

APPLICATION OF SAR REMOTE SENSING AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS) IN COASTLINE CHANGE STUDIES – A CASE STUDY OF COASTLINE CHANGE DUE TO THE 2018 TSUNAMI IN TANJUNG LESUNG, BANTEN

M. Arif Zainul Fuad^{1,2*}, Viola Rizka Effendi¹, Citra Satrya U. Dewi¹

¹Department of Marine Science, Faculty of Fisheries and Marine Sciences, Universitas Brawijaya

²Marine Resources Exploration and Management Research Group (RG-MEXMA)

Faculty of Fisheries and Marine Sciences, Universitas Brawijaya

Jln. Veteran Malang, Jawa Timur, 65145

*fuad_maz@ub.ac.id

ABSTRACT

On December 22, 2018, a tsunami was triggered by a landslide from the eruptive material of Mount Krakatau which hit Tanjung Lesung Beach, Tanjung Jaya Village, Panimbang District, Pandeglang Regency, Banten Province. The disaster caused damage to infrastructure, changes in coastline, and claimed lives and property. This study aims to determine the changes in the Tanjung Lesung coastline due to the Tsunami. The data used is Sentinel-1 Satellite imagery which was acquired before and after the disaster, which was on 19 and 23 December 2018 respectively. Image processing was carried out on the Sentinel Application Platform (SNAP). The shoreline delineation utilizes the tracing technique in Arc-GIS. Calculation of shoreline changes using Digital Shoreline Analysis System (DSAS) tools with a Net Shoreline Movement (NSM) approach with the length and width of the transect line of 300 and 50 meters, respectively. The results showed that the shoreline changes that occurred were dominated by abrasion with the highest value of 18.89 m located on the west coast of Tanjung Lesung in Tanjung Jaya Village, Panimbang District, Pandeglang Regency. In addition, there is also accretion in the eastern area of Tanjung Lesung Beach, although it only occurs in a small area with a coastline extension of 10.41 m.

Keywords: Tsunami, Coastline Change, Sentinel-1, DSAS.

I. PENDAHULUAN

Garis pantai didefinisikan sebagai wilayah batas pertemuan antara daratan dan lautan yang selalu dinamis dan dapat berubah seiring dengan waktu [1-2]. Perubahan ini dapat disebabkan oleh peningkatan aktifitas manusia di wilayah pesisir seperti pembangunan dan perluasan kawasan industri, permukiman, pertambakan, pariwisata yang dapat mengakibatkan abrasi maupun sedimentasi [3-5] meskipun secara umum pantai di dunia lebih banyak mengalami abrasi/erosi

dari pada sedimentasi [6]. Selain aktifitas diatas, garis pantai juga dapat berubah karena adanya kejadian alam seperti terjadinya gelombang badai ekstrim karena siklon tropis [7] dan Tsunami [5,8,9]. Abrasi yang terjadi pada wilayah pesisir mengurangi daratan yang ada di wilayah pesisir [10].

Kawasan Wisata Pantai Tanjung Lesung merupakan pantai di Kabupaten Pandeglang terkenal sebagai kawasan wisata pantai yang indah. Kawasan wisata pantai memiliki luas ± 1.500 Ha dengan

panjang pantai sepanjang 15 km. Pantai Tanjung Lesung memiliki keindahan pantai berupa pasir putih dan keadaan air pantai yang jernih, gelombang pantai tidak begitu besar karena pantai Tanjung Lesung tidak langsung berhadapan dengan laut lepas. Pantai Tanjung Lesung dapat menjadi pilihan saat Pantai Carita dan Anyer sudah tidak bisa menampung jumlah wisatawan karena pantai ini memiliki lahan yang sangat luas [11].

Pada tanggal 22 Desember 2018 terjadi Tsunami di Selat Sunda tanpa diawali dengan gempa tektonik. Tsunami tersebut disebabkan oleh tanah longsor yang terjadi di bawah laut setelah letusan Gunung Anak Krakatau yang dikombinasikan dengan gelombang pasang abnormal karena bulan purnama [12]. Tsunami tersebut menyebabkan kerugian yang cukup besar antara lain munculnya korban jiwa dan menurut data dari BNPB pada tanggal 29 Desember 2018, terdapat 431 orang meninggal, 15 orang hilang, 7.200 orang luka-luka serta 46.646 orang mengungsi. Selain dari korban jiwa, terjadi kerusakan sarana di sekitar pantai antara lain kerusakan jalan, jaringan listrik, jaringan telekomunikasi, *breakwater*, hancurnya beberapa bangunan, dan *scouring* atau gerusan pantai yang terjadi di pantai Cimanggu dan Sumur Pandeglang. Korban meninggal di Resort Tanjung Lesung sekitar 106 orang, dan di Kecamatan Sumur sekitar 64 orang [13]. Tidak seluruh kawasan wisata mengalami kerusakan fisik, namun kejadian Tsunami tersebut sangat menurunkan minat wisatawan untuk berkunjung ke Tanjung Lesung [14].

