

# Catatan tentang Perencanaan Tembok Laut untuk Mitigasi Bencana Tsunami

\*Radianta Triatmadja,<sup>1</sup> Warniyati<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Pattimura, Ambon

\*)[radiana@ugm.ac.id](mailto:radiana@ugm.ac.id)

Received: 1 November 2020 Revised: 15 Juni 2021 Accepted: 21 Juni 2021

## Abstract

*Many coastal structures or structures in coastal areas were destroyed by a tsunami attack. Such destructions were due primarily to the fact that such structures were not designed to withstand a tsunami. Those which were designed to withstand tsunami force may also have been destroyed due to some damaging factors which were not included in the design. The damage of the coastal structures is one of the important factors that have caused casualties. Especially, when the destroyed structures were originally aimed to mitigate the area against tsunami, they may cause higher fatalities. Examples of such structures are sea walls in many parts of Japan which were destroyed by the 2011 tsunami. This paper discusses the important factors relevant to the damage of seawall as tsunami mitigation structure such as impact force due to tsunami front, hydrostatic force, and hydrodynamic force, debris force and scour due tsunami. The study was carried out based on literature about the damages of seawall as tsunami protection structures and laboratory experiment reports. The destructions to the structures were divided into three classifications namely instantaneous direct destruction due to impact and drag forces, slowly direct destruction due to drag force, and slowly indirect destruction due to scour. Finally, important aspects to be considered in the design of seawall as tsunamis protection were proposed.*

**Keywords:** *Tsunami, mitigation, stability, force, scour*

## Abstrak

*Bangunan pantai atau bangunan di sekitar pantai banyak yang runtuh akibat diserang tsunami. Kegagalan bangunan tersebut terutama terjadi karena tidak dirancang untuk menahan tsunami. Bangunan yang dirancang untuk bertahan terhadap tsunami, mungkin juga gagal karena tidak memasukkan faktor yang mungkin terjadi dalam rancangan. Kerusakan bangunan merupakan salah satu penting yang mengakibatkan korban tsunami. Apa lagi jika bangunan tersebut ditujukan untuk mitigasi tsunami, maka kegagalannya dapat melipatgandakan korban bencana. Bangunan tersebut misalnya adalah tembok laut di Jepang yang ternyata banyak yang runtuh saat tsunami tahun 2011. Makalah ini membahas faktor-faktor penting dan relevan dengan kerusakan tembok laut sebagai bangunan mitigasi tsunami misalnya gaya impak front tsunami, gaya hidrostatik dan hidrodinamik, gaya akibat debris, dan gerusan akibat tsunami. Studi didasarkan pada pustaka tentang kerusakan tembok laut untuk mitigasi tsunami dan laporan hasil laboratorium. Kerusakan bangunan dibagi menjadi tiga yaitu kerusakan seketika secara langsung, kerusakan perlahan lahan secara langsung, dan kerusakan perlahan lahan tidak langsung akibat gerusan. Akhirnya, diusulkan faktor-faktor penting yang harus diperhatikan dalam perencanaan tembok laut untuk mitigasi bencana tsunami.*

**Kata kunci:** *Tsunami, mitigasi, stabilitas, gaya, gerusan*

## Pendahuluan

Tsunami merupakan bahaya laten bagi seluruh rakyat Indonesia. Disebut laten, karena akan selalu ada dan setiap saat mengancam hampir semua pantai di Indonesia. Disebut bagi seluruh rakyat

Indonesia, karena dampak tsunami kadang begitu besar yang akibatnya secara langsung maupun tidak langsung, baik moril maupun materiil harus diderita oleh seluruh rakyat Indonesia. Beberapa kejadian tsunami terakhir seperti di Aceh, Pangandaran, Palu dan Selat Sunda menunjukkan betapa skala

Tsunami yang terjadi di Indonesia tidak bisa diabaikan begitu saja. Selama tahun 2000-2018 terjadi 28 kali tsunami di Indonesia (BMKG, 2018). Triatmadja (2010) berdasarkan data dari *National Oceanic and Atmospheric Administration* (USA), menyebutkan bahwa frekuensi tsunami di Indonesia sekitar satu kali setiap tiga tahun, dalam 200 tahun terakhir dan terus meningkat. Oleh karena itu, perencanaan mitigasi bencana tsunami yang sistematis, benar dan bertanggung jawab menjadi tantangan bagi bidang Teknik Sipil.

Dalam skala tsunami seperti di Selat Sunda yang mungkin termasuk kecil sampai sedang dengan ketinggian 1-3 m (Takabatake *et al.*, 2019), ternyata desain infrastruktur pantai kita belum memperhitungkan bencana tsunami tersebut sebagai ancaman. Tsunami selat Sunda adalah salah satu bentuk tsunami yang tidak didahului dengan gempa yang signifikan (Syamsidik *et al.*, 2020), sehingga kerusakan infrastruktur di pantai benar-benar akibat tsunami secara langsung. Kerusakan tersebut dapat di klasifikasikan sebagai kerusakan struktur karena gaya dinamik tsunami, kerusakan struktur karena debris yang dibawa tsunami dan kerusakan struktur karena gerusan oleh tsunami.

Pada tahun 2011, Jepang juga dilanda tsunami. Perbedaannya dengan selat Sunda adalah selain adanya gempa bumi, tsunami di Jepang termasuk skala besar. Tsunami Jepang tahun 2011 dikategorikan sebagai tsunami level 2 dengan tinggi genangan lebih dari 10 m bahkan di beberapa tempat tinggi genangan mencapai 20-30 m (Shibayama *et al.*, 2013). Pantai timur Jepang telah dilindungi oleh infrastruktur Teknik Sipil yang sangat hebat yaitu tembok laut tsunami yang sangat tinggi (Suppasri *et al.*, 2012, Yeh *et al.*, 2013). Namun demikian, tsunami tahun 2011 ternyata lebih tinggi dari prediksi sehingga tsunami melimpasi tembok laut. Akibatnya, selain kerusakan tembok laut oleh gaya dinamik tsunami juga terjadi gerusan di belakang tembok laut (Ishikawa *et al.*, 2011). Setelah melimpasi dan merusakkan tembok laut, maka tsunami dengan mudah menerjang dan merusak bangunan yang awalnya terlindungi oleh tembok laut tersebut.

Menurut Yeh *et al.* (2014), kerusakan yang terjadi akibat tsunami di Jepang dapat diklasifikasikan sebagai kerusakan oleh gaya hidrodinamik, gaya hidrostatik, gaya impulsif, dan kerusakan karena debris. Menurut Sugano *et al.* (2014), kerusakan bangunan pantai akibat tsunami dapat diakibatkan oleh gerusan di sekitar bangunan yang mengakibatkan bangunan mengalami kerusakan lebih lanjut. Melihat berbagai macam kerusakan tersebut maka peran Teknik Sipil dalam perencanaan bangunan yang kuat terhadap gaya

dinamik baik oleh tsunami maupun oleh debris, gaya impact dari debris serta gerusan oleh tsunami sangat penting. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari berbagai faktor yang perlu diperhatikan dan diakomodasi dalam rangka perencanaan tembok laut untuk mitigasi bencana tsunami.

## Metode

Penelitian ini sebagian besar didasarkan pada literatur tentang kerusakan bangunan mitigasi tsunami yang telah ada. Kajian kerusakan bangunan dan analisis juga dilakukan oleh penulis berdasarkan teori yang tersedia. Setiap faktor perusak dikaji dan disimpulkan sementara dalam sub bab tersendiri. Selanjutnya faktor perusak diklasifikasikan untuk lebih memudahkan pemahaman peta faktor perusak yang perlu mendapat perhatian dalam perencanaan bangunan mitigasi tsunami.

