



Evaluasi Kegagalan Sistem Mitigasi Tsunami: Studi Kasus Tohoku 2011

Tri Ayu Lestari

Program Studi Pendidikan Fisika, FKIP, Universitas Nusa Cendana, Indonesia

Alamat: Jl. Adisucipto Penfui, Kupang, NTT, Indonesia

Korespondensi penulis: tri_lestari@staf.undana.ac.id*

Abstract. *The 2011 Tohoku tsunami stands as one of the most catastrophic natural disasters in Japan's history, resulting in massive loss of life, extensive property damage, and severe disruption to infrastructure along the northeastern coast. This study aims to examine the physical characteristics of the Tohoku tsunami and critically evaluate the factors that led to the failure of Japan's disaster mitigation systems. Utilizing an essay-based synthesis approach, this analysis draws from a range of previous research findings and post-disaster assessments. The tsunami was caused by a 9.0 magnitude megathrust earthquake off the eastern coast of Honshu, generating wave heights that exceeded 10 meters in several locations. The tsunami's immense energy produced destructive currents that penetrated deep inland, surpassing the protection capabilities of existing coastal defenses. The study identifies several contributing factors to the mitigation system's shortcomings: the design limitations of seawalls, which were not built to withstand such extreme events; delays and limitations in the early warning system's ability to reach all at-risk populations in time; and inadequate public preparedness, as the event exceeded historical precedents and training scenarios. These vulnerabilities highlight the need for integrated, adaptive disaster risk management strategies. Drawing lessons from Japan's experience, this study proposes recommendations for improving tsunami mitigation efforts in Indonesia. Key suggestions include reinforcing and redesigning coastal defense structures, advancing early warning technologies such as seabed sensors and coastal radar systems, and enhancing disaster literacy through public education and scenario-based training. By adopting a science- and technology-driven approach, Indonesia can strengthen its resilience and reduce vulnerability among coastal populations facing future tsunami threats.*

Keywords: *Disaster mitigation; Early warning system; Tohoku 2011 tsunami*

Abstrak. Tsunami Tohoku 2011 merupakan salah satu bencana alam paling dahsyat dalam sejarah Jepang, yang mengakibatkan korban jiwa dalam jumlah besar, kerusakan properti yang sangat luas, serta gangguan parah terhadap infrastruktur di sepanjang pesisir timur laut. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik fisik tsunami Tohoku dan mengevaluasi secara kritis faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan sistem mitigasi bencana di Jepang. Melalui pendekatan sintesis berbasis esai, analisis ini merujuk pada berbagai temuan penelitian dan laporan pascabencana. Tsunami ini dipicu oleh gempa megathrust bermagnitudo 9,0 yang terjadi di lepas pantai timur Pulau Honshu, menghasilkan gelombang tsunami dengan ketinggian lebih dari 10 meter di sejumlah lokasi. Energi tsunami yang sangat besar menimbulkan arus destruktif yang menjangkau jauh ke daratan, melampaui kemampuan perlindungan infrastruktur pesisir yang ada. Penelitian ini mengidentifikasi beberapa faktor utama penyebab kegagalan mitigasi, antara lain keterbatasan desain tanggul laut yang tidak dirancang untuk menghadapi peristiwa ekstrem, keterlambatan dan keterbatasan sistem peringatan dini dalam menjangkau seluruh populasi berisiko secara tepat waktu, serta kurangnya kesiapsiagaan masyarakat karena skenario bencana yang terjadi melebihi perkiraan sebelumnya. Kelemahan ini menegaskan pentingnya strategi manajemen risiko bencana yang terpadu dan adaptif. Berdasarkan pengalaman Jepang, penelitian ini merekomendasikan perbaikan sistem mitigasi tsunami di Indonesia, antara lain dengan memperkuat dan mendesain ulang infrastruktur pertahanan pesisir, mengembangkan teknologi peringatan dini seperti sensor dasar laut dan radar pantai, serta meningkatkan literasi bencana melalui edukasi publik dan pelatihan berbasis skenario. Pendekatan berbasis sains dan teknologi ini diharapkan dapat memperkuat ketangguhan serta mengurangi kerentanan masyarakat pesisir Indonesia terhadap ancaman tsunami di masa depan.

Kata kunci: Mitigasi bencana; Sistem peringatan dini; Tsunami Tohoku 2011.

1. LATAR BELAKANG

Mitigasi bencana merupakan komponen esensial dalam upaya mengurangi risiko dan dampak negatif yang ditimbulkan oleh bencana alam, khususnya di wilayah rawan gempa bumi dan tsunami. Pendekatan mitigasi yang efektif tidak cukup hanya berlandaskan pada teori dan simulasi, melainkan harus diperkuat dengan evaluasi empiris terhadap peristiwa bencana nyata yang telah terjadi di berbagai negara (Alexander, 2020). Melalui studi kasus terhadap bencana yang pernah terjadi, dapat diperoleh wawasan mendalam mengenai keefektifan strategi yang telah diterapkan dan celah-celah yang masih perlu diperbaiki. Pendekatan ini memungkinkan negara lain dengan risiko serupa untuk belajar dari pengalaman negara terdampak guna menghindari kesalahan yang sama dan mengadaptasi strategi yang terbukti efektif (Kelman, 2020).

Jepang merupakan salah satu negara dengan tingkat risiko bencana geologis tertinggi di dunia, karena letaknya di pertemuan empat lempeng tektonik utama: Pasifik, Filipina, Eurasia, dan Amerika Utara. Wilayah ini mengalami lebih dari 1.500 gempa bumi setiap tahun (Lay & Kanamori, 2011). Kondisi tersebut menjadikan Jepang sebagai negara yang sangat maju dalam pengembangan sistem mitigasi bencana. Sistem peringatan dini tsunami, infrastruktur tahan gempa, serta kebijakan evakuasi dan simulasi berkala menjadi bagian integral dari strategi mitigasi yang dijalankan pemerintah Jepang. Salah satu teknologi andalan mereka adalah Tsunami Early Warning System (TEWS) yang dikembangkan oleh Badan Meteorologi Jepang (JMA), yang memanfaatkan sensor dasar laut dan buoy tsunami untuk mendeteksi gelombang secara real-time (Satake, 2014). Selain itu, berbagai infrastruktur fisik seperti tanggul laut, gerbang anti-tsunami, dan bangunan berteknologi peredam getaran telah dibangun di wilayah pesisir yang rawan.

