



# FROPII

## Forum Profesional Teknik Sipil

*Struktur | Sumberdaya Air | Transportasi | Geoteknik*

- **ANALISIS PERBANDINGAN KONFIGURASI ANTARA FONDASI TIANG BOR DAN TIANG PANCANG TERHADAP DAYA DUKUNG DAN PENURUNAN DI PROYEK PERLUASAN TERMINAL BANDARA DEPATI AMIR TAHAP I**

Juniarti, Yayuk Apriyanti, Endang Setyawati Hisyam ..... 1-8

- **PERAN *LEAN CONSTRUCTION* DALAM MENINGKATKAN *SUSTAINABLE PROJECT PERFORMANCE* MELALUI *CONSTRUCTION WASTE MANAGEMENT* PADA PROYEK GEDUNG DI KOTA MEDAN**

Ormuz Firdaus, Rikson Kurniawan Tandelilin ..... 9-15

- **PENGARUH PEMECAH GELOMBANG AMBANG RENDAH (PEGAR) TERHADAP PERLINDUNGAN PANTAI DI INDONESIA : *A LITERATURE REVIEW***

Fikri Aris Munandar, Anita Yuliana..... 16-25

- **PERENCANAAN POLA TANAM UNTUK OPTIMASI LUAS LAYANAN DAERAH IRIGASI PAYAMAN KABUPATEN GUNUNG KIDUL**

Annisa Puji Lestari, Ayu Saraswati ..... 26-32

# FROPIL

Forum Profesional Teknik Sipil

Vol. 12 No. 1 (June 2026)

ISSN 2338-2791 (print)

ISSN 2621-1440 (online)

---

## Editor-in-chief

Muhammad Mujiburrakhman, S.T., M.Eng. Civil Engineering, Universitas Bangka Belitung

## Editorial Boards

Ir. Endang Setyawati Hisyam, S.T., M.Eng. Universitas Bangka Belitung

Ir. Yayuk Apriyanti, S.T., M.T. Universitas Bangka Belitung

Rikson Kurniawan Tandelilin, S.T., M.T. Universitas Bangka Belitung

## Website Administrator

Ir. Adriyansyah, S.T., M.T. Universitas Bangka Belitung

## Reviewers

Boy Dian Anugra Sandy, S.Pd., M.T. Universitas Bangka Belitung

Anno Mahfuda, S.Pd., M.Eng. Universitas Diponegoro

Muhammad Fathur Aditya, S.T., M.Eng. Universitas Sulawesi Tenggara

Wenny Herdianti, S.T., M.T. Universitas Negeri Medan

**Forum Profesional Teknik Sipil (FROPIL) is sponsored by the Civil Engineering Study Program, Faculty of Science and Engineering, Universitas Bangka Belitung. The journal focuses on the field of civil engineering, including structural engineering and materials, geotechnical engineering, transportation planning and management, highway engineering and development, water resources engineering, water resources management, and construction management**

# ANALISIS PERBANDINGAN KONFIGURASI ANTARA FONDASI TIANG BOR DAN TIANG PANCANG TERHADAP DAYA DUKUNG DAN PENURUNAN DI PROYEK PERLUASAN TERMINAL BANDARA DEPATI AMIR TAHAP I

JUNIARTI<sup>1</sup>, Yayuk APRIYANTI<sup>1\*</sup>, Endang Setyawati HISYAM<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Bangka Belitung, Bangka, Indonesia

\*Email korespondensi: [yayukapriyanti26@gmail.com](mailto:yayukapriyanti26@gmail.com)

[diterima: 11 Mei 2026, disetujui: 23 Juni 2026]

## ABSTRACT

The limited availability of large-diameter driven piles in the field necessitates an investigation into alternative foundation systems that are more efficient in terms of pile quantity while still satisfying technical requirements. This study aims to compare the performance of nine alternative bored pile foundation configurations in terms of bearing capacity and settlement, and to identify the configuration whose results most closely approximate the existing conditions as a design reference. The alternatives examined include 6 bored piles with a diameter of 60 cm, 5 piles with a diameter of 70 cm, and 4 piles with a diameter of 80 cm, each with three layout configuration variations. The study utilized N-SPT data obtained from the project site as the primary calculation parameters. Bearing capacity analysis was conducted using the Reese & Wright (1977) and Skempton (1966) methods, accounting for the cohesive soil conditions at the study location, while settlement calculations employed the Vesic (1970) method for single piles and the Vesic (1977) method for pile groups. The results indicate that configuration V3-3, consisting of 4 bored piles with an 80 cm diameter, represents the most effective alternative. This configuration yields a bearing capacity of 796 tonnes based on the Reese & Wright (1977) method and tonnes based on the Skempton (1966) method, thereby satisfying the design load requirement of 643.27 tonnes. Furthermore, configuration V3-3 produces the smallest group settlement of 14 mm among all evaluated alternatives, making it the most optimal solution in terms of both bearing capacity and foundation settlement.

**Keywords:** Bearing capacity, Configuration bored pile foundation, configuration, driven pile foundation, settlement.

## INTISARI

Ketersediaan tiang pancang berdiameter besar yang terbatas di lapangan mendorong perlunya kajian terhadap alternatif fondasi yang lebih efisien dari segi jumlah tiang namun tetap memenuhi persyaratan teknis. Penelitian ini bertujuan membandingkan performa sembilan konfigurasi alternatif fondasi tiang bor terhadap daya dukung dan penurunan, serta memilih konfigurasi yang hasilnya paling mendekati kondisi eksisting sebagai acuan perencanaan. Alternatif yang diteliti meliputi tiang bor berdiameter 60 cm sebanyak 6 tiang, diameter 70 cm sebanyak 5 tiang, dan diameter 80 cm sebanyak 4 tiang, dengan masing-masing tiga variasi bentuk konfigurasi. Penelitian menggunakan data N-SPT dari lokasi proyek sebagai parameter perhitungan. Analisis daya dukung dilakukan menggunakan metode Reese & Wright (1977) dan Skempton (1966) dengan mempertimbangkan kondisi tanah kohesif di lokasi studi, sedangkan perhitungan penurunan menggunakan metode Vesic (1970) untuk tiang tunggal dan Vesic (1977) untuk kelompok tiang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi V3-3 dengan 4 tiang bor berdiameter 80 cm merupakan alternatif paling efektif. Konfigurasi ini menghasilkan daya dukung sebesar 796 ton berdasarkan metode Reese & Wright (1977) dan 686 ton berdasarkan metode Skempton (1966), sehingga mampu menahan beban rencana sebesar 643,27 ton. Di samping itu, konfigurasi V3-3 menghasilkan penurunan kelompok terkecil sebesar 14 mm di antara seluruh alternatif yang ditinjau, sehingga dinilai sebagai solusi paling optimal ditinjau dari aspek daya dukung maupun penurunan fondasi.

**Kata kunci:** Daya dukung, fondasi tiang bor, fondasi tiang pancang, konfigurasi, penurunan.

## PENDAHULUAN

Kebutuhan pembangunan yang terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk mendorong pembangunan berbagai infrastruktur, seperti gedung, jalan, jembatan, terminal, dan fasilitas publik lainnya. Setiap struktur memerlukan fondasi yang mampu menopang beban secara aman dan stabil, karena fondasi merupakan elemen struktur bawah yang sangat menentukan kestabilan bangunan secara keseluruhan (Sitepu, 2019).

Perencanaan fondasi menjadi tahap penting dalam konstruksi karena keberhasilan struktur atas sangat bergantung pada kemampuan fondasi dalam menyalurkan beban ke lapisan tanah yang memiliki daya dukung memadai (Hardiyatmo, 2020). Proses ini didasarkan pada analisis beban struktur dan data penyelidikan tanah untuk menentukan jenis, dimensi, dan kedalaman fondasi yang sesuai (Husnirizqi, 2022). Pada bangunan bertingkat dan berbeban besar, fondasi dalam umumnya digunakan untuk memenuhi kebutuhan kapasitas daya dukung dan kontrol penurunan (Muthmainnah, 2021).

Salah satu penerapan fondasi dalam terdapat pada Proyek Perluasan Terminal Bandara Depati Amir Tahap I. Proyek ini menggunakan fondasi tiang pancang beton pracetak berdiameter 50 cm dengan kedalaman sekitar 15 m. Konfigurasi yang paling dominan adalah kelompok sembilan tiang, yang menunjukkan besarnya beban struktur terminal.

Meskipun telah memenuhi persyaratan desain, konfigurasi tersebut masih dapat ditinjau untuk memperoleh alternatif yang memberikan kinerja setara. Keterbatasan ukuran standar tiang pancang beton pracetak di pasaran, terutama untuk diameter di atas 60 cm, menjadi kendala dalam upaya mengurangi jumlah tiang. Oleh karena itu, fondasi tiang bor dipertimbangkan sebagai alternatif karena memungkinkan penggunaan diameter yang

lebih fleksibel, seperti 60 cm, 70 cm, dan 80 cm, sehingga jumlah tiang dalam satu kelompok berpotensi dikurangi.

Penelitian ini bertujuan membandingkan konfigurasi fondasi tiang bor dengan tiang pancang berdasarkan kapasitas daya dukung dan besarnya penurunan untuk menilai kelayakan tiang bor sebagai alternatif terhadap fondasi eksisting pada Proyek Perluasan Terminal Bandara Depati Amir Tahap I. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam ilmu geoteknik terkait optimasi konfigurasi fondasi dalam, serta memberikan rekomendasi teknis yang dapat menjadi acuan bagi Proyek Perluasan Terminal Bandara Depati Amir Tahap I maupun proyek infrastruktur sejenis.

## METODE

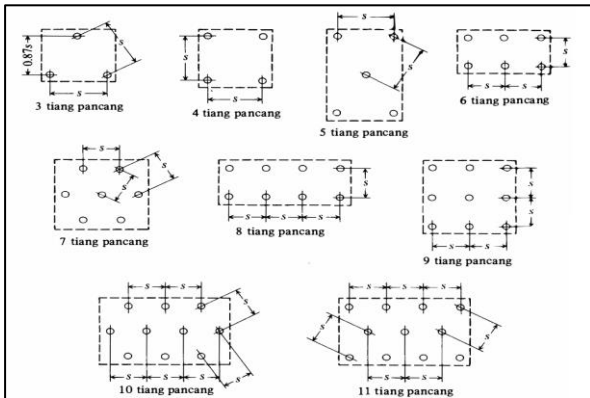
Penelitian ini dilaksanakan menggunakan data dari Proyek Perluasan Terminal Bandara Depati Amir Tahap I. Analisis dilakukan secara bertahap, dimulai dari pengolahan data N-SPT untuk memperoleh parameter tanah, dilanjutkan dengan perhitungan daya dukung aksial tiang tunggal, perhitungan efisiensi kelompok tiang, hingga perhitungan penurunan fondasi. Hasil dari masing-masing konfigurasi kemudian dibandingkan untuk menentukan alternatif yang paling optimal.

### *Safety Factor Tiang Bor*

Tomlinson (1977) dalam Hardiyatmo (2020) menyatakan bahwa penentuan kapasitas izin tiang bor dengan diameter kurang dari 2 meter dilakukan dengan membagi kapasitas ultima tiang terhadap faktor keamanan sebesar 2, apabila ujung tiang tidak mengalami pembesaran. Apabila pada dasar tiang dilakukan pembesaran, maka faktor keamanan yang digunakan meningkat menjadi 2,5. Sehingga, pada kondisi tiang bor tanpa pembesaran ujung, faktor keamanan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 2.

## Susunan Konfigurasi Tiang

Dalam perencanaan susunan konfigurasi tiang, pengelompokan beberapa tiang dalam satu *pile cap* perlu mempertimbangkan interaksi tegangan yang terjadi di dalam tanah. Bowles (1988) menjelaskan bahwa pada kelompok tiang akan terjadi tumpang tindih distribusi tegangan tanah, baik yang berasal dari tahanan selimut maupun tahanan ujung tiang. Besarnya intensitas tegangan yang saling bertumpuk tersebut dipengaruhi oleh beban yang bekerja serta jarak antartiang dalam kelompok.



Gambar 1. Bentuk Susunan Konfigurasi (Bowles, 1988)

## Kapasitas Daya Dukung Tiang Bor

Menurut metode Reese & Wright (1977), tahanan ujung fondasi tiang ( $Q_p$ , kN) dapat ditentukan melalui Persamaan (1).

$$Q_p = q_p A_p \quad (1)$$

di mana  $q_p$  dan  $A_p$  secara berurutan adalah tahanan ujung per satuan luas (kN) dan luas penampang fondasi tiang ( $m^2$ ).

Untuk tanah kohesif,  $q_p$  pada Persamaan 1 dapat ditentukan sebesar 9 kali kuat geser tanah ( $C_u$ , kN/ $m^2$ ) pada Persamaan 2.

$$C_u = \frac{20N_{SPT}}{3} \quad (2)$$

di mana  $N_{SPT}$  adalah jumlah pukulan empiris pada SPT (*Standard Penetration Test*).

Sementara itu, tahanan gesek ulitma ( $Q_s$ , kN) menurut metode Reese & Wright (1977)

pada fondasi tiang dapat ditentukan menggunakan Persamaan (3).

$$Q_s = \alpha C_u L_i P_p \quad (3)$$

di mana  $\alpha$ ,  $L_i$ , dan  $P_p$  secara berurutan adalah faktor adhesi gesek (0,55), tebal lapisan tanah ke- $i$ , dan keliling penampang fondasi tiang.

Adapun menurut metode Skempton (1977),  $Q_p$  dapat ditentukan menggunakan Persamaan (4).

$$Q_p = \mu A_p C_b N_c \quad (4)$$

di mana  $\mu$ ,  $C_b$ , dan  $N_c$  secara berurutan adalah faktor koreksi, kohesi tanah rerata kedalaman 5 kali diameter fondasi tiang di bawah ujung tiang, dan faktor kapasitas dukung.

Untuk diameter fondasi ( $d$ )  $\leq 1$  m,  $\mu$  pada Persamaan 3 adalah 0,8, sedangkan untuk  $d > 1$  m,  $\mu = 0,75$ . Nilai  $N_c$  sendiri dapat ditentukan sebesar 9.

Nilai  $Q_s$  menurut metode Skempton (1977) sendiri dapat ditentukan menggunakan Persamaan (3), namun dengan  $\alpha = 0,45$ .

Kapasitas dukung ultima fondasi tiang ( $Q_u$ ) dipengaruhi oleh elevasi muka air tanah, yakni seperti pada Persamaan (5).

$$Q_u = Q_p + Q_s - (W_p - U) \quad (5)$$

$$U = A_p \gamma_w (D_p - D_w) \quad (6)$$

di mana  $W_p$ ,  $U$ ,  $D_p$ , dan  $D_w$  secara berurutan adalah berat fondasi tiang, gaya *uplift*, kedalaman fondasi tiang, dan kedalaman muka air tanah.