## Pembahasan

### Gaya akibat tsunami pada bangunan

Gaya tsunami pada bangunan dapat dikelompokkan menjadi empat. Pertama adalah gaya *front* tsunami, yaitu gaya ujung tsunami pada bangunan. Aliran superkritik pada *front* (ujung) tsunami sangat besar sehingga gayanya sangat besar pula. Kedua, gaya *drag* tsunami, yaitu gaya setelah ujung tsunami melewati bangunan tersebut. Pada kondisi ini, kecepatan tsunami tidak secepat bagian ujung, tetapi kedalaman tsunami lebih besar dari bagian ujung tsunami. Gaya *drag* ini akan diperparah oleh debris yang tersangkut pada bangunan sehingga menambah luas bangunan (Yeh *et al.*, 2014). Ketiga adalah gaya *drag* karena *draw-down*. Gaya *drag* ini diakibatkan oleh kembalinya air ke laut. Tsunami yang besar dengan kecepatan yang cukup besar akan membawa debris kembali ke laut. Bangunan yang sebelumnya selamat karena gaya *drag* tsunami saat *run-up*, belum tentu selamat karena gaya seret akibat *draw-down* jika saat air surut tsunami membawa debris dan kebetulan tersangkut pada bangunan tersebut. Keempat adalah gaya hidrostatika tsunami. Selisih gaya hidrostatika di luar dan di dalam bangunan mampu merusakkan tembok tersebut. Untuk lebih jelasnya, gaya tsunami pada bangunan dan bahayanya diberikan pada Tabel 1.

### Gaya *front* tsunami pada bangunan

Gaya *front* tsunami pada bangunan dapat didekati dengan menggunakan perubahan momentum. *Surge* tsunami dengan kedalaman  $h$ , dan kecepatan  $U$  jika menabrak bangunan gaya yang bekerja pada

Tabel 1. Karakter gaya tsunami pada bangunan

Hal	Gaya impak <i>front</i>	Gaya <i>drag</i> saat <i>run-up</i>	Gaya <i>drag</i> saat <i>run-down</i>	Gaya hidrostatis
Waktu	Relatip singkat saat ujung tsunami mengenai bangunan	Terjadi selama <i>run-up</i>	Terjadi selama <i>run-down</i>	Lama, saat <i>run-up</i> dan <i>run-down</i>
Pengaruh	Mampu merusakkan bangunan karena gaya impak	Gaya <i>drag</i> dapat meruntuhkan bangunan apalagi jika ditambah debris	Gaya <i>drag</i> dapat meruntuhkan bangunan apalagi jika ditambah debris	Merusakkan/ merobohkan dinding
Keberadaan debris	Menghasilkan dan membawa debris	Gaya debris menambah gaya <i>drag</i>	Tidak secepat <i>run-up</i> , gaya debris menambah gaya <i>drag</i>	-
<i>Slope</i>	Untuk <i>slope</i> positif (semakin tinggi kedataran) kecepatan berkurang, gaya tereduksi	Untuk <i>slope</i> positif (semakin tinggi kedataran) kecepatan berkurang, gaya tereduksi	Untuk <i>slope</i> positif (semakin tinggi kedataran) kecepatan <i>run-down</i> lebih tinggi	-

bangunan dapat dihitung menurut Persamaan 1.

$$F = \frac{d mU}{dt} \quad (1)$$

dengan  $m$  adalah massa dan  $t$  adalah waktu. Pada waktu singkat sebelum membentur tembok dan menganggap  $U$  dan  $h$  konstan, maka Persamaan 1 dapat ditulis sebagai Persamaan 2 dan Persamaan 3, dengan  $Q$  adalah debit,  $B$  adalah lebar bangunan, dan  $\rho$  adalah rapat massa air.

$$F = \rho Q dU \quad (2)$$

atau

$$F = \rho B h U dU \quad (3)$$

Setelah menabrak tembok atau bangunan, mungkin gelombang direfleksikan atau berhenti mendadak. Persamaan 3 dapat ditulis menjadi Persamaan 4.

$$F = C_1 B \rho h U U \quad (4)$$

dengan  $C_1$  adalah koefisien.

Persamaan 4 dapat ditulis sebagai Persamaan 5 dengan  $g$  adalah percepatan gravitasi bumi.

$$F = C_1 B \rho g h^2 \frac{U^2}{gh} \quad (5)$$

Untuk setiap satuan lebar, Persamaan 5 dapat ditulis sebagai Persamaan 6 dan 7 dengan  $Fr$  adalah angka Froude.

$$F = \left( C_1 \frac{U^2}{gh} \right) \rho g h^2 \quad (6)$$

atau

$$F = (C_1 Fr^2) \rho g h^2 \quad (7)$$

Persamaan 7 menjadi persamaan gaya hidrostatis jika yang berada di dalam kurung adalah  $\frac{1}{2}$ . Pada Persamaan 7, harga yang berada dalam kurung bisa jauh lebih besar dari  $\frac{1}{2}$ . Di lokasi dekat dengan garis

pantai harga  $Fr$  mencapai 2 atau lebih. Sehingga untuk  $C_1$  sama dengan 1, angka dalam kurung bisa mencapai 4, atau 8 kali gaya hidrostatis (bandingkan dengan USA-EWES-CERC, 1990). Pada lokasi di daratan agak jauh dari pantai,  $U$  berkurang, demikian juga  $Fr$  karena kemungkinan banyaknya gesekan dengan pohon dan bangunan serta debris. Untuk bangunan dekat pantai dan berdasarkan penelitian sebelumnya, Triatmadja & Nurhasanah (2012) menunjukkan bahwa  $C_1 Fr^2$  berkisar antara 0,67 sampai dengan 7. Namun demikian umumnya antara 4 sd 4,5 termasuk di dalamnya FEMA P464 (2008)  $C_1 Fr^2 = 4$ , USA-EWES-CERC (1990) (2005)  $C_1 Fr^2 = 4,5$ .

Triatmadja & Nurhasanah (2012) mengusulkan Persamaan 8 dan 9 berturut-turut untuk gaya tsunami pada bangunan seluas  $A$ , dengan lubang  $n$  tanpa perlindungan dan dengan bangunan pelindung yang sama lebarnya dan kuat menahan tsunami sejauh  $S$  di depan bangunan. Harga  $C_f$  adalah 1,03.

$$F = C_f \rho (1 - n^2) B h U^2 \quad (8)$$

$$F = \begin{cases} 0,4 C_f \rho (1 - n^2) \frac{S}{Fr,h} A U^2 & \left( \frac{S}{Fr,h} \leq 2 \right) \\ 0,8 C_f \rho (1 - n^2) A U^2 & \left( 2 < \frac{S}{Fr,h} < 5 \right) \end{cases} \quad (9)$$

Persamaan 8 digunakan untuk bangunan dinding penahan tsunami atau bangunan biasa yang tidak terlindung. Hayashi *et al.* (2012) memperkirakan bahwa kerusakan pada dinding luar bangunan 2 lantai di kota Onagawa yang berjarak 100 m dari laut lebih dari 24,0 kN/m<sup>2</sup> saat tsunami Jepang tahun 2011. Gaya guling yang terjadi sangat besar sehingga kesalahan melakukan penulangan beton dapat berakibat fatal. Fondasi bangunan juga harus diperhitungkan terhadap gaya guling yang besarnya memang tidak biasa terjadi untuk bangunan Teknik

Sipil. Berbagai kegagalan struktur akibat gaya hidrodinamik dan hidrostatik dapat dilihat misalnya dalam Suppasri *et al.* (2013). Khusus untuk struktur baja, kajian rinci dapat dilihat dalam Cheung & Robertson (2014). Beban lateral pada dinding vertikal akibat tsunami dapat dipelajari dalam Robertson *et al.* (2013). Hal-hal terkait dengan gaya *front* tsunami seperti di atas penting dalam perencanaan bangunan mitigasi tsunami atau yang akan digunakan untuk evakuasi.

