



SDA-15 PERLUKAH SISTEM MITIGASI HIBRID UNTUK BENCANA TSUNAMI?: SEBUAH TINJAUAN LITERATUR

T Amaliah^{1*}, MA Thaha², R Karamma³ dan MP Hatta⁴

^{1*}Mahasiswa Program Doktor Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa,

email: tutyamaliahuh22@gmail.com

²Dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa

email: arsyad999@gmail.com

³Dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa,

email: riswalk@unhas.ac.id

⁴Dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa,

email: mukhsan.hatta@unhas.ac.id

ABSTRAK

Dewasa ini pesisir pantai menjadi wilayah yang berkembang pesat karena potensi keindahan laut dan sarana serta prasarana yang memadai sehingga mendorong pemukiman baru dan pengembangan wisata. Namun, potensi ini akan mengakibatkan semakin banyak masyarakat dan fasilitas umum yang terancam bencana gelombang tsunami. Untuk mengatasi dampaknya, solusi struktur mitigasi hibrid diterapkan. Langkah-langkah penanggulangan mencakup langkah-langkah struktur buatan untuk mencegah dampak tsunami seperti tembok laut, pemecah gelombang serta langkah-langkah struktur alami dengan penghijauan pantai. Jika upaya-upaya penanggulangan dengan struktur buatan untuk meredam energi dan mengurangi genangan, maka upaya dengan penanggulangan struktur alami untuk menurunkan kerentanan atau mitigasi dampak gelombang secara alamiah. Dalam makalah ini dilakukan tinjauan literatur tentang mitigasi dengan penanggulangan struktur buatan dan mitigasi dengan penanggulangan struktur alamiah (vegetasi pantai) dan tinjauan literatur tentang penggabungan penanggulangan struktur buatan dan struktur alami untuk mereduksi energi gelombang tsunami.

Kata kunci: Mitigasi Tsunami, Struktur buatan, vegetasi pantai

PENDAHULUAN

Tsunami merupakan bencana alam yang terjadi secara tidak terduga, tiba-tiba dan luar biasa, salah satunya disebabkan oleh gempa bumi. Keberadaan beberapa lempeng besar dunia yang mengelilingi negara Indonesia menjadikan kawasan di pesisir pantai yang rentan terhadap bahaya gempa bumi dan tsunami (Santoso et al., 2015), (Wibowo et al., 2017). Peristiwa tsunami besar dalam sejarah dunia seperti Tsunami Samudra Hindia 2004, Tsunami Tohoku 2011, Tsunami Palu 2018 dan tsunami Selat Sunda 2018, memperlihatkan pentingnya penerapan penanggulangan bencana yang efektif untuk mengurangi dan melindungi nyawa dan harta benda (Takabatake et al., 2022).

Dewasa ini pesisir pantai menjadi wilayah yang berkembang pesat karena ditunjang dengan sarana dan prasarana laut yang memadai. Potensi keindahan laut menjadikannya sebagai daya tarik pengembangan wisata. Potensi ini pula mendorong permukiman baru dan pengembangan wisata. Namun, potensi ini pula yang akan mengakibatkan semakin banyak masyarakat dan fasilitas pendukung yang terancam bencana gelombang tsunami.

Mitigasi bencana, peringatan dini (*early warning system*), dan evakuasi merupakan tindakan penanggulangan yang representatif untuk melindungi dan meminimalkan keterpaparan kehidupan manusia dan berbagai infrastruktur dari bahaya bencana alam. Secara umum, terdapat dua upaya

mitigasi bencana yang diterapkan dalam sistem penanganan bencana tsunami, yaitu *soft structure* dengan menggunakan zona penyangga alami vegetasi pantai, bukit pasir atau terumbu karang dan *hard structure* dengan tanggul laut atau pemecah gelombang (Dissanayaka et al., 2022).

Sistem pertahanan hibrida yang memanfaatkan keefektifan metode alami dan metode buatan, dan kombinasi ini dapat memainkan peran penting dalam mitigasi bencana dengan mengurangi dampak dari kejadian ekstrem di masa depan. Perlindungan pantai berupa vegetasi pantai yang telah terbentuk dan beradaptasi dengan lingkungan pantai sebagai sistem pertahanan mitigasi alami yang relatif mudah dan murah. Dari segi mitigasi struktural tetap dibutuhkan untuk perkuatan perlindungan dari gelombang tsunami dan limpasan gelombang serta melindungi vegetasi pantai yang baru ditanam (Rashedunnabi & Tanaka, 2020).

