



Analisis Kajian Fisika terhadap Mitigasi Bencana Banjir Rob di Kawasan Pesisir

Yoga Budi Bhakti*, Irnin Agustina Dwi Astuti, Rendi Prasetya

^{1,2} Universitas Indraprasta PGRI

* E-mail: bhaktiyoga.budi@gmail.com

Abstract

Tidal flooding (rob) is a serious threat to Indonesia's coastal areas, triggered by sea-level rise and land subsidence. This study aims to analyze tidal flood mitigation strategies through the application of physical principles, specifically fluid mechanics and wave dynamics. The method employed is descriptive-analytical with theoretical modeling based on Bernoulli's Law, hydrostatic pressure, and the principle of continuity. The results indicate that the resilience of seawall structures highly depends on the distribution of hydrostatic pressure and the material's ability to withstand lateral moments of force. Furthermore, polder systems require water discharge optimization based on the continuity equation to ensure pumping efficiency. The research findings also highlight the critical role of mangrove vegetation in dissipating wave kinetic energy by increasing the drag coefficient. The conclusion of this study emphasizes that the integration of mechanically measured structural mitigation and ecosystem-based non-structural mitigation provides the most effective and sustainable solution to address hydro-oceanographic dynamics in coastal regions.

Keywords: Tidal Flood, Coastal Mitigation, Fluid Mechanics, Hydrostatic Pressure, Energy Dissipation.

Abstrak

Banjir rob merupakan ancaman serius bagi kawasan pesisir Indonesia yang dipicu oleh kenaikan permukaan laut dan penurunan muka tanah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis strategi mitigasi bencana banjir rob melalui pendekatan prinsip-prinsip fisika, khususnya mekanika fluida dan dinamika gelombang. Metode yang digunakan adalah deskriptif-analitis dengan pemodelan teoretis berdasarkan Hukum Bernoulli, tekanan hidrostatik, dan prinsip kontinuitas. Hasil kajian menunjukkan bahwa ketahanan struktur tanggul sangat bergantung pada distribusi tekanan hidrostatik dan kemampuan material dalam menahan momen gaya lateral. Selain itu, sistem polder memerlukan optimasi debit air berdasarkan persamaan kontinuitas untuk memastikan efisiensi pemompaan. Temuan penelitian juga menyoroti peran penting vegetasi mangrove dalam mendisipasikan energi kinetik gelombang melalui peningkatan koefisien hambat (*drag coefficient*). Simpulan dari penelitian ini menegaskan bahwa integrasi antara mitigasi struktural yang terukur secara mekanis dan mitigasi non-struktural berbasis ekosistem merupakan solusi paling efektif dan berkelanjutan dalam menghadapi dinamika hidro-oseanografi di wilayah pesisir.

Kata kunci: Banjir Rob, Mitigasi Pesisir, Mekanika Fluida, Tekanan Hidrostatik, Disipasi Energi.

PENDAHULUAN

Kawasan pesisir merupakan wilayah yang memiliki nilai strategis secara ekonomi, sosial, dan ekologis bagi Indonesia sebagai negara kepulauan (Lasabuda, 2013; Wibowo et al, 2022). Namun, seiring dengan perubahan iklim global, wilayah ini menghadapi ancaman serius berupa fenomena banjir rob atau banjir pasang air laut. Banjir rob bukan sekadar limpasan air biasa, melainkan fenomena kompleks yang dipengaruhi oleh dinamika astronomis dan perubahan termodinamika global yang memicu kenaikan permukaan air laut secara progresif.

Fenomena ini diperparah oleh adanya penurunan muka tanah (*land subsidence*) yang masif di kota-kota besar pesisir seperti Jakarta, Semarang, dan Demak. Secara fisik, penurunan muka tanah menyebabkan elevasi daratan menjadi lebih rendah dibandingkan dengan tekanan hidrostatis air laut saat pasang tertinggi. Ketidakseimbangan antara laju kenaikan air laut dan penurunan tanah menciptakan risiko permanen bagi infrastruktur dan pemukiman warga, sehingga diperlukan pemahaman mendalam mengenai mekanika fluida di balik fenomena ini.