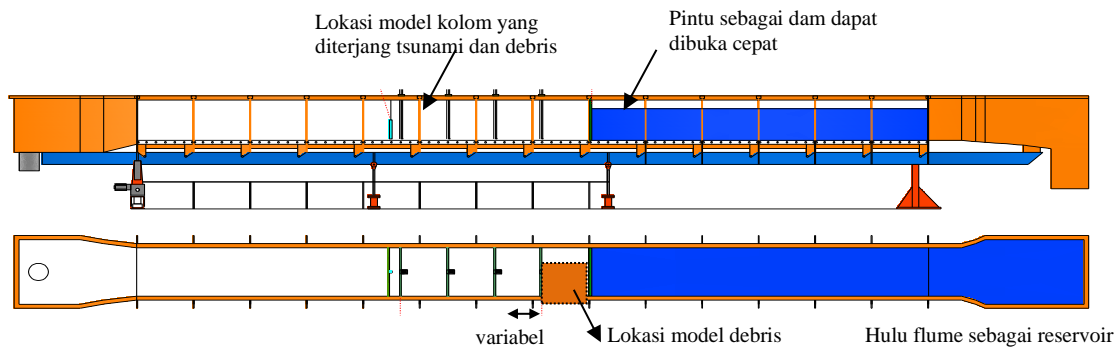
### Gaya debris pada bangunan

Debris kadang kurang diperhitungkan dalam mitigasi tsunami. Gaya dampak debris sangat besar karena hanya tertuju pada luasan yang kecil. Ko *et al.* (2015) dan Riggs *et al.* (2014) menyatakan bahwa besarnya gaya dampak oleh debris pada struktur berkorelasi secara linier terhadap kecepatan dampak.

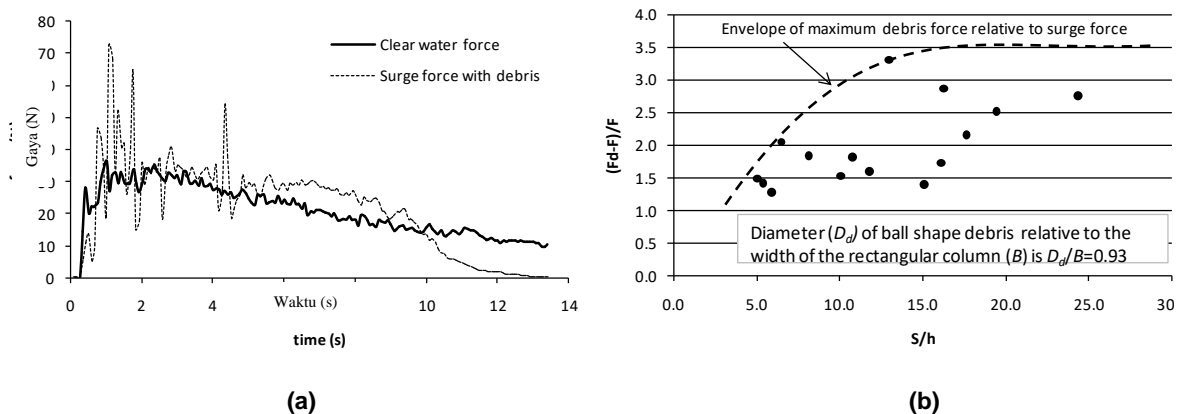
Indriyani *et al.* (2013) menunjukkan bahwa gaya debris pada bangunan sangat besar karena waktu dampak antara debris dan bangunan yang sangat kecil yaitu hanya 3 mili detik. Dengan durasi dampak yang sangat kecil maka perubahan momentum per detik menjadi sangat besar. Simulasi debris dengan

menggunakan bola-bola beton. Debris diletakkan dalam *flume* (panjang 17,5 m, lebar 0,6 m) yang kemudian diterjang model tsunami yang merupakan model *dam break* hasil dari pembukaan pintu secara cepat (Gambar 1). Metode mensimulasikan tsunami dengan *dam break* dikaji secara lebih mendalam oleh Kuswandi & Triatmadja (2019). Mereka menyimpulkan bahwa *surge* yang ditimbulkan oleh *dam break* mirip dengan *surge* dari tsunami yang sebenarnya dengan memenuhi persyaratan panjang reservoir terhadap kedalaman reservoir.

Hasil penelitian Indriyani *et al.* (2013) menunjukkan bahwa debris bertambah cepat dan menuju konstan pada kecepatan sekitar 70% dari kecepatan *surge*. Dengan kecepatan tersebut, saat mengenai kolom, gaya yang diakibatkan jauh lebih besar dari gaya *surge*. Gambar 2 menunjukkan bahwa debris yang berukuran relatif kecil mampu memberikan gaya hampir 3,5 kali gaya hidrodinamik. Indriyani *et al.* (2013) mengindikasikan adanya jarak optimum yang mengakibatkan gaya debris paling besar. Hal tersebut karena pada jarak dekat debris belum mencapai kecepatan puncak, sedang pada jarak yang jauh, kecepatan debris sudah menurun karena kecepatan *surge* yang berkurang.



Gambar 1. Model tsunami dengan *dam break* dan debris (d disesuaikan dari Indriyani *et al.*, 2013)



Gambar 2. Gaya debris dibandingkan dengan gaya hidrodinamik tsunami. (a) Gaya saat kedalaman reservoir 30 cm, (b) Rasio gaya maksimum akibat debris terhadap gaya hidrodinamik (Indriyani *et al.*, 2013).

Tembok laut yang rusak oleh tsunami dan menjadi debris dapat terlempar jauh dari pantai. Saat tsunami di Selat Sunda 2018, salah satu tembok laut yang tidak direncanakan untuk mitigasi tsunami rusak parah dan menjadi debris yang membahayakan. Bongkahan batu yang direkat semen dengan ukuran sekitar 0,8 m x 0,8 m x 0,6 m banyak berserakan di belakang tembok laut tersebut. Salah satu contohnya ditunjukkan pada Gambar 3. Pada Gambar 3 ditunjukkan debris berupa pecahan tembok laut serta beberapa peti kemas kosong yang sebelumnya digunakan untuk kamar hotel di kawasan pantai tersebut.



**Gambar 3. Debris berupa pecahan tembok laut yang terseret ke daratan oleh tsunami di Selat Sunda 2018**

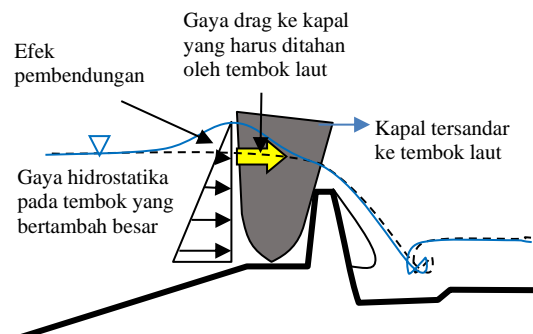
Selain terseret ke daratan, Inabah *et al.* (2020) menunjukkan bahwa debris dapat terseret ke laut akibat *run-down* tsunami.

Debris berupa perahu harus dipertimbangkan untuk daerah di sekitar pelabuhan ataupun daerah di sekitar perahu membuang sauh. Perahu dengan masa total yang besar misalnya 10.000 ton atau lebih, merupakan debris yang sangat berbahaya jika tidak terkendalikan dan hanyut bersama tsunami. Gaya yang bekerja pada kapal dan tembok laut dapat diperkirakan misalnya menggunakan Persamaan 10.

$$F_{max} = \frac{u^2 m}{\Delta x} \quad (10)$$

dengan  $F_{max}$  adalah gaya maksimum oleh debris,  $u$  adalah kecepatan saat menabrak,  $m$  adalah masa debris dan  $\Delta x$  adalah deformasi. Pada kondisi demikian, kapal besar (panjang) menambah beban hidrodinamik pada tembok laut dan mengakibatkan fenomena pembendungan seperti ditunjukkan oleh Gambar 4. Pada Gambar 4 ditunjukkan adanya tambahan gaya hidrodinamika (gaya *drag* pada kapal) dan tambahan gaya hidrostatika karena efek pembendungan. Fenomena ini seperti yang disampaikan oleh Nistor *et al.* (2017) bahwa debris yang tertahan pada bangunan akan memberikan tambahan beban dan berdampak pada struktur, terutama apabila keberadaan debris menyebabkan efek pembendungan. Berbagai kemungkinan gaya seperti disampaikan di atas perlu diperhatikan dalam merancang tembok laut untuk mitigasi

tsunami atau bahkan untuk membuat peraturan terkait dengan gaya hidrodinamik dan gaya debris pada bangunan mitigasi tsunami.