Kapasitas dukung izin fondasi tiang tunggal ( $Q_a$ ) kemudian dapat ditentukan sebesar  $Q_u/SF$ , di mana SF adalah *safety factor*. Untuk kelompok fondasi tiang, kapasitas dukung izin ( $Q_g$ ) dapat ditentukan menggunakan Persamaan (7).

$$Q_g = n Q_a e_g \quad (7)$$

di mana  $n$  adalah jumlah tiang dalam kelompok fondasi, sedangkan  $E_g$  adalah efisiensi kelompok tiang.

Menurut Loehr dkk. (2011) dalam Hardiyatmo (2020), nilai  $e_g$  pada Persamaan (7) dapat ditentukan dengan mengacu kepada Tabel 1.

Tabel 1. Efisiensi tiang bor

Tiang Bor Pada	Jarak Tiang	Efisiensi Tiang Bor
Pasir	2,5d	0,65
	4d	1
	2,5d s.d. 4d	Interpolasi linier antara 0,65–1
Lempung	2,5d	0,65
	6d	1
	2,5d s.d. 6d	Interpolasi linier antara 0,65–1

### Penurunan Tiang Bor

Besarnya penurunan yang terjadi pada fondasi tiang tunggal ( $S$ , m) akibat beban yang bekerja dapat dihitung menggunakan metode empiris yang dikembangkan oleh Vesic (1970), sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (8).

$$S = \frac{d}{100} + \frac{QL}{A_p E_p} \quad (8)$$

di mana  $Q$  dan  $E_p$  secara berurutan adalah beban yang bekerja dan modulus elastisitas fondasi tiang.

Sementara itu, penurunan kelompok tiang ( $S_g$ , m) menurut metode Vesic (1977) dapat ditentukan menggunakan Persamaan (9).

$$S_g = S \sqrt{B_g/d} \quad (9)$$

di mana  $B_g$  adalah lebar kelompok tiang.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Data Tanah

Data tanah merupakan salah satu parameter utama yang digunakan dalam analisis perencanaan fondasi. Pada penelitian ini, data tanah diperoleh dari hasil penyelidikan tanah pada proyek menggunakan uji SPT. Kondisi tanah di lokasi penelitian didominasi oleh pasir kasar campur lempung merah kekuningan pada kedalaman dangkal hingga sekitar 3 m. Pada kedalaman berikutnya hingga sekitar 11 m, lapisan tanah berupa lempung merah campur sedikit pasir kasar. Selanjutnya, pada kedalaman menengah hingga sekitar 15 m, lapisan tanah berkembang menjadi pasir kasar campur sedikit lempung. Pada kedalaman lebih dari 15 m dijumpai lapisan pasir kasar campur sedikit lempung bercampur batu gunung bongkahan.

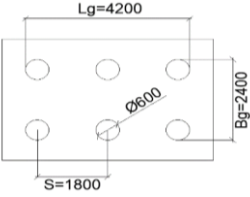
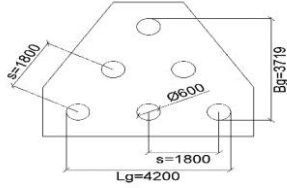
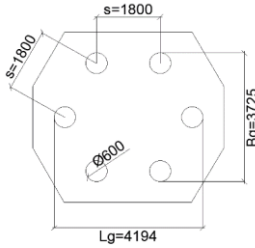
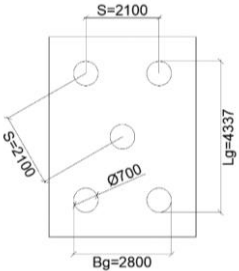
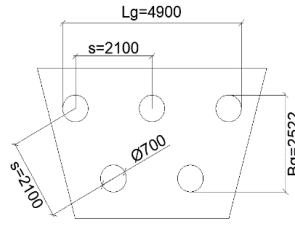
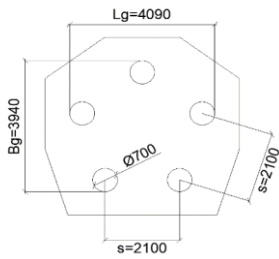
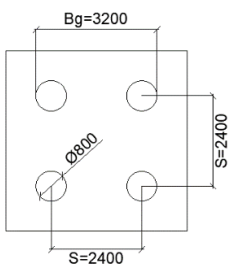
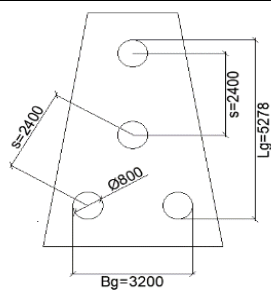
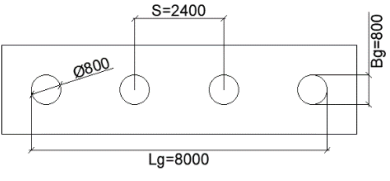
### Daya Dukung Izin Tiang Bor Tunggal

Dalam penelitian ini, perhitungan kapasitas daya dukung izin menggunakan SF sebesar 2 sesuai dengan standar untuk metode perhitungan statis dengan data tanah yang memadai. Namun, untuk memberikan perspektif yang lebih komprehensif dan mempertimbangkan tingkat konservatisme yang berbeda dalam desain fondasi, dilakukan juga perhitungan dengan variasi SF sebesar 3 dan 4. Penambahan variasi SF ini bertujuan untuk menunjukkan sensitivitas kapasitas daya dukung terhadap pemilihan faktor keamanan yang berbeda, yang dapat menjadi pertimbangan

Tabel 2. Perbandingan kapasitas daya dukung izin tiang tunggal

Jenis Tiang	Diameter (cm)	Metode						Eksisting (ton)
		Reese & Wright (1977) (ton)			Skempton (1966) (ton)			
		SF = 2	SF = 3	SF = 4	SF = 2	SF = 3	SF = 4	
Tiang bor	50	162	109	81	137	92	69	-
Tiang bor	60	201	134	100	171	114	86	-
Tiang bor	70	242	161	121	207	138	103	-
Tiang bor	80	284	190	142	245	163	122	-
Tiang pancang	50	-	-	-	-	-	-	107

Tabel 3. Bentuk konfigurasi masing-masing variasi

Variasi	Bentuk Konfigurasi*
V1	 <p>(V1-1)</p>
	 <p>(V1-2)</p>
	 <p>(V1-3)</p>
V2	 <p>(V2-1)</p>
	 <p>(V2-2)</p>
	 <p>(V2-3)</p>
V3	 <p>(V3-1)</p>
	 <p>(V3-2)</p>
	 <p>(V3-3)</p>

Catatan: (\*) Dimensi konfigurasi dalam mm

dalam tahap desain detail di lapangan. Selain itu, untuk melengkapi analisis perbandingan, ditambahkan juga perhitungan tiang bor diameter 50 cm (sama dengan diameter tiang pancang eksisting) guna melihat perbedaan kapasitas antara kedua jenis fondasi dengan diameter yang identik. Perbandingan kapasitas daya dukung izin tiang bor tunggal terhadap tiang pancang eksisting dapat dilihat pada Tabel 2.

### Bentuk-bentuk Konfigurasi Tiang

Dalam penelitian ini, terdapat tiga variasi konfigurasi kelompok tiang, yaitu variasi V1 untuk tiang bor berdiameter 60 cm dengan jumlah 6 tiang, variasi V2 untuk tiang bor berdiameter 70 cm dengan jumlah 5 tiang, dan variasi V3 untuk tiang bor berdiameter 80 cm dengan jumlah 4 tiang, di mana jarak antar tiang sebesar 3 kali diameter tiang. Tata letak dan jarak antar tiang pada masing-masing variasi konfigurasi ditunjukkan pada Tabel 3.

### Daya Dukung Kelompok Tiang Bor

Kapasitas daya dukung kelompok tiang bor dihitung dengan mengalikan efisiensi kelompok tiang yang setelah dilakukan inter-

Variasi ini ditambahkan untuk membandingkan kapasitas fondasi tiang bor dan tiang pancang pada diameter dan jumlah tiang yang sama. Rekapitulasi hasil perhitungan daya dukung kelompok fondasi tiang bor disajikan pada Tabel 4. Analisis lanjutan berupa perhitungan penurunan fondasi hanya dilakukan pada konfigurasi dengan SF = 2, karena hanya variasi tersebut yang memenuhi persyaratan kapasitas daya dukung kelompok terhadap beban rencana dalam penelitian ini.

### Penurunan Tiang Bor

Rekapitulasi hasil penurunan tiang tunggal masing-masing diameter disajikan pada Tabel 5. Analisis penurunan kelompok tiang didasarkan pada nilai penurunan tiang tunggal tersebut. Untuk variasi diameter 50 cm dengan jumlah 9 tiang (V), perhitungan dilakukan dengan prosedur yang sama seperti pada variasi diameter 60, 70, dan 80 cm. Variasi ini ditambahkan untuk membandingkan respon penurunan antara fondasi tiang bor dan fondasi tiang pancang eksisting pada diameter dan jumlah tiang yang sama. Rekapitulasi hasil penurunan kelompok tiang disajikan pada Tabel 6.

Tabel 4. Rekapitulasi kapasitas daya dukung kelompok tiang bor

Variasi	Diameter (cm)	Jumlah Tiang	Metode					
			Reese & Wright (1977) (ton)			Skempton (1966) (ton)		
			SF = 2	SF = 3	SF = 4	SF = 2	SF = 3	SF = 4
V	50	9	1.022	681	511	866	577	433
V1	60	6	807	562	422	683	479	360
V2	70	5	811	564	423	690	483	362
V3	80	4	766	531	398	654	457	343

Catatan: ( ) = memenuhi syarat ( $Q_g \geq 643,27$  ton)

( ) = tidak memenuhi syarat ( $Q_g < 643,27$  ton)

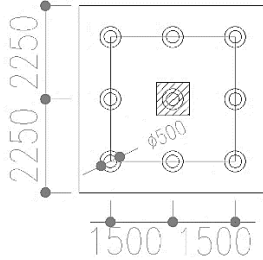
polasi sebesar 0,7, jumlah tiang, dan kapasitas daya dukung izin tiang tunggal pada masing-masing variasi konfigurasi. Untuk variasi diameter 50 cm, perhitungan dilakukan dengan cara yang sama menggunakan dukung izin fondasi tiang tunggal pada Tabel 3.3, efisiensi kelompok tiang, dan jumlah 9 tiang mengikuti konfigurasi fondasi tiang pancang eksisting.

Tabel 5. Rekapitulasi penurunan tiang tunggal

Diameter (cm)	Penurunan Tiang Tunggal (mm)
50	21
60	17
70	15
80	14

Tabel 6. Perbandingan penurunan kelompok tiang

Variasi	Bentuk Konfigurasi	Penurunan Kelompok (mm)
V	Sama dengan tiang pancang eksisting	55
V1	V1-1	34
	V1-2	42,32
	V1-3	42,36
V2	V2-1	30
	V2-2	28,47
	V2-3	35,59
V3	V3-1	28
	V3-2	28
	V3-3	14
Tiang Pancang Eksisting		19,95

### Perbandingan antara Tiang Bor dan Tiang Pancang

Perbandingan ini difokuskan pada dua parameter utama, yaitu kapasitas daya dukung kelompok tiang dan penurunan kelompok tiang. Rekapitulasi hasil perbandingan tersebut disajikan pada Tabel 7 sebagai dasar dalam penentuan konfigurasi fondasi tiang bor yang memiliki kinerja paling mendekati fondasi tiang pancang eksisting.

### KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi alternatif konfigurasi fondasi tiang bor sebagai pengganti fondasi tiang pancang eksisting pada Proyek Perluasan Terminal Bandara Depati Amir Tahap I berdasarkan kapasitas daya dukung dan penurunan. Sebanyak sembilan konfigurasi tiang bor berdiameter 60 cm, 70 cm, dan 80 cm dianalisis menggunakan metode Reese & Wright (1977) dan Skempton

Tabel 7. Perbandingan kinerja kelompok tiang antara fondasi tiang bor dengan tiang pancang eksisting

Variasi	Bentuk Konfigurasi	Daya Dukung Kelompok Tiang (ton)		Penurunan Kelompok (mm)
		Reese & Wright (1977)	Skempton (1966)	
V	Sama dengan eksisting	1022	866	55
V1	V1-1	843	719	34
	V1-2			42,32
	V1-3			42,36
V2	V2-1	846	724	30
	V2-2			28,47
	V2-3			35,59
V3	V3-1	796	686	28
	V3-2			28
	V3-3			14
Tiang Pancang Eksisting		703	19,95	

(1966) untuk daya dukung, serta Vesic (1970) dan Vesic (1977) untuk penurunan. Hasil menunjukkan bahwa variasi V1 menghasilkan daya dukung 719–843 ton dengan penurunan 34–42,36 mm, V2 sebesar 724–846 ton dengan penurunan 28,47–35,59 mm, dan V3 sebesar 686–796 ton dengan penurunan 14–28 mm. Fondasi tiang pancang eksisting memiliki daya dukung 703 ton dengan penurunan 19,95 mm. Seluruh variasi tiang bor memberikan kapasitas daya dukung yang sebanding dengan kondisi eksisting, meskipun penurunannya umumnya lebih besar. Berdasarkan kapasitas daya dukung dan penurunan, konfigurasi V3-3 merupakan alternatif terbaik karena menghasilkan penurunan terkecil (14 mm) dan mampu menahan beban rencana sebesar 643,27 ton.

Sitepu, O. K. B. (2019). *Analisis daya dukung dan penurunan kelompok tiang berdasarkan data sondir dan data uji beban pada proyek pembangunan Gedung Kargo Depati Amir Pangkalpinang* [Skripsi]. Universitas Bangka Belitung.

## REFERENSI

- Bowles, J. E. (1988). *Analisis dan desain pondasi jilid 2* (Edisi keempat). Erlangga.
- Hardiyatmo, H. C. (2020). *Analisis dan perancangan fondasi II* (Edisi kelima). Gadjah Mada University Press.
- Husnirizqi, F. U. (2021). *Perbandingan daya dukung tiang bor berdasarkan data lapangan dan laboratorium terhadap variasi dimensi* [Skripsi]. Universitas Islam Indonesia.
- Muthmainnah, M. (2021). *Analisis kapasitas dukung dan penurunan pondasi tiang pancang dengan variasi dimensi* [Skripsi]. Universitas Islam Indonesia.
- Prakash, S. & Sharma, H. D. (1991). *Pile foundations in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Reese, L. C. & Wright, S. J. (1977). *Drilled shaft manual: Construction procedures and design for axial loading* (Vol. 1). US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Offices of Research and Development, Implementation Division.