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini merupakan metode penelitian studi literatur. (Nazir, 2014) mengartikan studi literatur sebagai penelitian yang dilakukan dengan cara menelaah berbagai kajian kepustakaan yang diperlukan dalam penelitian sebagai Langkah awal dalam perencanaan penelitian dengan memanfaatkan kepustakaan untuk memperoleh data lapangan dan membentuk kerangka berpikir pada penelitian yang akan dilakukan. Sumber data dari penelitian ini diperoleh dari studi literatur terkait sistem mitigasi tsunami dengan struktur hibrida (data hasil penelitian, laporan penelitian, jurnal ilmiah, dll.).

PEMBAHASAN

Berbagai Tindakan mitigasi untuk melindungi pemukiman pesisir pantai dari dampak gelombang tsunami, yang diterapkan berdasarkan penilaian dampak tsunami di wilayah tersebut, kesadaran akan tsunami dan kapasitas ekonomi. Meskipun langkah-langkah mitigasi tsunami yang ada, pada umumnya efektif dalam menangani gelombang dengan energi besar yang sering terjadi (Sato, 2015), mengingat kejadian-kejadian tsunami baru-baru ini menunjukkan bahwa tindakan penanggulangan dan desain tersebut perlu ditingkatkan untuk mereduksi dampak tsunami ekstrem dan tidak terduga di beberapa daerah.

Mitigasi tsunami dengan pendekatan struktur buatan

Metode konstruksional yang paling banyak di adopsi yaitu pembangunan pemecah gelombang menerus atau terpisah baik tipe tenggelam ataupun yang muncul dan tanggul laut masif. Tanggul laut digunakan untuk melindungi daerah dataran pantai rendah dari penggenangan.

Tabel 1 konstruksi penghalang dan peredam gelombang menurut USACE 2011 (Oetjen et al., 2022)

Tipe	Fungsi	Sasaran
Sea dike	Mencegah atau mengurangi genangan di laut pada daerah dataran rendah	Pemisahan garis pantai dari daerah daratan dengan struktur kedap air yang tinggi
Seawall	Melindungi daratan dan bangunan dari genangan dan limpasan air laut	
Breakwater	Melindungi kolam pelabuhan, pintu masuk pelabuhan, dan saluran pengambilan air dari gelombang dan arus	Memperkuat beberapa bagian dari profil pantai
Detached breakwater	Mencegah erosi pantai	Peredaman energi gelombang dan/atau pemantulan kembali energi gelombang ke laut
Reef breakwater	Mencegah erosi pantai	Pengurangan ketinggian gelombang di bagian tepi struktur dan pengurangan



		transportasi sedimen ke arah pantai
Pemecah Gelombang Terapung	Melindungi kolam pelabuhan dan area tambat dari gelombang periode pendek	Pengurangan tinggi gelombang dengan refleksi dan atenuasi

Tembok laut dapat melindungi pemukiman dari bencana tsunami atau memperpanjang waktu evakuasi jika di rancang dengan baik. Namun, hal tersebut dapat meningkatkan bahaya jika terjadi kegagalan atau memungkinkan *overtopping*/limpasan. Meskipun tembok laut memiliki potensi yang signifikan untuk melindungi wilayah pesisir dari kejadian gelombang tsunami, penerapannya membutuhkan biaya yang cukup besar dan memberikan kesan keamanan palsu karena mengurangi kemauan atau kesiapsiagaan masyarakat untuk mengungsi (Oetjen et al., 2022).

Pemecah gelombang berpori telah digunakan hanya untuk mengurangi energi gelombang *overtopping* pemecah gelombang dinding vertikal sejak pertama kali diusulkan oleh Jarlan (1961) (Quinn, 1972). Energi gelombang akan pecah jika mengenai sisi depan pemecah gelombang dinding vertikal yang permeabel dan berpori, yang merupakan salah satu karakteristik penting dari pemecah gelombang berpori (Quinn, 1972). Selain itu, gelombang yang datang akan terus menghantam pori-pori, yang akan menyebabkan pantulan gelombang pada dasar struktur gelombang berubah. Pemecah gelombang berpori merupakan jenis pemecah gelombang yang pada awalnya merupakan pemecah gelombang tipe caisson, dengan penambahan parameter lain seperti tinggi gelombang, periode, keteraturan gelombang, arah gelombang, dan kedalaman air.