**Gambar 4. Kapal tersandar pada tembok dan menambah beban pada tembok laut**

### Gerusan oleh Tsunami

Gerusan akibat tsunami dapat mengakibatkan runtuhnya bangunan karena berkurangnya stabilitas terhadap guling dan geser (Kato *et al.*, 2012, Suppasri *et al.*, 2013, Jayaratne *et al.*, 2016). Akibat selanjutnya adalah bangunan tersebut menjadi debris yang terbawa tsunami dan merupakan ancaman bagi bangunan lain atau manusia.

Pada tahun 2011, pantai Jepang sebelah timur dilanda tsunami. Sepanjang 190 km tembok laut rusak diterjang tsunami di Iwate, Miyagi dan Fukushima (Supassri *et al.*, 2011). Disampaikan bahwa jika tinggi limpasan melebihi 3 sd 4 m, maka bangunan tembok laut rusak total. Kegagalan tembok laut tsunami di Jepang paling tidak memberikan dua pelajaran yang sangat berharga. Pertama, ternyata tsunami yang terjadi lebih tinggi dari yang diprediksi. Tinggi rendaman bertambah jika tsunami dihentikan oleh tembok sehingga energi kinetik tsunami berubah menjadi energi potensial. Benazir *et al.* (2016) menyimpulkan hal serupa berdasarkan model matematik. Artinya, tembok laut yang direncanakan harus mengantisipasi kemungkinan terjadinya limpasan. Kedua, limpasan tsunami menggerus bagian belakang tembok laut sehingga tembok laut tidak stabil dan terguling. Kegagalan tembok laut akibat gerusan ini mendorong pemahaman dan penelitian tembok laut tsunami untuk perencanaan yang lebih baik lagi.

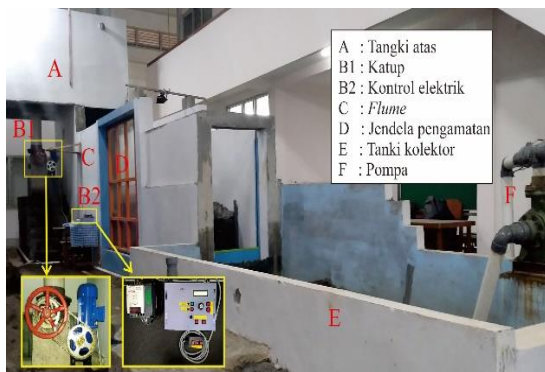
Sebenarnya, walaupun terlimpasi, tembok laut masih dapat berfungsi sebagai struktur mitigasi tsunami karena kemampuan tembok laut dalam hal: (a) Menunda terjadinya limpasan yang berarti memberi kesempatan untuk melakukan evakuasi. (b) Mengurangi kecepatan limpasan di daratan yang berarti mengurangi gaya tsunami pada bangunan maupun manusia yang diterjang. (c) Mengurangi kedalaman rendaman di daratan yang berarti



mengurangi dampak dan risiko bencana (tergantung panjang gelombang). (d) Mengurangi tinggi dan jarak *run up* terjauh, sehingga mengurangi dampak tsunami pada bangunan dan manusia.

Walaupun demikian Nateghi *et al.* (2016) menyatakan bahwa tembok laut yang relatif rendah (5 m) tidak efektif (untuk skala tsunami di Jepang tahun 2011). Efektifitas tembok laut tersebut mungkin lebih tinggi untuk ukuran tsunami yang tidak terlalu besar.

Penelitian tentang gerusan di belakang tembok laut dilakukan di Laboratorium Hidraulika Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada. Fasilitas untuk penelitian dibangun, dikalibrasi dan dicoba diterapkan oleh Banggana, *et al.* (2016) dan Warniyati *et al.* (2019) menunjukkan bahwa gerusan tsunami di belakang tembok laut dapat mencapai setinggi tembok laut tersebut, walaupun bagian hilir tembok laut telah dilindungi dengan batu lepas dengan diameter yang relatif besar. Gambar 5 menunjukkan fasilitas simulasi tsunami untuk gerusan di belakang tembok laut di Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan UGM. Fasilitas ini dirancang untuk dapat memodelkan hidrograf tsunami dengan kontrol debit air dari tangki yang dibuat lebih tinggi dari pada *flume*.



**Gambar 5. Perangkat laboratorium untuk pemodelan gerusan di belakang tembok laut di Laboratorium Hidraulika Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan UGM (diadaptasi dari Warniyati *et al.*, 2019).**

Beberapa penelitian gerusan akibat limpasan tsunami menggunakan aliran yang konstan (Kato *et al.*, 2012, Tsujimoto *et al.*, 2014, dan Wang *et al.*, 2016). Dengan kemampuan memodelkan hidrograf tsunami, alat yang dikembangkan oleh Warniyati, *et al.* (2019) dapat digunakan untuk mensimulasikan gerusan di belakang tembok laut dengan lebih realistis. Pada simulasi yang dilakukan, Warniyati menggunakan material lepas berupa batu kerikil dengan ukuran diameter rerata 2,5 cm. Tinggi

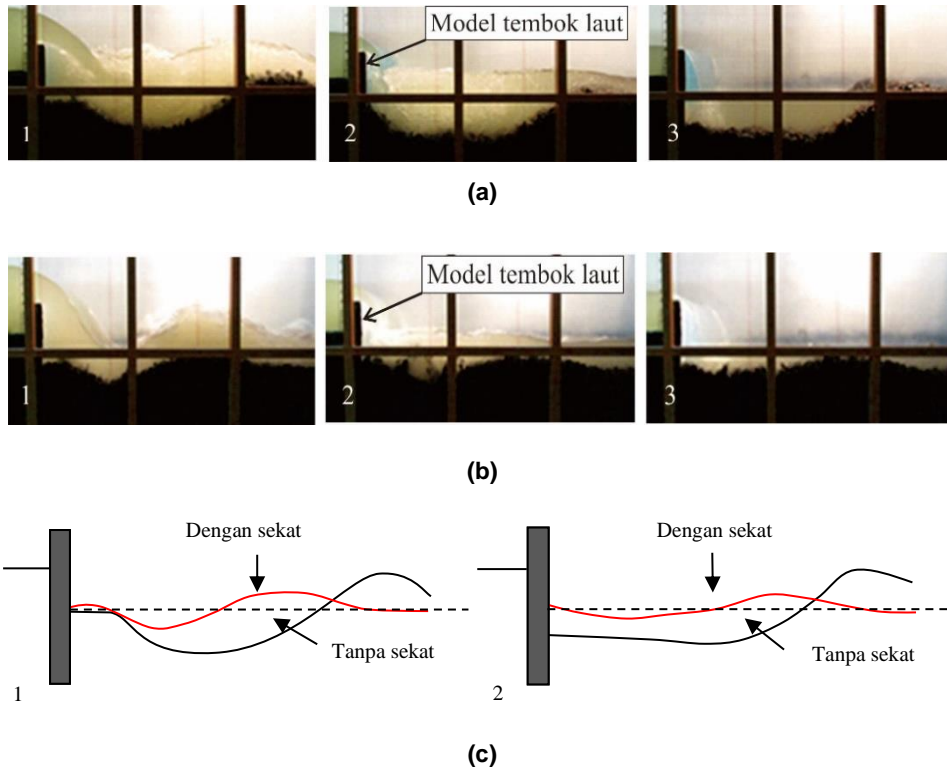
tembok 31 cm dari dasar sebelah hilir. Untuk tembok tsunami yang tidak terlalu tinggi, yaitu 9 m, maka skala model dapat dianggap sebagai 1: 30. Dengan demikian ukuran batu pelindung di sebelah hilir dalam prototip adalah 0,75 m dengan berat sekitar 0,6 ton. Hidrograph tsunami yang digunakan didasarkan pada Fritz *et al.* (2012) yaitu hidrograf tsunami yang terjadi di Jepang 2011.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa gerusan di belakang tembok laut dapat mencapai hampir setinggi terjunannya (Gambar 6a). Batu pelindung kaki terlempar jauh ke belakang sebagai debris dan mengumpul di belakang gerusan. Simulasi ini menunjukkan kemampuan tsunami dalam menggerus material batu lepas yang relatif berat dan melemparkannya sebagai debris lebih dari 50 m (prototip).

