	9,393
3	0,00167	0,1001	6,004	48,030	9,606
4	0,00164	0,0981	5,888	47,104	9,421
5	0,00160	0,0960	5,760	46,078	9,216
6	0,00160	0,0963	5,777	46,213	9,243
7	0,00159	0,0954	5,727	45,812	9,162
8	0,00157	0,0944	5,661	45,290	9,058
9	0,00159	0,0954	5,727	45,812	9,162
10	0,00158	0,0948	5,686	45,484	9,097
11	0,00158	0,0949	5,694	45,550	9,110
12	0,00159	0,0952	5,710	45,681	9,136
13	0,00157	0,0945	5,669	45,354	9,071
14	0,00158	0,0949	5,694	45,550	9,110
15	0,00157	0,0945	5,669	45,354	9,071
16	0,00158	0,0949	5,694	45,550	9,110

No. Kolom	Produktivitas (detik)	Produktivitas (menit)	Produktivitas (Jam)	Produktivitas (Hari)	Produktivitas (OH)
Rata-rata	**0,00160**	**0,0959**	**5,756**	**46,045**	**9,209**

Pada Tabel 5, secara umum terlihat bahwa hasil perhitungan produktivitas aktual rata-rata pekerjaan pengecoran sebesar 9,209 m^3/OH. Produktivitas ini didukung oleh penggunaan beton ready mix dan alat bantu pompa beton sehingga proses distribusi dan penempatan beton dapat dilakukan secara lebih cepat dibandingkan dengan pekerjaan yang dilakukan secara manual.

Komparasi koefisien tenaga kerja aktual terhadap Permen PUPR No. 08 Tahun 2023

Untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara produktivitas tenaga kerja riil di lapangan dan standar perencanaan nasional, nilai produktivitas aktual hasil pengamatan *Time Study* dikonversi terlebih dahulu menjadi satuan koefisien tenaga kerja (OH/satuan volume) menggunakan Persamaan (4). Nilai koefisien aktual yang diperoleh selanjutnya dibandingkan dengan koefisien standar normatif berdasarkan Peraturan Menteri PUPR Nomor 8 Tahun 2023. Besarnya tingkat kesesuaian maupun disparitas kuantitatif diukur melalui persentase selisih (deviasi) dengan menggunakan Persamaan (5). Apabila nilai deviasi bernilai positif (+), hal ini mengindikasikan bahwa koefisien lapangan lebih besar daripada koefisien standar normatif, yang berarti kebutuhan tenaga kerja aktual melebihi alokasi perencanaan atau tingkat produktivitas lapangan berada di bawah standar Permen PUPR No. 8 Tahun 2023 (terjadi pembengkakan waktu/tenaga kerja). Sebaliknya, jika deviasi bernilai negatif (-), maka produktivitas lapangan lebih tinggi dari standar perencanaan.

Berikut merupakan contoh perhitungan untuk perbandingan koefisien aktual dan koefisien permen PUPR No.08 Tahun 2023 pada penulangan.
Pada Kolom 1, koef penulangan berdasarkan standar Permen PUPR No.08 Tahun 2023 yaitu sebesar = 0,00160
Hasil perhitungan nilai koefisien aktual di lapangan yaitu = 0,00220, maka:

$$\text{Deviasi} = \frac{Koefisien\ lapangan - Koefisien\ Standar}{Koefisien\ standar} \times 100\%$$

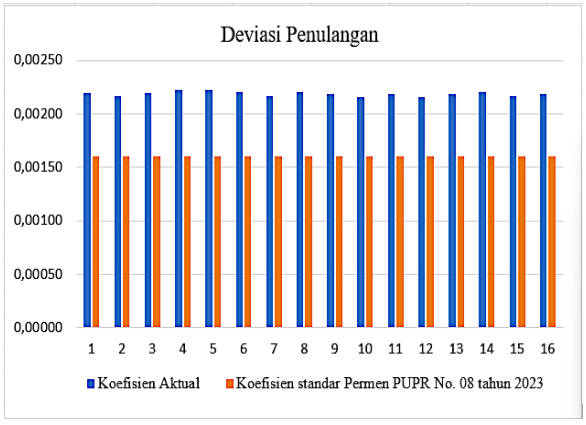
$$= \frac{0{,}0020 - 0{,}00160}{0{,}00160} \times 100\% = 37\%$$

Berdasarkan mekanisme perhitungan tersebut, diperoleh hasil deviasi pada Kolom 1 sebesar 37%. Hasil analisis komparasi dan rekapitulasi deviasi koefisien tenaga kerja secara keseluruhan pada 16 sampel kolom K1 lantai 4 untuk masing-masing jenis pekerjaan diuraikan pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Deviasi Koefisien Standar Dan Koefisien Aktual Pekerjaan Penulangan

No. Kolom	Koefisien Permen PUPR No.08 Tahun 2023 (OH/Kg)	Koefisien aktual (OH/Kg)	Hasil Deviasi (%)
1	0,00160	0,00220	37
2	0,00160	0,00217	35
3	0,00160	0,00220	37
4	0,00160	0,00222	39
5	0,00160	0,00222	39
6	0,00160	0,00221	38
7	0,00160	0,00217	36
8	0,00160	0,00220	38
9	0,00160	0,00219	37
10	0,00160	0,00215	35
11	0,00160	0,00219	37
12	0,00160	0,00216	35
13	0,00160	0,00219	37
14	0,00160	0,00221	38
15	0,00160	0,00217	36
16	0,00160	0,00218	36
Rata-rata	0,00160	0,00219	37

Data pada Tabel 6 kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk memperjelas perbedaan antara koefisien tenaga kerja aktual dan koefisien standar.



Gambar 4. Grafik Deviasi Penulangan

Berdasarkan Tabel 6 dan Gambar 4, pekerjaan penulangan menghasilkan deviasi sebesar 37% terhadap standar Permen PUPR Nomor 8 Tahun 2023. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan tenaga kerja aktual lebih besar dibandingkan dengan standar, sehingga produktivitas aktual masih berada di bawah produktivitas normatif. Deviasi ini dipengaruhi oleh kerumitan detail tulangan, khususnya jarak sengkang yang rapat, serta

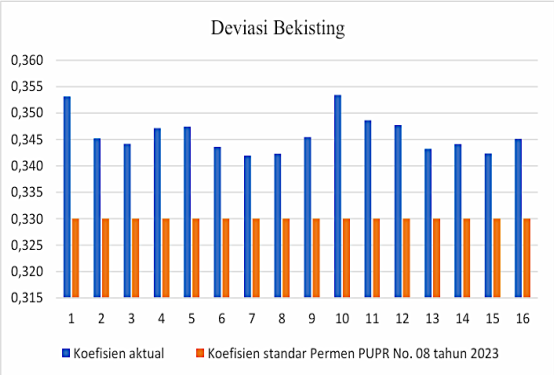
kelelahan pekerja akibat pelaksanaan pekerjaan pada elevasi lantai 4.

Analisis deviasi juga dilakukan pada pekerjaan bekisting untuk mengetahui tingkat kesesuaian koefisien tenaga kerja aktual terhadap standar Permen PUPR Nomor 8 Tahun 2023. Hasil perhitungan deviasi disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Rekapitulasi Hasil Deviasi Koefisien Standar Dan Koefisien Aktual Pekerjaan Bekisting

No. Kolom	Koefisien Permen PUPR No.08 Tahun 2023 (OH/m^2)	Koefisien aktual (OH/m^2)	Hasil Deviasi (%)
1	0,3300	0,353	7
2	0,3300	0,345	5
3	0,3300	0,344	4
4	0,3300	0,347	5
5	0,3300	0,347	5
6	0,3300	0,344	4
7	0,3300	0,342	4
8	0,3300	0,342	4
9	0,3300	0,345	5
10	0,3300	0,353	7
11	0,3300	0,349	6
12	0,3300	0,348	5
13	0,3300	0,343	4
14	0,3300	0,344	4
15	0,3300	0,342	4
16	0,3300	0,345	5
Rata-rata	**0,3300**	**0,346**	**5**

Data pada Tabel 7 kemudian disajikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah interpretasi hasil perbandingan koefisien tenaga kerja.



Gambar 5. Grafik Deviasi Bekisting

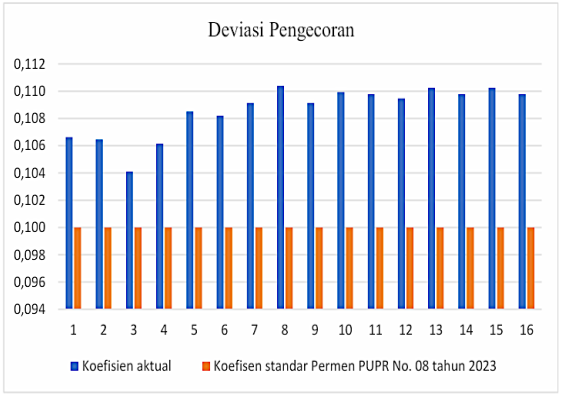
Berdasarkan Tabel 7 dan Gambar 5, pekerjaan bekisting rata-rata menghasilkan deviasi sebesar 5% terhadap standar Permen PUPR Nomor 8 Tahun 2023. Nilai ini menunjukkan bahwa produktivitas aktual relatif mendekati standar yang ditetapkan. Deviasi yang terjadi dipengaruhi oleh proses penyetelan, pemeriksaan posisi, dan pemasangan pengaku bekisting yang membutuhkan ketelitian dalam pelaksanaannya.

Untuk mengetahui tingkat kesesuaian koefisien tenaga kerja aktual pada pekerjaan pengecoran terhadap standar Permen PUPR Nomor 8 Tahun 2023, dilakukan analisis deviasi koefisien tenaga kerja. Hasil perhitungan deviasi disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Rekapitulasi Hasil Deviasi Koefisien Standar Dan Koefisien Aktual Pekerjaan Pengecoran

No. Kolom	Koefisien Permen PUPR No.08 Tahun 2023 (OH/m^3)	Koefisien aktual (OH/m^3)	Hasil Deviasi (%)
1	0,100	0,107	7
2	0,100	0,106	6
3	0,100	0,104	4
4	0,100	0,106	6
5	0,100	0,109	9
6	0,100	0,108	8
7	0,100	0,109	9
8	0,100	0,110	10
9	0,100	0,109	9
10	0,100	0,110	10
11	0,100	0,110	10
12	0,100	0,109	9
13	0,100	0,110	10
14	0,100	0,110	10
15	0,100	0,110	10
16	0,100	0,110	10
Rata-rata	**0,100**	**0,109**	**9**

Data pada Tabel 8 kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk memperjelas perbandingan antara koefisien tenaga kerja aktual dan standar.



Gambar 6. Grafik Deviasi Pengecoran

Berdasarkan Tabel 8 dan Gambar 6, pekerjaan pengecoran menghasilkan deviasi sebesar 9% terhadap standar Permen PUPR Nomor 8 Tahun 2023. Nilai tersebut menunjukkan bahwa produktivitas aktual masih sedikit lebih rendah dibandingkan dengan standar. Deviasi ini dipengaruhi oleh waktu tunggu material, koordinasi pelaksanaan pengecoran, serta kondisi cuaca yang memengaruhi efektivitas kerja di lapangan.

Faktor penyebab deviasi produktivitas tenaga kerja

Perbedaan antara koefisien tenaga kerja aktual dan koefisien standar menunjukkan adanya faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas tenaga kerja selama pelaksanaan pekerjaan. Untuk mengidentifikasi faktor tersebut, dilakukan observasi lapangan dan wawancara terhadap pihak yang terlibat dalam pelaksanaan pekerjaan.