Penelitian Umeda et al., (2013) tentang pengurangan genangan aliran tsunami dan energi tsunami oleh sekat vertikal berpori yang dipasang di atas tembok laut, hasil yang di peroleh yaitu efek pengurangan kedalaman genangan dan limpasan ditentukan oleh kerapatan sekat dan tinggi tsunami relatif terhadap tinggi sekat, sedangkan peredaman gelombang dipengaruhi oleh variasi ketinggian tsunami di depan sekat berpori.

Esmaeili et al., (2019) melakukan studi model fisik untuk mengetahui efisiensi hidrodinamika tembok laut berpori vertikal tipe caisson yang digunakan untuk melindungi daerah pesisir dengan membandingkan refleksi gelombang dari tembok laut berpori, semi-pori, dan berpori yang disebabkan oleh gelombang reguler dan acak. hasilnya memperoleh persamaan empirik untuk menghitung koefisien refleksi dari berbagai jenis tembok laut sehingga dapat mengoptimalkan desain tembok laut vertikal dan untuk skema perlindungan pantai.

Tamrin et al., (2014) juga melakukan studi eksperimental pada pemecah gelombang blok beton *perforated* /berpori dengan variasi jumlah barisan blok dan diameter pori, Jika jumlah barisan blok semakin banyak maka celah pori (B) akan semakin panjang, hal ini akan meningkatkan disipasi pada blok beton tersebut, sehingga fungsi *breakwater* akan semakin baik. Jika diameter celah pori (D/H_i) semakin lebar maka kemampuan disipasi blok beton akan berkurang, dan refleksi di depan *breakwater* akan semakin kecil, namun gelombang transmisi akan semakin besar dan sebaliknya.

Vegetasi Pantai sebagai salah satu peredam energi tsunami

Vegetasi dikenal sebagai metode alami untuk mengurangi gelombang. Batang dan daun vegetasi pantai menyebabkan gesekan internal pada gelombang. Gesekan dan hambatan ini mengurangi energi gelombang sehingga mengurangi ketinggian gelombang.

Penelitian Takabatake et al., (2022) telah menunjukkan pentingnya menerapkan tindakan penanggulangan yang efektif untuk melindungi nyawa dan harta benda dari bahaya yang berpotensi menghancurkan. Penggunaan infrastruktur ramah lingkungan (misalnya, vegetasi pantai, pantai berpasir, dan terumbu karang) sebagai penghalang alami terhadap tsunami akhir-akhir ini mendapat perhatian karena biayanya yang murah dan ramah lingkungan. Kejadian tsunami di masa lalu telah menyoroti efek mitigasi yang dapat diberikan oleh vegetasi pantai terhadap kerusakan yang terjadi di belakangnya, termasuk misalnya keberadaan bakau dan hutan pantai lainnya. Sebagai contoh, Danielsen dkk., (2005) melaporkan bahwa hutan bakau mengurangi kerusakan yang terjadi di beberapa desa di India akibat Tsunami Samudera Hindia tahun 2004. Tanaka dkk., (2007) melakukan

survei lapangan pasca bencana di 19 lokasi di Sri Lanka dan 29 lokasi di Thailand yang terkena dampak Tsunami Samudera Hindia 2004, dan menyelidiki dampak hutan bakau terhadap kerusakan yang disebabkan oleh tsunami. Mereka melaporkan dampak yang berbeda tergantung pada spesies bakau tertentu yang ada di berbagai lokasi, dan menyatakan bahwa varietas dengan struktur akar yang kompleks dapat secara signifikan mengurangi dampak tsunami. Yanagisawa dkk., (2010) melaporkan bahwa, pada kasus Tsunami Samoa 2009, kedalaman genangan di belakang hutan bakau 80% lebih rendah dibandingkan dengan yang di depannya di sebuah komunitas pesisir di Pulau Upolu, Samoa. Namun, penduduk setempat melaporkan bahwa hutan bakau yang rusak akibat tsunami menjadi puing-puing terapung yang kemudian merusak rumah-rumah penduduk. Selama Tsunami Tohoku 2011, sejumlah pohon pinus Jepang hancur, karena sistem perakarannya yang relatif dangkal kurang tahan terhadap tsunami dibandingkan dengan bakau (Strusińska., (2017). Di Kota Rikuzentakata, di Prefektur Iwate, tsunami menghancurkan sekitar 70.000 pohon pinus, kecuali satu pohon pinus setinggi 10 meter yang berusia 200 tahun.