Gerusan dimulai ketika aliran tsunami cukup besar sehingga mampu mengangkat material pelindung fondasi. Karena aliran yang besar serta tinggi jatuh yang cukup besar, maka gerusan terjadi relatif jauh dari dinding tembok laut. Gambar 6a.1 menunjukkan saat gerusan mencapai maksimum. Hal serupa juga disampaikan oleh Triatmadja *et al.* (2011). Pada kondisi ini sebenarnya tembok laut masih terlindungi oleh material pelindung, namun demikian, setelah aliran tsunami menyusut, terjunan mendekati tembok laut sehingga gerusan terjadi sangat dekat dengan tembok laut dan membahayakan tembok laut.

Gambar 6a.2 dan 6a.3 menunjukkan saat tsunami mulai surut dan limpasan mulai menggerus bagian pinggir tembok. Kegagalan tembok laut pada saat aliran sudah kecil masih membahayakan karena sebenarnya muka air laut masih sedikit lebih tinggi dari tembok laut. Kegagalan tembok laut saat air masih tinggi akan mengakibatkan aliran yang sangat deras (*dam break*) dengan elevasi air setinggi tembok laut tersebut.

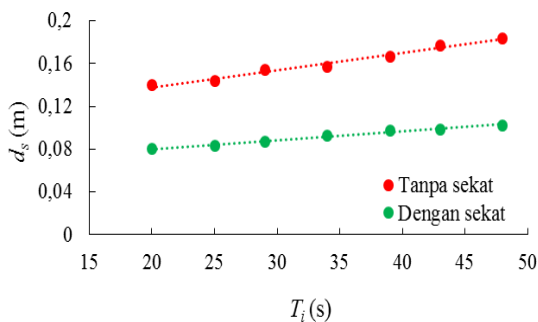
Warniyati *et al.* (2019) mengatasi gerusan yang membahayakan tersebut dengan memberikan sekat tembus air dalam model. Sekat dipasang vertikal sejajar dengan tembok laut dengan kedalaman melebihi kedalaman gerusan saat tanpa sekat. Sekat dimaksudkan untuk menjaga agar material batu pelindung hanya dapat terangkat vertikal atau paling tidak terangkat dengan sudut hampir vertikal mendekati 90° derajat. Oleh karenanya, jarak antara sekat dibuat tidak terlalu lebar. Hasilnya menunjukkan berkurangnya kedalaman gerusan secara signifikan (Gambar 6b). Gambar 6c menjelaskan perubahan kedalaman gerusan sebelum dan sesudah adanya sekat. Pada akhir hidrograf tsunami (Gambar 6c.2), gerusan



**Gambar 6. Gerusan di belakang tembok laut akibat tsunami. (a) tanpa perlindungan sekat, (b) dengan perlindungan sekat (Warniyati et al., 2019), (c) sketsa perbandingan gerusan**

bergeser mendekati tembok laut jika tanpa sekat namun tidak terjadi setelah adanya sekat. Gerusan di dekat tembok laut berkurang sangat signifikan (bandingkan gerusan di dekat tembok laut antara Gambar 6a.3 dan 6b.3 atau Gambar 6c) yang berpengaruh langsung terhadap stabilitas bangunan.

Gambar 7 juga mengindikasikan bahwa kedalaman gerusan setelah menggunakan sekat berkurang sekitar 40%.

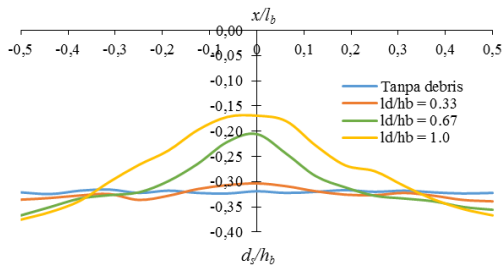


**Gambar 7. Gerusan di belakang tembok laut dilindungi sekat dan tidak dilindungi sekat (Warniyati et al., 2019).**

Gerusan oleh tsunami dapat dibandingkan dengan gerusan dibelakang bangunan terjunan misalnya berdasarkan Persamaan Fahlbusch (dalam Hoffmans & Verheij, 1997). Warniyati et al., 2019 menunjukkan bahwa gerusan akibat hidrograf

tsunami ternyata lebih dangkal dibanding Persamaan Fahlbusch. Perbedaan ini salah satu penyebabnya adalah perbedaan bentuk dan ukuran hidrograf. Permasalahan gerusan di belakang tembok laut bertambah rumit jika terjadi pembendungan akibat debris seperti halnya digambarkan pada Gambar 4. Kemungkinan adanya debris yang sangat besar terbawa oleh aliran tsunami menuju ke darat telah diuji di laboratorium.

Adanya kapal yang tersandar pada tembok laut mempengaruhi aliran limpasan di atas tembok laut. Hal ini sangat berpengaruh pada proses gerusan di bagian belakang tembok laut. Penelitian tentang pengaruh debris besar seperti kapal yang menempel pada tembok laut telah dilakukan oleh Warniyati, et al. (2020). Penelitian dilakukan dengan membuat variasi panjang debris ( $l_d$ ) relatif terhadap tinggi tembok laut ( $h_b$ ). Hasil penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 8. Gambar 8 menunjukkan bahwa perbedaan kedalaman gerusan ( $d_s$ ) pada bagian tengah debris dan bagian dinding flume sangat signifikan pada panjang debris relatif sebesar 1,0 dan 0,66 yaitu sebesar 54% dan 43%. Pada panjang debris relatif 0,33 perbedaan kedalaman gerusan hanya 10%. Jika dibanding kan dengan kondisi tanpa debris, pengurangan kedalaman gerusan pada bagian tengah debris adalah sebesar 47%, 36%, dan 5% untuk panjang debris relatif secara berturut-turut 1,0; 0,66 dan 0,33.

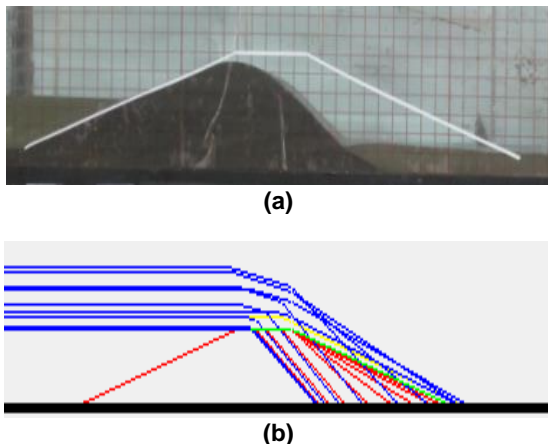


Gambar 8. Profil gerusan sepanjang tembok laut (Warniyati *et al.*, 2020)

### Reduksi Bahaya Tsunami Dengan Gumuk Pasir

Gumuk pasir terkadang banyak tersedia di pantai. Jika tidak, pasir dapat dikumpulkan dengan relatif mudah dengan pengerukan laut berpasir yang dapat digunakan sebagai bangunan sipil gumuk pasir untuk mitigasi tsunami. Gumuk pasir cukup menarik sebagai material pelindung pantai terhadap tsunami karena ketersediaannya, murah dan alami. Tsunami sulit untuk menembus gumuk pasir, namun jika tsunami mampu melimpasi gumuk pasir maka sangat membahayakan gumuk pasir.