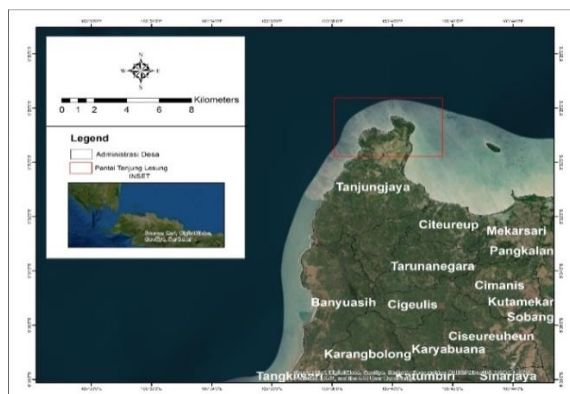
Selain kerusakan infrastruktur tersebut juga diindikasikan terjadinya perubahan garis pantai sebagai akibat hantaman gelombang Tsunami. Untuk itu dibutuhkan informasi tentang perubahan garis pantai yang ada antara sebelum dan sesudah Tsunami melanda wilayah ini. Deteksi perubahan garis pantai dapat

dilakukan dengan beberapa citra satelit baik jenis aktif maupun pasif. Satelit Sentinel 1 merupakan satelit aktif yang memanfaatkan teknologi *Syntetic Aperture Radar* (SAR) untuk memetakan permukaan Bumi. Sentinel-1 merupakan seri satelit pertama dari tujuh misi satelit yang diluncurkan sebagai bagian dari program *Copernicus* yang digagas oleh *European Commission* (EC) dan *European Space Agency* (ESA). Seperti satelit SAR ESA sebelumnya, Sentinel-1 memiliki sensor C-band dengan dua buah satelit yakni Sentinel-1a dan Sentinel-1b yang mengorbit secara tandem berjauhan 180°. Masing-masing satelit mampu melakukan *repeat cycle* setiap 12 hari dan dengan konstelasi kedua satelit tersebut membuat Sentinel-1 memiliki *repeat cycle* setiap 6 hari. Sentinel-1 memiliki 4 mode pengamatan dengan mode utama di daratan adalah mode *Interferometric Wide Swath* (IW) dengan resolusi spasial sekitar 5 m x 20 m. Dengan resolusi temporal yang cukup tinggi untuk satelit yang datanya dapat diakses tanpa berbayar, satelit ini dapat digunakan untuk mendeteksi adanya perubahan garis pantai dengan waktu jeda yang tidak terlalu jauh dengan kejadian tsunami. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk deteksi perubahan garis pantai akibat Tsunami yang ada dengan memanfaatkan Citra Sentinel 1.

2. METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan di Pantai Tanjung Lesung, Desa Tanjung Jaya, Kecamatan Panimbang, Kabupaten Pandeglang, Banten (Gambar 1). Pantai ini memiliki garis pantai sepanjang 15 km. Waktu pelaksanaan kerja Penelitian ini dilaksanakan dari bulan Februari sampai dengan bulan Mei 2020.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Metode Penelitian

Penelitian ini memanfaatkan penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) guna mengetahui perubahan garis pantai akibat Tsunami. Kombinasi penginderaan jauh dan SIG telah terbukti dapat digunakan untuk deteksi perubahan garis pantai dengan baik perubahan karena proses Hidro-oseanografi dan perubahan penggunaan lahan pesisir maupun Tsunami [10,15,16]. Citra satelit Sentinel-1 yang digunakan sebagai sumber data garis pantai merupakan citra berbasis SAR dengan resolusi temporal yang tinggi yaitu 6 hari sekali sehingga dapat mendeteksi perubahan dengan lebih cepat jika dibandingkan citra dengan resolusi temporal yang lebih rendah seperti Citra Satelit Landsat 1-8 [17-18]. Citra Sentinel-1 yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari dua waktu akuisisi yang berbeda yaitu tanggal 19 Desember 2018 untuk identifikasi garis pantai sebelum Tsunami dan citra tanggal 23 Desember 2018 untuk deteksi garis pantai setelah Tsunami. Citra yang dianalisis merupakan Level-1 dan memiliki mode pencitraan *Interferometric Wide Swath (IW)* dengan product GRDH dan resolusi 5-20 m. Citra tersebut diunduh dari laman <http://scihub.copernicus.eu/>.