Kelebihan Hutan pantai (Dissanayaka et al., 2022) dapat mengurangi kerusakan yang disebabkan oleh tsunami dengan cara: menghentikan aliran kayu apung dan puing-puing yang terbawa tsunami ke arah daratan, mengurangi kekuatan destruktif aliran tsunami dan mengurangi kecepatan gelombang, membentuk bukit pasir untuk melindungi dari tsunami dan gelombang yang lebih tinggi, dan memberikan dukungan tambahan untuk menjaring penduduk yang terbawa arus balik tsunami. Hutan pantai juga berfungsi untuk melindungi dari angin laut dan hembusan pasir dengan bertindak sebagai penyangga alami dan membentuk gumuk pasir, yang meningkatkan ketinggian gumuk pasir yang ada. Mazda dkk. (2006) dan Quartel dkk. (2007) dalam (Dissanayaka et al., 2022) mengukur kecepatan arus laut dan elevasi air di daerah pasang surut yang terbuka, di depan dan di sekitar hutan bakau, dan menemukan bahwa pengurangan ketinggian tsunami oleh hutan bakau adalah 5 hingga 7,5 kali lebih besar dibandingkan dengan pengurangan ketinggian tsunami yang hanya disebabkan oleh gesekan dengan dasar laut di dataran pantai.

Dalam peristiwa ini, pohon-pohon tersebut juga menjadi puing-puing terapung, yang meningkatkan dampak hilir gelombang (Suppasri et al., 2013). Namun, efektivitas pohon pinus dalam memitigasi dampak tsunami juga telah dilaporkan, misalnya, beberapa pohon pinus mungkin berfungsi sebagai perangkap puing-puing (Tanaka, 2012), dan berkontribusi pada mitigasi kerusakan di belakangnya. Suppasri et al., (2013) menunjukkan bahwa sebagian besar pohon pinus di Kota Ishinomaki (Prefektur Miyagi) mampu menahan kekuatan tsunami dan tetap berdiri, kemungkinan besar karena kedalaman genangan yang relatif rendah di titik garis pantai ini. Okada dkk (2012) melakukan survei pasca bencana di kota yang sama, dan membandingkan kerusakan yang terjadi di daerah dengan dan tanpa pohon pinus. Meskipun permukaan tanah yang sama (relatif datar) dan kedalaman genangan tsunami di kedua wilayah studi, kerusakan bangunan yang lebih sedikit teramati di daerah yang ditumbuhi pohon pinus pantai. Tanaka (2012) menggunakan model numerik untuk memperkirakan perlindungan yang dapat diberikan oleh hutan pesisir selama Tsunami Tohoku 2011, dengan simulasi yang menunjukkan bahwa keberadaan hutan pesisir dapat mengurangi panjang area di mana rumah-rumah berpotensi rusak akibat gelombang sekitar 150 m (Takabatake et al., 2022).

Hiraishi and Harada (2003) dalam Andini & Rahayu, (2019) menjelaskan tentang Efek mitigasi pada hutan pesisir dengan pohon *Hibiscus tiliaceus* (pohon waru) di Sissano, Papua Nugini yang memberikan efek pengurangan substansial dalam kedalaman genangan dan kekuatan hidrolis. Penurunan maksimum gaya hidrolis untuk satu lokasi adalah 275.000 N/m menjadi 900.000 N/m, atau sekitar 67% pengurangan kedalaman genangannya, dengan penghalang hutan dari empat pohon *H.tiliaceus* besar per 100 m².

Sistem mitigasi Hibrid Untuk Mitigasi Bencana Tsunami

Sejak GEJT 2011 yang berdampak pada Jepang secara nasional, banyak perbaikan telah dilakukan sebagai solusi struktur buatan dan alamiah untuk mengurangi dampak tsunami dan banjir pesisir (Pasha & Tanaka, 2017). Perencanaan pesisir dapat dilakukan sesuai dengan ketersediaan lahan di



sepanjang garis pantai dan mempertimbangkan hasil studi eksperimental sebelumnya tentang berbagai alternatif hibrida (Kimiwada et al., 2020; Rashedunnabi & Tanaka, 2019; Zaha et al., 2019).