Triatmadja *et al.* (2014) menguji kemampuan gumuk pasir dalam menahan limpasan tsunami menggunakan model fisik dan model matematik. Gambar 9a menunjukkan kondisi gumuk pasir setelah dilimpasi tsunami dalam model fisik. Hidrograf tsunami yang digunakan sangat pendek yaitu di bawah 1 menit. Model matematik yang dikembangkan oleh Triatmadja *et al.* (2014) memberikan hasil yang mirip dengan model fisik (Gambar 9b).



Gambar 9. Simulasi gerusan pada gumuk pasir yang terlampaui tsunami. (a) model fisik, (b) model matematik (diadaptasi dari Triatmadja *et al.*, 2014)

Garis biru menunjukkan elevasi muka air pada berbagai waktu. Semakin kecil  $D/d_0$ , ( $D$  adalah tinggi gumuk dan  $d_0$  adalah kedalaman reservoir

model tsunami) atau semakin rendah gumuk pasir terhadap tsunaminya, maka tingkat kerusakan gumuk semakin besar. Yang menarik adalah bahwa gumuk pasir masih tersisa cukup banyak dan masih bertahan melindungi bagian hilir. Gerusan di lereng belakang tidak menjadi masalah selama lereng masih stabil. Uji kemampuan gumuk pasir dalam menahan tsunami yang lebih panjang masih perlu dilakukan. Usaha memperkuat bagian hilir gumuk pasir adalah dengan mengganti pasir lepas dengan karung pasir memanjang tegak lurus tembok laut (Triatmadja *et al.* 2020). Karung pasir dapat diatur ukurannya agar stabil terhadap gaya drag dan hidrostatisa tsunami. Penelitian masih berlanjut dengan ketahanan tembok laut karung pasir terhadap gaya impact.

### Pembahasan dan rangkuman

#### Gaya tsunami pada bangunan

Dari uraian tentang gaya tsunami pada bangunan serta Persamaan 7, 8 dan 9, maka kajian tentang gaya tsunami perlu mengakomodasi berbagai kemungkinan. Gaya impact, yang terjadi pada saat ujung tsunami menghantam bangunan semakin besar jika bangunan semakin dekat dengan pantai. Berdasarkan Persamaan 8 dan 9, maka bangunan yang berada di dekat pantai seyogyanya kuat menahan tsunami. Dengan demikian bangunan di belakangnya merupakan bangunan terlindung dengan gaya impact yang sudah tereduksi.

Gaya impact tsunami pada bangunan berkurang secara signifikan dengan banyaknya persentasi lubang pada bangunan. Namun hal ini berakibat pada diteruskannya tsunami dan gaya impact tsunami pada bangunan di belakangnya. Gaya yang diteruskan berkurang dibanding dengan yang diterima bangunan di depannya yang bertindak sebagai bangunan penghalang. Sistem bangunan berlubang yang kuat terhadap tsunami serta berderet ke belakang (ke arah daratan) akan secara bertahap mengurangi dan meneruskan sebagian gaya tsunami ke hilir hingga pada akhirnya gelombang menerjang bangunan perumahan yang relatif lebih lemah saat gaya tsunami sudah relatif kecil. Sistem bangunan kuat terhadap tsunami yang mengurangi gaya tsunami di belakangnya dapat dipakai sebagai salah satu cara mitigasi tsunami.

Sebagai contoh dapat dilihat di Pantai Pangandaran saat terjadi tsunami tahun 2006. Bangunan yang relatif kuat (karena tsunaminya tidak terlalu besar) sejajar pantai di beberapa lokasi telah “menyelamatkan” bangunan di belakangnya. Oleh karenanya, bangunan dekat pantai juga harus lebih kuat dan mampu bertahan terhadap tsunami, setidaknya tidak hancur menjadi debris. Hal ini



supaya debris tidak menghantam bangunan di belakangnya dan mencelakai manusia.

Bangunan untuk evakuasi umumnya direncanakan dengan pilar-pilar dan lantai terbuka di bagian bawah. Tempat evakuasi diletakkan di lantai 2, 3 atau bahkan 4 tergantung posisi bangunan terhadap pantai. Belajar dari gaya tsunami pada pilar bangunan, maka sudah selayaknya pilar bangunan evakuasi dipertimbangkan terhadap gaya tsunami meliputi gaya *drag* dan *impak*.

### Debris

Bangunan mitigasi tsunami perlu diperhitungkan terhadap debris. Berbagai macam kemungkinan debris dapat diperkirakan dari bangunan, benda terapung maupun material lain di sekitarnya (menuju laut) yang jika terjadi tsunami akan tersapu dan menjadi debris. Jika diperkirakan ada debris yang cukup besar atau signifikan menghantam bangunan mitigasi atau bangunan evakuasi, maka perlu dilakukan perlakuan khusus rancangan bangunan tersebut. Akibat debris adalah gaya *impak* langsung ke bangunan dan peristiwa pembendungan.

Debris yang menempel pada bangunan akan menambah gaya hidrodinamika dan hidrostatika pada bangunan. Dengan demikian perlakuan khusus dapat berupa perkuatan pada lokasi yang diperkirakan akan dikenai gaya *impak* debris atau pemberian *fender* atau perlindungan khusus tertentu. Selain itu, pembendungan perlu diperhitungkan sebagai tambahan beban dalam perhitungan stabilitas bangunan. Bangunan mitigasi tsunami perlu dirancang kuat menahan tsunami atau jika runtuh tidak akan menjadi debris yang membahayakan bangunan lain atau manusia. Jika runtuh dan menjadi debris diusahakan terjadi saat tsunami *run-down* sehingga mengarah ke laut (Inabah *et al.*, 2020).

### Gerusan akibat tsunami

Kedalaman gerusan harus diminimalkan dengan perbaikan struktur atau perlindungan bagian hilir bangunan dalam hal tembok laut. Stabilitas bangunan diperhitungkan berdasarkan kondisi setelah terjadi gerusan tersebut. Debris yang mengakibatkan pembendungan akan menambah gaya serta kemungkinan gerusan karena pola aliran dan arus yang berubah. Oleh karenanya, kemungkinan terjadinya pembendungan dan besarnya pembendungan perlu mendapat perhatian dan diperhitungkan dalam menentukan gerusan di sekitar bangunan, terutama bangunan mitigasi tsunami.

Bangunan tembok laut merupakan bangunan khusus yang dalam hal ini perlu dipandang sebagai bendungan yang jika runtuh maka air akan menerjang bagian hilir dengan hebat. Pengaruh runtuhnya tembok laut tsunami akan berakibat parah, karena massa air yang besar akan secara cepat menghantam daerah yang sebelumnya terlindungi (Gambar 10).

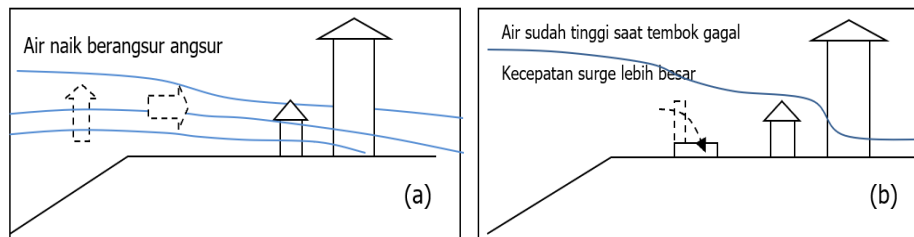
Gambar 10 menunjukkan perbandingan antara daerah yang tidak dilindungi tembok dan dilindungi tembok yang akhirnya runtuh. Jika tidak dilindungi tembok, air laut naik berangsur-angsur. Demikian pula gaya tsunami pada bangunan juga naik berangsur-angsur tergantung tinggi dan kecepatannya. Gaya *front* pada bangunan mungkin terjadi beberapa kali tidak sekaligus, tergantung pada bentuk dan jumlah gelombang tsunami.