Namun demikian, meskipun memiliki sistem mitigasi yang sangat canggih, Jepang tetap mengalami kerugian besar saat menghadapi bencana Gempa dan Tsunami Tohoku tahun 2011. Gempa berkekuatan Mw 9.0 di lepas pantai timur laut Honshu memicu tsunami setinggi hingga 40 meter yang menghancurkan sebagian besar wilayah pesisir Tohoku (Lay, 2018). Lebih dari 15.000 jiwa meninggal dunia, dan lebih dari 120.000 bangunan hancur (Suppasri et al., 2012). Kejadian ini menimbulkan pertanyaan penting mengenai efektivitas sistem mitigasi yang telah dibangun Jepang: Mengapa kegagalan masih terjadi meskipun sistem mitigasi telah disiapkan secara komprehensif? Hal ini menunjukkan bahwa mitigasi bencana perlu terus dikaji ulang secara kritis dan disesuaikan dengan kemungkinan terburuk yang dapat terjadi di luar skenario yang dirancang.

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi dua fokus utama: (1) Bagaimana karakteristik fisik dan dinamika tsunami Tohoku 2011? dan (2) Apa saja faktor yang menyebabkan kegagalan sistem mitigasi dalam menghadapi tsunami tersebut? Kajian ini memiliki urgensi tinggi, terutama bagi negara-negara yang memiliki kondisi geologis serupa dengan Jepang, seperti Indonesia. Dengan posisi geografis yang berada di Cincin Api Pasifik dan memiliki banyak zona subduksi aktif, Indonesia sangat rentan terhadap gempa besar yang berpotensi memicu tsunami. Beberapa kejadian besar seperti Tsunami Aceh 2004 dan Tsunami Palu 2018 menjadi pengingat nyata akan pentingnya kesiapsiagaan dan sistem mitigasi yang adaptif (Widiyantoro et al., 2020).

Di tengah meningkatnya ancaman bencana akibat perubahan iklim global dan kenaikan permukaan air laut (Houghton et al., 2001), penting bagi Indonesia dan negara-negara lain untuk mengevaluasi sistem mitigasi bencana secara menyeluruh. Dengan belajar dari kegagalan sistem mitigasi Jepang pada saat tsunami Tohoku 2011, negara lain dapat menyusun strategi yang lebih efektif dan responsif terhadap ancaman bencana yang terus berkembang. Evaluasi ini tidak hanya penting untuk mengidentifikasi kelemahan sistem yang ada, tetapi juga sebagai landasan untuk membangun sistem mitigasi berbasis teknologi dan edukasi masyarakat yang lebih kuat, tangguh, dan adaptif terhadap risiko bencana di masa depan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kajian sintesis esai, yaitu dengan mengombinasikan beberapa penelitian sebelumnya untuk menjawab pertanyaan utama yang telah dirumuskan. Metode sintesis telah banyak diterapkan dalam penelitian kebencanaan untuk mengintegrasikan berbagai temuan dari studi sebelumnya guna memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif (Boon, 2016; Rufat et al., 2015). Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih sistematis terhadap karakteristik tsunami Tohoku 2011 serta evaluasi kegagalan sistem mitigasi bencana yang diterapkan di Jepang.

Penelitian ini bersifat kualitatif dengan pendekatan analisis literatur, di mana berbagai sumber ilmiah digunakan sebagai dasar kajian. Studi sintesis literatur telah diterapkan dalam berbagai penelitian kebencanaan, terutama dalam mengevaluasi pola kejadian bencana serta efektivitas strategi mitigasi yang diterapkan (Aldrich & Meyer, 2015; Cutter et al., 2014). Fokus utama penelitian ini adalah mengintegrasikan temuan dari beberapa studi sebelumnya untuk mengidentifikasi pola kejadian, karakteristik tsunami, serta efektivitas dan kelemahan sistem mitigasi yang telah diterapkan.

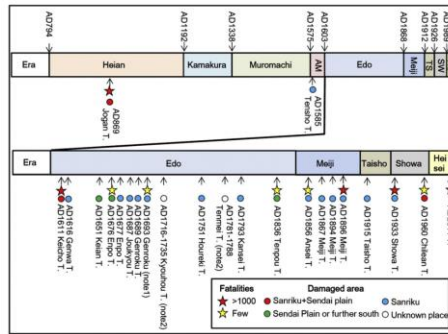
Penelitian ini berfokus pada tiga referensi utama yang memberikan landasan dalam memahami berbagai aspek tsunami Tohoku 2011: 1) Goto et al. (2012) – Digunakan untuk memahami historis gempa bumi di Jepang, termasuk pola kejadian gempa besar yang dapat memicu tsunami dalam skala besar. 2) Koshimura et al. (2013) – Digunakan untuk mengkaji karakteristik tsunami Tohoku 2011, termasuk tinggi gelombang, kecepatan arus, serta dampaknya terhadap wilayah pesisir. 3) Suppasri et al. (2013) – Digunakan untuk mengevaluasi tingkat kerusakan yang ditimbulkan oleh tsunami, termasuk pada infrastruktur mitigasi seperti tanggul dan pemecah gelombang.