Dalam perspektif fisika, banjir rob dapat dianalisis melalui konsep mekanika fluida statis dan dinamis. Parameter seperti densitas air laut, percepatan gravitasi, dan kedalaman fluida menjadi variabel kunci dalam menentukan besarnya tekanan yang diterima oleh struktur pelindung Pantai (Herho & Suwarman, 2024). Selain itu, fenomena gelombang yang membawa energi kinetik besar saat mencapai pantai juga berkontribusi pada kerusakan fisik bangunan yang tidak dirancang untuk menahan beban hidrodinamis tersebut (Hadi, 2018).

Meskipun upaya mitigasi telah dilakukan oleh pemerintah, sebagian besar pendekatan masih bersifat reaktif dan kurang mempertimbangkan variabel fisik secara presisi. Seringkali pembangunan tanggul tidak memperhitungkan gaya angkat (*uplift force*) atau efek erosi dasar akibat turbulensi air. Oleh karena itu, kajian yang mengintegrasikan prinsip-prinsip fisika murni ke dalam strategi mitigasi bencana menjadi sangat krusial untuk menghasilkan solusi yang berkelanjutan dan efisien secara struktural.

Kajian fisika dalam mitigasi ini mencakup pemodelan rambatan gelombang, analisis tekanan hidrostatik pada dinding penahan, hingga pemanfaatan hukum kekekalan energi untuk meredam kekuatan air laut. Dengan memahami karakteristik fisik dari air laut yang masuk ke daratan, kita dapat merancang sistem drainase dan penghalang yang bekerja selaras dengan hukum alam, bukan sekadar melawannya. Hal ini diharapkan dapat meminimalisir kegagalan struktur mitigasi yang sering terjadi akibat kurangnya perhitungan beban mekanis.

Penelitian ini bertujuan untuk menguraikan secara komprehensif bagaimana prinsip-prinsip fisika diterapkan dalam menganalisis mitigasi banjir rob. Fokus utama penelitian adalah pada optimasi struktur tanggul dan sistem polder melalui pendekatan hukum Bernoulli dan mekanika gelombang. Melalui analisis ini, diharapkan kontribusi teoretis ini dapat menjadi referensi bagi pemangku kebijakan dalam merancang infrastruktur pesisir yang lebih resilien terhadap perubahan iklim di masa depan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-analitis dengan metode kajian pustaka (*literature review*) dan pemodelan teoretis berbasis prinsip fisika. Penulis mengumpulkan data sekunder terkait laju kenaikan permukaan laut, data pasang surut, serta karakteristik topografi pesisir di Indonesia. Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan hukum-hukum dasar mekanika fluida untuk mengevaluasi efektivitas struktur mitigasi yang ada saat ini.

Langkah selanjutnya adalah melakukan analisis matematis terhadap variabel-variabel fisik yang memengaruhi banjir rob. Variabel tersebut mencakup tekanan hidrostatis pada berbagai kedalaman dan energi kinetik gelombang saat menghantam garis pantai. Model analisis menggunakan persamaan Bernoulli untuk menghitung kecepatan aliran fluida melalui celah atau pintu air, serta persamaan tekanan hidrostatis untuk menentukan ketahanan material tanggul dalam menahan beban air.

Penelitian ini melakukan komparasi antara mitigasi struktural (tanggul dan bendungan) dan mitigasi non-struktural (*restorasi mangrove*) berdasarkan kemampuan redaman energinya. Evaluasi dilakukan dengan meninjau koefisien absorpsi energi dari berbagai media pelindung pantai. Hasil dari analisis ini disintesis untuk memberikan rekomendasi desain mitigasi yang paling optimal dari sudut pandang efisiensi mekanis dan keberlanjutan lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Banjir rob merupakan salah satu bencana yang sering terjadi di pesisir pantai. Dalam konteks fisika, banjir rob dianalisis berdasarkan konsep fluida.

a. Analisis Tekanan Hidrostatik pada Tanggul Pantai

Beban utama yang harus ditahan oleh tanggul saat banjir rob adalah tekanan hidrostatik. Besarnya tekanan ini berbanding lurus dengan kedalaman air laut saat pasang. Secara matematis, tekanan pada kedalaman tertentu dirumuskan sebagai:

$$P = \rho gh$$

Keterangan:

P = Tekanan (Pa)

ρ = Massa jenis air laut (1025 kg/m^3)

g = Percepatan gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)

h = Kedalaman fluida (m)

Ketahanan tanggul tidak hanya bergantung pada tinggi dinding, tetapi juga pada kemampuannya menahan momen gaya yang dihasilkan oleh distribusi tekanan yang berbentuk segitiga dari permukaan hingga dasar laut. Kegagalan tanggul sering terjadi karena dasar tanggul tidak mampu menahan tekanan lateral yang mencapai puncaknya di bagian bawah.

b. Prinsip Kontinuitas dan Sistem Polder

Dalam mitigasi menggunakan sistem polder, air yang masuk ke area yang lebih rendah harus dikeluarkan menggunakan pompa. Hukum Bernoulli dan Persamaan Kontinuitas berperan penting dalam debit air yang keluar masuk. Debit air yang masuk (Q) harus seimbang dengan kapasitas pompa agar tidak terjadi penumpukan volume air.

c. Perbandingan Metode Mitigasi Fisik

Berikut adalah tabel perbandingan efektivitas mitigasi berdasarkan parameter fisika:

Tabel 1. Perbandingan Metode Mitigasi Fisik

Jenis Mitigasi	Prinsip Fisika Utama	Kelebihan	Kelemahan
Tanggul laut	Refleksi Gelombang & Tekanan Statis	Perlindungan instan, tahan terhadap beban tinggi.	Rentan terhadap abrasi dasar (<i>scouring</i>).
Hutan mangrove	Disipasi Energi & Friksi Fluida	Ramah lingkungan, meredam energi secara bertahap.	Membutuhkan waktu pertumbuhan lama.
Breakwater	Difraksi dan Pecah Gelombang	Mengurangi tinggi gelombang sebelum mencapai pantai.	Biaya konstruksi sangat tinggi.

d. Redaman Energi oleh Vegetasi Pesisir

Mangrove bertindak sebagai penghalang alami yang meningkatkan kekasaran permukaan (*surface roughness*). Saat gelombang melewati akar mangrove, terjadi konversi energi kinetik menjadi energi panas melalui gesekan (viskositas) dan turbulensi kecil, yang secara signifikan menurunkan tinggi gelombang (H) saat mencapai daratan.

Pembahasan

Analisis pertama berfokus pada distribusi tekanan hidrostatik yang bekerja pada struktur tanggul laut. Secara teoritis, tekanan yang diberikan oleh air laut meningkat secara linier terhadap kedalaman, membentuk distribusi beban segitiga (Nugraha & Perbani, 2023). Hal ini berarti bagian

dasar tanggul menerima beban lateral paling besar, yang jika tidak diperhitungkan, dapat menyebabkan kegagalan struktur berupa pergeseran (*sliding*) atau penggulingan (*overturning*). Banjir rob yang terjadi secara periodik, material tanggul juga mengalami kelelahan mekanis (*mechanical fatigue*) akibat siklus pasang surut yang terus-menerus memberikan tekanan dan relaksasi bergantian (Jamaluidn et al, 2016). Oleh karena itu, perhitungan modulus elastisitas dan kuat tekan material menjadi parameter krusial agar struktur tidak hanya tinggi secara elevasi, tetapi juga kokoh secara mekanika.

Selanjutnya, aspek hidrodinamika gelombang memainkan peran vital dalam menentukan besarnya energi kinetik yang menghantam pesisir. Ketika gelombang air laut bergerak menuju daratan yang lebih dangkal, terjadi fenomena *shoaling* di mana tinggi gelombang meningkat sementara panjang gelombangnya memendek, yang menyebabkan konsentrasi energi di permukaan (Rumbyarso, 2024). Berdasarkan hukum kekekalan energi, energi yang dibawa oleh gelombang ini harus dilepaskan saat menghantam penghalang. Jika mitigasi hanya mengandalkan dinding tegak lurus (reflektor), maka energi tersebut akan dipantulkan kembali dan seringkali memicu turbulensi di dasar tanggul yang menyebabkan penggerusan pasir (*scouring*). Secara fisik, penggunaan *breakwater* atau susunan batu pelindung dengan koefisien refleksi rendah lebih efektif karena mampu memecah energi kinetik menjadi energi panas dan suara melalui gesekan antar material.