Citra Sentinel-1 ini diolah dengan perangkat lunak *Sentinel Application Platform (SNAP)* untuk delineasi garis pantai; selanjutnya hasil delineasi garis pantai tersebut dianalisis dengan menggunakan perangkat lunak

Digital Shoreline Analysis System (DSAS) yang dijalankan pada perangkat lunak Arc-GIS. DSAS dapat menghitung perubahan untuk serangkaian data garis pantai dengan waktu yang berbeda secara otomatis [19-20]. Metode perhitungan yang digunakan adalah *Net Shoreline Movement (NSM)* yaitu mengukur jarak perubahan garis pantai antara garis pantai yang lama (sebelum Tsunami) dan garis pantai terbaru (setelah Tsunami). Metode DSAS ini telah digunakan untuk deteksi dan dianalisis perubahan garis pantai yang diakibatkan oleh kejadian yang bertahap misalnya karena pengaruh dinamika gelombang, arus sepanjang pantai (*longshore current*) perubahan penggunaan dan tutupan lahan [21–28] karena kejadian alam yang mendadak dan cepat seperti Tsunami dan badai [12,29]. Pada penelitian ini lebar dan panjang transek masing masing adalah 50 m dan 300 m. Dengan panjang pantai Tanjung Lesung mendekati 15 Km, maka kurang lebih dapat dibagi menjadi 240 transek.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Umum Lokasi Penelitian

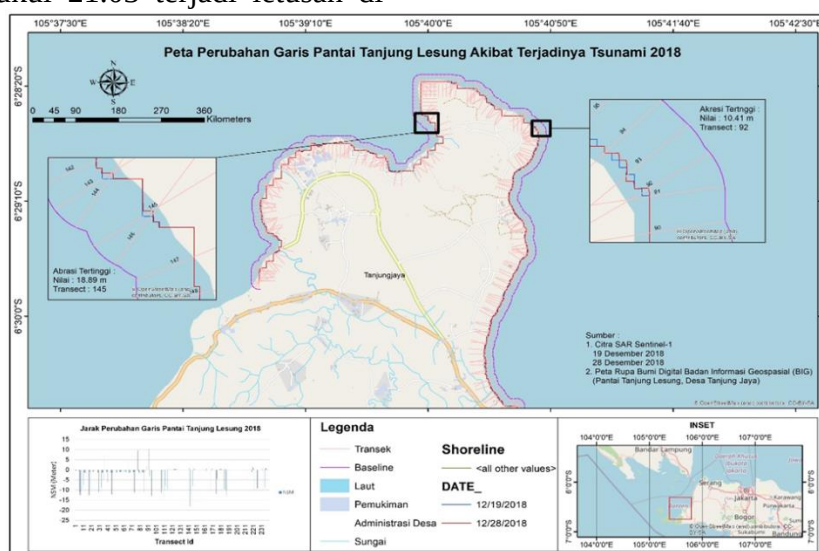
Pantai Tanjung Lesung merupakan kawasan wisata pantai yang terletak di desa Tanjung Jaya, Kecamatan Panimbang, Kabupaten Pandeglang, Provinsi Banten. Pantai ini merupakan salah satu wilayah strategis yang masuk di dalam Program Strategis Nasional berdasarkan Peraturan Presiden No. 3 Tahun 2016 dan diperbaharui menjadi Peraturan Presiden No. 58 Tahun 2017 sebagai salah satu dari 10 Destinasi Pariwisata Prioritas Nasional. Wilayah ini merupakan pantai yang cukup digemari oleh penduduk sekitar maupun wisatawan lokal. Selain itu, wilayah Kecamatan Panimbang merupakan salah satu kawasan yang secara khusus dikembangkan untuk KEK (Kawasan Ekonomi Khusus), sehingga adanya upaya yang kuat pemerintah daerah dalam pengembangan infrastruktur.

Pantai tanjung lesung termasuk ke dalam kategori pantai landai yang mempunyai ciri-ciri kemiringan kurang dari 10° dan beda tinggi antara daratan dan muka air laut kurang dari 3 m; umumnya tersusun oleh pasir lepas berwarna putih abu-abu hingga kecoklatan dengan ukuran butir pasir sedang hingga pasir kasar. Adapun sebagian pantai di Tanjung Lesung yang memiliki relief sedang hingga tinggi tersusun oleh batuan rombakan gunung api berumur tersier terdiri dari breksi gunung api, lava dan tufa [13].