Metode sintesis literatur yang diterapkan dalam penelitian ini telah terbukti efektif dalam menganalisis bencana sebelumnya. Misalnya, Boon (2016) menggunakannya untuk mengevaluasi respons sosial terhadap bencana di Australia, sementara Rufat et al. (2015) menerapkannya dalam kajian risiko sosial terhadap bencana di berbagai negara. Selain itu, penelitian Aldrich & Meyer (2015) menunjukkan bahwa pendekatan sintesis dapat membantu memahami hubungan antara modal sosial dan ketahanan masyarakat terhadap bencana.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sejarah kejadian gempa dan tsunami di Jepang

Jepang memiliki catatan sejarah gempa dan tsunami yang terdokumentasi dengan baik sejak abad ke-7. Sejarah ini terbagi dalam beberapa era kekaisaran, di mana bencana alam yang terjadi sering kali dikaitkan dengan nama era tersebut, seperti Tsunami Jogan tahun 869. Catatan sejarah Jepang menunjukkan bahwa bencana alam tidak hanya berdampak pada masyarakat tetapi juga berpengaruh terhadap perubahan sosial dan politik dalam berbagai era kekaisaran. Secara historis, terdapat empat peristiwa tsunami besar yang menyebabkan lebih dari 1.000 korban jiwa di wilayah pesisir timur Jepang (Gambar 1), yaitu: 1) Tsunami Jogan (869) → >1.000 korban jiwa, 2) Tsunami Keicho-Sanriku (1611) → >5.000 korban jiwa, 3) Tsunami Meiji-Sanriku (1896) → 21.953 korban jiwa, 4) Tsunami Showa-Sanriku (1933) → 1.529 korban jiwa (Goto et al., 2012). Namun, korban jiwa ini pun bergantung pada distribusi populasi yang terdampak.

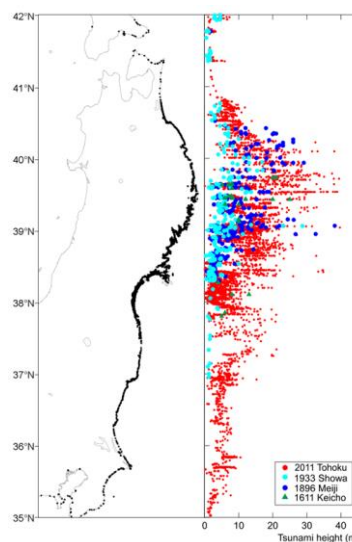


Sumber: Goto et al. (2012).

Gambar 1. Catatan sejarah tsunami untuk pantai Pasifik Tohoku

Di antara keempat kejadian tersebut, Tsunami Jogan 869 memiliki kesamaan pola dengan Tsunami Tohoku 2011. Sumber sejarah menunjukkan bahwa tsunami ini melanda wilayah Orai dan Kesennuma, yang juga mengalami dampak besar dalam tsunami tahun 2011. Sementara itu, tiga tsunami lainnya (Keicho, Meiji, dan Showa) hanya berdampak di pantai Sanriku, sehingga tidak bisa dianggap sebagai kejadian pendahulu yang setara dengan Tsunami Tohoku 2011.

Dampak tsunami tahun 2011 lebih luas dibandingkan dengan kejadian sebelumnya, mencakup lebih dari 800 km garis pantai dari Hokkaido hingga Kanto, dengan tinggi gelombang lebih dari 5 meter dan maksimum 40 meter di wilayah Sanriku (Gambar 2). Berdasarkan pola kejadian ini, terdapat indikasi bahwa Tsunami Tohoku 2011 merupakan bagian dari siklus tsunami 1.000 tahunan, di mana tsunami Jogan 869 menjadi kejadian pendahuluannya.



Sumber: Koshimura et al. (2013).

Gambar 2. Ketinggian terukur dari Tsunami Tohoku 2011 dan perbandingannya dengan tsunami sejarah

Karakteristik Tsunami Tohoku 2011

Wilayah Tohoku terletak di timur laut Pulau Honshu, Jepang. Pada 11 Maret 2011, terjadi gempa bumi berkekuatan 9.0 Mw pada pukul 14:46 waktu setempat, yang berpusat di lepas pantai Tohoku. Gempa ini memicu tsunami besar yang menghancurkan wilayah pesisir, terutama di Prefektur Iwate, Miyagi, dan Fukushima. Gempa Tohoku 2011 merupakan gempa terbesar dalam sejarah Jepang, sekaligus terkuat keempat di dunia sejak tahun 1900. Peristiwa ini terjadi akibat pergerakan zona subduksi antara Lempeng Pasifik dan Lempeng Amerika Utara, di mana Lempeng Pasifik bergerak ke arah barat dengan kecepatan 8,5 cm/tahun dan tersubduksi di bawah Lempeng Amerika Utara (Kennett et al., 2011).

Japan Meteorological Agency (JMA) secara resmi menamai peristiwa ini sebagai Gempa Tohoku 2011 (Tohoku-oki yang berarti "lepas pantai Tohoku" dalam bahasa Jepang). Secara historis, gempa dengan magnitudo >7 Mw yang dapat memicu tsunami di wilayah ini biasanya memiliki interval kejadian (lag time) sekitar 30–40 tahun (Tabel 1). Namun, gempa sebesar 9.0 Mw tidak pernah tercatat dalam sejarah seismik modern, sehingga kemungkinan kejadian ini tidak diperhitungkan dalam skenario mitigasi Jepang. Studi geologi menunjukkan bahwa gempa paling mirip dengan peristiwa ini adalah Gempa Jogan tahun 869, yang memiliki pola subduksi serupa. Hal ini mengindikasikan bahwa Tsunami Tohoku 2011 kemungkinan merupakan bagian dari siklus gempa 1.000 tahunan (Goto et al., 2012).

Tabel 1. Rekaman Gempa di Laut Miyagi

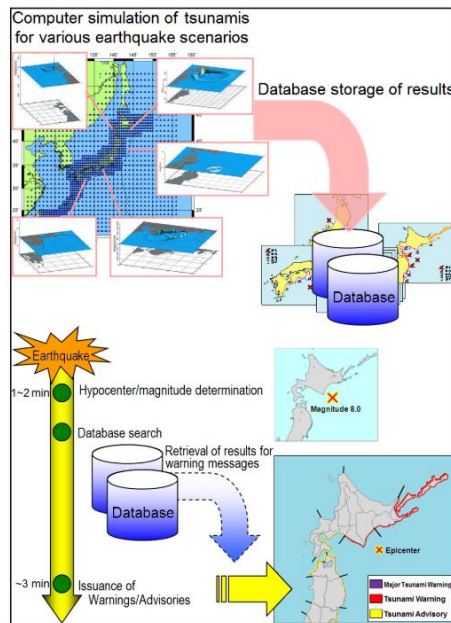
DD/MM/YY	Lag time		Magnitude
17 Feb 1793			8.2
20 July 1835	42.4 years	37.1 years on	7.3
21 Oct 1861	26.3 years	average	7.4
20 Feb 1897	35.3 years		7.4
3 Nov 1936	39.7 years		7.4
12 June 1978	41.6 years		7.4
Before 11 Mar 2011	33 years had passed, so the possibility of occurrence was 99 %		7.5–8.0

Sumber: Goto et al. (2012).