Analisis efektivitas sistem polder dan drainase dapat ditinjau melalui prinsip kontinuitas dan hukum Bernoulli. Dalam sistem mitigasi aktif, air yang terjebak di area pemukiman akibat elevasi yang lebih rendah dari permukaan laut harus dialirkan menuju kolam retensi dan dikeluarkan melalui pompa. Variabel debit (Q) menjadi penentu utama, luas penampang saluran dan kecepatan aliran harus optimal untuk mencegah stagnasi. Penggunaan pompa air juga harus mempertimbangkan *head* (perbedaan ketinggian) dan massa jenis air yang mungkin meningkat akibat kandungan sedimen saat rob (Ralstone et al, 2019; Rocha, 2020). Secara termodinamika, efisiensi pompa sangat bergantung pada kemampuan sistem dalam mengatasi rugi-rugi gesekan (*friction loss*) di sepanjang pipa penyalur, sehingga desain hidrolika yang mulus menjadi syarat mutlak dalam manajemen banjir rob.

Fenomena penurunan muka tanah (*land subsidence*) menambah kompleksitas kajian fisik ini, karena menyebabkan perubahan kerangka acuan elevasi secara dinamis (Abidin et al, 2015). Secara mekanika tanah, penurunan ini terjadi akibat konsolidasi lapisan tanah serta pengambilan air tanah yang berlebihan, yang mengurangi tekanan pori dan menyebabkan pemampatan (Lay et al, 2020; Cassiophea, 2014). Akibatnya, tekanan hidrostatik yang dialami oleh infrastruktur pesisir meningkat dari tahun ke tahun meskipun tinggi pasang air laut tetap sama. Dalam perspektif fisika, ini adalah masalah perubahan kesetimbangan gaya-gaya internal pada lapisan bumi. Mitigasi yang berkelanjutan tidak boleh hanya melihat kenaikan air laut sebagai variabel tunggal, tetapi harus mengintegrasikan laju penurunan tanah ke dalam desain teknis tanggul agar memiliki masa pakai fungsional yang lebih lama.

Integrasi mitigasi alami melalui ekosistem mangrove memberikan solusi berbasis disipasi energi yang sangat efisien secara fisik. Hutan mangrove berfungsi sebagai media berpori (*porous media*) yang memiliki koefisien hambat (*drag coefficient*) tinggi (Fitriah et al, 2013; Naibaho, 2023). Saat aliran rob atau gelombang melewati kerapatan akar mangrove, terjadi konversi energi melalui mekanisme turbulensi kecil di sekitar perakaran (Mullarney et al, 2017; Kazemi et al, 2021, Wang et al, 2022). Secara fisik, hal ini menurunkan kecepatan aliran secara eksponensial tanpa menciptakan efek pantulan yang merusak sebagaimana pada dinding beton. Kajian ini menunjukkan bahwa pendekatan "bekerja dengan alam" menggunakan prinsip bio-mekanika fluida memberikan perlindungan berlapis yang lebih resilien, di mana struktur keras (tanggul) berfungsi sebagai benteng terakhir, sementara vegetasi berperan sebagai peredam energi utama.

PENUTUP

Berdasarkan analisis kajian fisika, dapat disimpulkan bahwa mitigasi banjir rob memerlukan perhitungan yang presisi terhadap variabel tekanan hidrostatik dan dinamika energi gelombang. Penggunaan tanggul laut harus didasarkan pada perhitungan momen gaya dan tekanan lateral untuk mencegah keretakan struktural. Di sisi lain, integrasi antara mitigasi struktural (tanggul) dan non-