# PERAN *LEAN CONSTRUCTION* DALAM MENINGKATKAN *SUSTAINABLE PROJECT PERFORMANCE* MELALUI *CONSTRUCTION WASTE MANAGEMENT* PADA PROYEK GEDUNG DI KOTA MEDAN

Ormuz FIRDAUS<sup>1</sup>, Rikson Kurniawan TANDELILIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Bangka Belitung, Bangka, Indonesia

\*Email korespondensi: rikson-kurniawan@ubb.ac.id

[diterima: 15 Mei 2026, disetujui: 23 Juni 2026]

## ABSTRACT

The construction industry still faces issues like projects taking longer than planned, spending more money than expected, using resources in a not efficient way, and not meeting sustainability goals. Lean construction is commonly known as a good method to reduce waste and make projects more successful. This study looks into how lean construction methods affect the sustainability of building projects in Medan City, Indonesia. A quantitative method was used, which involved surveying contractors who work on building construction projects. Data was gathered using detailed questionnaires and then examined with Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS SEM). Lean construction was shown through Process and Technology Lean Practices, People and Culture Lean Practices, and Integrated Project Delivery. Sustainable Project Performance was checked by looking at economic, environmental, and social aspects. The findings show that PTLP, PCLP, and IPD have a positive and significant effect on sustainable project performance. The structural model accounts for 65.6% of the variation in how well sustainable projects perform ( $R^2 = 0.656$ ) and explains 33.7% of the variation in how construction waste is managed ( $R^2 = 0.337$ ). The model shows a good fit with an SRMR value of 0.073. Furthermore, managing construction waste plays a key role in connecting PTLP with SPP, showing that good waste reduction methods help improve sustainability results.

**Keywords:** Building construction projects, construction waste management, lean construction, PLS SEM, sustainable project performance.

## INTISARI

Industri konstruksi masih mengalami berbagai masalah seperti proyek yang tertunda, biaya yang terus meningkat, penggunaan sumber daya yang tidak efisien, serta pencapaian di bidang keberlanjutan yang masih rendah. *Lean construction* berkembang sebagai cara manajemen yang dapat mengurangi pemborosan dan meningkatkan kinerja proyek secara berkelanjutan. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan cara melakukan survei kepada kontraktor yang bertugas mengerjakan proyek konstruksi bangunan. Data dikumpulkan melalui kuesioner yang sudah disusun secara rapi dan dianalisis menggunakan metode *Partial Least Squares Structural Equation Modeling* (PLS SEM). *Lean construction* terdiri dari tiga variabel, yaitu *Process and Technology Lean Practices* (PTLP), *People and Culture Lean Practices* (PCLP), dan *Integrated Project Delivery* (IPD). Sementara itu, *Sustainable Project Performance* (SPP) dinilai melalui tiga aspek, yaitu ekonomi, lingkungan, dan sosial. Penelitian menunjukkan bahwa PTLP, PCLP, dan IPD memiliki dampak yang baik dan nyata terhadap SPP. Model struktural dapat menjelaskan sebanyak 65,6% perubahan dalam SPP dengan nilai  $R^2 = 0,656$ , serta 33,7% perubahan dalam *construction waste management* dengan nilai  $R^2 = 0,337$ . Nilai SRMR sebesar 0,073 menunjukkan model tersebut memiliki kesesuaian yang cukup baik. Selain itu, pengelolaan sampah konstruksi terbukti secara nyata memediasi hubungan antara PTLP dan SPP dalam menggunakan sumber daya, mengurangi *construction waste* yang dihasilkan dalam konstruksi serta memperkuat kerja sama antar pihak yang terlibat.

**Kata kunci:** *Construction waste management*, *lean construction*, PLS SEM, proyek konstruksi gedung, *sustainable project performance*.

## PENDAHULUAN

Industri konstruksi di Indonesia, termasuk di Kota Medan, terus mengalami pertumbuhan seiring meningkatnya pembangunan gedung dan infrastruktur. Sektor konstruksi memberikan kontribusi sebesar 10,43% terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) Indonesia pada Triwulan IV tahun 2024, yang menunjukkan pentingnya sektor ini dalam mendukung pertumbuhan ekonomi nasional (Badan Pusat Statistik [BPS], 2025). Namun demikian, industri konstruksi masih menghadapi berbagai tantangan seperti keterlambatan proyek, pembengkakan biaya, rendahnya produktivitas, konflik antar *stakeholder*, serta permasalahan keberlanjutan lingkungan.

Menurut Elkington (1998) dalam Doloi dkk. (2012), lemahnya pengelolaan proyek, perubahan desain, keterlambatan material, dan kurangnya koordinasi antar pihak proyek menjadi penyebab utama keterlambatan proyek konstruksi. Selain itu, Flyvbjerg dkk. (2003) menjelaskan bahwa *cost overrun* merupakan permasalahan umum dalam proyek konstruksi akibat ketidakakuratan estimasi biaya dan rendahnya efektivitas pengendalian proyek.

Salah satu pendekatan yang berkembang adalah *lean construction*, yaitu metode manajemen konstruksi yang berfokus pada pengurangan pemborosan (*waste reduction*), peningkatan nilai tambah, dan optimalisasi proses konstruksi (dalam Kent & Becerik, 2010). *Lean construction* mengadopsi prinsip *lean manufacturing* melalui *continuous improvement*, *just in time*, *collaborative planning*, dan *integrated project delivery* untuk meningkatkan produktivitas proyek (Koskela, 1992). Penerapan *lean construction* terbukti mampu meningkatkan efisiensi waktu, kualitas pekerjaan, dan produktivitas proyek konstruksi di berbagai negara (Alarcón dkk., 2008). Selain itu, Salem dkk. (2006) menyatakan bahwa *lean construction* dapat meningkatkan *workflow reliability* serta mengurangi aktivitas *non-value added* dalam proyek konstruksi.

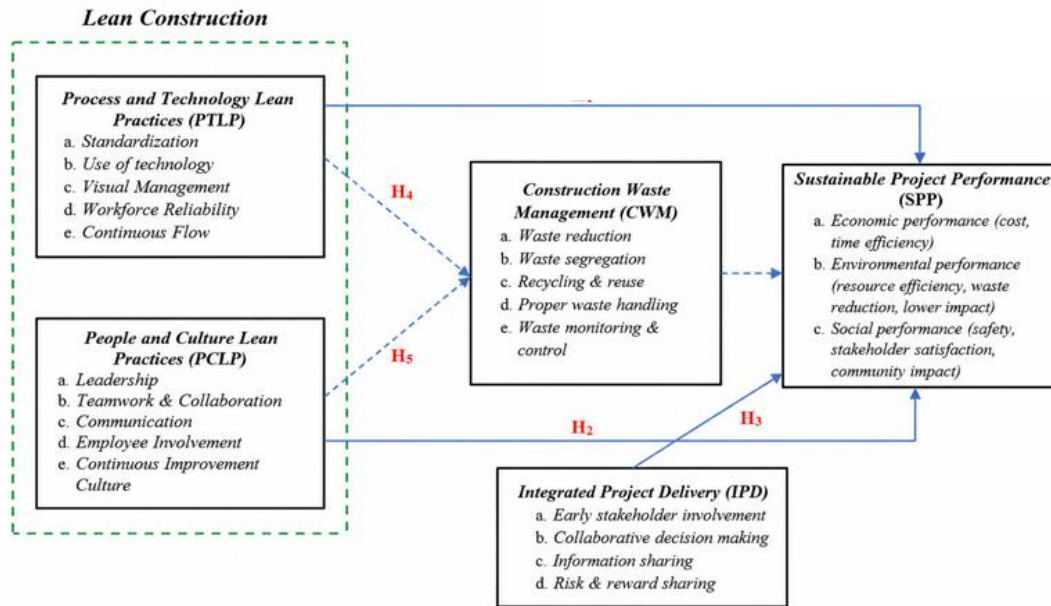
Dalam konteks konstruksi berkelanjutan, *lean construction* tidak hanya berorientasi pada aspek ekonomi, tetapi juga mendukung aspek lingkungan dan sosial melalui pengurangan limbah material, efisiensi sumber daya, serta peningkatan kolaborasi antar *stakeholder* proyek (Solaimani & Sedighi, 2020). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *lean construction* terhadap *sustainable project performance* pada proyek konstruksi gedung di Kota Medan.

Penelitian ini memfokuskan *lean construction* pada dimensi *process and technology practices*, *people and culture practices*, serta *integrated project delivery* terhadap *sustainable project performance* yang diukur berdasarkan indikator ekonomi, lingkungan, dan sosial. Metode yang digunakan adalah *Partial Least Squares Structural Equation Modeling* (PLS SEM) dengan bantuan *software* SmartPLS untuk menganalisis hubungan antar variabel penelitian. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi kontraktor dan manajer proyek dalam meningkatkan kinerja proyek konstruksi yang lebih efisien dan berkelanjutan di Kota Medan.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode survei melalui penyebaran kuesioner untuk menguji hipotesis yang telah dirumuskan berdasarkan model konseptual penelitian (Hair dkk., 2018). Seperti pada Gambar 1, model konseptual tersebut menggambarkan hubungan antara *lean construction*, *construction waste management*, dan *sustainable project performance* pada proyek konstruksi gedung di Kota Medan.

Pengumpulan data penelitian dilakukan menggunakan teknik *simple random sampling* dengan menyebarkan sebanyak 185 kuesioner kepada para profesional konstruksi yang terlibat dalam proyek pembangunan gedung di Kota Medan pada tahun 2026. Responden penelitian meliputi *project manager*, *site*



Gambar 1. Model kerangka penelitian

engineer, office engineer, serta staf teknis lainnya yang memiliki pengalaman dalam pengelolaan proyek konstruksi gedung.

Berdasarkan hasil karakteristik responden pada Tabel 1, sebagian besar responden memiliki pengalaman kerja profesional lebih dari 10 tahun, yang menunjukkan bahwa responden memiliki pemahaman dan pengalaman yang memadai dalam praktik manajemen proyek konstruksi. Selain itu, mayoritas responden berasal dari *posisi project management, site engineering, dan office engineering*, sehingga dapat dinilai mampu merepresentasikan kondisi aktual penerapan *lean construction* pada proyek konstruksi gedung di Kota Medan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Evaluasi Model Pengukuran

Hasil model pengukuran yang telah diolah akan menghasilkan nilai *outer loading*, yang digunakan untuk mengetahui korelasi antara indikator dengan variabel laten. Seperti yang terlihat pada Tabel 2, seluruh nilai *outer loading* telah melebihi batas minimum yang direkomendasikan (0,70). Hal ini menunjukkan bahwa seluruh indikator mampu merepresentasikan konstraknya dengan baik. Selain

itu, *Average Variance Extracted (AVE)* untuk seluruh variabel berada di atas 0,50, sehingga mengonfirmasi terpenuhinya validitas konvergen (Ringle dkk., 2020).

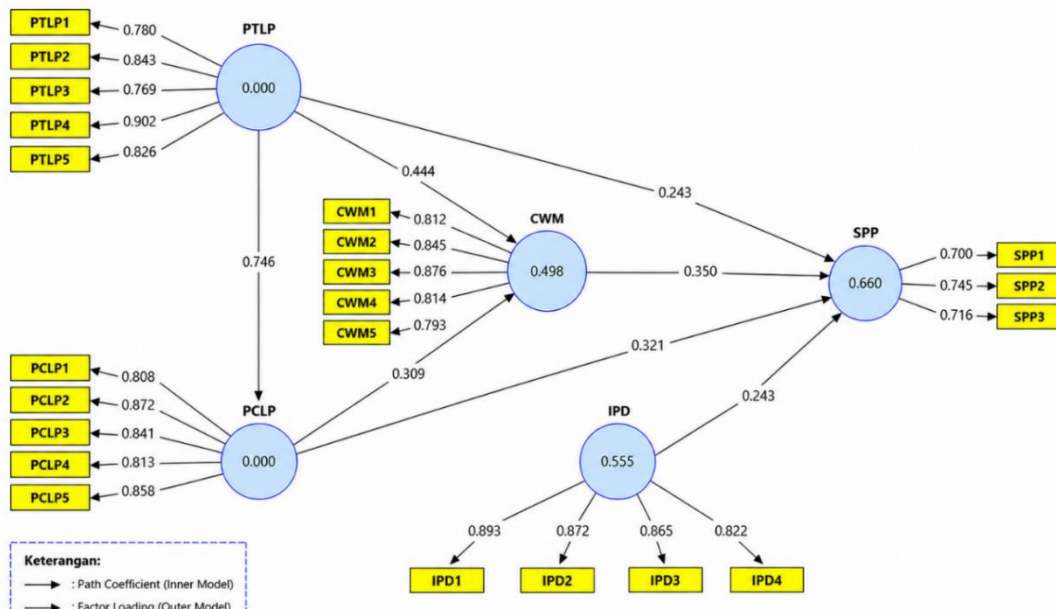
Nilai *Cronbach's Alpha* dan *Composite Reliability* pada seluruh konstruk juga telah melampaui nilai minimum yang direkomendasikan (0,70). Ini menunjukkan adanya konsistensi internal dan reliabilitas konstruk yang baik. Selain itu, seluruh indikator pada konstruk PTLP, PCLP, CWM, SPP dan IPD memiliki nilai statistik *t* yang signifikan pada tingkat signifikansi 5% ( $p < 0,05$ ). Hal ini dapat menunjukkan bahwa seluruh indikator memiliki relevansi yang signifikan dalam menjelaskan konstruk penelitian. Sehingga, model pengukuran penelitian dinilai dapat digunakan. Hasil *outer model* yang dikeluarkan oleh aplikasi PLS SEM sendiri dapat dilihat pada Gambar 2.

### Evaluasi Model Struktural

Evaluasi model struktural penelitian dilakukan untuk menguji tingkat kolinearitas, kemampuan prediktif, serta kesesuaian model penelitian. Pengujian *predictive relevance* menunjukkan bahwa model PLS SEM memiliki kemampuan prediksi yang baik karena

Tabel 1. Karakteristik responden penelitian

Kategori	Frekuensi	Persentase
<b>Pengalaman Kerja</b>		
1 – 5 Tahun	42	22,7
6 – 10 Tahun	34	18,4
11 – 15 Tahun	67	36,2
> 16 Tahun	42	22,7
<b>Latar Belakang Pendidikan</b>		
Doktor (S3)	5	2,7
Magister (S2)	68	36,8
Sarjana (S1)	112	60,5
<b>Posisi atau Jabatan Pekerjaan</b>		
Site Engineer / Construction Engineer	46	24,9
Office Engineer	28	15,1
Project Manager	92	49,7
Lainnya	19	10,3



Gambar 2. Hasil output model pengukuran (outer model)

menghasilkan nilai kesalahan prediksi yang lebih rendah dibandingkan model pembandingan (*naïve linear model benchmark*). Selain itu, nilai *Standardized Root Mean Square Residual* (SRMR) pada model penelitian sebesar 0,073 berada di bawah batas maksimum 0,08, sehingga model penelitian memiliki tingkat *goodness of fit* yang baik dan layak digunakan untuk analisis lebih lanjut.