Kesalahan dalam perhitungan risiko ini berdampak signifikan terhadap kesiapsiagaan bencana. Tsunami yang mencapai 10 hingga 40 meter menghancurkan infrastruktur di sepanjang pesisir dengan luas wilayah terdampak mencapai 561 km² (Gambar 2). Secara keseluruhan, bencana ini menelan 15.868 korban jiwa, dengan 2.848 orang hilang (Koshimura et al., 2013).

Peringatan Dini Tsunami

Japan Meteorological Agency (JMA), sesuai dengan standar operasional, mengeluarkan peringatan dini tsunami tiga menit setelah gempa, berdasarkan data observasi yang dikumpulkan secara realtime dari sekitar 180 seismometer. JMA menentukan lokasi dan magnitudo gempa dari data ini. Prediksi tsunami dilakukan dengan simulasi komputer berdasarkan database tsunami yaitu berbagai skenario yang melibatkan berbagai lokasi dan magnitudo. Ketika gempa bumi yang kuat terjadi, sistem operasi segera menghitung hiposenter dan magnitudo, mencari database tsunami dengan mengacu pada skenario yang ada dan memilih hasil yang cocok (Gambar 3).



Sumber: Japan Meteorological Agency (Organization) (2013)

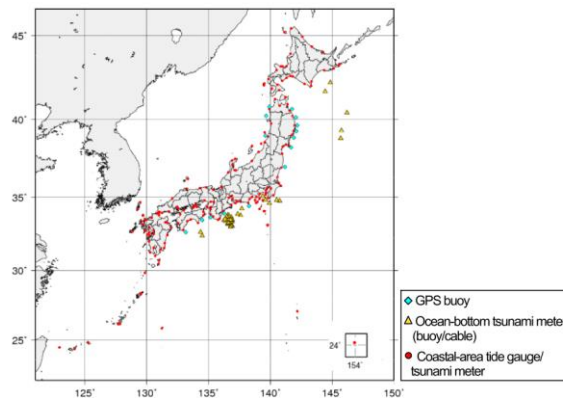
Gambar 3. Metode Prediksi Peringatan Dini Tsunami JMA

JMA juga memantau data permukaan laut dari sekitar 220 stasiun (buoy dan gauge, Gambar 4). Ketika tsunami terdeteksi, JMA menggunakan data ini untuk memperbarui peringatan tsunami dan mengeluarkan informasi pengamatan tsunami tentang waktu kedatangan dan skala gelombang tertingginya. Namun, kekuatan gempa dan perkiraan ketinggian tsunami pada peringatan awal secara signifikan underestimate. Besaran magnitude gempa pada perkiraan awal adalah 7,9. Karena magnitude dan lokasi hampir sama dengan penanggulangan yang disiapkan, JMA menganggap parameter sumber telah tepat. Prediksi awal ketinggian tsunami adalah enam meter di Prefektur Miyagi dan tiga meter di prefektur Iwate dan Fukushima.

Setelah dikeluarkan peringatan dini, JMA memeriksa parameter sumber secara rinci, memantau perubahan permukaan laut dan memperbarui peringatan tsunami untuk

mencerminkan pengamatan ini. Sehingga, JMA memperkirakan ulang waktu kedatangan dan ketinggian tsunami di setiap wilayah. Namun, karena guncangan yang kuat, bentuk gelombang seismometer tidak dapat terekam dengan baik (saturated), sehingga peringatan ulang tsunami tidak dapat dilakukan dalam waktu 15 menit.

Data GPS buoy mencatat kenaikan muka air dengan baik, memungkinkan JMA membuat peringatan tsunami ulang sekitar 28 menit setelah gempa dengan perkiraan ketinggian tsunami menjadi 10 meter untuk Prefektur Miyagi dan 6 meter untuk prefektur Iwate dan Fukushima. Namun, tsunami yang terjadi jauh lebih tinggi di daerah-daerah ini. Beberapa fasilitas pengamatan pun tersapu atau rusak dan aliran data terputus.



Sumber: Japan Meteorological Agency (Organization) (2013)

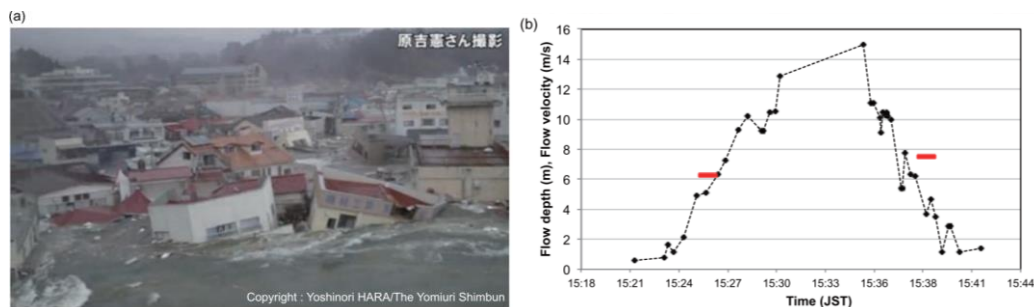
Gambar 4. Distribusi Titik Observasi Tsunami

Perubahan peringatan dini ini memunculkan respon masyarakat pesisir yang kurang waspada. Ketinggian tsunami pada peringatan awal terlalu rendah menyebabkan masyarakat berfikir gelombang tsunami tidak akan mencapai wilayah mereka yang dilindungi oleh tanggul laut atau alat struktural penanggulangan tsunami lainnya, dan akhirnya menyebabkan penundaan evakuasi. Kemudian, peringatan ulang tsunami mungkin tidak dapat menjangkau beberapa masyarakat pesisir karena situasi seperti kegagalan aliran listrik. Sehingga, penting untuk tidak memberikan perkiraan terlalu rendah ke dalam peringatan awal.