Tabel 9. Faktor Penyebab Deviasi Produktivitas Tenaga Kerja

No	Faktor	Pengaruh terhadap produktvitas
1	Jarak sengkang yang rapat	Memperlambat proses perakitan tulangan
2	Elevasi pekerjaan lantai 4	Meningkatkan kelelahan pekerja
3	Cuaca ekstrem	Menurunkan efektivitas kerja
4	Kelelahan pekerja	Menurunkan kecepatan kerja
5	Pengawasan lapangan	Mempengaruhi kelancaran pekerjaan

Berdasarkan hasil observasi dan wawancara, deviasi produktivitas tenaga kerja dipengaruhi oleh faktor teknis pekerjaan, kondisi tenaga kerja, lingkungan kerja, dan pengawasan lapangan. Faktor-faktor tersebut menyebabkan produktivitas aktual yang diperoleh lebih rendah dibandingkan dengan standar Permen PUPR Nomor 8 Tahun 2023. Hal tersebut sejalan dengan temuan di lapangan, dan satu faktor dapat berkaitan dengan faktor lainnya. Kondisi cuaca yang relatif panas dapat memengaruhi semangat pekerja, yang membuat pekerja cepat lelah. Fabrikasi tulangan yang dilakukan di lantai satu dan harus dibawa ke lantai empat juga membuat pekerja cepat lelah di tengah cuaca yang cukup panas. Teknik atau metode pekerjaan yang tidak efektif dan pengawasan yang relatif tidak konsisten juga memengaruhi produktivitas di lapangan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis komparasi produktivitas tenaga kerja pada pekerjaan kolom K1 lantai 4 terhadap Peraturan Menteri PUPR Nomor 8 Tahun 2023, dapat disimpulkan bahwa produktivitas aktual tenaga kerja secara keseluruhan masih berada di bawah standar normatif. Hal ini dibuktikan dengan nilai koefisien tenaga kerja aktual yang lebih besar dibandingkan dengan koefisien standar, yang memicu terjadinya deviasi atau pembengkakan waktu dan tenaga kerja pada setiap subpekerjaan. Secara rinci, deviasi terbesar terjadi pada pekerjaan penulangan sebesar 37% (koefisien aktual 0,00219 OH/kg terhadap standar 0,00160 OH/kg), diikuti oleh pekerjaan pengecoran sebesar 9% (koefisien aktual 0,109 OH/m^3 terhadap standar 0,100 OH/m^3), serta pekerjaan bekisting sebesar 5% (koefisien aktual 0,346 OH/m^2 terhadap standar 0,330 OH/m^2). Capaian produktivitas aktual masing-masing tercatat sebesar 457,094 kg/OH untuk penulangan, 9,209 m^3/OH untuk pengecoran, dan 2,891 m^2/OH untuk bekisting. Terjadinya selisih persentase di bawah standar tersebut dipengaruhi oleh faktor teknis dan lingkungan di lapangan, kelelahan fisik pekerja akibat elevasi tinggi di lantai 4, kondisi cuaca, serta waktu tunggu material saat pelaksanaan. Temuan ini menegaskan pentingnya bagi para perencana dan praktisi konstruksi untuk mempertimbangkan penyesuaian koefisien riil lapangan, khususnya pada struktur kolom bertingkat agar estimasi durasi dan anggaran proyek menjadi lebih akurat dan realistis.

REFERENSI

[1] T. Suwondo, "Analisa Penerapan Manajemen Waktu Dan Biaya (Studi Kasus Pekerjaan Struktur Bawah Pada Proyek Pembangunan Gedung Arumaya)," *J. Kaji. Tek. Sipil*, vol. 6, no. 2, pp. 11–17, 2022, doi: 10.52447/jkts.v6i2.5560.

[2] S. Stringer, J. Jusmidah, M. Fikri, and N. Nurhidayah, "Analisis Persepsi Penerapan Manajemen Proyek Terhadap Keberhasilan Suatu Proyek Konstruksi," *J. Ilm. Ecosyst.*, vol. 25, no. 1, pp. 185–195, 2025, doi: 10.35965/eco.v25i1.5869.

[3] F. Activity, I. A. Factors, M. P. Faradina, and S. H. Dewi, "Analisis Produktivitas Tenaga Kerja Pekerjaan Pembesian Dan Bekisting Serta Faktor -Faktor yang Mempengaruhinya," vol. 22, pp. 59–68, 2022, doi: 10.25299/saintis.2022.vol22(02).25190.

[4] Y. I. Silalahi, L. Masthura, and N. Fahriana, "Analisis Faktor - Faktor Penentu Keberhasilan Proyek Konstruksi Berdasarkan Mutu, Biaya dan Waktu," *J. Komposit*, vol. 7, no. 2, pp. 233–240, 2023, doi: 10.32832/komposit.v7i2.14240.

[5] M. Fahri, H. Ashad, and W. Watono, "Pengaruh Faktor-Faktor Produktivitas Tenaga Kerja dalam Pembangunan Gedung Tinggi di Parepare," *J. Tek. Sipil MACCA*, vol. 7, no. 1, pp. 66–74, 2022, doi: 10.33096/jtsm.v7i1.543.

[6] F. M. Azhari, S. Sumargono, and A. I. Candra, "Analisa Efisiensi Dan Produktivitas Pekerjaan Kolom Pada Proyek Gedung 7 Lantai Universitas Kadiri," *Publ. Ris. Orientasi Tek. Sipil*, vol. 6, no. 1, pp. 102–109, 2024, doi: 10.26740/proteksi.v6n1.p102-109.

[7] S. Thioritz, Mursalim, and G. G. Sombolayuk, "Analisis Produktivitas Tenaga Kerja Pada Pekerjaan Kolom (Studi Kasus : Proyek Pagar Batas Cluster G Citraland Tallasa City Makassar)," *J. Media Tek. Sipil*, vol. 1, no. 1, pp. 8–15, 2023, doi: 10.56963/judiateks.v1i1.13.

[8] J. Setiawan, B. Sutriono, and N. Rochmah, "Analisis Produktivitas Tenaga Kerja Terhadap Pekerjaan Pembesian Kolom dan Balok Pada Proyek Vasa Hotel Extension", Jurnal Kacapuri vol. 5, No.1 pp. 260-268, 2022.

[9] D. P. Wahyudi, U. Saepudin, and A. Maskur, "Analisis Produktivitas Pelaksanaan Pekerjaan Beton Bertulang Pada Kolom Dan Balok Di Proyek Pembangunan Mesjid Fmipa Ugm (Studi Kasus Proyek Pembangunan Masjid FMIPA UGM Yogyakarta)," pp. 1–11, 2022.

[10] F. G. Bagaskara and A. B. Listyawan, "Produktivitas Pada Pekerjaan Kolom Beton Bertulang Lantai 3 Dan Lantai 4 Proyek Masjid Mibas," *Pros. Semin. Nas. Tek. Sipil 2023 Fak. Tek. Univ. Muhammadiyah Surakarta*, no. 1, pp. 522–527, 2023.

[11] M. C. Putujaya, "Analisa Produktivitas Pekerjaan Kolom Dengan Metode Time Study Pada Proyek Pembangunan Ruang Kelas Mtsn 3 Pekanbaru," 2020.

[12] Peraturan Mentri PUPR NO : 08/PRT/M/2023, "Pedoman Penyusunan Perkiraan Biaya Pekerjaan Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat," *Kementrian PUPR*, pp. 1–18, 2023.

[13] I. W. S. Arta, I. I. W. Arya, and I. G. A. Neny, "Perbandingan Koefisien Tenaga Kerja Pada Pekerjaan Struktur Kolom Berdasarkan Ahsp 2023 Dan Lapangan (Studi Kasus : Pembangunan Villa Solair Pererenan Badung Bali)," vol. 3, pp. 68–78, 2024.

[14] N. N. Rodhi, "Perencanaan Manajemen Proyek Dalam Meningkatkan Efektifitas Kinerja Sumber Daya Manusia Di Bojonegoro," *DEARSIP J. Archit. Civ.*, vol. 4, no. 01, pp. 25–32, 2024, doi: 10.52166/dearsip.v4i01.6262.

[15] Masca Indra Triana Wahyu Agung Ponco Ndriyo Galih Utomo, "Analisis Produktivitas Tenaga Kerja pada Proyek Pembangunan Airlangga Edupreneur Center (AEC) Tahap 1 Universitas Airlangga dengan Metode Time Study," vol. 5, no. 3, pp. 499–509, 2025.

http://journal.uir.ac.id/index.php/saintis

Jurnal Saintis

ISSN (Print) : 1410-7783
ISSN (Online) : 2580-7110

Volume 26 Nomor 02, Oktober 2026 : 119-136

Effect of Shear Wall Configuration on Torsional Response and Seismic Performance of Irregular Buildings

Ayu Sinta Aprilia[1,*], Andi S.[1], Rahmat Kurniawan[1], Kirtinanda P.[1], Siska Apriwelni[1], Ahmad Auliadi Yufrizal[1]

[1] *Civil Engineering Study Program, Faculty of Infrastructure and Regional Planning, Institut Teknologi Sumatera, South Lampung, Lampung 35365, Indonesia*

* Corresponding author: ayu.aprilia@si.itera.ac.id
Tel.: +62-856-4513-4326
Received: Sep 25, 2026; Revision: Oct 29, 2026; Accepted: Oct 31, 2026
DOI: 10.25299/saintis.2026.vol26(02).30339

Abstract

Indonesia lies in a region of high seismic intensity, so earthquake-resistant design is essential for buildings in high-risk categories. This study evaluates the seismic performance of the Public Service Building (GLU) of Institut Teknologi Sumatera (ITERA), a seven-story reinforced concrete building with an irregular plan, classified as Risk Category IV, under five shear wall placement configurations: SWC-Full, CW-Only, SW-Only, SWC-Dist and SW-Multi. The structure was modeled in ETABS as a dual system and analyzed using response spectrum analysis in accordance with SNI 1726:2019 and nonlinear static pushover analysis based on FEMA 440. Seven parameters were assessed: structural period and modal response, inter-story drift, P-Delta stability, dual system effectiveness, element compliance with the Special Moment-Resisting Frame (SMRF) requirements of SNI 2847:2019, shear wall capacity, and pushover performance level. The results show that the centralized configuration (SWC-Full) produces a dominant torsional first mode (RZ), whereas the distributed configuration (SWC-Dist) produces a translational first mode (UX). The X-direction period ranges from 0.876 s (SWC-Dist) to 1.673 s (SW-Only). Only SWC-Full and SWC-Dist satisfy all seven evaluation criteria simultaneously, with drift-based performance levels between Immediate Occupancy (IO) and Life Safety (LS) and practically equivalent relative scores (0.92 and 0.90). Removing the core wall (SW-Only) causes drift and beam failures, including a 42% exceedance of beam flexural strength, and leaves the walls only 13% of the X-direction base shear. These findings indicate that, for irregular Risk Category IV buildings, the shear wall–core wall combination is the decisive factor in satisfying the seismic requirements.

Keywords: shear wall configuration, irregular building, dual system, pushover analysis, FEMA 440

INTRODUCTION

Indonesia is located at the convergence of three major tectonic plates, namely the Indo-Australian, Eurasian and Pacific plates, making it one of the most seismically active regions in the world. The Sumatran subduction zone, stretching from Aceh to Lampung, is one of the most active earthquake sources, with a peak ground acceleration (PGA) of 0.465g at a 7% probability of exceedance in 75 years in the Sunda Strait area [1]. This seismotectonic condition demands earthquake-resistant structural design, particularly in Lampung Province, which is experiencing rapid growth in educational infrastructure.

The Public Service Building (Gedung Layanan Umum, GLU) of Institut Teknologi Sumatera (ITERA) is a seven-story educational facility serving thousands of students and is classified as a Risk Category IV building under SNI 1726:2019 [2]. The building is characterized by an irregular floor plan geometry, which is structurally more susceptible to torsional effects and non-uniform deformation than regular buildings [3]. Ruggieri and Vukobratović [4] further showed that torsion amplifies not only displacement but also floor acceleration demands in low-rise reinforced concrete buildings, so torsional behavior must be checked explicitly rather than inferred from global drift alone. The choice of the lateral force-resisting element configuration, particularly that of the shear walls, is therefore a critical aspect of the structural design.

Shear walls are highly effective structural elements for resisting lateral earthquake forces [5]. Shamrao [6] showed probabilistically that, in torsionally imbalanced buildings, shear walls markedly reduce the probability of damage and equalize the response in both orthogonal directions. In multi-story buildings with a dual system, shear walls work together with moment-resisting frames to resist seismic forces; the frames must be capable of carrying at least 25% of the design seismic force [2]. The effectiveness of the dual system is strongly influenced by the shear wall placement configuration, which determines the lateral stiffness

distribution, the torsional response and the overall deformation capacity of the structure [7].