Selain itu, hubungan tidak langsung antara *People/Culture Lean Construction Principles* dan *Sustainable Project Performance* melalui *Construction Waste Management* (PCLP >

CWM > SPP) juga menunjukkan hasil yang signifikan dengan nilai  $\beta = 0.104$ ,  $t = 2.737$ , dan  $p < 0.05$ . Pengaruh langsung PCLP terhadap SPP juga signifikan ( $\beta = 0.276$ ,  $t = 3.491$ ,  $p < 0.05$ ). Dengan demikian, hasil penelitian ini juga mengindikasikan adanya *complementary partial mediation* antara PCLP dan SPP melalui CWM.

## KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Process and Technology Lean Practices* (PTLP), *People and Culture Lean Practices* (PCLP), dan *Integrated Project Delivery* (IPD)

Tabel 2. Nilai *outer loading*, *ave*, dan reliabilitas konstruk (*outer model*)

<i>Measures</i>	<i>Outer Loading</i>	<i>Cronbach's Alpha</i>	<i>Composite Reliability (rho a)</i>	<i>Composite Reliability (rho c)</i>	<i>AVE</i>
<i>Process and Technology Lean Practices (PTLP)</i>		0,887	0,891	0,918	0,691
PTLP <sub>1</sub>	0,780				
PTLP <sub>2</sub>	0,843				
PTLP <sub>3</sub>	0,769				
PTLP <sub>4</sub>	0,902				
PTLP <sub>5</sub>	0,826				
<i>People and Culture Lean Practices (PCLP)</i>		0,874	0,879	0,909	0,668
PCLP <sub>1</sub>	0,808				
PCLP <sub>2</sub>	0,872				
PCLP <sub>3</sub>	0,841				
PCLP <sub>4</sub>	0,813				
PCLP <sub>5</sub>	0,858				
<i>Integrated Project Delivery (IPD)</i>		0,869	0,877	0,910	0,745
IPD <sub>1</sub>	0,893				
IPD <sub>2</sub>	0,872				
IPD <sub>3</sub>	0,865				
IPD <sub>4</sub>	0,822				
<i>Construction Waste Management (CWM)</i>		0,852	0,861	0,894	0,629
CWM <sub>1</sub>	0,812				
CWM <sub>2</sub>	0,845				
CWM <sub>3</sub>	0,876				
CWM <sub>4</sub>	0,814				
CWM <sub>5</sub>	0,793				
<i>Sustainable Project Performance (SPP)</i>		0,781	0,792	0,873	0,696
SPP <sub>1</sub>	0,700				
SPP <sub>2</sub>	0,745				
SPP <sub>3</sub>	0,716				

Tabel 3. Uji hipotesis

<b>Hipotesis</b>	<b>Path (<math>\beta</math>)</b>	<b>Confidance Interval 95%</b>	<b>Standard Deviation</b>	<b>t-value</b>	<b>p-value</b>	<b>Kesimpulan</b>
H <sub>1</sub> : PTLP > SPP	0.243	[0.135, 0.372]	0.060	4.059	0.001	Diterima
H <sub>2</sub> : PCLP > SPP	0.321	[0.184, 0.447]	0.071	4.521	0.042	Diterima
H <sub>3</sub> : IPD > SPP	0.243	[0.121, 0.356]	0.058	4.188	0.004	Diterima
H <sub>4</sub> : PTLP > CWM > SPP	0.444	[0.287, 0.563]	0.074	5.998	0.009	Diterima
H <sub>5</sub> : PCLP > CWM > SPP	0.309	[0.176, 0.428]	0.069	4.477	0.013	Diterima
<b>Direct Effect</b>						
H <sub>1</sub> : PTLP > SPP	0.312	[0.145, 0.471]	0.081	3.852	0.000	Diterima
H <sub>2</sub> : PCLP > SPP	0.276	[0.094, 0.418]	0.079	3.491	0.001	Diterima
H <sub>3</sub> : IPD > SPP	0.241	[0.072, 0.389]	0.085	2.835	0.005	Diterima
H <sub>4a</sub> : PTLP > CWM	0.428	[0.221, 0.587]	0.094	4.553	0.000	Diterima
H <sub>4b</sub> : CWM > SPP	0.297	[0.118, 0.446]	0.083	3.578	0.000	Diterima
H <sub>5a</sub> : PCLP > CWM	0.351	[0.162, 0.503]	0.088	3.989	0.000	Diterima

Tabel 3. Uji hipotesis (lanjutan)

Hipotesis	Path ( $\beta$ )	Confidance Interval 95%	Standard Deviation	t-value	p-value	Kesimpulan
<b>Direct Effect</b>						
H <sub>1</sub> : PTLP > SPP	0.312	[0.145, 0.471]	0.081	3.852	0.000	Diterima
H <sub>2</sub> : PCLP > SPP	0.276	[0.094, 0.418]	0.079	3.491	0.001	Diterima
H <sub>3</sub> : IPD > SPP	0.241	[0.072, 0.389]	0.085	2.835	0.005	Diterima
H <sub>4a</sub> : PTLP > CWM	0.428	[0.221, 0.587]	0.094	4.553	0.000	Diterima
H <sub>4b</sub> : CWM > SPP	0.297	[0.118, 0.446]	0.083	3.578	0.000	Diterima
H <sub>5a</sub> : PCLP > CWM	0.351	[0.162, 0.503]	0.088	3.989	0.000	Diterima

berpengaruh positif dan signifikan terhadap *Sustainable Project Performance* (SPP). PTLP dan PCLP juga berpengaruh positif terhadap *Construction Waste Management* (CWM), yang terbukti memediasi secara parsial hubungan PTLP dan PCLP terhadap SPP. Temuan ini menegaskan bahwa integrasi praktik *lean construction*, kolaborasi antar-pemangku kepentingan, dan pengelolaan limbah konstruksi yang efektif dapat meningkatkan kinerja proyek yang berkelanjutan. Namun, penelitian ini terbatas pada proyek gedung di Kota Medan dan berbasis persepsi responden. Penelitian selanjutnya disarankan memperluas cakupan studi, meningkatkan jumlah responden, serta mempertimbangkan faktor lain seperti digitalisasi konstruksi, kapabilitas organisasi, dan dukungan regulasi

## REFERENSI

- Alarcón, L. F., Diethelm, S., Rojo, O., & Calderón, R. (2008). Assessing the impacts of implementing lean construction. *Proceedings of the 16th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 387–393.
- American Institute of Architects California Council. (2007). *Integrated project delivery: A guide*. AIACC.
- Badan Pusat Statistik. (2025). *Indikator Konstruksi, Triwulan IV-2024*. URL: <https://www.bps.go.id/id/publication/2025/03/27/9bae1d4a4dd0b3cd7fb31ffd/in-dikator-konstruksi--triwulan-iv-2024.html> (diakses 17 Juni 2026)
- Doloi, H., Sawhney, A., Iyer, K. C., & Rentala, S. (2012). Analysing factors affecting delays in Indian construction projects. *International Journal of Project Management*, 30(4), 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2011.10.004>
- Elkington, J. (1998). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. New Society Publishers.
- Flyvbjerg, B., Holm, M. K. S., & Buhl, S. (2003). How common and how large are cost overruns in transport infrastructure projects? *Transport Reviews*, 23(1), 71–88. <https://doi.org/10.1080/01441640309904>
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2018). *A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)* (2nd ed.). Sage Publications.
- Kent, D. C., & Becerik, G. B. (2010). Understanding construction industry experience and attitudes toward integrated project delivery. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(8), 815–825. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000188](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000188)
- Koskela, L. (1992). *Application of the new production philosophy to construction*. Stanford University.
- Ringle, C. M., Wende, S., & Becker, J. M. (2020). *SmartPLS 3*.

Salem, O., Solomon, J., Genaidy, A., & Minkarah, I. (2006). Lean construction: From theory to implementation. *Journal of Management in Engineering*, 22(4), 168–175.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(2006\)22:4\(168\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(2006)22:4(168))

Sedighi, S. & Sedighi, M. (2020). Toward a holistic view on lean sustainable construction: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119213.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119213>

# PENGARUH PEMECAH GELOMBANG AMBANG RENDAH (PEGAR) TERHADAP PERLINDUNGAN PANTAI DI INDONESIA: *A LITERATURE REVIEW*

Fikri Aris MUNANDAR<sup>1\*</sup>, Anita YULIANA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

\*Email korespondensi: [fikriarism@uho.ac.id](mailto:fikriarism@uho.ac.id)

[diterima: 16 Mei 2026, disetujui: 24 Juni 2026]

## ABSTRACT

Low-crested breakwaters (LCB) have been widely examined as a coastal protection approach due to their capacity to reduce wave energy, support sediment accretion, and enhance the effectiveness of sand nourishment in tropical coastal environments. This systematic literature review analyzes the environmental impacts of LCB on sand nourishment, particularly along tropical Indonesian coasts and comparable coastal settings, while considering the influence of climate change on shoreline dynamics. The reviewed literature includes peer-reviewed studies employing field observations, numerical modeling, experimental testing, and literature synthesis. Findings indicate that LCB can improve sediment retention and reduce erosion when designed according to local hydrodynamic conditions, coastal morphology, and sediment supply. Their effectiveness, however, remains constrained by several limitations, including sediment distribution imbalance, limited high-resolution data, and insufficient long-term ecological assessment. The integration of LCB with mangroves restoration and hybrid nature-based solutions (HNBS) demonstrates a more adaptive potential, as it can simultaneously enhance wave attenuation, sediment stabilization, and ecological benefits. Methodological variation, limited integration of socio-economic aspects, and weak linkage with coastal policy reveal important knowledge gaps that require further investigation. This synthesis highlights the need for a multidisciplinary approach that connects coastal engineering, ecology, social sciences, and public policy to support sustainable coastal protection strategies in Indonesia under increasing climate change pressures.

**Keywords:** Low-crested breakwater, sand nourishment, sustainable coastal protection, climate change, Indonesian coasts.

## INTISARI

Pemecah gelombang ambang rendah (PEGAR) menjadi salah satu pendekatan perlindungan pesisir yang banyak dikaji karena kemampuannya dalam mereduksi energi gelombang, mendukung akresi sedimen, dan memperkuat efektivitas *sand nourishment* pada wilayah pesisir tropis. Artikel berbasis *systematic literature review* ini menganalisis dampak lingkungan PEGAR terhadap *sand nourishment*, khususnya pada pesisir tropis Indonesia dan wilayah sejenis, dengan mempertimbangkan pengaruh perubahan iklim terhadap dinamika garis pantai. Literatur yang dianalisis mencakup studi terbaru yang menggunakan observasi lapangan, pemodelan numerik, pengujian eksperimental, dan sintesis literatur. Temuan menunjukkan bahwa PEGAR dapat meningkatkan retensi sedimen dan mengurangi erosi apabila dirancang sesuai karakteristik hidrodinamika, morfologi pantai, dan suplai sedimen setempat. Efektivitas struktur ini masih menghadapi sejumlah keterbatasan, terutama ketidakseimbangan distribusi sedimen, keterbatasan data beresolusi tinggi, serta minimnya evaluasi ekologis jangka panjang. Integrasi PEGAR dengan restorasi *mangroves* dan pendekatan *Hybrid Nature Based Solution* (HNBS) memperlihatkan potensi yang lebih adaptif karena mampu meningkatkan pelemahan gelombang, stabilisasi sedimen, dan manfaat ekologis secara bersamaan. Variasi metodologi, keterbatasan integrasi aspek sosial-ekonomi, dan lemahnya keterkaitan dengan kebijakan pesisir menunjukkan adanya celah pengetahuan yang perlu ditangani. Kajian ini menegaskan pentingnya pendekatan multidisipliner yang menghubungkan rekayasa pantai, ekologi,

ilmu sosial, dan kebijakan publik untuk mendukung strategi perlindungan pesisir Indonesia yang berkelanjutan di tengah tekanan perubahan iklim.

**Kata kunci:** PEGAR, *sand nourishment*, perlindungan pesisir berkelanjutan, perubahan iklim, pesisir Indonesia.

## PENDAHULUAN

Penelitian mengenai dampak lingkungan pemecah gelombang ambang rendah, selanjutnya disebut PEGAR, terhadap pengisian pasir pantai (*sand nourishment*) di wilayah pesisir tropis, khususnya Indonesia, telah berkembang menjadi bidang kajian yang penting seiring meningkatnya ancaman erosi pantai dan kenaikan muka air laut akibat perubahan iklim. Kawasan pesisir Indonesia memiliki karakteristik morfodinamika yang beragam serta didukung oleh sistem ekologis penting, seperti *mangroves* dan padang lamun, sehingga menghadapi tantangan besar akibat ketidakseimbangan sedimen dan perubahan garis pantai (Solihuddin dkk., 2020). Dalam beberapa dekade terakhir, orientasi penelitian perlindungan pesisir mulai bergeser dari pendekatan rekayasa keras (*hard engineering*) menuju integrasi pendekatan hibrida dan solusi berbasis alam (*nature-based solutions*) yang tidak hanya menekankan efektivitas perlindungan, tetapi juga keberlanjutan ekologis (Huynh dkk., 2024; Saengsupavanich dkk., 2022). Signifikansi praktis topik ini terlihat pada kerentanan wilayah pesisir padat penduduk, seperti pantai utara Jawa, yang mengalami laju erosi hingga 2 m/tahun dan mengancam infrastruktur serta mata pencaharian masyarakat (Candrayana dkk., 2023; Sagala dkk., 2024). Sebagai contoh, dalam kurun tahun 1990–2018, garis pantai daerah Legonkulon, Subang, Jawa Barat telah bergeser sejauh 2361,46 m ke daratan dengan kehilangan 1012,25 ha akibat erosi. (Kalther & Itaya, 2022). Pada tingkat global, sekitar 70% pantai mengalami erosi, sehingga kebutuhan terhadap strategi perlindungan pesisir yang efektif menjadi semakin mendesak (Dong dkk., 2024; Morris dkk., 2018)

Permasalahan spesifik yang dibahas dalam artikel ini adalah terbatasnya pemahaman mengenai pengaruh LCB terhadap dinamika sedimen dan *sand nourishment* dalam kondisi iklim tropis, terutama ketika dikombinasikan dengan dampak perubahan iklim seperti kenaikan muka air laut dan peningkatan intensitas badai (Dong dkk., 2024; Hassanpour dkk., 2024). Meskipun LCB telah banyak digunakan sebagai struktur perlindungan pesisir, masih terdapat celah pengetahuan mengenai dampak lingkungan jangka panjangnya, khususnya pada ekosistem pesisir Indonesia yang kompleks (Dm dkk., 2021; Medina, 2024; Xia, 2025). Perdebatan juga muncul antara pihak yang mendukung penggunaan struktur keras untuk pengendalian erosi secara cepat dan pihak yang menekankan rekayasa ekologis (*eco-engineering*) serta solusi berbasis alam yang lebih memperhatikan manfaat ekologis dan keberlanjutan (Md Noor dkk., 2024). Kesenjangan pengetahuan tersebut berpotensi menghasilkan keputusan pengelolaan pesisir yang kurang optimal, bahkan dapat memperburuk erosi atau menurunkan kualitas habitat pesisir (Arifanti, 2020; Haryani, 2022).