Karakteristik Arus Tsunami Tohoku

Aliran tsunami ke daratan dengan aliran genangan yang kuat dapat menyebabkan kerusakan infrastruktur, bangunan, serta menelan korban jiwa. Pengukuran kecepatan aliran tsunami di daratan jarang dan sulit dilakukan. Namun, dengan adanya kamera video dari ponsel yang praktis saat ini, banyak korban yang mengabadikan momen serangan tsunami ke wilayah mereka dan menggugahnya ke internet. Pengukuran tsunami di daratan pun dilakukan dengan teknik analisis video, yang dilakukan oleh (Koshimura et al., 2013).

Salah satu video yang merekam jelas aliran tsunami yang menghanyutkan sebagian besar infrastruktur ialah perekaman di kota Onagawa, di Prefektur Miyagi. Kota ini berpenduduk 10.014 jiwa sebelum gempa bumi dan mengalami kehancuran akibat tsunami. Tsunami menyerang kota ini 35 menit setelah gempa terjadi dan menyebabkan 816 korban jiwa dan 125 orang hilang. Video diambil dari seorang penduduk yang dievakuasi ke atas gedung beton di pelabuhan Onagawa. Gambar 5 menunjukkan snapshot yang ada dalam video, dan menangkap rumah yang sedang hanyut. Analisis dilakukan dari video ini dengan mengukur ketinggian permukaan air dari bangunan yang bertahan dalam video ini, yaitu sekitar 5 m. Kecepatan aliran diperkirakan berdasarkan pergerakan benda-benda yang hanyut. Tsunami yang semakin ke dalam pemukiman, semakin meningkat, serta arus baliknya menghancurkan bangunan. Aliran tsunami awal yang naik 6,3 m/s (15:25), maksimal 15 m/s (15:36), dan arus balik menurun 7,5 (15:38). Arus balik tsunami dari daratan lebih kuat daripada arus sebelumnya. Arus balik ini dengan mudah menghancurkan rumah.



Sumber: Koshimura et al. (2013).

Gambar 5. (a) Cuplikan dari video yang diambil oleh seorang korban yang menangkap momen ketika rumah-rumah hanyut, (b) Rangkaian waktu dari kedalaman aliran tsunami dan kecepatan arus, diinterpretasikan berdasarkan studi video

Evaluasi Sistem Mitigasi Tsunami di Jepang

Pemecah Gelombang Tsunami

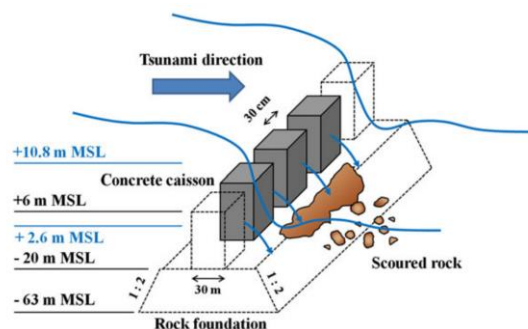
Pemecah gelombang ini dibangun di pantai Sanriku untuk melindungi kota dari tsunami masa depan, karena sejarah panjang mencatat tsunami beberapa kali menghancurkan kawasan ini. Salah satu pemecah gelombang yang terkenal, ialah pemecah gelombang di Kamaishi, yang dibangun di pintu masuk teluk. Pemecah gelombang dirancang untuk menahan tsunami yang berkekuatan serupa dengan tsunami Meiji-Sanriku (M8.5) tahun 1896. Pemecah gelombang ini memiliki kedalaman 63 m dan memperoleh rekor dunia Guinness sebagai pemecah gelombang terdalam. Pembangunan pemecah gelombang ini selesai pada tahun 2009, dan memiliki lebar bukaan 300 m dan panjang 670 m dan 900 m.



Sumber: Suppasri et al. (2013).

Gambar 6. Pemecah gelombang tsunami di kota Kamaishi (sebelum tsunami) (kiri), Kerusakan akibat genangan tsunami di kota Kamaishi dengan ketinggian runup maksimum 11,7 m (1/6/2011) (kanan)

Struktur pemecah gelombang ini terletak di atas fondasi batu. Balok selebar tiga puluh meter disusun di atas fondasi batuan sepanjang arah sumbu pemecah gelombang. Balok-balok tersebut memiliki ketinggian 6 m di atas permukaan laut dan dirancang untuk melindungi kota dari tsunami setinggi 5,6 m. Ketinggian tsunami terukur 6,7 m di stasiun GPS Laut Kamaishi. Berdasarkan data tersebut, dua simulasi dilakukan untuk kasus dengan dan tanpa pemecah gelombang. Hasil menunjukkan tinggi tsunami adalah 10,8 di depan balok dan 2,6 m di belakang balok (Gambar 7). Sehingga, balok-balok pemecah gelombang ini membantu mengurangi ketinggian tsunami hingga 8,2 m. Kemudian, arus kuat terjadi pada jarak antara balok, yaitu 30 cm, yang mengakibatkan fondasi pemecah gelombang mengalami kerusakan. Hampir 70% dari balok hancur.



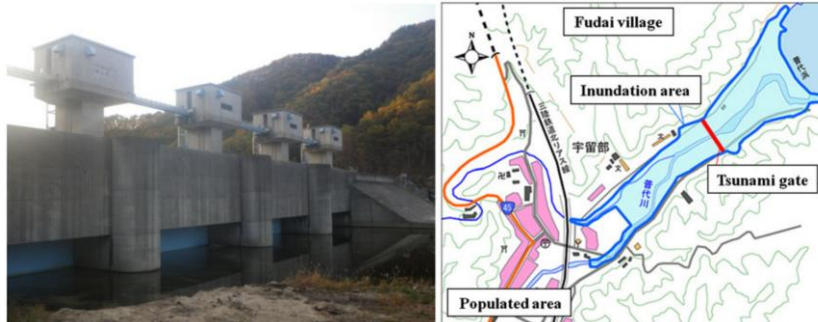
Sumber: Suppasri et al. (2013).