Dislokasi dasar laut atau longoran sebagai sumber tsunami kemungkinan tidak terjadi sekaligus atau adanya pengaruh refleksi dari pulau maupun refraksi tsunami. Daerah yang dilindungi tembok laut akan aman selama tembok laut tidak runtuh. Tetapi jika tembok laut runtuh saat tsunami telah tinggi, maka kejadiannya seperti bendungan pecah. Kejadian seperti ini harus dihindari. Kerusakan gumuk pasir yang terlampas akan tergerus secara bertahap. Gerusan atau kegagalan yang tidak seketika ini mengurangi risiko karena aliran yang tidak secara tiba-tiba besar seperti kondisi bendungan pecah (*dam break*). Perbandingan kondisi kerusakan tembok laut dan gumuk pasir sebagai pelindung tsunami ditunjukkan pada Tabel 2.

### Klasifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kerusakan bangunan akibat tsunami

Faktor yang mempengaruhi kerusakan bangunan diberikan dalam Tabel 3. Faktor yang berpengaruh diberikan pada kolom ke-2. Kolom ke-3 menunjukkan klasifikasi faktor yang berpengaruh. Klasifikasi C-L berarti kejadiannya cepat atau singkat dan langsung akibat tsunami. Kerusakannya juga akan segera terjadi sehingga sangat berbahaya dan sangat perlu diperhatikan.

Klasifikasi L-L mengakibatkan kerusakan lambat yang langsung terjadi akibat tsunami. Kerusakan ini memberi tambahan waktu untuk evakuasi. Klasifikasi L-TL tidak selalu terjadi karena dipengaruhi oleh faktor lain dalam hal ini adalah perlindungan terhadap gerusan. Jika dapat dipastikan tidak terjadi gerusan maka kerusakan tidak terjadi, walaupun mungkin bahaya tsunami tetap ada karena limpasan. Kerusakan yang terjadi pada bangunan diberikan pada Tabel 3 kolom 4.



Gambar 10. Perbandingan kemungkinan serangan tsunami jika (a) tanpa perlindungan tembok laut dan (b) dengan tembok tsunami yang akhirnya terguling

Tabel 2. Kerusakan bangunan pantai dan akibatnya jika terjadi keruntuhan

Jenis bangunan pelindung tsunami	Jenis kerusakan	Akibat yang terjadi jika bangunan runtuh
Tembok laut	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Parapet tembok laut patah</li> <li>- Tembok laut bergeser</li> <li>- Tembok laut roboh</li> <li>- Gerusan di belakang tembok laut</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keruntuhan pada saat air sudah tinggi mengakibatkan aliran seperti bendungan pecah yang sangat merusak</li> <li>- Puing-puing bangunan dapat terseret ke daratan sehingga berbahaya bagi manusia maupun bangunan yang ada di daratan</li> <li>- Puing-puing yang tertahan pada bangunan dapat menambah luas bidang tekan pada bangunan sehingga meningkatkan resiko kerusakan</li> </ul>
Gumuk pasir	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gerusan pada dinding sisi laut</li> <li>- Gerusan pada bagian puncak</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keruntuhan terjadi berangsur-angsur sehingga daya rusaknya lebih rendah dibandingkan dengan keruntuhan tembok laut.</li> <li>- Material runtuh berupa pasir sehingga tingkat bahaya bagi manusia dan bangunan lebih kecil dibandingkan puing-puing tembok laut.</li> </ul>

Tabel 3. Faktor yang berpengaruh, klasifikasi dan jenis kerusakan yang ditimbulkan pada tembok laut

Jenis bahaya	Faktor yang berpengaruh	Klasifikasi	Kerusakan
Tsunami	gaya impact dan <i>drag</i> ( <i>run-up</i> )	C-L	pecah, rusak, patah, runtuh, tergeser, pindah, terguling
	gerusan akibat limpasan	L-TL	terguling, tergeser (horizontal, vertikal), berkurang elevasinya, runtuh
	gaya impact debris yang terbawa	C-L	pecah, rusak, patah
	gaya <i>drag</i> ( <i>run-down</i> )	L-L	pecah, rusak, patah, runtuh, tergeser, pindah, terguling
Debris	gaya hidrostatika	L-L	runtuh, rusak, patah
	gaya angkat	C-L	tergeser, pindah
	pengaruh pada gerusan	L-TL	terguling, tergeser (horizontal, vertikal)
	pengaruh pada tambahan gaya <i>drag</i>	L-L	rusak, patah, runtuh, tergeser, pindah, terguling

Keterangan: C-L: cepat langsung; L-L: lambat langsung, L-TL: lambat tidak langsung,

## Kesimpulan

Selain harus kuat terhadap gempa, bangunan mitigasi dan evakuasi tsunami perlu direncanakan dengan memperhatikan berbagai faktor antara lain mampu menahan gaya impact dari tsunami *front* sesuai dengan Persamaan 7, 8 dan 9. Mampu menahan gaya hidrostatik dan hidrodinamik tsunami setelah gaya impact berakhir. Mampu menahan gaya impact dari debris dihitung berdasarkan Persamaan 10. Besaran defleksi perlu diperkirakan berdasarkan pengalaman atau

penelitian yang ada. Jika perlu dapat dilakukan perlindungan khusus pada bangunan untuk menambah defleksi. Mampu menahan gaya akibat pembendungan oleh debris. Debris berupa perahu yang tersangkut pada tembok laut perlu dipikirkan kemungkinannya dan akibatnya, baik berupa tambahan gaya maupun gerusan. Mampu bertahan dan tetap stabil jika terjadi erosi dan gerusan. Stabilitas bangunan dihitung berdasarkan gerusan yang terbesar di kaki tembok laut. Harus direncanakan tidak boleh gagal walaupun masih diperkenankan terlampaui. Gaya pada kesimpulan

butir 1, 2, 3, 4 dan kondisi pada butir 5 digunakan atau bekerja pada saat yang sama dalam perhitungan stabilitas. Gaya tsunami saat *run-down* perlu diakomodasi.