Several prior studies have examined the effect of shear wall placement on structural performance. Katrangi et al. [8] assessed the seismic performance and base shear contribution ratios of reinforced concrete wall-frame dual systems and confirmed that dual system effectiveness depends on the proportional stiffness of each lateral force-resisting element. Dumalanta et al. [9] evaluated three shear wall configurations in a five-story irregular building and found that the outer-center (distributed) configuration provided the most balanced seismic response, improving the performance level from Life Safety (LS) to Immediate Occupancy (IO) based on FEMA 440. Khelaifia et al. [10] reported that symmetric and complete shear wall configurations produce the smallest drift values, while Barser et al. [11] demonstrated a positive correlation between the completeness of lateral elements and drift limit compliance. Kurnia et al. [12] compared three shear wall positions in an irregular building using response spectrum analysis and found that the most effective position reduced the maximum lateral displacement by about 40% relative to the building without shear walls. Aslani and Tehrani [3] examined the effect of vertical irregularities in shear walls on the collapse capacity of dual system structures and showed that the vertical position of the irregularity is a critical parameter that is not yet accommodated by current seismic design standards. Salmassi et al. [13] demonstrated that the position of end shear walls in tall buildings with torsional irregularity governs the distribution of wall stresses and the overall performance, while Yakhkeshi and Tehrani [14] analyzed seven dual frame–shear wall models and found that local wall inclination affects collapse resistance more strongly than global torsional irregularity, indicating that the geometric arrangement of the walls, and not only the total wall area, governs seismic performance.

Although shear wall placement has been studied widely, three gaps remain. First, most studies use regular or symmetric building models in the lower risk categories (II and III), whereas irregular Risk Category IV buildings, for which the code imposes the strictest drift limits and the redundancy factor, have received little attention. Second, the evaluations are usually limited to global indicators such as period, drift or base shear, so the link between the wall layout and the element-level SMRF compliance of the frames is not examined. Third, the dual system is normally checked only against the 25% minimum frame share, although the actual distribution of base shear between walls and frames can differ greatly between layouts. To the authors' knowledge, these aspects have not been evaluated together for an existing irregular Risk Category IV building in Indonesia.

Based on these gaps, the present study aims to (1) evaluate the effect of five shear wall configurations on the structural period, inter-story drift and torsional response; (2) analyze the dual system of each configuration, both against the code requirement and in terms of the actual force share; and (3) compare the pushover performance of the configurations in order to determine the most suitable shear wall placement for an irregular Risk Category IV building. The original contributions of this study are: (i) a side-by-side evaluation of five wall layouts of an existing irregular Risk Category IV building designed to SNI 1726:2019 and SNI 2847:2019; (ii) an integrated framework that links each layout to its torsional irregularity, dual system force share, SMRF element compliance and pushover performance within one consistent set of models; and (iii) evidence that a layout can satisfy the 25% dual system requirement while its walls carry only 13% of the base shear, which leads to beam failures that global drift checks do not reveal.

METHOD

Study Object Description

The case study building is the ITERA Public Service Building (GLU), located in South Lampung Regency, Lampung Province, at coordinates 5.36289° S and 105.31377° E (Figure 1). The building has seven stories and a total height of 32.5 m; the first two stories are 5 m high and the remaining five stories are 4.5 m high. The floor plan is irregular, with overall dimensions of 56 m × 50.77 m. The structural materials comprise concrete with a specified compressive strength (f'_c) of 30 MPa, longitudinal reinforcement with a yield strength (f_y) of 420 MPa (BjTS 420A) and transverse reinforcement with a yield strength (f_{yt}) of 280 MPa (BjTP 280). The principal member dimensions are beam B1 (350 × 650 mm), column K1 (700 × 700 mm), shear wall thickness 400 mm and slab thickness 130 mm. The plan comprises seven 8 m bays in the X direction and has a re-entrant corner (horizontal irregularity Type 2 of SNI 1726:2019 [2]) in all configurations.

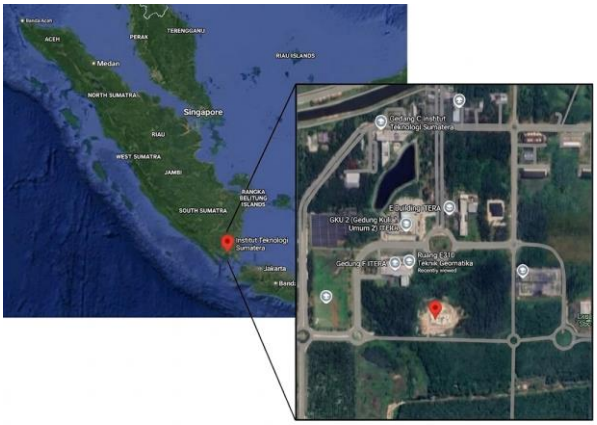


Figure 1. Location of the ITERA Public Service Building in South Lampung

Shear Wall Configurations

The five shear wall configurations evaluated in this study are shown in Figure 2. The naming convention is based on the type of lateral element and its distribution characteristics.

(1) SWC-Full (full central SW–CW): the existing configuration with complete shear wall (SW) and core wall (CW), centrally positioned in the building. It serves as the comparison baseline.

(2) CW-Only (central CW without SW): retains only the core wall without additional shear walls, which removes the lateral stiffness elements along the building perimeter.

(3) SW-Only (peripheral SW without CW): retains the shear walls along the building perimeter but omits the core wall, eliminating the central stiffness core of the building.

(4) SWC-Dist (distributed SW–CW): an alternative configuration with a core wall and varied shear wall positions distributed differently from SWC-Full.

(5) SW-Multi (multidirectional SW without CW): shear walls oriented in the X direction replace the core wall and act together with the original shear walls, forming linear multidirectional elements without a closed core.

Figure 2 shows the global X and Y axes and the layout of the lateral elements in each configuration. The core wall (CW) is a closed box between grid lines 4 and 5 above the central void, with its longer side along the X direction. The planar shear walls (SW) are 400 mm thick and 4.7 m long including their boundary columns, and they are oriented in the Y direction. In SWC-Full and SW-Only they are on grid lines 3 and 6; in SWC-Dist they are moved to the end bays, between grid lines 1 and 2 and between grid lines 7 and 8; and in SW-Multi the core is replaced by a planar wall along the X direction between grid lines 4 and 5 (PSW3), which acts with the two Y-direction walls on grid lines 3 and 6 (PSW1 and PSW2). All other members are identical in the five models. The centers of mass and rigidity were not exported from the ETABS models; the plan eccentricity is therefore characterized through the torsional irregularity ratios of all configurations (Tables 2 and 3).

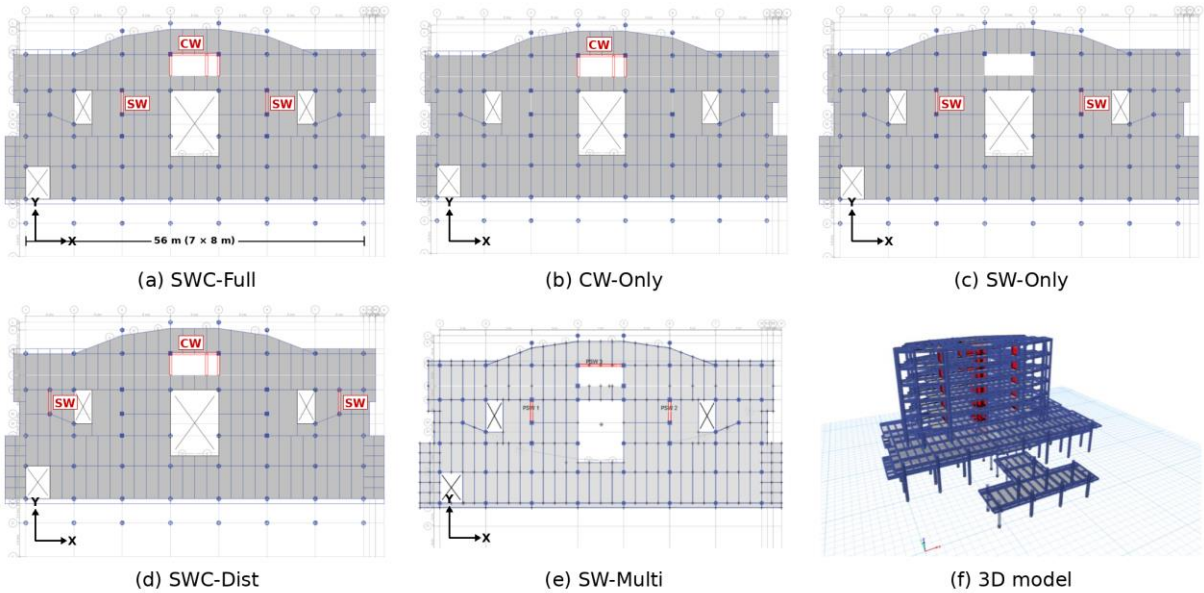


Figure 2. Typical Floor Plans and Three-Dimensional Model of the ITERA GLU (Red: Shear Walls and Core Wall; Grid Spacing 8 m in the X Direction; Overall Plan 56 m × 50.77 m)

Seismic Design Parameters

Seismic acceleration parameters were obtained from the RSA Cipta Karya web application based on SNI 1726:2019 for the building site, which is classified as site class SD, i.e., stiff soil [15]. The key design parameters are shown in Figure 3: the mapped spectral response acceleration at short periods (S_s) is 0.8291g and that at a period of 1 s (S_1) is 0.4138g. Using a short-period site coefficient (F_a) of 1.1684 and a 1 s site coefficient (F_v) of 1.8862, the design spectral response acceleration at short periods (S_{DS}) is 0.6458g and that at a period of 1 s (S_{D1}) is 0.5203g. Based on these values, the structure is assigned to Seismic Design Category (SDC) D. For Risk Category IV, the seismic importance factor (I_e) is 1.5, the response modification coefficient (R) is 7, the system overstrength factor (Ω_0) is 2.5 and the deflection amplification factor (C_d) is 5.5. The approximate fundamental period (T_a), computed from the empirical expression of SNI 1726:2019, is 0.6643 s, with an upper-bound period $T_{max} = C_u \cdot T_a$ = 0.930 s.

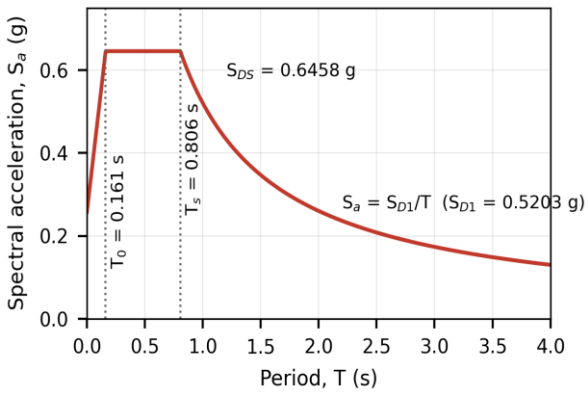


Figure 3. Design Response Spectrum for the ITERA GLU Site

Loading

The loads were determined in accordance with SNI 1727:2020 [16]. The superimposed dead load (SDL) comprises ceramic tiles, 0.24 kN/m^2; mechanical ducting, 0.25 kN/m^2; ceiling and frame, 0.14 kN/m^2; mortar screed, 0.61 kN/m^2; and autoclaved aerated concrete (AAC) block walls, 5.8 kN/m^2 and 6.6 kN/m^2. The live loads vary with occupancy: cafeteria and lobby, 4.79 kN/m^2; office, 2.4 kN/m^2; toilet, 1.92 kN/m^2; archive room, 3.6 kN/m^2; corridor, 3.83 kN/m^2; and roof, 0.96 kN/m^2. The wind load was based on a basic wind speed of 40 m/s and Exposure Category B. The load combinations followed SNI 1726:2019, and orthogonal seismic effects were accounted for using the 100%–30% directional combination rule.