Gambar 7. Mekanisme kerusakan pemecah gelombang Kamaishi

Gerbang Tsunami

Sungai Fudai memiliki gerbang tsunami setinggi 15,5 m dibangun untuk menutup muara sungai jika terjadi tsunami dan melindungi pemukiman warga. Gerbang tsunami ini merupakan salah satu penanggulangan tsunami struktural yang sukses melindungi desa dari

tsunami 2011. Tsunami setinggi 17 m di depan pintu gerbang tsunami, dan hanya beberapa ratus meter berhasil melewati gerbang tsunami. Sebagian besar wilayah desa berhasil dilindungi dan tidak ada korban jiwa. Jika tidak ada gerbang tsunami, maka pedesaan akan rusak total.



Sumber: Suppasri et al. (2013).

Gambar 8. Gerbang tsunami di sungai Fudai (9/11/2011)

Gerbang tsunami lainnya ada di kota Minami-Sanriku. Gerbang tsunami ini dibangun setelah tsunami Chili 5 m. Tsunami yang menerjang wilayah ini lebih dari 15 m. Penduduk tidak menduga tsunami lebih besar daripada itu, terutama karena peringatan tsunami awal hanya memperkirakan tsunami memiliki ketinggian 3 m di prefektur Miyagi. Penundaan evakuasi dari penduduk meningkatkan korban jiwa. Hampir seluruh kota, termasuk bangunan hancur serta setengah dari populasi hilang setelah tsunami.



Sumber: Suppasri et al. (2013).

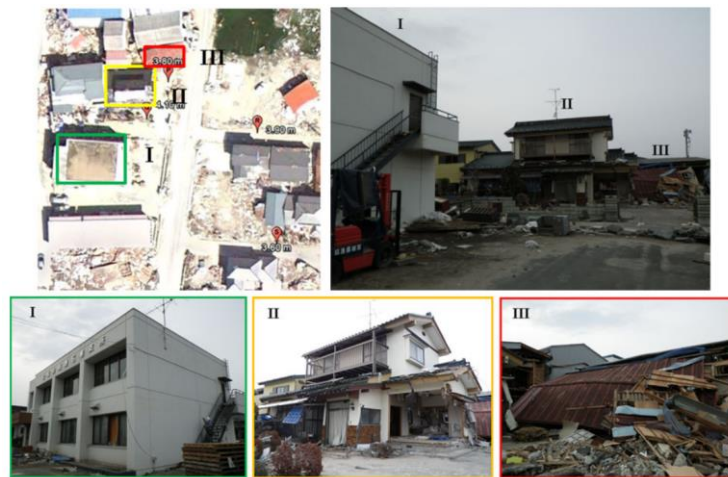
Gambar 9. Gerbang tsunami yang rusak di kota Minami-Sanriku dan kondisi kota setelah tsunami

Masalah lainnya ialah petugas pemadam kebakaran yang bertugas menutup gerbang tsunami ini. Gerbang tsunami belum dirancang dapat dikontrol jarak jauh sehingga petugas harus datang dan menutup gerbang tsunami. 471 petugas pemadam kebakaran, beberapa di 23% antaranya menutup gerbang dan 47% melakukan evakuasi. Namun, 22% petugas yang menutup gerbang ini tewas selama pengerjaan penutup gerbang, dan 31% tewas saat

melakukan evakuasi. Sehingga, pemerintah Jepang berencana memasang sistem baru untuk mengontrol gerbang ini dari jarak jauh.

Struktur Perumahan

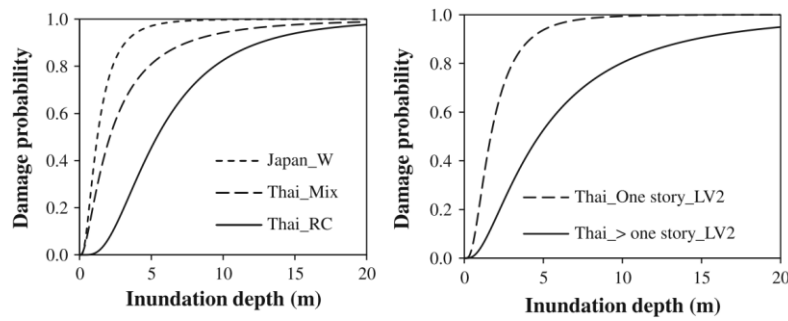
Terdapat 3 contoh bangunan berbeda yang mengalami kejadian tsunami yang sama serta memiliki tingkat kerusakan yang berbeda (Gambar 10). Bangunan pertama (dalam kotak hijau) adalah kantor dengan bangunan beton memiliki dua lantai dengan jendela pecah, namun tidak ada kerusakan struktural. Bangunan kedua (dalam kotak kuning) adalah rumah kayu dua lantai dan mengalami kerusakan pada beberapa dinding dan tiangnya. Bangunan ketiga (dalam kotak merah) adalah rumah kayu satu lantai dan benar-benar mengalami kerusakan.



Sumber: Suppasri et al. (2013).

Gambar 10. Contoh tingkat kerusakan yang berbeda untuk kedalaman genangan tsunami yang sama (26/4/2011)

Hubungan bahan bangunan dan jumlah lantai dengan kemungkinan kerusakan akibat tsunami dijelaskan pada kurva di Gambar 11. Hubungan ini dibangun dari data tsunami Okuishiri 1993. Kurva ini menunjukkan bahwa kemungkinan kerusakan terjadi ketika genangan tsunami melebihi 2 m. Probabilitas kerusakan dari tsunami dengan genangan 4 m, ialah 0,3 untuk rumah beton, 0,7 untuk rumah tipe campuran, dan 0,9 untuk rumah kayu. Kemudian, probabilitas kerusakan adalah 0,9 untuk rumah satu lantai dan 0,5 untuk lebih dari dua lantai.