Kerangka konseptual penelitian ini mengintegrasikan prinsip rekayasa pantai dan konservasi ekologi dengan mendefinisikan LCB sebagai struktur pesisir berprofil rendah yang dirancang untuk meredam energi gelombang dan mendorong pengendapan sedimen (Hassanpour dkk., 2024; Torres-Freyermuth dkk., 2019). *Sand nourishment* merujuk pada proses penambahan sedimen secara artifisial maupun alami untuk mempertahankan profil Pantai (Kindeberg dkk., 2022). Faktor perubahan iklim, termasuk kenaikan muka air laut dan perubahan hidrodinamika, berinteraksi dengan struktur dan proses tersebut sehingga

memengaruhi stabilitas garis Pantai (Dong dkk., 2024; Jayson-Quashigah dkk., 2025). Kerangka ini menjadi dasar bagi tinjauan sistematis dalam menilai keterkaitan antara LCB, dinamika sedimen, dan dampak iklim dalam konteks pesisir tropis.

Tinjauan sistematis ini bertujuan menyintesis literatur mutakhir mengenai dampak lingkungan LCB terhadap sand nourishment di wilayah pesisir tropis Indonesia, dengan perhatian khusus pada pengaruh perubahan iklim. Tujuan tersebut diarahkan untuk mengidentifikasi keterbatasan dan celah penelitian guna mendukung perumusan strategi perlindungan pesisir berkelanjutan yang mampu menyeimbangkan efektivitas rekayasa dan integritas ekologis. Artikel ini memberikan kontribusi dengan menjembatani perspektif rekayasa dan ekologi, terutama karena studi terintegrasi dalam konteks pesisir tropis masih relatif terbatas (Sayar dkk., 2024; Xia, 2025).

Tinjauan ini menggunakan penelusuran literatur secara terstruktur dan analisis kritis terhadap artikel terulas sejawat, laporan, serta studi kasus yang relevan dengan LCB, dinamika sedimen, dan adaptasi perubahan iklim di Indonesia maupun wilayah tropis yang sebanding. Temuan disusun secara tematik untuk menjelaskan perubahan morfologi, dampak ekologis, dan pendekatan rekayasa hibrida. Penyusunan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai perkembangan pengetahuan saat ini serta arah penelitian mendatang dalam perlindungan pesisir berkelanjutan (Roldán dkk., 2024; Santoso, 2025).

## METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *systematic literature review* untuk mengkaji integritas struktural PEGAR terhadap gelombang badai ekstrem dalam skenario perubahan iklim. Penyusunan artikel ini dibantu oleh *AI-assisted literature search* pada tahap pen-

carian, pengumpulan, penyaringan awal, pengurutan relevansi, dan *citation chaining*. AI digunakan untuk mengubah kata kunci penelitian menjadi beberapa *search queries*, menjalankan pencarian artikel pada basis data ilmiah, menyaring artikel berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, serta mengidentifikasi artikel tambahan melalui *backward citation chaining* dan *forward citation chaining*. Namun, penulis tetap melakukan pemeriksaan akhir terhadap judul, abstrak, kata kunci, dan substansi artikel untuk memastikan kesesuaian literatur dengan fokus penelitian. Pada tahap pencarian awal ditemukan 132 artikel kandidat, kemudian proses *citation chaining* menghasilkan 112 artikel tambahan, sehingga total artikel kandidat yang diperoleh berjumlah 244 artikel. Setelah dilakukan penilaian relevansi berdasarkan kedekatan dengan pertanyaan penelitian, kontribusi metodologis, dan kualitas ilmiah, sebanyak 237 artikel dinilai relevan dengan topik penelitian, sedangkan 36 artikel dikategorikan sangat relevan dan digunakan sebagai dasar utama analisis mendalam. Literatur terpilih kemudian dianalisis secara tematik untuk mengidentifikasi pola temuan, keterbatasan metodologis, dan celah pengetahuan terkait integritas struktural PEGAR, skenario perubahan iklim, *overtopping*, stabilitas struktur, biaya siklus hidup, serta pendekatan perlindungan pesisir berbasis hibrida maupun ekologis.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Dampak Lingkungan

Penilaian dampak lingkungan menunjukkan bahwa struktur pemecah gelombang memiliki pengaruh yang signifikan terhadap transport sedimen, morfologi garis pantai, dan kondisi ekologis pesisir. Berbagai penelitian mengungkapkan bahwa dampak tersebut dapat bersifat positif maupun negatif, bergantung pada desain struktur, karakteristik lingkungan, serta konteks hidrodinamika setempat (Saengsupavanich dkk., 2022; Solihuddin dkk., 2020; Torres-Freyermuth dkk., 2019).

Sejumlah studi menyoroti terjadinya ketidakseimbangan sedimen dan erosi pada sisi hilir arus sedimen (*downdrift*) dari struktur pemecah gelombang. Temuan ini menunjukkan pentingnya perencanaan tata letak, permeabilitas struktur, dan hubungan antara pola gelombang, arus, serta suplai sedimen dalam desain perlindungan pesisir (Solihuddin dkk., 2020; Torres-Freyermuth dkk., 2019; Vasconcelos dkk., 2024). Dampak ekologis yang teridentifikasi meliputi gangguan habitat dan perubahan keanekaragaman hayati. Perkembangan penelitian terbaru mulai mendorong penggunaan material ramah lingkungan dan pendekatan *ecological retrofitting* untuk mengurangi dampak negatif struktur keras terhadap ekosistem pesisir (Medina, 2024; Sayar dkk., 2024; Xia, 2025). Solusi berbasis alam, seperti *mangroves* dan padang lamun, juga diakui memiliki peran penting dalam stabilisasi sedimen dan perlindungan garis pantai, baik sebagai pelengkap maupun sebagai alternatif terhadap struktur keras (James dkk., 2019; Jordan & Fröhle, 2022; Risandi dkk., 2023). Beberapa tinjauan juga menegaskan bahwa kajian dampak ekologis jangka panjang masih terbatas, sehingga diperlukan penilaian lingkungan yang lebih terintegrasi dalam perencanaan dan desain pemecah gelombang (Jordan & Fröhle, 2022; Xia, 2025).

### Efektivitas

Efektivitas PEGAR dalam mendukung *sand nourishment* menunjukkan hasil yang bervariasi. Studi eksperimental dan observasi lapangan memperlihatkan bahwa akresi sedimen di belakang struktur dapat terjadi, tetapi tingkat keberhasilannya sangat dipengaruhi oleh permeabilitas pemecah gelombang, konfigurasi tata letak, serta kondisi hidrodinamika lokal (Solihuddin dkk., 2020; Torres-Freyermuth dkk., 2019). Hasil analisis yang dilakukan oleh Solihuddin dkk. (2020) menunjukkan bahwa sedimentasi mencapai 0.01 – 0,04 m dibelakang struktur. Studi oleh Soeprbowati dkk. (2025) menunjukkan pendekatan gabungan antara pemecah gelombang

dan *mangroves* terbukti dapat meningkatkan retensi sedimen dan meredam energi gelombang secara lebih efektif hingga 94% dibandingkan penggunaan pemecah gelombang secara tunggal (Utomo dkk., 2024). Metode *beach nourishment*, seperti *berm nourishment*, *profile nourishment*, dan *bar nourishment*, menunjukkan tingkat efisiensi yang berbeda pada kondisi badai maupun nonbadai. *Bar nourishment* dinilai efektif dalam mendisipasikan energi gelombang karena posisinya dapat membantu mengurangi energi gelombang sebelum mencapai garis pantai (Meng dkk., 2024). Pemodelan numerik dan pemantauan lapangan juga menunjukkan bahwa pengangkatan struktur pemecah gelombang dapat mendorong pemulihan garis pantai secara alami, meskipun durasi dan tingkat keberhasilan pemulihan bergantung pada berbagai faktor lokal (Chi dkk., 2023). Analisis biaya-manfaat menegaskan pentingnya desain berbasis lokasi dan integrasi faktor ekologis agar hasil *sand nourishment* dapat berlangsung secara berkelanjutan (Pais-Barbosa dkk., 2023).

### Integrasi Perubahan Iklim

Integrasi adaptasi perubahan iklim menjadi salah satu aspek penting dalam pengembangan desain perlindungan pesisir. Banyak penelitian telah memasukkan faktor kenaikan muka air laut, gelombang badai (*storm surge*), dan variabilitas monsun ke dalam desain perlindungan pesisir, meskipun tingkat integrasinya masih sangat beragam antarstudi (Dong dkk., 2024; Hassanpour dkk., 2024; Sagala dkk., 2024). Berbagai tinjauan menegaskan bahwa pesisir tropis semakin rentan terhadap dampak perubahan iklim, sehingga diperlukan solusi perlindungan yang adaptif dan hibrida dengan menggabungkan pendekatan rekayasa teknik dan solusi berbasis alam (*nature-based solutions/NbS*) (Atmaja dkk., 2025; Dong dkk., 2024; Huynh dkk., 2024). Beberapa penelitian juga mengidentifikasi adanya kesenjangan dalam mempertim-

bangkan perubahan sosial-ekonomi dan lingkungan masa depan dalam perencanaan adaptasi, terutama pada kawasan pesisir perkotaan seperti Jakarta (Alaudin dkk., 2025; Murthy dkk., 2023). Program restorasi *mangroves* dan NbS sering dikaitkan dengan tujuan peningkatan ketahanan iklim karena mampu mendukung akresi sedimen dan stabilisasi garis pantai dalam kondisi lingkungan yang terus berubah (Jayson-Quashigah dkk., 2025; Soeprbowati dkk., 2025). Hasil meta-analisis juga menunjukkan bahwa pendekatan hibrida memiliki keunggulan dalam pengurangan risiko bahaya dan efektivitas biaya hingga 8% pada skenario perubahan iklim (Huynh dkk., 2024).

### **Ketelitian Metodologis dan Kualitas Data**

Ketelitian metodologis dan kualitas data menjadi faktor penting dalam menilai validitas temuan penelitian terkait perlindungan pesisir. Studi-studi terdahulu menggunakan beragam metode, antara lain penginderaan jauh berbasis satelit, survei lapangan, pengujian eksperimental pada saluran gelombang (*flume testing*), pemodelan numerik seperti IH2VOF, CFD, dan GIS, serta *systematic literature review* (Munandar dkk., 2020; Roldán dkk., 2024; Santoso, 2025; Solihuddin dkk., 2020). Model numerik lanjutan umumnya dikalibrasi menggunakan data eksperimental untuk mensimulasikan interaksi gelombang-struktur dan dinamika transport sedimen (Chi dkk., 2023; Hassanpour dkk., 2024; Roldán dkk., 2024). Tinjauan sistematis dan meta-analisis juga menerapkan protokol seperti PRISMA untuk memastikan sintesis literatur dilakukan secara komprehensif dan mengurangi potensi bias (Atmaja dkk., 2025; Santoso, 2025). Sebagian studi mencatat keterbatasan akibat minimnya data lapangan, terutama dalam memahami interaksi hidrodinamika dengan padang lamun serta pemantauan ekologis jangka panjang (Risandi dkk., 2023). Pendekatan interdisipliner yang menggabungkan rekayasa teknik, ekologi, dan ilmu sosial dinilai penting untuk

meningkatkan kualitas data, ketepatan interpretasi, dan daya guna hasil penelitian (Morris dkk., 2018; Md Noor dkk., 2024).

### **Hybrid dan Nature Base Solutions**

Sinergi antara pendekatan hibrida dan solusi berbasis alam menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan ketahanan pesisir sekaligus menjaga fungsi ekosistem. Banyak penelitian menunjukkan manfaat integrasi PEGAR dengan restorasi *mangroves*, penghalang permeabel, atau material ramah lingkungan untuk meningkatkan ketahanan pesisir dan layanan ekosistem (Atmaja dkk., 2025; Soeprbowati dkk., 2025). Solusi hibrida terbukti mampu meningkatkan pelemahan energi gelombang, retensi sedimen, dan dukungan terhadap keanekaragaman hayati dibandingkan penggunaan struktur keras secara tunggal (Huynh dkk., 2024; Roldán dkk., 2024). Keterlibatan masyarakat dan pengelolaan partisipatif juga diidentifikasi sebagai faktor penting bagi keberhasilan implementasi NbS dan keberlanjutan program perlindungan pesisir (Ardhi Prasetyo Utomo dkk., 2024; Soeprbowati dkk., 2025). Kesenjangan penelitian masih terdapat pada upaya kuantifikasi fungsi ekologis jangka panjang dan dampak sosial-ekonomi dari solusi hibrida, sehingga diperlukan studi empiris dan pemodelan yang lebih mendalam (Xia, 2025). Efektivitas biaya dan integrasi kebijakan juga menjadi aspek penting agar perlindungan pesisir berbasis hibrida dan alam dapat diterapkan secara lebih luas di wilayah tropis (Atmaja dkk., 2025; Morris dkk., 2018).

### **Implikasi Teoretis**

Sintesis literatur menunjukkan adanya hubungan yang kompleks antara PEGAR, dinamika sedimen, dan respons ekosistem pesisir pada lingkungan tropis, khususnya Indonesia. Temuan yang dikaji menantang pandangan tradisional bahwa struktur keras saja sudah memadai untuk mewujudkan perlindungan pesisir berkelanjutan. Kinerja LCB perlu dipahami secara lebih terpadu dengan

proses ekologis, termasuk interaksi mangrove dan padang lamun dalam memengaruhi stabilitas sedimen, morfologi garis pantai, dan efektivitas perlindungan pesisir (Risandi dkk., 2023; Solihuddin dkk., 2020; Torres-Freyermuth dkk., 2019).

