

Erosi pantai yang semakin meningkat akibat perubahan iklim mendorong pengembangan pendekatan perlindungan yang lebih adaptif. Struktur rekayasa keras efektif dalam jangka pendek namun sering merusak ekosistem pesisir, sedangkan pendekatan berbasis alam seperti lamun memerlukan waktu lama untuk mencapai efektivitas penuh. Sistem pertahanan pantai hibrida yang mengintegrasikan pemecah gelombang terendam berpuncak rendah dengan lamun buatan menjadi solusi yang komprehensif. Penelitian ini merumuskan dua pertanyaan utama: seberapa efektif sistem hibrida dalam mereduksi energi gelombang, dan bagaimana pengaruh dimensi pemecah gelombang serta kerapatan lamun terhadap efektivitas sistem.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja hidrodinamika sistem hibrida berdasarkan koefisien transmisi (K_t), koefisien refleksi (K_r), koefisien disipasi energi (K_d), dan fraksi energi terdisipasi (E_d); menganalisis pengaruh parameter interaksi pemecah gelombang (Ψ) dan parameter resistansi vegetasi (Π); serta menyusun persamaan empiris berbasis parameter tak berdimensi.

Pengujian fisik dilakukan pada model 2D skala 1:15 di Laboratorium Hidraulika Universitas Gadjah Mada menggunakan flume 15 m $\times$ 0,3 m $\times$ 0,45 m. Dua variasi pemecah gelombang *rubble mound* (BW15 tinggi 15 cm; BW20 tinggi 20 cm; kemiringan 1:2) dan tiga kerapatan lamun buatan PE 08 (30, 60, 120 batang/m²) diuji pada dua kedalaman (25 dan 30 cm) dengan tiga periode gelombang reguler ($T = 1,3$ s; 1,5 s; 2,0 s) dalam 12 konfigurasi. K_t dihitung dari rasio H_t/H_i , K_r melalui metode gelombang berdiri, serta K_d dan E_d dari persamaan keseimbangan energi. Parameter Ψ dan Π diturunkan melalui Teorema Buckingham Pi, dan model empiris dikembangkan menggunakan regresi eksponensial linier dan eksponensial berpangkat dengan algoritma Levenberg–Marquardt, dievaluasi dengan R^2 dan RMSE.

Sistem hibrida secara konsisten menghasilkan atenuasi gelombang lebih besar dibandingkan komponen tunggal. Nilai K_t minimum 0,890 dicapai pada konfigurasi BW20 + L120 ($h = 25$ cm; $T = 1,3$ s) dengan K_d mencapai 0,452. Nilai K_r tetap rendah pada seluruh konfigurasi (0,007–0,062), menunjukkan dominasi mekanisme disipasi terhadap refleksi. Model eksponensial berpangkat menghasilkan $R^2 = 0,8996$ dan RMSE = 0,0089 untuk prediksi K_t . Konfigurasi BW20 + L120 pada kedalaman dangkal dan periode pendek merupakan konfigurasi paling efektif dan memberikan dasar awal perancangan sistem perlindungan pantai yang adaptif dan ramah lingkungan.

Kata kunci: Sistem pertahanan pantai hibrida, Pemecah gelombang terendam berpuncak rendah, Vegetasi lamun, Koefisien transmisi gelombang, Parameter tak berdimensi

ABSTRACT

Increasing coastal erosion driven by climate change has accelerated the need for more adaptive protection approaches. Hard engineering structures offer short-term effectiveness but frequently damage coastal ecosystems, while nature-based solutions such as seagrass require extended periods to reach full performance. A hybrid coastal defence system integrating a low-crested submerged breakwater with artificial seagrass presents a comprehensive alternative. This study addresses two questions: how effective is the hybrid system in attenuating wave energy, and how do breakwater dimensions and seagrass density influence system performance.

The study aimed to evaluate the hydrodynamic performance of the hybrid system using the wave transmission coefficient (K_t), wave reflection coefficient (K_r), wave energy dissipation coefficient (K_d), and dissipated energy fraction (E_d); to analyse the influence of the breakwater interaction parameter (Ψ) and vegetation resistance parameter (Π); and to develop empirical equations based on nondimensional parameters.

Physical model experiments were conducted at a 1:15 scale in a wave flume (15 m $\times$ 0.3 m $\times$ 0.45 m) at the Hydraulics Laboratory of Universitas Gadjah Mada. Two rubble-mound breakwater configurations (BW15, height 15 cm; BW20, height 20 cm; slope 1:2) and three artificial PE 08 seagrass densities (30, 60, and 120 shoots/m²) were tested at two water depths (25 and 30 cm) and three regular wave periods ($T = 1.3, 1.5, \text{ and } 2.0 \text{ s}$) across 12 configurations. K_t was computed as H_t/H_i , K_r using the standing wave method, and K_d and E_d from energy balance equations. The parameters Ψ and Π were derived via the Buckingham Pi theorem, and empirical models were developed using linear and power-type exponential regression with the Levenberg–Marquardt algorithm, evaluated with R^2 and RMSE.

The hybrid system consistently produced greater wave attenuation than single-component configurations. A minimum K_t of 0.890 was achieved under BW20 + L120 at $h = 25 \text{ cm}$ and $T = 1.3 \text{ s}$, with K_d reaching 0.452. K_r remained consistently low across all configurations (0.007–0.062), confirming that dissipation dominated over reflection. The power-type exponential model yielded $R^2 = 0.8996$ and $\text{RMSE} = 0.0083$ for K_t prediction. The BW20 + L120 configuration at shallow water depth and short wave period proved most effective, providing an initial basis for designing adaptive and environmentally sound coastal protection systems.

Keywords: Hybrid coastal defence system, Low-crested submerged breakwater, Seagrass vegetation, Wave transmission coefficient, Nondimensional parameters