## Daftar Pustaka

- Bangguna, D.S.V.L., Triatmadja, R., & Yuwono, N. (2016). *Simulation of Tsunami Attack on Seawall Caisson*. In Proceeding of 20th Congress of IAHR-APD 2016, Colombo, Sri Lanka.
- Benazir, Triatmadja, R., Rahardjo, A.P., & Nur Yuwono. (2016). *Studi Interaksi Gelombang Tsunami terhadap Struktur Mitigasi dan Pengaruhnya dalam Pembentukan Run-up di Daratan Pantai*. In Pertemuan Ilmiah Tahunan HATHI XXXIII.
- BMKG. (2018). *Katalog tsunami Indonesia tahun 416-2018*. <https://cdn.bmkg.go.id/Web/Katalog-Tsunami-Indonesia-pertahun-416-2018.pdf>
- Cheung, V., & Robertson, I.N. (2014). *Evaluating the effects of tsunami loading on prototypical steel structures*. <http://www.cee.hawaii.edu/wp-content/uploads/UHM-CEE-14-02.pdf>
- Fritz, H.M., Phillips, D.A., Okayasu, A., Shimozono, T., Liu, H., Mohammed, F., ... Takahashi, T. (2012). The 2011 Japan tsunami current velocity measurements from survivor videos at Kesennuma Bay using LiDAR. *Geophysical Research Letters*, 39(2), 1-6. <https://doi.org/10.1029/2011GL050686>
- Hayashi, K., Tamura, S., Nakashima, M., Cheung, Y. ., & Hoki, K. (2012). *Evaluation of Tsunami Load and Building Damage Mechanism Observation in the 2011 off Pacific Coast of Tohoku Earthquake*. In 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon. [https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_1807.pdf](https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1807.pdf)
- Hoffmans, G. J. C. M., & Verheij, H. J. (1997). *Scour manual*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Inabah, R. F., Warniyati, Bangguna, D. S. V. ., Kuswandi, Legono, D., Yuwono, N., & Triatmadja, R. (2020). Mechanism of seawall destruction due to tsunami. *Science of Tsunami Hazards*, 39(3), 168-182. <http://www.tsunamisociety.org/393InabahEtAl.pdf>
- Indriyani, M., Triatmadja, R., & Kuswandi. (2013). *Debris Force on Rectangular Column due to Tsunami*. In The 4th International Workshop on Multimodal Sediment Disaster. Yogyakarta.
- Ishikawa, N., Beppu, M., Mikami, T., Tatesawa, H., & Asai, M. (2011). *Collapse Mechanism of Seawalls by Impulsive Load due to The March 11 Tsunami*. In 9th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures, 1-12. [http://www.koseisabo.gr.jp/report/H23/H23\\_11.pdf](http://www.koseisabo.gr.jp/report/H23/H23_11.pdf)
- Jayaratne, M.P. R., Premaratne, B., Adewale, A., Mikami, T., Matsuba, S., Shibayama, T., ... Nistor, I. (2016). Failure mechanisms and local scour at coastal structures induced by tsunami. *Coastal Engineering Journal*, 58(4), 1640017. <https://doi.org/10.1142/S0578563416400179>
- Kato, F., Suwa, Y., Watanabe, K., & Hatogai, S. (2012). Mechanisms of coastal dike failure induced by the great East Japan earthquake tsunami. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), 1-9. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.structures.40>
- Ko, H.T.S., Cox, D.T., Riggs, H.R., & Naito, C.J. (2015). Hydraulic experiments on impact forces from tsunami-driven debris. *Journal Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, 141(3), 1-11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000286](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000286)
- Kuswandi, & Triatmadja, R. (2019). The use of dam break model to simulate tsunami run-up and scouring around a vertical cylinder. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12(5), 1395-1406. <https://doi.org/10.29252/jafm.12.05.29216>
- Nateghi, R., Bricker, J.D., Guikema, S.D., & Bessho, A. (2016). Statistical analysis of the effectiveness of seawalls and coastal forests in mitigating tsunami impacts in Iwate and Miyagi prefectures. *Plos One*, 11(8), 1-21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158375>
- Nistor, I., Goseberg, N., & Stolle, J. (2017). Tsunami-driven debris motion and loads : A critical review. *Frontiers in Built Environment*, 3(January), 1-11. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00002>
- Riggs, H.R., Cox, D.T., Naito, C.J., Kobayashi, M.H., Piran Aghl, P., Ko, H.T.S., & Khowitar, E. (2014). Experimental and analytical study of water-driven debris impact forces on structures. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 136(4), 41603. <https://doi.org/10.1115/1.4028338>
- Robertson, I.N., Paczkowski, K., Riggs, H.R., & Mohamed, A. (2013). Experimental investigation of tsunami bore forces on vertical walls. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 135, 21601. <https://doi.org/10.1115/1.4023149>

- Shibayama, T., Esteban, M., Nistor, I., Takagi, H., Thao, N.D., Matsumaru, R., ... Ohira, K. (2013). Classification of tsunami and evacuation areas. *Natural Hazards*, 67(2), 365-386. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0567-4>
- Sugano, T., Nozu, A., Kohama, E., Shimosako, K., & Kikuchi, Y. (2014). Damage to coastal structures. *Soils and Foundations*, 54(4), 883-901. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.06.018>
- Suppasri, A., Koshimura, S., Imai, K., Mas, E., Gokon, H., Muhari, A., & Imamura, F. (2012). Damage characteristic and field survey of the 2011 great East Japan tsunami in Miyagi prefecture. *Coastal Engineering Journal*, 54(1), 1250005. <https://doi.org/10.1142/S0578563412500052>
- 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>
- Syamsidik, Benazir, Luthfi, M., Suppasri, A., & Comfort, L.K. (2020). The 22 December 2018 Mount Anak Krakatau volcanogenic tsunami on Sunda Strait coasts, Indonesia: Tsunami and damage characteristics. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 549-565. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-549-2020>
- Takabatake, T., Shibayama, T., Esteban, M., Achiari, H., Nurisman, N., Gelfi, M., ... Kyaw, T. O. (2019). Field survey and evacuation behaviour during the 2018 Sunda Strait tsunami. *Coastal Engineering Journal*, 61(4), 423-443. <https://doi.org/10.1080/21664250.2019.1647963>
- Triatmadja, R. (2010). *Tsunami: kejadian, penjalaran, daya rusak dan mitigasinya*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Triatmadja, R., Hijah, S.N., & Any Nurhasanah. (2011). *Scouring Around Coastal Structures Due to Tsunami Surge*. In the 6th Annual International Workshop & Expo on Sumatra Tsunami Disaster & Recovery 2011.
- Triatmadja, R., Hijah, S.N., Azizah, N., Kuswandi, & Dewanti, I. (2014). *Simulation of Sand Dune as a Tsunami Protection*. In the 19th IAHR-APD Congress 2014. Hanoi, Vietnam.
- Triatmadja, R., & Nurhasanah, A. (2012). Tsunami force on buildings with openings and protection. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 6(4), 1-17. <https://doi.org/10.1142/S1793431112500248>
- Triatmadja, R., Warniyati, Legono, D., Supraba, I., & Yuwono, N. (2020). *Stability of Sand Tube Seawall As a Tsunami Protection*. In Proceedings of the 22nd IAHR-APD Congress 2020. Sapporo, Japan.
- Tsujimoto, G., Mineura, R., Yamada, F., Kakinoki, T., & Uno, K. (2014). Scouring mechanism behind seawall from tsunami overflow and optimum conditions to reduce tsunami energy with an artificial trench. *Coastal Engineering Journal*, 1(34), 38. <https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/7396>
- USA-EWES-CERC. (1990). Wave force on a wall shoreward of the still-water line. *Coastal Engineering Technical Note (CETN IV-9)*, 12, 1-8. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1003863.pdf>
- Wang, D., Li, S., Arikawa, T., & Gen, H. (2016). ISPH simulation of scour behind seawall due to continuous tsunami overflow. *Coastal Engineering Journal*, 58(3), 104-115. <https://doi.org/10.1142/S0578563416500145>
- Warniyati, Triatmadja, R., & Yuwono, N. (2020). *The effect of large debris damming on scour behind a seawall due to tsunami*. In Proceedings of the 22nd IAHR-APD Congress 2020, Sapporo, Japan.
- Warniyati, Triatmadja, R., Yuwono, N., & Banggana, D.S.V.L. (2019). Design of a Facility for tsunami run up generation to study tsunami and seawall interaction. *Journal of The Civil Engineering Forum*, 5(1), 9-16. <https://jurnal.ugm.ac.id/jcef/article/view/39130>
- Warniyati, Triatmadja, R., Yuwono, N., Legono, D., & Supraba, I. (2019). *Simulation of Scouring Due to Tsunami at Downstream of a Seawall*. In Proceedings of the 38th IAHR World Congress, pp. 5658-5667. Panama City, Panama. <https://doi.org/doi:10.3850/38WC092019-1410>
- Yeh, H., Barbosa, A.R., Ko, H., & Cawley, J. (2014). Tsunami loadings on structures review and analysis. *Coastal Engineering*, 1-13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.9753/icce.v34.currents.4>