Studi-studi yang ditinjau mendukung perkembangan teori bahwa pendekatan rekayasa hibrida, yang menggabungkan PEGAR dengan NbS, dapat meningkatkan ketahanan pesisir melalui perlindungan fisik dan restorasi ekologis secara bersamaan. Pandangan ini sejalan dengan kerangka konseptual perlindungan pesisir multifungsi yang tidak hanya berorientasi pada pengurangan energi gelombang, tetapi juga mampu beradaptasi terhadap dampak perubahan iklim (Hassanpour dkk., 2024; Huynh dkk., 2024; Roldán dkk., 2024). Bukti dari pemodelan numerik dan eksperimen juga memperkuat pemahaman teoretis mengenai adaptasi pemecah gelombang terhadap tekanan perubahan iklim, seperti kenaikan muka air laut dan peningkatan intensitas badai. Model-model tersebut menunjukkan bahwa modifikasi struktur, termasuk penurunan elevasi mercu dan penggunaan unit pelindung ramah lingkungan, dapat mengoptimalkan kinerja hidraulik sekaligus mengurangi dampak lingkungan (Chi dkk., 2023; Munandar dkk., 2020; Sayar dkk., 2024)

Literatur yang ditinjau juga memperlihatkan masih adanya kesenjangan besar dalam penilaian dampak ekologis jangka panjang dan integrasi faktor sosial-ekonomi ke dalam teori perlindungan pesisir. Kondisi ini menunjukkan perlunya perluasan kerangka interdisipliner yang mencakup fungsi ekologis, keterlibatan masyarakat, dan dinamika tata kelola untuk memahami keberlanjutan penerapan PEGAR secara lebih menyeluruh (Jordan & Fröhle, 2022; Xia, 2025). Peran ekosistem pesisir sebagai agen dinamis dalam transport sedimen dan pembentukan morfologi garis pantai juga semakin diakui. Padang lamun dan mangrove dipahami dapat memodulasi hidrodinamika

serta meningkatkan stabilitas sedimen, sehingga keduanya perlu dimasukkan ke dalam model morfodinamika pesisir dan strategi perlindungan Pantai (James dkk., 2019; Risandi dkk., 2023; Twomey dkk., 2022). Pengaruh perubahan iklim terhadap dinamika garis pantai, termasuk perubahan rezim gelombang dan suplai sedimen, secara teoretis berkaitan langsung dengan kinerja serta umur layanan pemecah gelombang. Asumsi desain yang berbasis pada kondisi statis perlu dikaji kembali dengan memasukkan prinsip pengelolaan adaptif dalam teori rekayasa pantai (Candrayana dkk., 2023; Dong dkk., 2024; Medina, 2024).

### Implikasi Praktis

Dalam konteks pengelolaan pesisir di Indonesia, integrasi PEGAR dengan NbS, seperti restorasi *mangroves*, menawarkan pendekatan yang lebih hemat biaya dan berkelanjutan secara lingkungan untuk mengurangi erosi serta meningkatkan stabilitas garis pantai. Strategi hibrida ini mendukung layanan ekosistem sekaligus menjawab kerentanan pesisir terhadap perubahan iklim (Atmaja dkk., 2025; Soeprbowati dkk., 2025). Pembuat kebijakan dan praktisi perlu memprioritaskan desain dan pemeliharaan PEGAR yang adaptif dengan mempertimbangkan dinamika sedimen lokal, iklim gelombang, dan konteks ekologis setempat. Pertimbangan tersebut penting untuk menghindari dampak negatif yang tidak diinginkan, seperti erosi pada sisi hilir arus sedimen (*downdrift erosion*) atau degradasi habitat pesisir (Dm dkk., 2021; Torres-Freyermuth dkk., 2019; Vasconcelos dkk., 2024).

Penggunaan material dan unit pelindung ramah lingkungan dalam konstruksi pemecah gelombang dapat mengurangi jejak ekologis serta mendukung keanekaragaman hayati. Pendekatan ini menyelaraskan pembangunan infrastruktur pesisir dengan tujuan konservasi, sehingga membutuhkan kolaborasi antara insinyur, ahli ekologi, pemerintah, dan pemangku kepentingan lokal dalam menyusun

pedoman pertahanan pesisir yang berkelanjutan (Md Noor dkk., 2024; Sayar dkk., 2024; Xia, 2025). Peningkatan kapasitas pemantauan dan pemodelan, termasuk penggunaan *digital twins* dan simulasi numerik lanjutan, juga menjadi faktor penting untuk mengoptimalkan NbS dan solusi hibrida. Perangkat tersebut memungkinkan pengujian skenario dan evaluasi kinerja struktur di bawah kondisi iklim masa depan, sehingga keputusan pengelolaan dapat disusun berbasis bukti (Chi dkk., 2023; Roldán dkk., 2024).

Kebutuhan terhadap penguatan kapasitas dan peningkatan pendanaan menjadi semakin mendesak untuk mendukung riset interdisipliner serta implementasi perlindungan pesisir terpadu di Indonesia. Pengisian kesenjangan pengetahuan, terutama terkait hidrodinamika dan dampak sosial-ekonomi, akan meningkatkan efektivitas serta penerimaan intervensi berbasis PEGAR dan NbS (Atmaja dkk., 2025; Risandi dkk., 2023; Wannewitz & Garschagen, 2021). Strategi perlindungan pesisir juga perlu memasukkan partisipasi masyarakat dan reformasi tata kelola agar hasil yang dicapai lebih adil dan berkelanjutan. Upaya tersebut mencakup pengakuan terhadap pengetahuan lokal, penguatan keterlibatan pemangku kepentingan, serta penyelarasan intervensi pesisir dengan kerangka adaptasi perubahan iklim nasional (Alaudin dkk., 2025; Atmaja dkk., 2025; Wannewitz & Garschagen, 2021).

## KESIMPULAN

PEGAR memiliki peran penting dalam perlindungan pesisir tropis karena mampu mereduksi energi gelombang, mendukung akresi sedimen, dan meningkatkan efektivitas *sand nourishment* apabila dirancang sesuai karakteristik hidrodinamika, morfologi pantai, dan suplai sedimen lokal. Hasil sintesis menunjukkan bahwa efektivitas struktur ini tidak bersifat tunggal, melainkan sangat dipengaruhi oleh konfigurasi tata letak, permeabilitas, elevasi mercu, kondisi gelombang,

serta interaksi dengan ekosistem pesisir. Pada beberapa kondisi, PEGAR dapat membantu menstabilkan garis pantai dan mengurangi erosi. Pada kondisi lain, desain yang kurang tepat berpotensi menimbulkan ketidakseimbangan sedimen, erosi pada sisi *downdrift*, gangguan habitat, serta perubahan keanekaragaman hayati. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan rekayasa keras tidak cukup untuk menjawab kompleksitas perlindungan pesisir berkelanjutan, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia yang memiliki dinamika pantai dan ekosistem pesisir yang beragam.

Integrasi PEGAR dengan NbS, seperti restorasi *mangroves*, padang lamun, penghalang permeabel, dan material ramah lingkungan, menunjukkan potensi yang lebih adaptif dalam menghadapi tekanan perubahan iklim. Pendekatan hibrida mampu meningkatkan pelemahan gelombang, retensi sedimen, stabilitas garis pantai, serta manfaat ekologis dibandingkan penggunaan struktur keras secara terpisah. Temuan ini menegaskan pentingnya desain perlindungan pesisir yang tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis, tetapi juga memasukkan faktor ekologis, sosial-ekonomi, partisipasi masyarakat, dan tata kelola kebijakan. Keterbatasan utama yang masih ditemukan meliputi kurangnya data lapangan beresolusi tinggi, minimnya pemantauan ekologis jangka panjang, heterogenitas metode penelitian, serta terbatasnya integrasi aspek sosial-ekonomi dalam evaluasi perlindungan pesisir. Arah penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada pengembangan model interdisipliner, pemantauan jangka panjang, analisis biaya-manfaat berbasis lokasi, serta penguatan kebijakan adaptasi pesisir agar penerapan PEGAR dan solusi hibrida dapat mendukung perlindungan pesisir Indonesia yang lebih berkelanjutan, adaptif, dan ekologis.

## REFERENSI

Alaudin, Sujantoko, & Mustain, M. (2025). Impact of Sea Level Rise on the North Coast of Java, Indonesia: A Systematic

- Literature Review. *E3S Web of Conferences*, 674, 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202567403004>
- Utomo, A. P., Haerani, J. O., Ferdian, R. N., Paradise, R., & Radianto, D. O. (2024). Pemaksimalan Fungsi Penanaman Mangrove di Daerah Rawan Abrasi Jakarta. *Jurnal Ilmiah Nusantara*, 1(3), 12–22. <https://doi.org/10.61722/jinu.v1i3.1502>
- Arifanti, V. B. (2020). Mangrove management and climate change: A review in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 487(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/487/1/012022>
- Atmaja, T., Yulianti, W., Arini, E. Y., Santoso, H., Setiawati, M. D., & Akita, N. (2025). Scaling Nature-Based Solutions (NbS): Lessons from Global Progress and Indonesia's Path to Sustainability. *Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00842-5>
- Candrayana, K. W., Sinarta, I. N., & Putu Eryani, I. G. A. (2023). Evaluasi Sistem Pengaman Pantai di Bali Selatan untuk Mengatasi Tantangan Perubahan Iklim. *Jurnal Ilmiah MITSU (Media Informasi Teknik Sipil Universitas Wiraraja)*, 11(2), 21–34. <https://doi.org/10.24929/ft.v11i2.2319>
- Chi, S., Zhang, C., & Zheng, J. (2023). Sandy shoreline recovery ability after breakwater removal. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1191386. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1191386>
- Dm, S., Nurhabni, F. & Null, H. B. (2021). Lessons Learned From Low-Crested Breakwaters Installation in North Coast of Java. *SCIREA Journal of Hydraulic Engineering*, 4(3), 40–50. <https://doi.org/10.54647/hydraulic57026>
- Dong, W. S., Ismailluddin, A., Yun, L. S., Ariffin, E. H., Saengsupavanich, C., Abdul Maulud, K. N., Ramli, M. Z., Miskon, M. F., Jeofry, M. H., Mohamed, J., Mohd, F. A., Hamzah, S. B., & Yunus, K. (2024). The impact of climate change on coastal erosion in Southeast Asia and the compelling need to establish robust adaptation strategies. *Heliyon*, 10(4), e25609. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25609>
- Haryani, E. B. S. (2022). Kerusakan Pesisir Akibat Sedimentasi dan Abrasi di Pantai Karawang. *Grouper*, 13(2), 117–125. <https://doi.org/10.30736/grouper.v13i2.127>
- Hassanpour, N., Contestabile, P., Lara, J. L., & Vicinanza, D. (2024). Analisis Of Upgrading Low-Crested Structures As An Adaptation Measure To Climate Change For Coastal Protection: A Hybrid Approach. *CoastLab 2024: Physical Modelling in Coastal Engineering and Science*. <https://doi.org/10.59490/coastlab.2024.770>
- Huynh, L. T. M., Su, J., Wang, Q., Stringer, L. C., Switzer, A. D., & Gasparatos, A. (2024). Meta-analysis indicates better climate adaptation and mitigation performance of hybrid engineering-natural coastal defence measures. *Nature Communications*, 15(1), 2870. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46970-w>
- James, R. K., Silva, R., Van Tussenbroek, B. I., Escudero-Castillo, M., Mariño-Tapia, I., Dijkstra, H. A., Van Westen, R. M., Pietrzak, J. D., Candy, A. S., Katsman, C. A., Van Der Boog, C. G., Riva, R. E. M., Slobbe, C., Klees, R., Stapel, J., Van Der Heide, T., Van Katwijk, M. M., Herman, P. M. J., & Bouma, T. J. (2019). Maintaining Tropical Beaches with Seagrass and Algae: A Promising Alternative to Engineering Solutions. *BioScience*, 69(2), 136–142. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy154>

- Jayson-Quashigah, P.-N., Staneva, J., Chen, W., and Djath, B.: *Mangroves and Coastal Resilience: A Model-Based Evaluation*, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-17068. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-17068>
- Jordan, P. & Fröhle, P. (2022). Bridging the gap between coastal engineering and nature conservation?: A review of coastal ecosystems as nature-based solutions for coastal protection. *Journal of Coastal Conservation*, 26(2). <https://doi.org/10.15480/882.4238>
- Kalther, J. & Itaya, A. (2020). Coastline changes and their effects on land use and cover in Subang, Indonesia. *Journal of Coastal Conservation*. 24. <https://doi.org/10.1007/s11852-020-00736-w>
- Kindeberg, T., Almström, B., Skoog, M., Olsson, P. A., & Hollander, J. (2022). Toward a multifunctional nature-based coastal defense: A review of the interaction between beach nourishment and ecological restoration. *Nordic Journal of Botany*, 2023(1), e03751. <https://doi.org/10.1111/njb.03751>
- Medina, J. R. (2024). Breakwaters in a Living Environment. *CoastLab 2024: Physical Modelling in Coastal Engineering and Science*. <https://doi.org/10.59490/coastlab.2024.819>
- Meng, Y., Qu, Z., Li, X., Zhu, M., & Liang, B. (2024). An experimental study on the evolution of beach profiles under different beach nourishment methods. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1381937. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1381937>
- Morris, R. L., Konlechner, T. M., Ghisalberti, M., & Swearer, S. E. (2018). From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence. *Global Change Biology*, 24(5), 1827–1842. <https://doi.org/10.1111/gcb.14063>
- Munandar, F. A., Triatmadja, R., & Yuwono, N. (2020). The performance of low crested breakwaters as a sand trap for shore protection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 426(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/426/1/012005>
- Md Noor, N., Abdul Maulud, K.N., Mohd Azmi, A.T., & Harun, S.N. (2024). Eco-engineering in the Application of Nature-based Coastal Defense. *Jurnal Kejuruteraan*. <https://doi.org/10.60692/0P1VA-T9P16>
- Pais-Barbosa, J., Ferreira, A. M., Lima, M., Filho, L. M., Roebeling, P., & Coelho, C. (2023). Cost-benefit analysis of artificial nourishments: Discussion of climate change adaptation pathways at Ovar (Aveiro, Portugal). *Ocean & Coastal Management*, 244, 106826. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106826>
- Ramana Murthy, M. V., Ravichandran, V., Vendhan, M., Alluri, S. K. R., & Ram Kumar, J. (2023). Coastal Research—Beach Restoration and Protection. In V. K. Gahalaut & M. Rajeevan (Eds.), *Social and Economic Impact of Earth Sciences* (pp. 297–311). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-6929-4\\_15](https://doi.org/10.1007/978-981-19-6929-4_15)
- Risandi, J., Rifai, H., Lukman, K. M., Sondak, C. F. A., Hernawan, U. E., Quevedo, J. M. D., Hidayat, R., Ambo-Rappe, R., Lanuru, M., McKenzie, L., Kohsaka, R., & Nadaoka, K. (2023). Hydrodynamics across seagrass meadows and its impacts on Indonesian coastal ecosystems: A review. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1034827. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1034827>