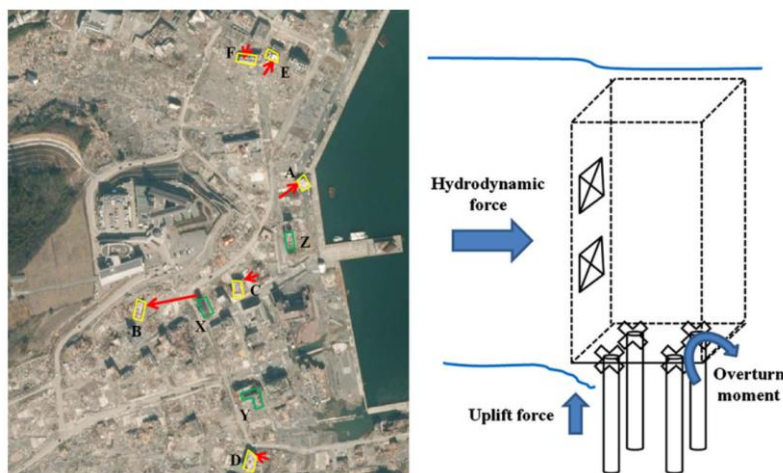


Sumber: Suppasri et al. (2013).

Gambar 11. Kurva kerapuhan tsunami untuk berbagai jenis material struktur (kiri) dan untuk jumlah lantai yang berbeda (kanan)

Bangunan Komersial Umum

Pada kejadian tsunami, biasanya disarankan untuk mengungsi ke gedung bertingkat tinggi dengan bahan beton jika tidak ada gedung di dekatnya. Namun, pada tsunami tohoku 2011, menunjukkan bahwa pedoman ini mungkin tidak selalu benar. Terdapat enam bangunan yang terbalik di kota Onagawa (Gambar 12, A-F), namun ada pula bangunan yang bertahan (Gambar 12, X-Z). Bangunan ini memang bukan bangunan khusus untuk evakuasi tsunami. Pada tempat yang sama yang mengalami tsunami yang sama, terdapat bangunan yang bertahan dan yang terguling.



Sumber: Suppasri et al. (2013).

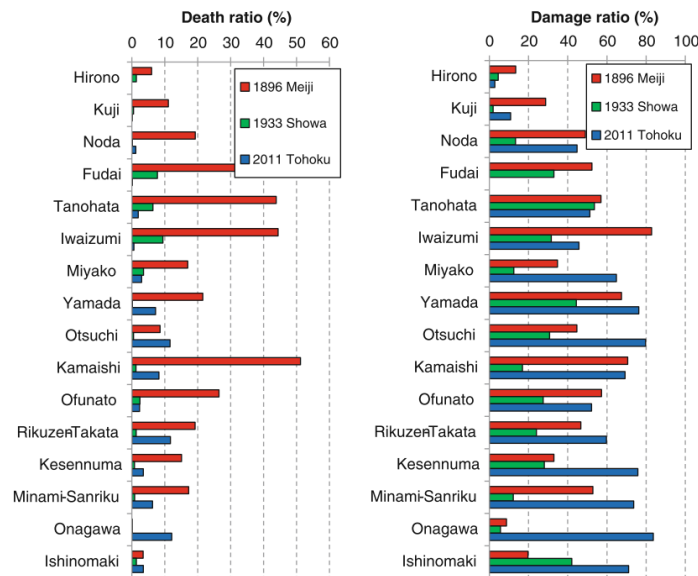
Gambar 12. 6 bangunan yang terguling (A-F) dan 3 bangunan bertahan (X-Z) yang di kota Onagawa(kiri), mekanisme yang memediasi pembalikan (kanan)

Terdapat alasan mengapa bangunan ini dapat terguling. Alasan pertama adalah fondasi tiang pancang yang rusak karena guncangan gempa dan likuifaksi, menyebabkan sambungan tiang gagal dan tidak dapat menahan serangan tsunami yang merobohkan bangunan.

Kemudian, rasio bukaan jendela dan pintu pada bangunan yang terballik ini kecil. Tekanan terjadi menumpuk menyebabkan dorongan secara hidrodinamika.

Penanggulanga Non-Struktural

Orang-orang yang tinggal di sepanjang pantai Sanriku memiliki lebih banyak pengalaman tsunami daripada mereka yang tinggal di dataran Sendai. Catatan sejarah dari wilayah Sanriku digunakan untuk membandingkan jumlah kematian dan jumlah rumah yang rusak disebabkan tsunami tahun 1896, 1933, dan 2011 (Gambar 13). Kematian akibat tsunami tahun 1896 sangat tinggi, dan tidak sebanding dengan korban jiwa pada tsunami tahun 1933 dan 2011. Namun, kerusakan rumah akibat tsunami tahun 1896 dan 2011 tidak jauh berbeda, dan terdapat angka sangat tinggi untuk tsunami 2011 di prefektur Miyagi karena pengembangan lahan di daerah ini.



Sumber: Suppasri et al. (2013).

Gambar 13. 6 . Kematian akibat tsunami dan kerusakan rumah bagi masyarakat pesisir Sanriku

Pengalaman tsunami masa lalu meningkatkan kesadaran tsunami masyarakat di wilayah Sanriku. Evakuasi diri sesegera mungkin penting untuk mencegah diri menjadi korban jiwa. Kegagalan perlindungan diri biasanya karena orang-orang masih tinggal di rumah menunggu keluarganya atau mengambil barang-barang setelah gempa bumi. Sebuah gagasan evakuasi diri dibentuk di daerah Sanriku yaitu “Tsunami tendenko” yang berarti “Anda harus melindungi hidup anda sendiri”.

KESIMPULAN DAN SARAN

Tsunami Tohoku 2011 merupakan salah satu bencana tsunami terbesar yang pernah tercatat dalam sejarah Jepang, dengan karakteristik gelombang besar yang mencapai ketinggian lebih dari 40 meter di beberapa wilayah dan daya jangkau hingga beberapa kilometer ke daratan. Tsunami ini dipicu oleh gempa bumi megathrust berkekuatan 9,0 Mw di lepas pantai timur laut Jepang, yang menyebabkan pergeseran lempeng secara signifikan dan menghasilkan gelombang tsunami yang sangat destruktif.