Modeling and Analysis

The structure was modeled in ETABS v22.0.0 (Extended Three-dimensional Analysis of Building Systems) as a three-dimensional model with fixed supports at the base and a rigid diaphragm assigned at each floor level. Cracked-section stiffness modifiers were applied in accordance with SNI 2847:2019 to account for cracking of the reinforced concrete members, namely (Table 6.6.3.1.1(a)) 0.70I_g for columns and for shear walls (the uncracked-wall value) and 0.35I_g for beams, where I_g is the gross moment of inertia [17]. The linear analysis used the response spectrum method with base shear scaling [18]. The nonlinear analysis used a displacement-controlled static pushover procedure up to 4% of the total height (1,300 mm); the procedures and limitations of this technique have been reviewed comprehensively by Kuria and Kegyes-Brassai [19]. Plastic hinges were defined at beam ends (0.1L and 0.9L) using Auto M3 hinges (strong-axis flexure, ASCE 41-17 Table 10-7) and at column ends using Auto P-M2-M3 hinges (biaxial flexure–axial interaction, ASCE 41-17 Table 10-8) [20]; the IO, LS and CP acceptance criteria (plastic rotations) of the same tables were assigned to each hinge. The shear walls were modeled as elastic shell elements, as explained below.

The modal analysis used 25 modes. The cumulative modal mass participation ratios in UX, UY and RZ were 97.8%, 94.5% and 98.7% for SWC-Full; 97.5%, 95.2% and 99.0% for CW-Only; 99.9%, 95.3% and 98.2% for SW-Only; 98.3%, 95.4% and 96.4% for SWC-Dist; and 97.3%, 96.6% and 98.5% for SW-Multi. All exceed the 90% minimum of SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.1 [2] in both horizontal directions. The pushover analysis started from a nonlinear gravity case (1.0D + 1.0SIDL + 0.25L), was run under displacement control up to 1,300 mm, and monitored the roof displacement at the center of mass of the roof diaphragm.

The shear walls were modeled as elastic shell elements with the stiffness of 0.70I_g, whereas plastic hinges were assigned only to the beams and columns. In the SMRF–special wall dual system considered here, the frame hinges are the intended energy-dissipating mechanism, and the walls were verified separately by the force-based checks of SNI 2847:2019 [17]: axial–flexural interaction with SP-Column, minimum reinforcement, special boundary elements and shear capacity (Table 6). This approach keeps the five models comparable under identical assumptions, but flexural yielding, shear cracking and stiffness degradation of the walls are

not represented. The nonlinear response of the system is therefore governed by the frame hinges, and the capacity curves are stiffer and stronger than those of a model with nonlinear walls; the base shear capacity in particular is overestimated. The target displacements and performance levels should consequently be read as comparative indicators between the configurations rather than as absolute estimates of the nonlinear capacity. This limitation is most relevant for CW-Only, whose core wall fails the shear capacity check (Table 6), so its pushover response is unconservative.

The target displacement was computed using the coefficient (displacement modification) method of FEMA 356 Section 3.3.3.3.2 [21], which FEMA 440 [22] reviewed and retained in the same form, expressed in Equation (1). The spectral acceleration and effective period at the performance point were obtained from the FEMA 440 equivalent linearization procedure in ETABS, as also adopted by Sugianto and Pranata [23], and the target displacement was then evaluated with the coefficient expression, following the procedure applied by Usman et al. [24] to reinforced concrete shear wall buildings in several Indonesian seismic regions, so that its output maps directly onto the drift-based performance limits used in this study.

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 \cdot S_a \cdot (T_e^2/4\pi^2) \cdot g \qquad (1)$$

where C_0 is the modification factor relating the spectral displacement to the roof displacement (1.2, taken from FEMA 356 Table 3-2), C_1 is the modification factor relating the maximum inelastic displacement to the elastic displacement, C_2 is the modification factor accounting for pinched hysteresis, stiffness degradation and strength deterioration, C_3 is the P-Delta factor, S_a is the spectral acceleration at the performance point and T_e is the effective period, both obtained from the FEMA 440 equivalent linearization output of ETABS, and g is the acceleration of gravity (9.81 m/s^2). In accordance with FEMA 356 Section 3.3.3.3.2, $C_1 = 1.0$ was adopted because the effective period of every configuration exceeds the characteristic period of the design response spectrum, $T_s = S_{D1}/S_{DS} = 0.806$ s ($T_e \geq T_s$), $C_2 = 1.0$, which the same section permits for nonlinear procedures, and $C_3 = 1.0$ because the capacity curves have a positive post-yield stiffness.

Evaluation Parameters

Structural performance was evaluated against seven parameters: (1) the inter-story drift limit of SNI 1726:2019, set at 0.77% of the story height for Risk Category IV with a redundancy factor of 1.3; (2) the P-Delta stability coefficient ($\theta < \theta_{allow} = 0.0909$); (3) the dual system requirement of SNI 1726:2019 Pasal 7.2.5.1 [2], under which the moment frame must resist at least 25% of the design seismic force, together with the effectiveness of the force share between frame and walls; (4) beam compliance with the SMRF requirements of SNI 2847:2019, covering flexural strength ($\phi M_n > M_u$), shear strength ($\phi V_n/V_u \geq 1$) and torsional demand; (5) column compliance with the strong column–weak beam (SCWB) criterion; (6) shear wall adequacy, covering minimum reinforcement, special boundary element confinement ($A_{sh}/s \geq (A_{sh}/s)_{min}$) and shear capacity; and (7) the pushover performance, obtained from the FEMA 440 target displacement as described below. The SCWB criterion is expressed in Equation (2).

$$\Sigma M_{nc} \geq 1.2\, \Sigma M_{nb} \qquad (2)$$

where ΣM_{nc} is the sum of the nominal flexural strengths of the columns above and below the joint ($\Sigma M_{nc} = 2M_{nc}$ for identical columns) and $\Sigma M_{nb} = M_n^- + M_n^+$ is the sum of the nominal flexural strengths of the beams framing into the joint.

Three quantities are distinguished in the pushover evaluation and are not treated as identical. The performance point is the intersection of the capacity spectrum with the FEMA 440 modified demand spectrum (equivalent linearization) and gives S_a, S_d and T_e [22]. The target displacement δ_T is the roof displacement demand obtained from Equation (1) with S_a and T_e at the performance point. The component acceptance criteria are the IO, LS and CP plastic rotation limits of ASCE 41-17 [20] assigned to the beam and column hinges; they are checked at the analysis step closest to δ_T.

The global performance level is obtained by converting δ_T into the roof drift ratio δ_T/H, where H = 32.5 m is the height of the monitored roof node above the fixed base, and comparing it with the drift values given for concrete frames in FEMA 356 Table C1-3 [21]: 1% transient drift for IO, 2% for LS and 4% for CP, that is 325 mm, 650 mm and 1,300 mm. FEMA 440 does not define these thresholds itself; it improves the nonlinear static procedures of FEMA 356 and ATC-40 that are used here to compute the demand. FEMA 356 states that these drift values are typical values that illustrate the overall response and are not acceptance criteria. The drift-based level is therefore used only as a common global indicator for comparing the configurations, and it is reported

together with the hinge states at δ_T (Table 12). The concrete-frame values were adopted because the inelastic response of the model is concentrated in the frame hinges. The same table gives stricter values for concrete walls (0.5%, 1% and 2%); applying them would lower the global level of every configuration by one category, so the drift-based levels reported here are upper-bound estimates.

RESULTS AND DISCUSSION

Structural Period and Modal Response

Table 1 summarizes the structural periods of the five configurations. The fundamental period T_1 varies significantly: SW-Only has the highest value (1.673 s), indicating the most flexible structure due to the removal of the core wall, whereas SWC-Dist has the lowest value (0.876 s). SWC-Dist is the only configuration whose fundamental period is shorter than the upper-bound period T_{max} = 0.930 s, so it is also the only configuration for which the computed rather than the code-limited period governs the design in the X direction.

Table 1. Summary of Structural Periods and Mode Shapes

Parameter	SWC-Full	CW-Only	SW-Only	SWC-Dist	SW-Multi	Unit
T_1 (mode 1)	1.014	1.223	1.673	0.876	1.025	s
T_2 (mode 2)	0.778	0.904	0.985	0.824	0.980	s
T_{UY} (first UY mode)	0.778	0.904	0.968	0.824	0.980	s
T_X (design)	0.930	0.930	0.930	0.876	0.930	s
T_Y (design)	0.778	0.904	0.930	0.824	0.930	s
Mode 1	RZ	RZ	UX	UX	UX	–
Mode 2	UY	UY	RZ	UY	UY	–
Mode 3	UX	UX	UY	UX	UX	–

Note: T_1 and T_2 are the periods of the first and second ETABS modes. T_{UY} is the period of the lowest mode with dominant translational mass participation in the Y direction, which for SW-Only is the third mode (0.968 s) because its second mode is torsional. T_X and T_Y are the periods adopted for design, limited by $T_{max} = C_u \cdot T_a$ = 0.930 s.

A key finding of the modal analysis (Figure 4) is the difference in torsional response among the configurations. SWC-Full and CW-Only exhibit a first mode of rotation about the vertical axis (RZ) with torsional mass participation ratios of 0.242 and 0.266, respectively, indicating a dominant torsional response caused by the centralized shear wall position. In contrast, SW-Only, SWC-Dist and SW-Multi exhibit a first mode of translation in the X direction (UX), because the dispersed lateral elements increase the torsional stiffness. This result is consistent with Dumalanta et al. [9], who showed that the outer-center (distributed) configuration produces a more balanced seismic response than the centralized configuration, and with Aslani and Tehrani [3], who emphasized the influence of the spatial distribution of the lateral elements on the torsional response of dual system structures.

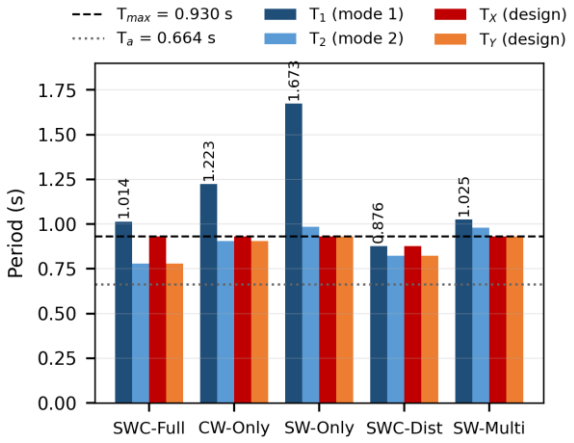


Figure 4. Comparison of Structural Periods Among Shear Wall Configurations

Table 2 presents the torsional irregularity check for the SWC-Full configuration. The ratio of maximum to average displacement ($\Delta_{max}/\Delta_{avg}$) was evaluated at each floor level in both principal directions. Following SNI 1726:2019 Table 13, a ratio exceeding 1.2 is classified as torsional irregularity (H.1a) and a ratio exceeding 1.4 as extreme torsional irregularity (H.1b).

Table 2. Torsional Irregularity Ratio ($\Delta_{max}/\Delta_{avg}$) of the SWC-Full Configuration

Floor	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$ (X)	Status X	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$ (Y)	Status Y
8	1.312	H.1a	1.146	OK
7	1.327	H.1a	1.155	OK
6	1.341	H.1a	1.163	OK
5	1.347	H.1a	1.169	OK
4	1.336	H.1a	1.167	OK
Elv 10.4	1.428	H.1b	1.364	H.1a
3	1.319	H.1a	1.597	H.1b
Elv 9	1.417	H.1b	1.157	OK
Elv 6.53	1.400	H.1b	1.399	H.1a
Elv 5.13	1.488	H.1b	1.167	OK
2	1.405	H.1b	1.201	H.1a

All five configurations exhibit H.1a or H.1b irregularity in at least one direction (Table 3). Consequently, the accidental torsional moment was amplified using the torsional amplification factor A_x given by Equation (3).

$$A_x = (\Delta_{max} / 1.2\,\Delta_{avg})^2 \le 3.0 \qquad (3)$$

For SWC-Full, the largest amplification factors were A_x = 1.538 in the X direction (elevation 5.13 m) and A_x = 1.771 in the Y direction (story 3), corresponding to accidental eccentricities of 3.903 m (7.7% of the building dimension) and 4.959 m

(8.9%), respectively. A redundancy factor ρ = 1.3 was also applied to the drift limits, as required for structures exhibiting extreme torsional irregularity (H.1b).