- Roldán, M., Maza, M., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2024). Analysis Of Hybrid Solutions For Coastal Protection Combining Physical And Numerical Cfd Modeling. *CoastLab 2024: Physical Modelling in Coastal Engineering and Science*. <https://doi.org/10.59490/coastlab.2024.813>
- Saengsupavanich, C., Ariffin, E. H., Yun, L. S., & Pereira, D. A. (2022). Environmental impact of submerged and emerged breakwaters. *Heliyon*, 8(12), e12626. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12626>
- Sagala, P. M., Bhomia, R. K., & Murdiyarso, D. (2024). Assessment of coastal vulnerability to support mangrove restoration in the northern coast of Java, Indonesia. *Regional Studies in Marine Science*, 70, 103383. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103383>
- Santoso, E. H. (2025). Tinjauan Pustaka: Metode Analisis Perubahan Morfologi Pantai. *Jurnal Penginderaan Jauh Indonesia*, 5(1), 1–8. <https://doi.org/10.12962/jpji.v5i1.8217>
- Sayar, S. D., Nistor, I., Baker, S., & Martínez, J. G. (2024). Low-crested and Emergent Breakwaters with Eco-Friendly Armour Units. *CoastLab 2024: Physical Modelling in Coastal Engineering and Science*. <https://doi.org/10.59490/coastlab.2024.775>
- Soeprobowati, T. R., Khotimperwati, L., Jumari, J., & Helmy, M. (2025). Integrating nature-based solutions in estuary management: A climate mitigation perspective from Demak, Central Java. *Estuarine Management and Technologies*, 2, 119–140. <https://doi.org/10.3897/emt.2.172938>
- Solihuddin, T., Prihantono, J., Mustikasari, E., & Husrin, S. (2020). Perubahan Garis Pantai di Perairan Teluk Banten Dan Sekitarnya. *Jurnal Geologi Kelautan*, 18(2). <https://doi.org/10.32693/jgk.18.2.2020.596>
- Torres-Freyermuth, A., Medellín, G., Mendoza, E. T., Ojeda, E., & Salles, P. (2019). Morphodynamic Response to Low-Crested Detached Breakwaters on a Sea Breeze-Dominated Coast. *Water*, 11(4), 635. <https://doi.org/10.3390/w11040635>
- Twomey, A. J., Callaghan, D. P., O'Brien, K. R., & Saunders, M. I. (2022). Contextualising shoreline protection by seagrass using lessons from submerged breakwaters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 276, 108011. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108011>
- Vasconcelos, Y., De Paula, D., Ferreira, Ó., & Leisner, M. (2024). Contrasting short-term shoreline behaviour after the construction of sinusoidal groynes in NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 136, 104832. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104832>
- Wannewitz, M. & Garschagen, M. (2021). Review article: Mapping the adaptation solution space – lessons from Jakarta. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(11), 3285–3322. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3285-2021>
- Xia, Y. (2025). Multifunctional integration of breakwaters: Taking ecological protection and restoration as an example. *E3S Web of Conferences*, 606, 05006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560605006>

## PERENCANAAN POLA TANAM UNTUK OPTIMASI LUAS LAYANAN DAERAH IRIGASI PAYAMAN KABUPATEN GUNUNG KIDUL

Annisa Puji Lestari THAHIR<sup>1\*</sup>, Ayu SARASWATI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Tenggara, Kendari, Indonesia

\*Email korespondensi: [annisapujilestari05@gmail.com](mailto:annisapujilestari05@gmail.com)

[diterima: 18 Mei 2026, disetujui: 28 Juni 2026]

### ABSTRACT

The Payaman Irrigation Area (IA) in Gunungkidul Regency experiences irrigation water shortages due to climatic conditions, topography, and declining network efficiency caused by canal leakage. Of the 672 ha functional area recorded in the Annual Irrigation Management Plan (RTT) under the 2023 Decree of the Governor of the Special Region of Yogyakarta, only 323.38 ha were irrigated during the 2022–2023 observation period. This study aimed to determine an optimal cropping pattern based on water availability using historical rainfall data from 2000–2022. Water availability was estimated using dependable discharge with an 80% exceedance probability derived from the Mock rainfall-runoff model calibrated with measured streamflow data. Irrigation water demand was calculated according to Irrigation Planning Criteria KP-01 (2013), while evapotranspiration was estimated using the Penman-Monteith method. Water balance analysis employed measured data from 2022–2023 and simulated three alternative cropping patterns. Although the overall water balance showed a surplus, deficits occurred during several periods because planting schedules were not aligned with potential water availability. Alternative 1, with simultaneous planting, served only 264.70 ha of rice in MT I and 143.34 ha of secondary crops in MT II. Alternative 2, using a rice-secondary crop pattern, expanded the service area to 470 ha, a 45% increase over the baseline period. Alternative 3, with planting group division, achieved the largest service area of 572.22 ha, representing a 77% increase. Therefore, Alternative 3 is recommended as the optimum cropping pattern.

**Keywords:** Cropping pattern, dependable discharge, water balance.

### INTISARI

Daerah Irigasi (DI) Payaman di Kabupaten Gunungkidul mengalami kekurangan air irigasi akibat faktor iklim, topografi, dan penurunan efisiensi jaringan karena kebocoran saluran. Dari luas fungsional 672 ha berdasarkan RTT SK Gubernur DIY Tahun 2023, hanya 323,38 ha yang terlayani pada periode pengamatan 2022–2023. Penelitian ini bertujuan menentukan pola tanam optimal pascarehabilitasi jaringan berdasarkan ketersediaan air dari data hujan historis 2000–2022. Ketersediaan air dihitung menggunakan debit andalan probabilitas 80% melalui model Mock yang dikalibrasi dengan debit terukur, sedangkan kebutuhan air irigasi mengacu pada KP-01 (2013) dengan evapotranspirasi metode Penman-Monteith. Evaluasi keseimbangan air menggunakan data terukur 2022–2023 dan dilanjutkan dengan simulasi tiga alternatif pola tanam untuk mengoptimalkan luas layanan. Hasil menunjukkan bahwa secara total kondisi 2022–2023 mengalami surplus, namun terjadi defisit pada beberapa periode akibat ketidaksesuaian jadwal tanam dengan potensi ketersediaan air. Alternatif 1 dengan penanaman serentak hanya mampu melayani padi seluas 264,70 ha pada MT I dan palawija seluas 143,34 ha pada MT II. Alternatif 2 dengan pola padi–palawija meningkatkan luas layanan menjadi 470 ha atau 45% lebih besar dibandingkan luas layanan periode pengamatan, sedangkan alternatif 3 dengan pembagian golongan tanam memberikan peningkatan tertinggi menjadi 572,22 ha atau meningkat 77%. Dengan demikian, alternatif 3 dipilih sebagai solusi optimum karena paling efektif memanfaatkan ketersediaan air sekaligus memaksimalkan luas layanan irigasi.

**Kata kunci:** Debit andalan, keseimbangan air, pola tanam.

## PENDAHULUAN

Dalam perkembangan dunia saat ini, salah satu yang menjadi isu global adalah krisis pangan (Amri & Muttaqin, 2022). Bertambahnya jumlah penduduk, kebutuhan akan pangan pun ikut meningkat, Dalam menjamin ketersediaan pangan diperlukan peningkatan produktivitas pertanian (Prambudi dkk., 2025). Air memiliki peran penting dalam sektor pertanian karena keberhasilan produksi tanaman sangat bergantung pada kecukupan pasokan air. Keterbatasan ketersediaan air maupun rendahnya efisiensi distribusi air irigasi dapat menyebabkan penurunan produktivitas lahan pertanian. Salah satu faktor yang mengakibatkan terjadinya kehilangan air adalah terdapat kerusakan di saluran dan bangunan irigasi lainnya, sehingga kebutuhan air kurang optimal untuk mengairi air ke area persawahan yang pada akhirnya berkurangnya luas layanan irigasi dan penurunan produktivitas pertanian. Oleh sebab itu, salah satu peran pemerintah Indonesia dalam mendukung ketahanan pangan adalah melalui pengembangan program rehabilitasi irigasi serta peningkatan bangunan irigasi dan fasilitas pendukungnya dalam meningkatkan produksi tanaman pangan (Prasetyo dkk., 2025).

Neraca air adalah hubungan antara ketersediaan air dengan kebutuhan air irigasi di suatu daerah irigasi dalam periode tertentu (Sosrodarsono & Takeda, 2003). Evaluasi neraca air menjadi langkah penting dalam mengetahui kemampuan suatu sistem irigasi dalam memenuhi kebutuhan air tanaman. Penelitian sebelumnya mengenai evaluasi neraca air pada Daerah Irigasi (DI) Payaman oleh Lestari dkk. (2024) menunjukkan bahwa kondisi neraca air DI Payaman belum mampu memenuhi kebutuhan air secara optimal pada periode tertentu, terutama pada musim kemarau, sehingga terjadi defisit air yang berdampak pada terbatasnya luas area yang dapat dilayani. Ketidakseimbangan neraca air dalam peningkatan produksi pertanian memerlukan pengelolaan sumber daya air yang tepat, salah

satunya melalui pengaturan pola tanam dengan pergeseran jadwal tanam atau pemilihan jenis tanaman (Nurrochmad, 2023). DI Payaman menghadapi kekurangan air irigasi akibat faktor iklim dan topografi, dimana kondisi tanah di Gunungkidul sulit menyimpan air. Selain itu, kebocoran pada beberapa saluran irigasi menyebabkan penurunan efisiensi penyaluran air sehingga luas area terlayani hanya 323,38 ha dari luas fungsional 672 ha yang tercatat dalam RTT SK Gubernur DIY Tahun 2023.

Oleh sebab itu, diperlukan penyesuaian pola tanam dalam pengelolaan irigasi DI Payaman berdasarkan ketersediaan air yang ada, guna mengoptimalkan pemanfaatan air irigasi secara efisien dan meningkatkan luas layanan menuju luas fungsional yang telah ditetapkan.

## METODE

### Lokasi dan Data Penelitian

Penelitian ini dilakukan di DI Payaman, Kabupaten Gunung Kidul, Provinsi DIY. Penyuplai air daerah irigasi ini berasal dari Bendung Payaman yang alirannya bersumber dari Sungai Oyo. Daerah irigasi ini memiliki luas fungsional sebesar 672,11, namun hanya 323,38 ha yang tercatat dalam RTT SK Gubernur DIY Tahun 2023. Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data primer dan data sekunder. Data primer berasal dari survei langsung di lapangan dan wawancara terhadap petugas operasi pemeliharaan (OP) DI Payaman dan data sekunder diperoleh dari instansi terkait yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Penelitian yang digunakan

Jenis Data	Data yang Digunakan
Curah hujan tahun (2000-2022)	<ul style="list-style-type: none"><li>Stasiun Gedangan</li><li>Stasiun Ngawen</li><li>Stasiun Wuryantoro</li></ul>
Curah hujan daerah tangkapan air (DTA) tahun (2000-2022)	<ul style="list-style-type: none"><li>Stasiun Wuryantoro</li><li>Stasiun Wonogiri</li><li>Stasiun Ngawen</li></ul>

Jenis Data	Data yang Digunakan
Debit sungai tahun (2012–2022)	Bendung Payaman
Debit pengambilan (November 2022–Oktober 2023)	Intake Payaman
Klimatologi tahun (2018–2022)	Stasiun Playen
Skema jaringan	DI Payaman
Rencana tata tanam tahun 2023	SK Gubernur DIY
Laju perkolasi	Jenis tanah di Kab. Gunung Kidul

### Ketersediaan Air

Debit andalan digunakan sebagai dasar penentuan ketersediaan air irigasi dengan probabilitas terpenuhi sebesar 80% berdasarkan persamaan Weibull (Harto, 1993). Data debit aliran setengah bulanan untuk penentuan debit andalan disimulasikan melalui model Mock. Model ini menggunakan konsep neraca air dengan komponen utama evapotranspirasi, curah hujan, neraca air permukaan tanah, dan tampungan air tanah (Mock, 1973).

Hasil simulasi hujan aliran tahun 2000-2022 dikalibrasi menggunakan data debit terukur tahun 2012-2022 untuk mendapatkan parameter optimum yang terdiri dari koefisien infiltrasi basah, koefisien infiltrasi kering, kapasitas kelembaban tanah, faktor resesi, dan *groundwater storage* awal. Parameter tersebut digunakan untuk memaksimalkan koefisien korelasi dan meminimumkan volume *error* dengan bantuan fitur Solver pada Microsoft Excel.

### Kebutuhan Air Irigasi

Perhitungan kebutuhan air irigasi mengacu pada *Standar Perencanaan Irigasi: Kriteria Perencanaan Bagian Perencanaan Jaringan Irigasi (KP-01)* (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013). Kebutuhan air irigasi dipengaruhi oleh faktor tanaman (luas tanam, jenis tanaman, dan fase tumbuh), faktor iklim (curah hujan dan evapotranspirasi), dan faktor jenis tanah (perkolasi). Curah hujan efektif pada tanaman padi dapat diasumsikan sebesar

80% dan untuk tanaman palawija terjadi 50%. Data hujan yang digunakan dalam perhitungan curah hujan efektif adalah dalam kurun tahun 2000–2022 pada Stasiun Gedangan, Stasiun Ngawen, dan Stasiun Wuryantoro.

Evapotranspirasi dipengaruhi beberapa faktor lainnya, yakni parameter cuaca (radiasi, suhu udara, kelembaban, dan kecepatan angin), karakteristik tanaman, pengelolaan, dan aspek lingkungan (Allen dkk., 1998). Evapotranspirasi sendiri pada dasarnya adalah kebutuhan konsumtif tanaman yang sangat dipengaruhi oleh iklim (Doorenbos & Pruitt, 1977). Dalam penelitian ini, evapotranspirasi ditentukan menggunakan metode Penman-Monteith versi *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56* (Allen dkk., 1998), berdasarkan data klimatologi Stasiun Playen tahun 2018–2022.

### Pengaturan Pola Tanam

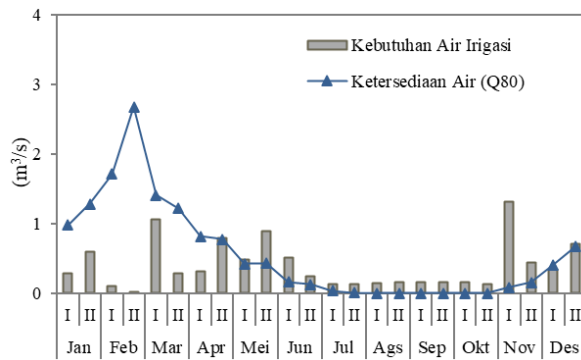
Simulasi pengaturan pola tanam dilakukan dengan menggunakan beberapa skenario untuk meningkatkan luas layanan irigasi Payaman agar terealisasi atau mendekati luas fungsional rencana yang tercatat di SK Gubernur DIY tahun 2023 setelah rehabilitasi. Alternatif skenario tersebut dapat berupa pergeseran jadwal tanam, perubahan jenis tanaman, pengurangan musim tanam dalam setahun, atau dengan pembagian golongan tanam menjadi dua golongan. Penentuan pola tanam perlu dipertimbangkan untuk memenuhi kebutuhan air tanaman.