Zaha et al., (2019) menyimpulkan bahwa solusi hibrid ke dalam urutan Vegetasi Moat dan tanggul laut dari sisi laut ke sisi darat memiliki pengurangan volume luapan, momen, dan waktu tempuh aliran tsunami yang paling tinggi. (Rashedunnabi & Tanaka, 2019) mendefinisikan penggunaan model hutan yang muncul satu lapis dan model hutan lapis ganda vertikal dengan model tanggul sebagai alternatif pendekatan hibrid dan menyelidiki pembentukan lompatan hidraulik, lokasi lompatan, dan karakteristik reduksi energi di bagian hilir pada model vegetasi.

Rashedunnabi & Tanaka, (2020) meneliti lebih lanjut tentang penggunaan vegetasi kaku lapis ganda untuk mengurangi kecepatan aliran tsunami dan gaya fluida dari genangan tsunami di belakang vegetasi. Mereka menyimpulkan bahwa penggunaan vegetasi lapis ganda lebih efektif dalam mengurangi kecepatan aliran dibandingkan dengan vegetasi lapis tunggal.

Selain itu, Zaha et al., (2019) menunjukkan bahwa penggunaan tanggul dan parit secara efektif mengurangi kecepatan aliran tsunami di bagian hilir struktur. Penggunaan vegetasi dengan infrastruktur (yaitu tanggul dan parit) dalam skala eksperimental menunjukkan bahwa model pohon tinggi lebih sesuai sebagai model vegetasi dalam mereduksi energi aliran air tsunami dan lebih tahan terhadap kerusakan akibat rasio tinggi batang terhadap tinggi pohon (Kimiwada et al., 2020; Zaha et al., 2019)

Penelitian Anjum & Tanaka, (2020), efek mitigasi dari hutan pantai yang tumbuh secara terus menerus dan divariasi dengan tanaman pendek diselidiki secara eksperimental untuk peredaman energi arus tsunami yang menggenang di bawah kondisi aliran subkritis. Hasilnya menunjukkan bahwa hutan dengan penempatan terputus-putus lebih efektif dalam menghasilkan resistensi terhadap arus dengan meningkatkan kenaikan air balik di bagian hulu dan mengurangi energi arus tsunami di bagian hilir, dibandingkan dengan hutan pantai yang menerus.

Rosenberger & Marsooli, (2022) menunjukkan peluang yang menarik bagi para insinyur untuk merancang struktur pantai hibrida dengan penggunaan vegetasi untuk meredam beban gelombang yang mereka rancang. Hasilnya menunjukkan bahwa vegetasi memiliki potensi untuk meningkatkan keandalan struktur pelindung pantai terhadap beban gelombang dan memungkinkan insinyur untuk mengurangi ukuran struktur tanpa mengurangi keandalannya.

Dari beberapa penelitian ini sejalan dengan penelitian yang akan dilakukan, yaitu dengan menggabungkan penanggulangan struktur buatan dengan *seawall* dan vegetasi pantai sebagai penanggulangan struktur alami.

KESIMPULAN

Dari tinjauan ini menunjukkan bahwa langkah-langkah mitigasi tsunami merupakan penelitian yang luas dan sangat menarik. Tsunami yang mengakibatkan kerusakan dan kematian yang sangat besar, semakin meningkatkan ketertarikan penelitian. Tsunami yang terjadi pada masa lampau menunjukkan bahwa kegagalan struktur atau mitigasi tsunami hanya dengan satu lapis perlindungan akan mengakibatkan bahaya yang lebih besar. Untuk itu pembangunan dengan pendekatan hibrid (menggabungkan struktur buatan dan vegetasi atau pun vegetasi dengan dua lapis perlindungan) diharapkan dapat lebih optimal dalam menanggulangi serangan tsunami dan meningkatkan upaya penanggulangan yang sudah ada.

DAFTAR PUSTAKA

Andini, A. S., & Rahayu, S. M. (2019). Kesesuaian Vegetasi Dalam Mitigasi Bencana Tsunami Di Teluk Sepi, Lombok Barat. *Media Bina Ilmiah*, 14(3), 2095. <https://doi.org/10.33758/mbi.v14i3.310>