Table 3 extends the check to all configurations. Extreme torsional irregularity (H.1b) occurs in both directions in SWC-Full, CW-Only, SW-Only and SWC-Dist, and in the Y direction of SW-Multi, whose X direction remains H.1a (maximum 1.280). The largest ratio is 1.681 (SWC-Dist, Y direction, story 3), so distributing the walls changes the mode sequence but does not remove the irregularity class. In all configurations the maxima occur at stories 2 and 3 and at the partial intermediate levels between elevations 5.13 m and 10.4 m, where the absolute drifts are small. At stories 4 to 8 the X-direction ratios are 1.06–1.11 for SW-Only and 1.09–1.12 for SW-Multi, whose walls are not concentrated at the core, compared with 1.31–1.35 for SWC-Full and SWC-Dist and 1.22–1.42 for CW-Only. The amplification factor A_x was computed for every configuration and applied to the accidental eccentricity.

Table 3. Maximum Torsional Irregularity Ratio ($\Delta_{max}/\Delta_{avg}$) of All Configurations

Configuration	Max. ratio X (level)	Max. ratio Y (level)	Type X / Y	$A_{x,max}$
SWC-Full	1.488 (Elv 5.13)	1.597 (3)	H.1b / H.1b	1.771
CW-Only	1.516 (Elv 5.13)	1.631 (3)	H.1b / H.1b	1.847
SW-Only	1.590 (Elv 6.53)	1.577 (3)	H.1b / H.1b	1.756
SWC-Dist	1.454 (Elv 5.13)	1.681 (3)	H.1b / H.1b	1.962
SW-Multi	1.280 (2)	1.584 (3)	H.1a / H.1b	1.742

Note: level of the maximum in parentheses (story number or partial level elevation in m); $A_{x,max} = (\Delta_{max}/1.2\Delta_{avg})^2$ for the larger ratio of the two directions.

Inter-Story Drift and P-Delta Stability

The inter-story drift limit for Risk Category IV is 0.77% of the story height (1% divided by the redundancy factor of 1.3). The analysis shows that only SWC-Full and SWC-Dist satisfy the drift limit in both directions. CW-Only fails in the Y direction, while SW-Only and SW-Multi fail in both directions, as shown in Figure 5 and Figure 6. The commonality between the two compliant configurations is that both retain the complete combination of shear wall and core wall; removing either element causes the drift to exceed the allowable limit. This finding is consistent with Khelaifia et al. [10] and Barser et al. [11], who reported a positive correlation between the completeness of lateral elements and drift limit compliance.

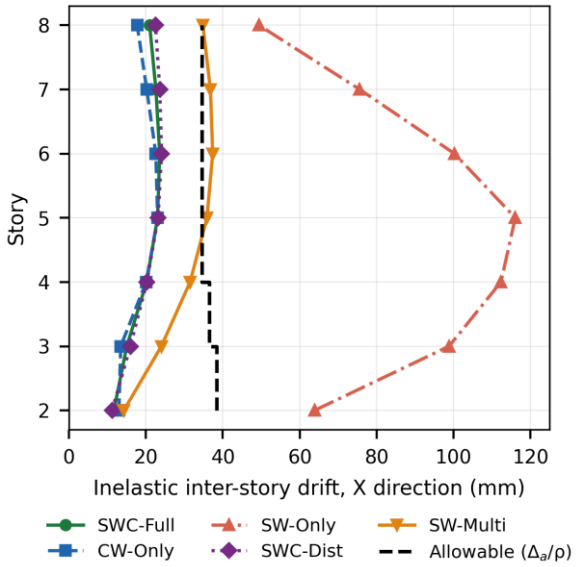


Figure 5. Comparison of Inter-Story Drift in the X Direction

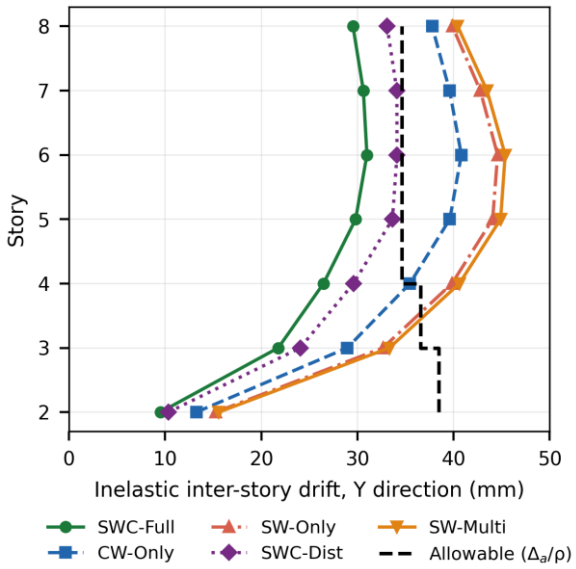


Figure 6. Comparison of Inter-Story Drift in the Y Direction

For the P-Delta analysis, all configurations formally satisfy the stability requirement $\theta < \theta_{allow} = 0.0909$ at every story, as shown in Table 4, but the margins differ by more than an order of magnitude. Four configurations remain below $\theta = 0.010$, whereas SW-Only reaches $\theta = 0.089$ at story 3 in the X direction, only 2% below the allowable limit. This peak occurs in the X direction, the same direction in which SW-Only exhibits its largest inter-story drift (116.03 mm at story 5 against an allowable 34.62 mm), which confirms that removing the core wall

severely reduces the lateral stiffness of the structure in that direction.

Table 4. Maximum P-Delta Stability Coefficient (θ_{max}) of Each Configuration

Configuration	θ_{max} (X)	θ_{max} (Y)	θ_{allow}	Status
SWC-Full	0.007	0.009	0.0909	OK
CW-Only	0.002	0.004	0.0909	OK
SW-Only	0.089	0.005	0.0909	OK
SWC-Dist	0.002	0.003	0.0909	OK
SW-Multi	0.004	0.005	0.0909	OK

The FEMA 440 P-Delta modification factor C_3 equals 1.000 for all configurations in both directions, indicating that second-order effects do not amplify the target displacement, because the pushover curves retain a positive post-yield stiffness, except for a local drop in base shear of SWC-Full in the Y direction that is discussed with Table 12. For the four configurations with $\theta < 0.010$ this is also consistent with the elastic stability check. For SW-Only, however, $C_3 = 1.000$ should not be read as a large reserve of stability: its elastic stability coefficient is already at the allowable limit, so any further reduction in lower-story stiffness would make the configuration unacceptable.

Dual System Effectiveness

Table 5 presents the seismic force distribution between the frame and the shear walls, which is also illustrated in Figure 7. The dual system was checked against SNI 1726:2019 Pasal 7.2.5.1 [2], which requires the moment frames to resist at least 25% of the design seismic force and the total seismic force to be resisted by the frames and walls in proportion to their rigidities. All configurations satisfy this requirement in both directions, but the distribution of the force differs significantly.

Table 5. Seismic Force Distribution in the Dual System

Config.	SW (X)	Frame (X)	SW (Y)	Frame (Y)	Remarks
SWC-Full	53	47	61	39	Effective
CW-Only	34	66	75	25	Less effective
SW-Only	13	87	74	26	Ineffective
SWC-Dist	72	28	67	33	Effective
SW-Multi	64	36	67	33	Effective

Note: SW = shear wall; values are percentages of the total base shear. All configurations meet SNI 1726:2019 Pasal 7.2.5.1 (frame ≥ 25%); the Remarks column describes the proportionality of the force share, which is not a code criterion.

SWC-Full shows the most balanced distribution (47% frame and 53% shear wall in the X direction). The 50:50 distribution used as a comparative benchmark in the scoring system reflects the proportional cooperation between the lateral elements and is not a code requirement; SNI 1726:2019 mandates only a minimum frame contribution of 25%. The shares were obtained from the base joint reactions of the scaled response spectrum cases (Spec X for FX and Spec Y for FY). The reactions of all base joints were summed to give the total base shear, the reactions of the base joints that belong to the shear walls and core wall were summed to give the wall share, and the frame share is the difference between the two. Because each joint reaction is a modal peak value, the sum of the joint reactions (12,303 kN in the X direction for SWC-Full) is about 10% larger than the modal base shear (11,129 kN), so the shares are approximate but consistent between the configurations. In contrast, SW-Only shows an extreme imbalance (87% frame in the X direction), indicating that the dual system is effectively non-functional in that direction because the shear walls absorb only 13% of the seismic force. This confirms that dual system effectiveness depends strongly on the proportional contribution of each element, as also reported by Katrangi et al. [8].

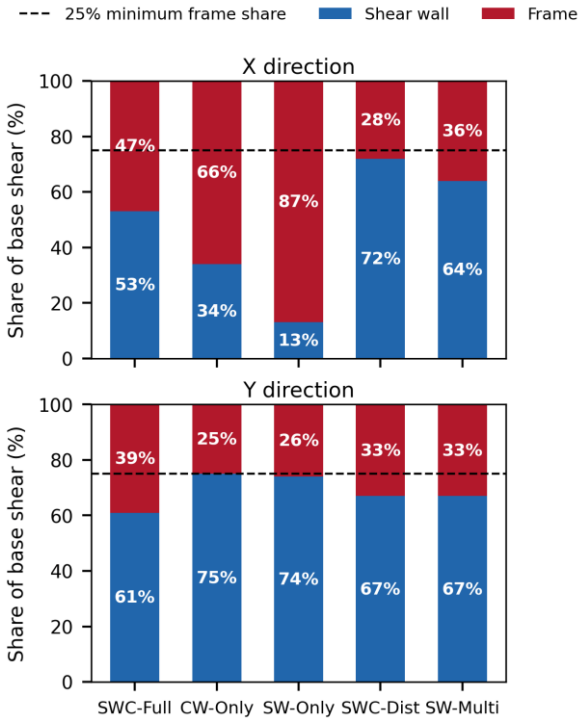


Figure 7. Seismic Force Distribution Between Shear Walls and Frame in the Dual System

Structural Element Compliance with SMRF Requirements

Table 6 summarizes the compliance evaluation of structural elements against the SMRF requirements of SNI 2847:2019 for the largest beam (350 × 650 mm) and column (700 × 700 mm).

The element forces were taken from the envelope of the SNI 1726:2019 load combinations [2], namely the basic combinations and the seismic combinations of Pasal 4.2.2.3, $(1.2 + 0.2S_{DS})D + \rho Q_E + L$ and $(0.9 - 0.2S_{DS})D + \rho Q_E$, with the redundancy factor $\rho = 1.3$ and the orthogonal effects combined by the 100%–30% rule (16 seismic combinations). The beam checked is the most heavily loaded B1 beam (350 × 650 mm, span 8.0 m, clear span 7.3 m, effective depth 590.5 mm). Flexure was checked at the support face for the negative and positive moments and at midspan. Shear was checked at the support, within the 2h = 1,300 mm plastic hinge region, with the capacity design shear $V_e = V_g + (M_{pr}^+ + M_{pr}^-)/\ell_n$, where the probable moments M_{pr} are based on $1.25f_y$, and at midspan with the shear from the analysis; because the factored torsion exceeded the threshold torsion ϕT_{th} in all configurations, torsion reinforcement was designed and the longitudinal reinforcement for combined flexure and torsion ($A_s + A_\ell$) was checked; T_{th}. The column checked is the 700 × 700 mm K1 column of the lowest story with D25 longitudinal bars and D10 ties; six force sets taken from the envelope (maximum and minimum P, M_2 and M_3) were checked with SP-Column, and the governing ratio occurred at P_u = 3,251.7 kN. Strength reduction factors of 0.90 for tension-controlled flexure and 0.75 for shear were used, following SNI 2847:2019 [17].