Sumber air tidak selamanya dapat menyediakan kebutuhan air irigasi yang dibutuhkan, sehingga diperlukan rencana pengaturan air yang baik, agar air yang tersedia dapat digunakan secara merata. Keseimbangan antara ketersediaan air dengan kebutuhan air irigasi merupakan prinsip dasar dalam penyusunan rencana tata tanam (RTT), sehingga distribusi air irigasi dapat dilakukan secara efisien dan merata (Mallah dkk., 2025).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Neraca Air

Gambar 1 menunjukkan hasil perhitungan neraca air antara ketersediaan dan kebutuhan air di DI Payaman. Diketahui bahwa ketersediaan air tahunan mengalami surplus dalam memenuhi kebutuhan air irigasi tahunan. Namun, distribusi tengah bulanannya tidak memungkinkan terpenuhi kebutuhan air pada periode bulan tertentu. Terjadi defisit pada periode bulan Mei II s.d. November II dengan total defisit sebesar 3,55 m<sup>3</sup>/s dalam setahun. Pada saat musim kemarau, debit ketersediaan air pada periode tersebut mendekati nilai 0 m<sup>3</sup>/s (Annisa dkk., 2024).

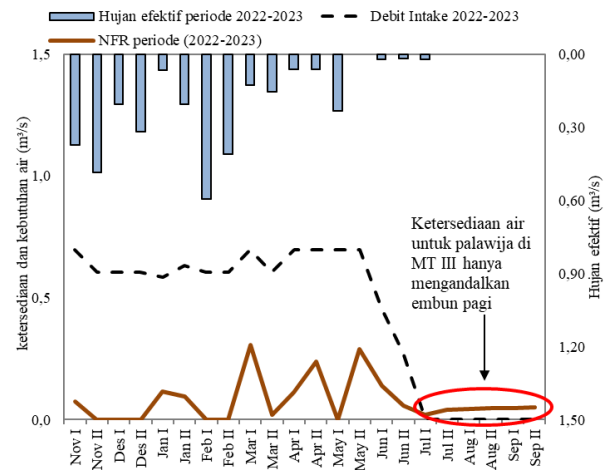


Gambar 1. Perhitungan neraca air

### Evaluasi Keseimbangan Air

Berdasarkan kondisi di lapangan, ketersediaan air periode 2022-2023 untuk memenuhi musim tanam III (MT III) memiliki debit sungai yang mendekati 0 m<sup>3</sup>/s. Selain itu, pengaturan pintu *intake* saat memasuki MT III tidak dioperasikan, sehingga tidak ada air yang mengalir di saluran. Namun, pada MT III tersebut, palawija jenis kedelai berhasil panen. Hal ini disebabkan karena ketersediaan airnya berasal dari sumber lain berupa embun pagi. Menurut petugas OP jaringan irigasi DI Payaman mengungkapkan bahwa tanaman palawija jenis kedelai yang ditanami akan membusuk jika diberikan air yang cukup banyak. Oleh sebab itu, tanaman palawija pada MT III tidak diberikan air melalui saluran tetapi ketersediaan airnya hanya mengandalkan embun pagi dalam memenuhi kebutuhan air untuk

palawija di MT III. Secara lebih detail, keseimbangan air antara ketersediaan dan kebutuhan air di lahan untuk periode 2022–2023 dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Keseimbangan air DI Payaman periode 2022–2023

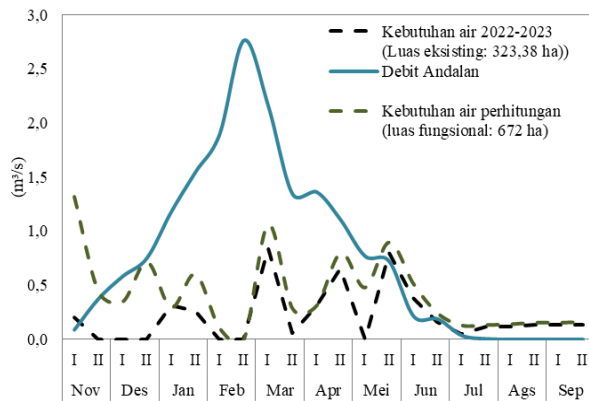
Gambar 2 menunjukkan hasil perhitungan keseimbangan air antara ketersediaan dan kebutuhan pada tahun 2022–2023 untuk luas lahan 323,38 ha. Pengaturan pengambilan debit *intake* dibiarkan terbuka terus, di mana debit yang diberikan jauh lebih besar dibandingkan kebutuhan air di lahan. Berdasarkan kondisi pengamatan yang terjadi di lapangan, hujan efektif yang terjadi pada periode 2022–2023 mengalami kejadian hujan yang cukup besar, terutama pada periode bulan November I hingga Desember II tahun 2022. Selain itu, puncak terjadinya hujan lebih besar, yakni pada periode bulan Februari I hingga Februari II tahun 2023. Dengan demikian, kebutuhan air irigasi netto pada beberapa periode bulan sebesar 0 m<sup>3</sup>/s. Hal ini disebabkan karena kebutuhan air di lahan telah terpenuhi melalui hujan.

### Simulasi Perencanaan Pola Tanam Alternatif

DI Payaman memiliki aset lahan dengan luas fungsional sebesar 672 ha yang tercatat dalam RTT SK Gubernur Provinsi DIY tahun 2023. Namun, karena terjadinya penurunan efisiensi jaringan, luas layanan eksisting pada periode pengamatan yang dapat ditanami

hanya sebesar 323,38 ha, dan sisa lahan fungsionalnya tidak dapat ditanami. Oleh sebab itu, penelitian ini merencanakan pola tanam untuk meningkatkan luas layanan eksisting setelah selesainya pekerjaan rehabilitasi. Salah satu upaya dalam meminimalisir terjadinya defisit air adalah dengan pengaturan pola tanam. Tanaman memiliki kebutuhan air dan masa tanam yang berbeda.

Pada kondisi eksisting, dilakukan pola tanam padi-padi-palawija. Tanaman padi memiliki masa tanam selama empat bulan dan jenis palawija yang digunakan berupa kedelai. Berdasarkan potensi ketersediaan air yang diperoleh dari perhitungan debit andalan, dapat dilihat bahwa terdapat kelebihan air yang dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan luas layanan irigasi seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Potensi debit andalan dalam memenuhi kebutuhan air irigasi kondisi eksisting dan sesuai dengan luas fungsional

Gambar 3 memperlihatkan bahwa ketersediaan air total menunjukkan surplus dalam memenuhi kebutuhan air irigasi kondisi eksisting dengan luas lahan 323,38 ha, maupun luas fungsional 672 ha. Namun, beberapa periode tertentu mengalami defisit, sehingga diperlukan penyesuaian pola tanam dengan pergeseran awal jadwal tanam. Agar air distribusi air menjadi lebih efisien, dilakukan simulasi pengaturan perubahan jadwal tanam, pola tanam, dan pembagian golongan yang dapat dilihat pada Tabel 2.

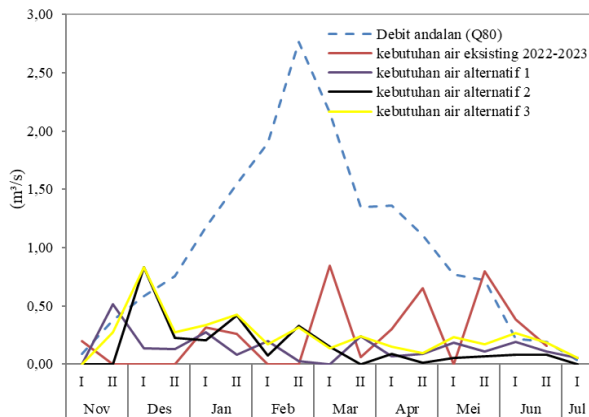
Simulasi rencana pola tanam alternatif dilakukan hanya dengan dua masa tanam yang

disesuaikan dengan potensi ketersediaan air yang ada, kondisi di lapangan memperlihatkan bahwa pada MT III, kebutuhan air irigasi dapat dipenuhi oleh embun pagi. Oleh sebab itu, ketersediaan air untuk memenuhi kebutuhan MT III dianggap terpenuhi walaupun tidak adanya ketersediaan air sungai untuk MT III. Beberapa simulasi pola tanam alternatif memiliki hasil yang bervariasi dengan rencana tanam yang berbeda-beda. Pemilihan simulasi pola tanam yang optimal didasarkan dengan kemampuan peningkatan luas layanan yang paling maksimum. Adapun keseimbangan air dari beberapa pengusulan simulasi alternatif dapat dilihat pada Gambar 4.

Tabel 2. Alternatif perubahan jadwal tanam, pola tanam, dan pembagian golongan

Jenis	Keterangan
Pola Tanam Alternatif 1 (Penanaman Serentak)	Pola Tanam: Padi-Padi Jadwal Tanam: • MT I = Nov II hingga Mar I • MT II = Mar II hingga Jul I Luas Area Tanam: • MT I = 269,7 ha • MT II = 143,34 ha
Pola Tanam Alternatif 2 (Penanaman Serentak)	Pola Tanam: Padi-Palawija Jadwal Tanam: • MT I = Des I hingga Mar II • MT II = Apr I hingga Jun II Luas Area Tanam: • MT I = 470 ha • MT II = 470 ha
Pola Tanam Alternatif 3 (Pembagian dua Golongan Jadwal tanam)	Pola Tanam: • Golongan A: Padi-Padi • Golongan B: Padi-Palawija Jadwal Tanam: Golongan A: • MT I = Nov II hingga Mar I • MT II = Mar II hingga Jul I Golongan B: • MT I = Des I hingga Mar II • MT II = Apr I hingga Jun II

Jenis	Keterangan
	Luas Area Tanam:
	MT I = 572,22 ha
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Golongan A: 143,34 ha</li> <li>• Golongan B: 428,88 ha</li> </ul>
	MT II = 572,22 ha
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Golongan A: 143,34 ha</li> <li>• Golongan B: 428,88 ha</li> </ul>



Gambar 4. Keseimbangan air dari beberapa simulasi rencana pola tanam alternatif

Pada Tabel 2 bahwa pada alternatif 1 menghasilkan penurunan luas layanan dari luas area tanam kondisi eksisting (323,38 ha). Hal disebabkan oleh terbatasnya ketersediaan air untuk awal jadwal tanam MT I. Sementara itu, pola tanam alternatif 2 menghasilkan peningkatan luas layanan irigasi sebesar 45% dari luas area tanam eksisting. Kemudian, pola tanam alternatif 3 dapat menghasilkan peningkatan luas layanan irigasi sebesar 77% dari luas area tanam eksisting. Oleh sebab itu, simulasi rencana tanam yang optimum adalah pola tanam alternatif 3 dapat meningkatkan luas layanan irigasi paling maksimum dan mendekati luas fungsional dalam RTT SK Gubernur DIY tahun 2023.

## KESIMPULAN

Daerah Irigasi Payaman di Kabupaten Gunungkidul mengalami kekurangan air sehingga luas layanan hanya 323,38 ha dari luas fungsional 672 ha berdasarkan RTT SK Gubernur DIY Tahun 2023. Penelitian ini bertujuan menentukan pola tanam optimal pas-

carehabilitasi jaringan irigasi untuk meningkatkan luas layanan. Hasil menunjukkan bahwa alternatif 1 dengan penanaman serentak hanya melayani padi 264,70 ha dan palawija 143,34 ha, sedangkan alternatif 2 dengan pola padi-palawija meningkatkan luas layanan menjadi 470 ha atau 45% lebih luas dari kondisi eksisting. Alternatif 3 dengan pembagian golongan tanam memberikan hasil terbaik dengan luas layanan 572,22 ha atau meningkat 77% dari kondisi eksisting, sehingga paling mendekati target luas fungsional 672 ha. Oleh karena itu, alternatif 3 direkomendasikan sebagai pola tanam optimum karena paling efektif memanfaatkan ketersediaan air dan meningkatkan layanan irigasi di DI Payaman.

## REFERENSI

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm> (diakses 15 Mei 2026)
- Amri, C. & Muttaqin, M. M. (2022). Dampak krisis pangan terhadap Indonesia. Dalam: *Prosiding Seminar Nasional BSKJI Post Pandemic Economy Recovery*, 30–37. Balai Standarisasi dan Pelayanan Jasa Industri Samarinda, Samarinda.
- Direktorat Jenderal Sumber Daya Air (2013). *Standar Perencanaan Irigasi: Kriteria Perencanaan Bagian Perencanaan Jaringan Irigasi (KP-01)*. Kementerian Pekerjaan Umum.
- Doorenbos, J. & Pruitt, W. O. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Lestari, A. P., Pratiwi, E. P. A., Jayadi, R., 2024. Evaluasi Neraca Air untuk Daerah

- Irigasi Payaman, Kabupaten Gunung Kidul, Provinsi DIY. Dalam: *Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur*. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Mallah, S., Gorji Anari, M., Balali, M. R., Asadi, H., Davatgar, N., Varmazyari, H., Stellacci, A. M., & Castellini, M. (2025). Cropping pattern effects on water supply-demand balance in a traditional irrigation network of a semi-arid region of Iran. *The Journal of Agricultural Science*, 163(3), 249–265. <https://doi.org/10.1017/S0021859625000206>
- Mock, F. J. (1973). *Land capability appraisal Indonesia: Water availability appraisal (Basic Study Prepared for the FAO/UNDP Land Capability Appraisal Project, AGL: SF/INS/72/011)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Nurrochmad, F., 2023. *Manajemen Irigasi*. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Prambudi, W.T., Rowibowo, N., Ariyanti, M., Sentauri, F., 2025. Pendampingan Pembangunan Jaringan Irigasi Air Tanah untuk Mendukung Ketahanan Pangan di Desa Jatimulyo Kecamatan Plumpang Kabupaten Tuban. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 5(3), 1234–1239. <https://doi.org/10.31004/abdira.v5i3.904>
- Prasetyo, A.S., Dooley, K.E., Widyastuti, K., Firdauzi, A., 2025. Comparing national food security policies in Indonesia and Thailand: a systematic meta-synthesis approach. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1676641. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1676641>
- Sosrodarsono, S., Takeda, K., 2003. *Hidrologi untuk Pengairan*. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Sri Harto, 1993. *Analisis Hidrologi*. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.