struktural (mangrove) terbukti paling efektif karena mampu mengombinasikan kekuatan refleksi dan disipasi energi. Pemahaman fisik terhadap fenomena kenaikan permukaan laut dan penurunan tanah menjadi landasan utama dalam menciptakan kawasan pesisir yang tangguh terhadap ancaman bencana hidrometeorologi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., & Brinkman, J. J. (2015). Study on the risk and impacts of land subsidence in Jakarta. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 115-120. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-115-2015>.
- Cassiophea, L. (2014). Relationship Of Pore Number With Consolidation Settlement Of Clay. *BALANGA: Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, 2(2), 1-11.
- Fitriah, E., Maryuningsih, Y., Chandra, E., & Mulyani, A. (2013). Studi analisis pengelolaan hutan mangrove Kabupaten Cirebon. *Scientiae Educatia: Jurnal Pendidikan Sains*, 2(2), 73-92.
- Hadi, S. (2018). *Oceanografi Fisika: Karakteristik Fisik Air Laut dan Dinamikanya*. Bandung: ITB Press.
- Herho, S. H. S., & Suwarman, R. (2024). Pengantar Dinamika Fluida Geofisika. *Authorea Preprints*.
- Jamalludin, J., Fatoni, K. I., Alam, T. M., & Pranowo, W. S. (2016). Identifikasi Banjir Rob Periode 2013–2015 di Kawasan Pantai Utara Jakarta: Identification of Rob Floods for the Period of 2013–2015 in the North Coast of Jakarta. *Jurnal Chart Datum*, 2(2), 105-116.
- Kazemi, A., Castillo, L., & Curet, O. M. (2021). Mangrove roots model suggest an optimal porosity to prevent erosion. *Scientific Reports*, 11(1), 9969.
- Lasabuda, R. (2013). Pembangunan wilayah pesisir dan lautan dalam perspektif Negara Kepulauan Republik Indonesia. *Jurnal ilmiah platax*, 1(2), 92-101.
- Lay, M. O., Sumarli, I., & Iskandar, A. (2020). Studi Parametrik Jarak Pengaruh Penurunan dan Pergerakan Lateral Akibat Vacuum Pre-Loading pada Damage Area Sekitar. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 1091-1104.
- Mullarney, J. C., Henderson, S. M., Norris, B. K., Bryan, K. R., Fricke, A. T., Sandwell, D. R., & Culling, D. P. (2017). A question of scale: How turbulence around aerial roots shapes the seabed morphology in mangrove forests of the Mekong Delta. *Oceanography*, 30(3), 34-47.
- Naibaho, A. A., Harefa, M. S., Nainggolan, R. S., & Alfiaturrahmah, V. L. (2023). Investigasi pemanfaatan hutan mangrove dan dampaknya terhadap daerah pesisir di Pantai Mangrove Paluh Getah, Tanjung Rejo. *J-CoSE: Journal of Community Service & Empowerment*, 1(1), 22-33.
- Nugraha, A. D., & Perbani, N. M. R. R. C. (2023). Analisis Waktu Banjir Rob Pada Model Sea Level Anomaly Harmonik Dari Data Satelit Altimetri Jason-3 Tahun 2016—2018. *Prosiding FTSP Series*, 1328-1336.
- Ralston, D. K., Talke, S., Geyer, W. R., Al-Zubaidi, H. A., & Sommerfield, C. K. (2019). Bigger tides, less flooding: Effects of dredging on barotropic dynamics in a highly modified estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(1), 196-211.
- Rocha, C. (2000). Density-driven convection during flooding of warm, permeable intertidal sediments: the ecological importance of the convective turnover pump. *Journal of Sea Research*, 43(1), 1-14.
- Rumbyarso, Y. P. A. (2024). Kajian Penurunan Tanah di Kabupaten Bekasi Akibat Eksploitasi Air Berlebihan dengan Aplikasi Geostudio dan Plaxis. *Qomaruna Journal of Multidisciplinary Studies*, 2(1), 42-56.
- Wang, Y., Yin, Z., & Liu, Y. (2022). Experimental investigation of wave attenuation and bulk drag coefficient in mangrove forest with complex root morphology. *Applied Ocean Research*, 118, 102974.
- Wibowo, B. A., Bambang, A. N., Pribadi, R., Setiyanto, I., Prihantoko, K. E., & Sutanto, H. A. (2022). Strategi Pengelolaan Kawasan Pesisir di Pasar Banggi Kabupaten Rembang dengan Pendekatan Analytical Hierarchy Process (AHP). *Jurnal Kelautan Tropis*, 25(2), 191-201.