Table 6. Compliance Matrix of Structural Elements Against SMRF Requirements

Element / Parameter	SWC-Full	CW-Only	SW-Only	SWC-Dist	SW-Multi
Beam – flexure ($\phi M_n > M_u$)	OK	OK	Failed	OK	OK
Beam – shear ($\phi V_n/V_u \geq 1$)	OK	OK	OK	OK	OK
Beam – flexure + torsion ($A_s + A_\ell$)	OK	OK	Failed	OK	OK
Column – P-M diagram (SP-Column)	OK	OK	OK	OK	OK
Column – SCWB ($\Sigma M_{nc} \geq 1.2\ \Sigma M_{nb}$)	OK	OK	OK	OK	OK
Shear wall – shear capacity	OK	Failed	OK	OK	OK
Beam–column joint	Add. reinf.	Add. reinf.	Add. reinf.	Add. reinf.	Add. reinf.

Note: $T_u > \phi T_{th}$ in all configurations, so torsion reinforcement is required; the torsion row checks $A_s + A_\ell$ provided against required. T_{th} is the threshold torsional moment ($T_{th} = T_{cr}/4$). "Add. reinf." indicates that additional transverse reinforcement (four D10 legs at 150 mm spacing) is required at the beam–column joint.

SW-Only fails the beam flexural and torsional checks because the factored negative moment at the support (M_u = 933.40 kN·m) exceeds the design flexural strength (ϕM_n = 656.48 kN·m) by 42%, owing to internal force redistribution after the removal of the core wall; for the same reason the longitudinal reinforcement required for combined flexure and torsion at the support (83.61 cm^2) exceeds that provided (67.69 cm^2). This redistribution is consistent with the concept that the loss of a central stiffness element forces the remaining members to carry a larger proportion of the load [7]. CW-Only fails the shear capacity check of the shear wall because the design shear demand on the remaining wall (V_u/ϕ = 13,763 kN) is about twice that of SWC-Full (6,697 kN). All configurations require additional transverse reinforcement at the beam–column joints (four D10 legs at 150 mm spacing).

The beam–column joint shear check gives V_u = 3,384.0 kN against a design shear strength $\phi V_n = \phi(1.7\sqrt{f'_c})A_j = 0.8 \times 1.7 \times \sqrt{30} \times 490{,}000 = 3{,}650.0$ kN, where ϕ = 0.80 was used, which is conservative relative to ϕ = 0.85 for joints in SNI 2847:2019 Pasal 21.2.4.3, and $A_j = 700 \times 700\ mm^2$ is the effective joint area. The resulting demand-to-capacity ratio of 0.93 confirms joint shear adequacy for all configurations. The SCWB evaluation was carried out at the maximum axial load (P_u = 3,251.7 kN), which corresponds to the critical lower-story column.

Tables 7 and 8 present the detailed calculation results based on the ETABS output. Table 7 compares M_u against ϕM_n and the shear demand against ϕV_n for the beam, while Table 8 shows the capacity ratios obtained from the column check using SP-Column for each configuration.

Table 7. Beam Flexural and Shear Capacity Check for Each Configuration

Parameter	SWC-Full	CW-Only	SW-Only	SWC-Dist	SW-Multi	Unit
Flexure – negative support and positive span						
ϕM_n	656.48	656.48	656.48	656.48	656.48	kN·m
M_u	518.03	370.70	933.40	331.92	467.73	kN·m
Check $\phi M_n > M_u$	OK	OK	Failed	OK	OK	–
Flexure – positive support and negative span						
ϕM_n	561.36	561.36	561.36	561.36	561.36	kN·m
M_u	121.91	196.47	719.29	160.50	342.84	kN·m
Check $\phi M_n > M_u$	OK	OK	Failed	OK	OK	–
Support shear design						
V_n	939.57	747.12	747.12	747.12	747.12	kN
V_u	502.31	375.46	384.05	374.10	318.29	kN
$\phi V_n / V_u$	1.40	1.49	1.46	1.50	1.76	–
Capacity check	OK	OK	OK	OK	OK	–
Span shear reinforcement						
V_n	815.76	815.76	815.76	815.76	815.76	kN
$\phi V_n / V_u$	2.13	4.04	1.69	4.10	2.13	–
Capacity check	OK	OK	OK	OK	OK	–

Table 8. Column Capacity Check (SP-Column) and Strong Column–Weak Beam Evaluation

Parameter	SWC-Full	CW-Only	SW-Only	SWC-Dist	SW-Multi
Capacity ratio (SP-Column)	0.87	0.73	0.99	0.53	0.84
M_{nc} (kN·m)	1411.2	1448.6	1448.6	1448.6	1448.6
M_n^- (kN·m)	729.4	729.4	729.4	729.4	729.4
M_n^+ (kN·m)	623.7	623.7	623.7	623.7	623.7

Pushover Performance

Tables 9 and 10 present the displacement modification coefficients of Equation (1) used to compute the target displacement of each configuration in the X and Y directions, respectively. The coefficients comprise the modal participation factor (C_0), the inelastic modification factor (C_1), the hysteresis shape factor (C_2) and the P-Delta factor (C_3), together with the corresponding spectral acceleration (S_a), effective period (T_e), secant period at the performance point (T_{sec}) and resulting target displacement (δ_T). Because $T_e \geq T_s$ in all cases and the system is treated as non-degrading, $C_1 = C_2 = 1.0$ throughout, so the target displacements differ between configurations only through C_0, S_a and T_e.

Table 9. Target Displacement Coefficients (Equation (1)) in the X Direction

Coeff.	SWC-Full	CW-Only	SW-Only	SWC-Dist	SW-Multi
C_0	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
C_1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
C_2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
C_3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
S_a (g)	1.267	1.081	0.453	1.577	1.187
T_e (s)	0.829	0.823	2.181	0.874	1.063
T_{sec} (s)	0.631	0.680	1.662	0.602	0.754
δ_T (mm)	259.80	218.55	643.16	359.59	400.41

Table 10. Target Displacement Coefficients (Equation (1)) in the Y Direction

Coeff.	SWC-Full	CW-Only	SW-Only	SWC-Dist	SW-Multi
C_0	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
C_1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
C_2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
C_3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
S_a (g)	1.270	0.967	1.085	1.118	1.080
T_e (s)	0.959	1.096	1.188	0.938	1.215
T_{sec} (s)	0.683	0.830	0.832	0.715	0.845
δ_T (mm)	349.68	346.72	457.12	293.73	475.90

Note: $C_3 = 1.000$ in all cases, indicating that second-order effects do not amplify the target displacement. $C_1 = 1.0$ because $T_e \geq T_s = 0.806$ s and $C_2 = 1.0$ for non-degrading systems in all cases (FEMA 356 Section 3.3.3.3.2). $C_0 = 1.2$ for all configurations (FEMA 356 Table 3-2). T_{sec} is the secant period at the performance point ($S_d = S_a \cdot T_{sec}^2 / 4\pi^2 \cdot g$).

Table 11 presents, for each configuration and direction, the roof displacement at the FEMA 440 performance point, the target displacement δ_T, the roof drift ratio δ_T/H with H = 32.5 m, and the

resulting drift-based performance level, which are also illustrated in Figures 8 to 10. The thresholds are 325 mm (1%) for IO, 650 mm (2%) for LS and 1,300 mm (4%) for CP, as defined in the Method [21]. The target displacement exceeds the performance-point displacement in eight of the ten cases (by a factor of 1.26 to 1.63) and is used for the classification; in SWC-Full X and CW-Only X the performance-point displacement is the larger value (268.19 mm and 284.40 mm), but it is still below the IO threshold, so the classification does not change.

Table 11. Summary of Performance-Point Displacements, Target Displacements, Roof Drift Ratios and Drift-Based Performance Levels

Parameter	SWC-Full	CW-Only	SW-Only	SWC-Dist	SW-Multi
Target δ, X (mm)	259.80	218.55	643.16	359.59	400.41
S_a, X (g)	1.267	1.081	0.453	1.577	1.187
T_e, X (s)	0.829	0.823	2.181	0.874	1.063
PP roof displacement, X (mm)	268.19	284.40	417.35	286.31	303.16
δ_T/H, X (%)	0.80	0.67	1.98	1.11	1.23
Drift-based level X	IO	IO	LS	LS	LS
Target δ, Y (mm)	349.68	346.72	457.12	293.73	475.90
S_a, Y (g)	1.270	0.967	1.085	1.118	1.080
T_e, Y (s)	0.959	1.096	1.188	0.938	1.215
PP roof displacement, Y (mm)	230.14	259.85	284.37	221.37	291.35
δ_T/H, Y (%)	1.08	1.07	1.41	0.90	1.46
Drift-based level Y	LS	LS	LS	IO	LS

Note: δ = displacement; S_a = spectral acceleration; T_e = effective period; PP = FEMA 440 performance point; H = 32.5 m; levels follow the FEMA 356 Table C1-3 drift values for concrete frames (IO ≤ 1%, LS ≤ 2%, CP ≤ 4%).

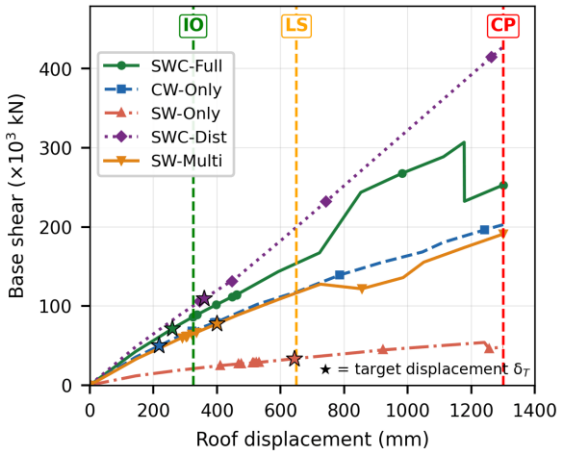


Figure 8. Pushover Capacity Curve in the X Direction

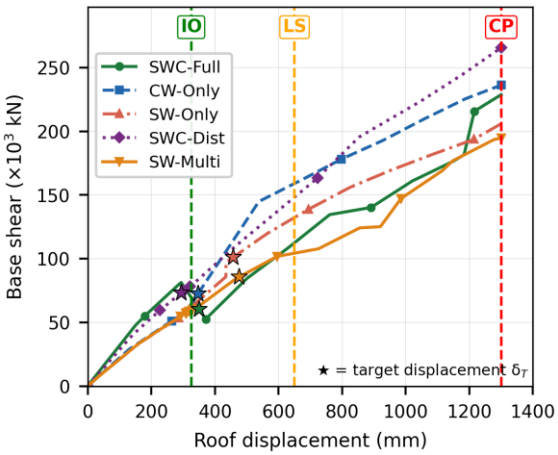


Figure 9. Pushover Capacity Curve in the Y Direction

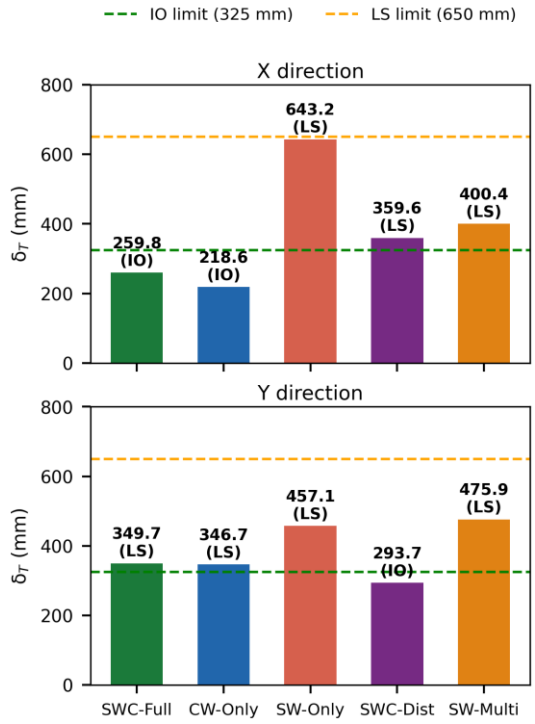


Figure 10. Target Displacement and Drift-Based Performance Level of Each Configuration

As shown in Figures 8, 9 and 10, a complementary pattern is observed between SWC-Full and SWC-Dist. SWC-Full reaches IO in the X direction (259.80 mm < 325 mm) but only LS in the Y direction, whereas SWC-Dist reaches IO in the Y direction (293.73 mm < 325 mm) but only LS in the X direction. This pattern indicates that the dominant orientation of the shear wall governs the stiffness distribution between the two principal directions and is consistent with Dumalanta et al. [9], who reported that specific shear wall configurations achieved the IO performance level in particular directions. SW-Only shows the poorest performance,

with an X-direction target displacement of 643.16 mm, only 1.1% below the LS limit of 650 mm, which represents a very small margin of safety in that direction.