Kegagalan dalam penanggulangan tsunami Tohoku 2011 disebabkan oleh beberapa faktor utama. Pertama, sistem pertahanan tsunami yang ada, termasuk tanggul laut dan sistem peringatan dini, tidak dirancang untuk menghadapi tsunami sebesar ini. Ketinggian tanggul yang ada tidak mampu menahan gelombang yang jauh lebih tinggi dari perkiraan. Kedua, kurangnya kesiapsiagaan masyarakat dalam menghadapi skenario tsunami yang lebih besar dari yang diperkirakan menyebabkan keterlambatan dalam evakuasi. Ketiga, keterbatasan dalam koordinasi tanggap darurat, baik dalam penyampaian informasi maupun dalam mobilisasi sumber daya, memperburuk dampak yang terjadi. Keseluruhan faktor ini menunjukkan perlunya peningkatan dalam sistem mitigasi, peringatan dini, serta edukasi masyarakat dalam menghadapi potensi tsunami di masa depan.

Pembelajaran dari sistem mitigasi kebencanaan Jepang dalam studi tsunami 2011 dapat menjadi dasar bagi Indonesia untuk memperbaiki dan memperkuat sistem mitigasi bencana nasional, terutama melalui pendekatan multi-layer yang mengombinasikan infrastruktur fisik dan kesiapsiagaan masyarakat. Pembangunan tanggul yang lebih tinggi dan tahan erosi, penambahan jalur evakuasi vertikal di kawasan pesisir, serta modernisasi sistem peringatan dini dengan sensor bawah laut dan radar pantai harus menjadi prioritas utama guna meningkatkan ketahanan terhadap tsunami. Selain itu, edukasi dan pelatihan kebencanaan perlu diperkuat dengan simulasi evakuasi rutin yang melibatkan masyarakat, sekolah, dan instansi pemerintah, sehingga kesiapan warga dalam menghadapi bencana meningkat. Pendekatan berbasis skenario terburuk seperti yang diterapkan Jepang juga perlu diadopsi dalam kebijakan tata ruang, agar pembangunan di wilayah pesisir mempertimbangkan risiko tsunami dengan magnitudo besar. Koordinasi antar lembaga dan pemerintah daerah harus lebih terintegrasi untuk memastikan informasi peringatan dini dapat tersampaikan dengan cepat dan akurat. Selain itu, pemanfaatan teknologi digital, seperti aplikasi peringatan dini berbasis ponsel dan sistem komunikasi darurat berbasis kecerdasan buatan serta big data, harus ditingkatkan agar respons evakuasi lebih efektif bahkan dalam kondisi jaringan utama terganggu. Dengan mengadaptasi strategi mitigasi Jepang ke dalam konteks geografis dan

sosial Indonesia, diharapkan sistem mitigasi bencana di Indonesia dapat lebih tangguh dan responsif dalam menghadapi ancaman tsunami di masa depan.

DAFTAR REFERENSI

- Aldrich, D. P., & Meyer, M. A. (2015). Social capital and community resilience. *American Behavioral Scientist*, 59(2), 254–269. <https://doi.org/10.1177/0002764214550299>
- Alexander, D. (2020). Disaster risk reduction. *Oxford Research Encyclopedia of Politics*, August, 1–23. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228637.013.1538>
- Boon, H. J. (2016). Disaster resilience in a flood-impacted rural Australian town. *Natural Hazards*, 71(1), 683–701. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0935-0>
- Cutter, S. L., Ash, K. D., & Emrich, C. T. (2014). The geographies of community disaster resilience. *Global Environmental Change*, 29, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.08.005>
- Goto, K., Chagué-Goff, C., Goff, J., & Jaffe, B. (2012). The future of tsunami research following the 2011 Tohoku-oki event. *Sedimentary Geology*, 282, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.08.003>
- Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., & Johnson, C. A. (2001). *Climate change 2001: The scientific basis* (1st ed.). The Press Syndicate of the University of Cambridge. https://doi.org/10.1007/9783031259104_264
- Japan Meteorological Agency. (2013). Lessons learned from the tsunami disaster caused by the 2011 Great East Japan Earthquake and improvements in JMA's tsunami warning system. <https://www.jma.go.jp>
- Kelman, I. (2020). *Disaster by choice: How our actions turn natural hazards into catastrophes* (1st ed.). Oxford University Press. <https://global.oup.com/academic/product/disaster-by-choice-9780198841357>
- Kennett, B. L. N., Gorbato, A., & Kiser, E. (2011). Structural controls on the Mw 9.0 2011 Offshore-Tohoku earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 310(3–4), 462–467. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.08.039>
- Koshimura, S., Hayashi, S., & Gokon, H. (2013). Lessons from the 2011 Tohoku earthquake tsunami disaster. *Journal of Disaster Research*, 8(4), 549–560. <https://doi.org/10.20965/jdr.2013.p0549>
- Lay, T. (2018). A review of the rupture characteristics of the 2011 Tohoku-oki Mw 9.1 earthquake. *Tectonophysics*, 733, 4–36. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.09.022>
- Lay, T., & Kanamori, H. (2011). Insights from the great 2011 Japan earthquake. *Physics Today*, 64(12), 33–39. <https://doi.org/10.1063/PT.3.1361>

- Mardiatno, D., Malawani, M. N., Annisa, D. N., & Wacano, D. (2017). Review on tsunami risk reduction in Indonesia based on coastal and settlement typology. *Indonesian Journal of Geography*, 49(2), 186–194. <https://doi.org/10.22146/ijg.28406>
- Rufat, S., Tate, E., Burton, C. G., & Maroof, A. S. (2015). Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 470–486. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.09.013>
- Satake, K. (2014). Advances in earthquake and tsunami sciences and disaster risk reduction since the 2004 Indian Ocean tsunami. *Geoscience Letters*, 1(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40562-014-0015-7>
- 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), 1–30. <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>
- Utami, W. (2022). Post-tsunami land use monitoring to support sustainable coastal management. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 12(2), 186–196. <https://doi.org/10.29244/jpsl.12.2.186-196>
- Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., Hanifa, N. R., Susilo, S., Supendi, P., Shiddiqi, H. A., Nugraha, A. D., & Putra, H. E. (2020). Implications for megathrust earthquakes and tsunamis from seismic gaps south of Java, Indonesia. *Scientific Reports*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72142-z>