- Anjum, N., & Tanaka, N. (2020). Study on the flow structure around discontinued vertically layered vegetation in an open channel. *Journal of Hydrodynamics*, 32(3), 454–467. <https://doi.org/10.1007/s42241-019-0040-2>
- Dissanayaka, K. D. C. R., Tanaka, N., & Vinodh, T. L. C. (2022a). Integration of Eco-DRR and hybrid defense system on mitigation of natural disasters (Tsunami and Coastal Flooding): a review. *Natural Hazards*, 110(1). <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04965-6>
- Dissanayaka, K. D. C. R., Tanaka, N., & Vinodh, T. L. C. (2022b). Integration of Eco-DRR and hybrid defense system on mitigation of natural disasters (Tsunami and Coastal Flooding): a review. *Natural Hazards*, 110(1). <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04965-6>
- Esmaeili, M., Rahbani, M., & Khaniki, A. K. (2019). Experimental Investigating on the Reflected Waves from the Caisson-Type Vertical Porous Seawalls. *Acta Oceanologica Sinica*, 38(6), 117–123. <https://doi.org/10.1007/s13131-019-1386-6>
- Kimiwada, Y., Tanaka, N., & Zaha, T. (2020). Differences in effectiveness of a hybrid tsunami defense system comprising an embankment, moat, and forest in submerged, emergent, or combined conditions. *Ocean Engineering*, 208(January), 107457. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107457>
- Nazir, M. (2014). *Metode Penelitian* (R. Sikumbang (ed.)). Ghalia Indonesia.
- Oetjen, J., Sundar, V., Venkatachalam, S., Reicherter, K., Engel, M., Schüttrumpf, H., & Sannasiraj, S. A. (2022). A comprehensive review on structural tsunami countermeasures. In *Natural Hazards* (Vol. 113, Issue 3). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05367-y>
- Pasha, G. A., & Tanaka, N. (2017). Undular hydraulic jump formation and energy loss in a flow through emergent vegetation of varying thickness and density. In *Ocean Engineering* (Vol. 141, pp. 308–325). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.049>
- Rashedunnabi, A. H. M., & Tanaka, N. (2019). Energy Reduction of a Tsunami Current Through a Hybrid Defense System Comprising a Sea Embankment Followed by a Coastal Forest. *Geosciences (Switzerland)*, 9(6), 1–27. <https://doi.org/10.3390/geosciences9060247>
- Rashedunnabi, A. H. M., & Tanaka, N. (2020). Effectiveness of double-layer rigid vegetation in reducing the velocity and fluid force of a tsunami inundation behind the vegetation. *Ocean Engineering*, 201(February), 107142. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107142>
- Rosenberger, D., & Marsooli, R. (2022). Benefits of vegetation for mitigating wave impacts on vertical seawalls. *Ocean Engineering*, 250(March), 110974. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110974>
- Santoso, A. J., Dewi, F. K. S., & Sidhi, T. A. P. (2015). Natural disaster detection using wavelet and artificial neural network. *Proceedings of the 2015 Science and Information Conference, SAI 2015*, 761–764. <https://doi.org/10.1109/SAI.2015.7237228>
- Sato, S. (2015). Characteristics of the 2011 Tohoku Tsunami and introduction of two level tsunamis for tsunami disaster mitigation. *Proceedings of the Japan Academy Series B: Physical and Biological Sciences*, 91(6), 262–272. <https://doi.org/10.2183/pjab.91.262>
- Suppasri, A., Shuto, N., Imamura, F., Koshimura, S., Mas, E., & Yalciner, A. C. (2013). Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Tsunami: Performance of Tsunami Countermeasures, Coastal Buildings, and Tsunami Evacuation in Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 170(6–8), 993–1018. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0511-7>
- Takabatake, T., Esteban, M., & Shibayama, T. (2022). Simulated effectiveness of coastal forests on reduction in loss of lives from a tsunami. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 74(March), 102954. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102954>
- Tamrin, Pallu, S., Parung, H., & Thaha, A. (2014). Experimental Study of Perforated Concrete Block Breakwater. *International Journal of Engineering and Technology*, 14(3), 6–10.
- Umeda, S., Saitoh, T., Furumichi, H., Nakaguchi, A., & Ishida, H. (2013). Reduction of Tsunami Inundation Flow and Tsunami Force by a Porous Vertical Barrier Mounted on a Seawall. 69(2), 323–328. https://doi.org/10.2208/kaigan.69.I_766
- Wibowo, T. W., Mardiatno, D., & Sunarto, S. (2017). Pemetaan Risiko Tsunami terhadap Bangunan secara Kuantitatif. *Majalah Geografi Indonesia*, 31(2), 68. <https://doi.org/10.22146/mgi.28044>