The complementary performance pattern between SWC-Full and SWC-Dist reflects the directional stiffness distribution of their respective lateral element orientations. In SWC-Full the centrally placed core wall has its longer dimension aligned with the X direction, producing higher flexural stiffness and a smaller target displacement in X (259.80 mm → IO) while contributing less stiffness in Y (349.68 mm → LS). In SWC-Dist the redistributed shear wall positions increase the lever arm of the lateral elements relative to the center of mass in the Y direction, improving the Y-direction stiffness (293.73 mm → IO) at the cost of reduced X-direction performance (359.59 mm → LS). This trade-off illustrates a general characteristic of irregular structures: stiffness optimization in one principal direction typically reduces performance in the orthogonal direction, a limitation that can only be overcome through a symmetric shear wall distribution or three-dimensional optimization.

Component Acceptance at the Target Displacement

The drift-based level in Table 11 is a global indicator and not a component acceptance check. Table 12 therefore reports the state of the beam and column hinges, relative to the ASCE 41-17 acceptance criteria assigned in ETABS [20], at the analysis step closest to δ_T. In the three cases with a drift-based IO level (SWC-Full X, CW-Only X and SWC-Dist Y), 97.5–99.8% of the hinges remain within the IO criterion, but 6 to 82 hinges have passed it, and in SWC-Full X and CW-Only X one hinge has also passed the LS criterion. In the LS cases the number of hinges beyond IO ranges from 48 to 394. The most severe case is SWC-Full in the Y direction: the step closest to δ_T (370.7 mm) follows a local drop in base shear between 294 mm and 371 mm, and 23 hinges exceed the CP criterion at that step. If every primary component is required to satisfy its acceptance criterion, as in ASCE 41-17, the drift-based levels are therefore optimistic, most markedly for SWC-Full in the Y direction, which requires confirmation with a nonlinear wall model. Because the analysis steps are discrete, the step closest to δ_T may lie up to 65 mm away from δ_T (SW-Multi X).

Table 12. Hinge States at the Analysis Step Closest to the Target Displacement

Parameter	SWC-Full	CW-Only	SW-Only	SWC-Dist	SW-Multi
Step roof displacement, X (mm)	275.4	275.4	661.7	345.4	465.2
Hinges within A–IO, X (%)	99.8	99.8	87.9	98.5	96.1
IO–LS / LS–CP / >CP, X	5 / 1 / 0	6 / 1 / 0	318 / 74 / 2	47 / 1 / 0	125 / 0 / 1
Step roof displacement, Y (mm)	370.7	306.5	434.2	297.7	465.2
Hinges within A–IO, Y (%)	88.3	97.8	98.0	97.5	96.6
IO–LS / LS–CP / >CP, Y	273 / 81 / 23	73 / 0 / 0	63 / 1 / 0	82 / 0 / 0	100 / 12 / 0
Total number of hinges	3222	3250	3264	3218	3250

Note: hinge states from the ETABS pushover output; A–IO = within the IO criterion; IO–LS, LS–CP and >CP = number of hinges beyond the IO, LS and CP criteria.

Comprehensive Evaluation

To provide a quantitative comparison across configurations, a relative performance score (S) was computed for the seven parameters using capacity-to-demand ratio normalization. Each parameter was normalized to the range 0–1, where 1 indicates the best performance and 0 indicates failure. The normalization rules are as follows.

(1) Inter-story drift: $S = \min(\Delta_{allow}/\Delta_{max}, 1.0)$, with a 50% penalty for failure in one direction and a zero score for failure in both directions.

(2) P-Delta stability: $S = 1 - (\theta_{max} / \theta_{allow})$, where $\theta_{allow} = 0.0909$.

(3) Dual system effectiveness: $S = 1 - |\%frame - 50| / 50$, measuring the deviation from a 50:50 distribution between frame and shear wall. The worst value of the X and Y directions is used.

(4) SMRF beam: $S = \min(\phi M_n/M_u, \phi V_n/V_u, \phi T_n/T_u)$, capped at 1.0; the governing value of the flexural, shear and torsional checks is used.

(5) SMRF column: $S = \min(\Sigma M_{nc} / (1.2\ \Sigma M_{nb}), 1.0)$, based on the strong column–weak beam criterion.

(6) Shear wall capacity: S = 1.0 if all shear wall checks are satisfied and 0 otherwise.

(7) Pushover performance level: IO = 1.00, LS = 0.50, CP = 0.00 per direction; the final score is the average of both directions.

The scoring system is a comparative evaluation framework developed in this study to provide a quantitative ranking across configurations; it is not a standardized procedure. The dual system score uses the deviation from a 50:50 distribution as a proportionality indicator, acknowledging that SNI 1726:2019 requires only a frame contribution of at least 25%. Its sensitivity to

these scoring choices is examined after Table 14; a formal weighting study is recommended for future research.

Table 13 presents the compliance-based evaluation scorecard, while Table 14 gives the quantitative normalized scores, which are visualized in Figure 11.

Table 13. Compliance Evaluation Scorecard of All Configurations

Parameter	SWC-Full	CW-Only	SW-Only	SWC-Dist	SW-Multi
Drift X and Y	✓	✗	✗	✓	✗
P-Delta	✓	✓	✓	✓	✓
Dual system	✓	△	✓	✓	✓
SMRF beam	✓	✓	✗	✓	✓
SMRF column	✓	✓	✓	✓	✓
Shear wall	✓	✗	✓	✓	✓
Pushover X	IO	IO	LS	LS	LS
Pushover Y	LS	LS	LS	IO	LS
Total failures	0	2	2	0	1

Note: ✓ = compliant; ✗ = non-compliant; △ = at the limit. Dual system = SNI 1726:2019 Pasal 7.2.5.1 (frame share ≥ 25%); the proportionality of the force share is scored separately in Table 14.

Table 14. Relative Performance Scores Based on Capacity-to-Demand Ratio Normalization

Parameter	SWC-Full	CW-Only	SW-Only	SWC-Dist	SW-Multi
Inter-story drift	1.00	0.42	0.00	1.00	0.00
P-Delta stability	0.90	0.96	0.02	0.97	0.95
Dual system effectiveness	0.78	0.50	0.26	0.56	0.66
SMRF beam	1.00	1.00	0.70	1.00	1.00
SMRF column	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Shear wall capacity	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00
Pushover performance level	0.75	0.75	0.50	0.75	0.50
Average	0.92	0.66	0.50	0.90	0.73

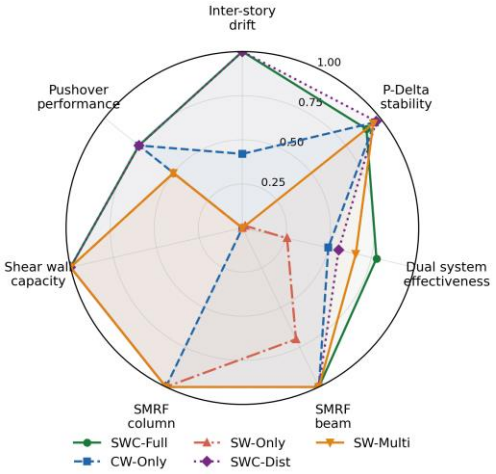


Figure 11. Relative Performance Radar Chart of the Five Shear Wall Configurations

Based on the average scores, SWC-Full (0.92) and SWC-Dist (0.90) rank highest, confirming that the complete combination of shear wall and core wall is the determining factor in satisfying all seismic requirements. Both configurations achieve a perfect score (1.00) in four of the seven parameters. SW-Only has the lowest score (0.50), with critical weaknesses in inter-story drift (0.00), P-Delta margin (0.02), dual system effectiveness (0.26) and beam capacity (0.70), demonstrating the cascading effect of removing the core wall on both the global response and the element-level behavior. CW-Only (0.66) and SW-Multi (0.73) rank in the middle, each with one critical weakness: CW-Only in shear wall capacity (0.00) and SW-Multi in drift (0.00). The contrast between Table 13 and Table 14 for the P-Delta row illustrates the purpose of the two tables: Table 13 records code compliance, which SW-Only formally achieves, whereas Table 14 measures the remaining margin, which for SW-Only is almost exhausted.

The difference of 0.02 between SWC-Full and SWC-Dist is too small to rank one above the other with confidence. Two simple checks show this. First, if the dual system parameter is scored only against the code requirement of SNI 1726:2019 Pasal 7.2.5.1 (score 1.0 when the frame share is at least 25%) instead of the deviation from 50:50, the averages become 0.95 for SWC-Full and 0.96 for SWC-Dist, which reverses the order. Second, if each of the seven parameters is removed in turn, the difference between the two ranges from −0.01 to +0.04. In every variant, however, both configurations remain ahead of the other three by at least 0.03. SWC-Full and SWC-Dist are therefore regarded as equivalent within the resolution of the scoring framework, and the choice between them should be based on the direction in which the higher performance level is required.

Discussion

The results indicate that the seismic response of the GLU building is governed less by the amount of shear wall than by the position of the walls relative to the center of rigidity. The torsional stiffness provided by a wall increases with the square of its distance from the center of rigidity, so the centrally placed core wall of SWC-Full and CW-Only adds considerable translational stiffness but comparatively little torsional stiffness. This explains why both configurations exhibit a rotational first mode, with torsional mass participation ratios of

0.242 and 0.266, and why the existing building (SWC-Full) shows $\Delta_{max}/\Delta_{avg}$ ratios of up to 1.488 in the X direction and 1.597 in the Y direction. Moving part of the walls away from the plan center, as in SWC-Dist, lengthens the torsional lever arm; the first mode then becomes translational and the fundamental period becomes the shortest of all configurations (0.876 s). The irregularity class, however, does not change: SWC-Dist has the largest ratio of all configurations (1.681 in the Y direction, Table 3), and its upper-story ratios in the X direction (1.31–1.35) equal those of SWC-Full. SW-Multi replaces the core with open walls oriented in the X direction, yet its period is longer (1.025 s) and it fails the drift limit in both directions, which shows that open linear walls cannot reproduce the combined flexural and torsional stiffness of a closed core.

These trends agree with previous parametric studies. Kurnia et al. [12] found that the most effective shear wall position in an irregular building reduced the maximum lateral displacement by about 40% in the X direction (from 157.57 mm to 94.46 mm) and 38% in the Y direction (from 193.13 mm to 119.24 mm) relative to the building without shear walls. In the present study the contrast between the stiffest (SWC-Dist) and the most flexible (SW-Only) configuration is even larger: the fundamental period almost doubles, from 0.876 s to 1.673 s, and the maximum X-direction drift increases almost fivefold, from 24.10 mm to 116.03 mm. Pranava et al. [5] and Khelaifia et al. [10] likewise reported that optimized and complete wall layouts minimize torsional irregularity and drift, and Dumalanta et al. [9] observed an improvement from LS to IO when the walls were distributed. The present study extends these observations to a Risk Category IV dual system and shows that the same configuration change also governs the force share between walls and frames and the SMRF compliance of the beams, which studies limited to global drift did not evaluate.

The element-level results reveal a cascading mechanism that drift checks alone do not show. When the core wall is removed (SW-Only), the walls carry only 13% of the X-direction base shear and the frames must resist the remaining 87%. The beam flexural failure (M_u = 933.40 kN·m, 42% above ϕM_n = 656.48 kN·m) and the beam torsional failure follow directly from this redistribution. A dual system can therefore satisfy the 25% minimum frame share of SNI 1726:2019 even when the walls are almost inactive, so the minimum frame share alone is not a sufficient indicator of dual system performance. This observation agrees with Katrangi et al. [8], who showed that the base shear contribution ratios depend on the relative stiffness of the walls and frames, and with Yakhkeshi and Tehrani [14], who found that wall geometry rather than wall area controls the collapse resistance. Conversely, CW-Only retains the core and satisfies the beam checks, but the shear demand concentrated on the remaining wall (V_u/ϕ = 13,763 kN, about twice that of SWC-Full) exceeds its capacity. Removing the perimeter walls therefore shifts the vulnerability from the frames to the walls rather than eliminating it.

The pushover results place all configurations between the IO and LS levels on the drift-based scale, although some hinges already exceed the IO criterion at δ_T (Table 12). Usman et al. [24], who applied the same coefficient method with the FEMA 440 performance point to a four-story reinforced concrete shear wall building in several Indonesian cities, including Bandar Lampung, obtained the IO level for most locations. The larger target displacements in the present study (218.55 mm to 643.16 mm) are consistent with the greater height of the GLU building (32.5 m compared with about 17 m) and its longer effective periods (0.823 s to 2.181 s compared with about 0.56 s). The complementary pattern of SWC-Full and SWC-Dist shows that a configuration that is optimal in one direction is not necessarily optimal in the other, so the selection must consider both principal directions. SW-Only formally attains the LS level, but its X-direction target displacement is only 1.1% below the LS limit and its stability coefficient (θ = 0.089) is close to the allowable value of 0.0909. This configuration therefore has practically no reserve against uncertainties in the ground motion, material properties or modeling assumptions.

From a design perspective, the findings suggest three practical guidelines for irregular Risk Category IV buildings: the core wall should be retained, because its removal produced the most severe failures (a 42% beam flexural overstress, the largest drift exceedance and the smallest wall share of the base shear); perimeter or distributed walls should be added to increase the torsional lever arm rather than only the total wall area; and dual system adequacy should be judged from the actual force share and the resulting element demands, not only from the 25% minimum frame share. SWC-Full and SWC-Dist both satisfy these guidelines, and the choice between them can be based on the direction in which the higher performance level (IO) is required, for example the direction that governs the

protection of critical occupancies or nonstructural components.

CONCLUSIONS

Based on the comprehensive analysis of five shear wall configurations in the ITERA Public Service Building, the shear wall configuration significantly affects the torsional response of the structure. Centralized placement (SWC-Full) produces a first rotational mode (RZ), whereas distributed placement (SWC-Dist) produces a translational mode (UX), and the X-direction period ranges from 0.876 s (SWC-Dist) to 1.673 s (SW-Only), demonstrating a substantial effect on the lateral stiffness of the structure. Only SWC-Full and SWC-Dist satisfy all seven evaluation criteria simultaneously (inter-story drift, P-Delta stability, dual system, SMRF beam and column compliance, shear wall capacity and pushover performance) without a single failed criterion; the critical commonality of both is the retention of the complete shear wall and core wall combination. Removal of the core wall (SW-Only) has the most detrimental effect, with failures in inter-story drift and beam capacity: the factored beam moment exceeds the design flexural strength by 42%, and although the 25% minimum frame share of SNI 1726:2019 Pasal 7.2.5.1 is met, the walls carry only 13% of the X-direction base shear, and the pushover target displacement approaches the Life Safety limit. SWC-Full and SWC-Dist exhibit a complementary performance pattern, in which SWC-Full attains IO in the X direction but LS in the Y direction while SWC-Dist attains the reverse, indicating that the dominant orientation of the shear wall governs the stiffness distribution and performance level between directions. Their relative scores (0.92 and 0.90) are equivalent within the sensitivity of the scoring framework, so both configurations are recommended for the structural design of the ITERA GLU.

The main limitations of this study are as follows. The shear walls were modeled as elastic shell elements, so wall yielding and degradation are not captured and the capacity curves overestimate the stiffness and strength of the system. This simplification does not change the main conclusion, because the objective of the study is to identify the most suitable shear wall configuration rather than to estimate the absolute nonlinear capacity of the building. The same modeling assumptions were applied to all five models, so the differences between the results reflect the wall layout. In addition, six of the seven evaluation parameters (drift, P-Delta stability, dual system, SMRF beam and column compliance and shear wall capacity) were obtained from the elastic analysis and the code-based element checks, which do not depend on the nonlinear behavior of the walls. The performance levels are based on the FEMA 356 drift values for concrete frames, which are indicative values rather than acceptance criteria, and the hinge states at the target displacement show that some components already exceed the IO criterion; the levels are therefore upper-bound, comparative estimates. Soil–structure interaction was not considered, and the scoring framework was checked only with simple variants. Future research is recommended to use nonlinear wall models (for example fiber or layered shell elements), to evaluate the performance levels with component-based acceptance criteria, and to include soil–structure interaction and a formal weighting study.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support of Institut Teknologi Sumatera through the 2026 *Penelitian Berbasis Kepakaran* research grant (Contract No. 2269aq/DST/IT9.2.1/PT.01.03/2026). The authors also thank the project development team of the ITERA Public Service Building (GLU) for providing the data used in this study.

AUTHOR DECLARATION

Authors' Contributions and Responsibilities

All authors contributed to the study conception and design, participated in the data analysis and interpretation of the results, and contributed to the writing of the manuscript.

Funding

This work was supported by the *Penelitian Berbasis Kepakaran* research grant of the Institute for Research and Community Service (LPPM), Institut Teknologi Sumatera, in 2026.

Availability of Data and Materials

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Competing Interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

REFERENCES

[1] W. Triyoso, W. Kongko, G. S. Prasetya, and A. Suwondo, "Study on earthquake and tsunami hazard: evaluating probabilistic seismic hazard function (PSHF) and potential tsunami height simulation in the coastal cities of Sumatra Island," *Frontiers in Built Environment*, vol. 10, Art. no. 1310251, 2024, doi: 10.3389/fbuil.2024.1310251.

[2] Badan Standardisasi Nasional, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung (SNI 1726:2019)*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional, 2019.

[3] M. Aslani and P. Tehrani, "Seismic response and collapse capacity assessment of dual RC buildings with vertical irregularities in shear walls," *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 9966, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-94328-z.

[4] S. Ruggieri and V. Vukobratović, "The influence of torsion on acceleration demands in low-rise RC buildings," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 22, no. 5, pp. 2433–2468, 2024, doi: 10.1007/s10518-024-01873-5.

[5] K. Pranava, A. R. Avinash, M. Chaithra, S. Anil, and K. Kamath, "Seismic performance of torsionally irregular multistorey RC buildings with optimised shear wall configurations," *Infrastructures*, vol. 10, no. 11, Art. no. 296, 2025, doi: 10.3390/infrastructures10110296.

[6] P. V. Shamrao, "Seismic fragility analysis for torsionally imbalanced shear wall concrete building," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, vol. 102, no. 2, pp. 553–563, 2021, doi: 10.1007/s40030-021-00527-y.

[7] F. Velarde *et al.*, "Structural reliability assessment of dual RC buildings for different shear wall configuration," *Buildings*, vol. 15, no. 11, Art. no. 1783, 2025, doi: 10.3390/buildings15111783.

[8] M. Katrangi, M. M. Memarpour, and M. Yakhchalian, "Assessment of the seismic performance and the base shear contribution ratios of the RC wall-frame dual system considering soil–structure interaction," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 26, no. 10, pp. 5290–5317, 2022, doi: 10.1080/13632469.2021.1871678.

[9] M. C. R. Dumalanta, N. G. I. Rabilas, A. J. C. Rapacon, E. J. S. Urieta, and G. A. Frando, "Seismic performance evaluation of an irregular five-story reinforced concrete building under various shear wall placement configurations using pushover analysis," *The Vector: International Journal of Emerging Science, Technology and Management (IJESTM)*, vol. 34, no. 1, 2025. [Online]. Available: https://vector.unp.edu.ph/index.php/1/article/view/340. [Accessed: Oct. 9, 2026].

[10] A. Khelaifia, R. Chebili, and A. Zine, "Impact of the position and quantity of shear walls in buildings on the seismic performance," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 953–964, 2024, doi: 10.1007/s42107-023-00824-w.

[11] M. Barser, R. C. Bush, and A. I. Shirkol, "Performance analysis of asymmetrical RC structures using different configurations of shear wall," *Materials Today: Proceedings*, vol. 88, pp. 52–65, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.493.

[12] A. Kurnia, S. H. Dewi, and M. Kurniawan, "Pengaruh posisi dinding geser terhadap kinerja struktur pada gedung tidak beraturan dengan menggunakan metode response spectrum [Effect of shear wall position on structural performance in irregular buildings using the response spectrum method]," *Jurnal Saintis*, vol. 18, no. 1, pp. 15–24, 2018, doi: 10.25299/saintis.2018.vol18(1).2809.

[13] M. A. Salmassi, A. Kheyroddin, and A. Hemmati, "Seismic behavior of end walls in RC tall buildings with torsional irregularity," *Magazine of Civil Engineering*, vol. 97, no. 5, Art. no. 9707, 2020, doi: 10.18720/mce.97.7.

[14] M. Yakhkeshi and P. Tehrani, "Seismic performance of dual RC frame-shear wall buildings with nonparallel shear walls: insights and recommendations," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 23, no. 11, pp. 4831–4869, 2025, doi: 10.1007/s10518-025-02233-7.

[15] RSA Cipta Karya, "Desain Spektra Indonesia 2021: aplikasi online spektrum respons," 2021. [Online]. Available: http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/. [Accessed: May 12, 2025].

[16] Badan Standardisasi Nasional, *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain (SNI 1727:2020)*.

Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional, 2020.

[17] Badan Standardisasi Nasional, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung (SNI 2847:2019)*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional, 2019.

[18] R. A. Firdha, M. Isneini, H. R. Husni, and R. Widyawati, "Structural performance analysis of multi-story buildings under seismic loads using pushover analysis method (case study: non-surgical inpatient building RSUD Dr. H. Abdul Moeloek)," *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain*, vol. 9, no. 4, pp. 829–840, 2021, doi: 10.23960/jrsdd.v9i4.2201.

[19] K. K. Kuria and O. K. Kegyes-Brassai, "Pushover analysis in seismic engineering: a detailed chronology and review of techniques for structural assessment," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 1, Art. no. 151, 2024, doi: 10.3390/app14010151.

[20] American Society of Civil Engineers, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-17)*. Reston, VA, USA: ASCE, 2017, doi: 10.1061/9780784414859.

[21] Federal Emergency Management Agency, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Washington, DC, USA: FEMA, 2000.

[22] Federal Emergency Management Agency, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures (FEMA 440)*. Washington, DC, USA: FEMA, 2005.

[23] J. R. Sugianto and Y. A. Pranata, "Seismic performance evaluation using pushover analysis of four two-storey residential building types in West Bandung Regency," *Journal of Green Science and Technology*, vol. 10, no. 1, 2026, doi: 10.33603/jgst.v10i1.11748.

[24] A. P. Usman, Rosidawani, and S. P. Mutmainna, "Analisis respons dan kinerja struktur bangunan gedung menggunakan pushover analysis [Analysis of response and performance of building structures using pushover analysis]," *Jurnal Saintis*, vol. 21, no. 2, pp. 87–96, 2021, doi: 10.25299/saintis.2021.vol21(02).7585.

NOMENCLATURE

A_x	torsional amplification factor
C_0	factor relating spectral displacement to roof displacement
C_1	factor relating maximum inelastic to elastic displacement
C_2	factor for pinched hysteresis, stiffness degradation and strength deterioration
C_3	P-Delta factor
g	acceleration of gravity (9.81 m/s^2)
H	height of the monitored roof node above the base (32.5 m)
M_n^-, M_n^+	negative and positive nominal flexural strengths of the beam (kN·m)
S_a	spectral acceleration at the performance point (g)
T_e	effective period (s)
T_s	characteristic period of the design response spectrum, S_{D1}/S_{DS} (s)
T_{sec}	secant period at the performance point (s)
Δ_{max}, Δ_{avg}	maximum and average story displacement
δ_T	target displacement (mm)
θ, θ_{allow}	P-Delta stability coefficient and its allowable limit
ΣM_{nb}	sum of nominal flexural strengths of beams framing into the joint (kN·m)
ΣM_{nc}	sum of nominal flexural strengths of columns above and below the joint (kN·m)
ϕ	strength reduction factor

This page is intentionally blank

Jurnal Saintis
Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Riau
Jl. Kaharuddin Nasution 113 Pekanbaru 28284
Email: saintis@journal.uir.ac.id

E-ISSN
9 772580 711171

P-ISSN
1410 7788