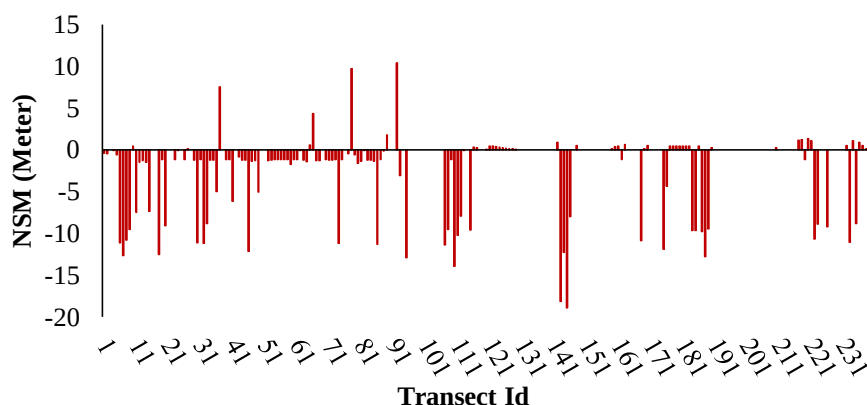
Perubahan Garis Pantai Pasca Tsunami

Tsunami yang terjadi di Selat Sunda pada tanggal 22 Desember 2018 tidak disebabkan oleh gempa tektonik, namun disebabkan oleh gelombang pasang abnormal karena bulan purnama dan tanah longsor yang terjadi di bawah laut setelah letusan Gunung Anak Krakatau [12]. Mekanisme fenomena ini diawali dari erupsi Gunung Anak Krakatau yang terjadi dari bulan juni sehingga mengalami penumpukan material di lereng gunung, lalu pada 22 Desember 2018 terjadi gempa bumi di sekitar Gunung Anak Krakatau pada pukul 20.55 dengan kekuatan 5 M, namun tidak memicu terjadinya tsunami. Setelah itu pukul 21.03 terjadi letusan di

Gunung Anak Krakatau yang menyebabkan longsor lereng Pulau Anak Krakatau yang muncul di atas permukaan laut Selat Sunda dengan ketinggian 338 m dan ketinggian setelah terjadinya erupsi adalah 110 m di atas permukaan laut dan menyebabkan munculnya gelombang tsunami dengan tinggi 9.6 m dari arah Barat Gunung Anak Krakatau menuju arah Barat Pantai Tanjung Lesung [13]. Tanjung Lesung merupakan lokasi di Pantai Barat Pandeglang yang pertama kali terkena gelombang tsunami karena berbatasan langsung dengan Gunung Anak Krakatau dengan jarak 49.5 km. Setelah dari Pantai Tanjung Lesung, gelombang Tsunami menyerang Sumur dan Ujung Kulon. Kemudian gelombang tsunami menghantam Pantai Carita dan energinya berkurang ke arah utara [30]. Hal tersebut yang menyebabkan hasil bahwa Pantai Tanjung Lesung mengalami abrasi paling parah. Selain itu tipe Pantai Tanjung Lesung merupakan pantai berpasir yang landai sehingga lebih mudah mengalami abrasi karena gelombang Tsunami dapat dengan mudah melewatinya. Semakin landai dan rendah suatu pantai maka kerentanan terhadap penggenangan Tsunami semakin tinggi [31–33].



Gambar 2. Peta Perubahan Garis Pantai Pasca Tsunami



Gambar 2. Perubahan Garis pantai (*Net Shoreline Movement: NSM*)

Berdasarkan Gambar 2 dan 3 dapat dilihat bahwa perubahan garis pantai yang terjadi di Pantai Tanjung Lesung akibat Tsunami cukup signifikan. Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa pada transek 1 hingga transek 240 terlihat lebih banyak grafik kearah nilai negatif yang mengindikasikan jika perubahan garis pantai di dominasi oleh abrasi. Hal ini sesuai dengan pernyataan beberapa peneliti yang mengemukakan bahwa kejadian bencana ekstrim yang terjadi dalam waktu singkat seperti Tsunami dapat menyebabkan erosi yang parah [5,34]. Meskipun perlu diingat jika perubahan garis pantai bukan sebagai akibat dari satu faktor saja, tetapi terjadi sebagai akibat dari kombinasi beberapa faktor.

Perubahan garis Pantai di lokasi penelitian terjadi berkisar antara -18 m ,yang mengindikasikan abrasi, dan +10 m yang mengindikasikan akresi. Secara umum abrasi banyak terjadi di transek 1-30, 100-110,140-145, dan 170-190. Sedangkan akresi hanya dijumpai pada transek 37, 66, 78,88, dan 92 yang berada pada bagian timur Tanjung lesung dengan morfologi pantai yang berupa teluk dan tanjung.

Wilayah yang mengalami abrasi tertinggi terletak pada transek 145 yang berada di bagian barat Pantai Tanjung Lesung Desa Tanjung Jaya dengan kemunduran garis pantai sejauh 18.9 m. Posisi geografis wilayah ini yang

berhadapan langsung dengan Gunung Anak Krakatau menyebabkan Gelombang Tsunami langsung menerjang tanpa halangan. Limpasan air laut akibat Tsunami dapat masuk jauh ke darat karena kondisi pantai landai dan umumnya tanpa adanya bangunan penghalang pantai berupa dinding penahan pantai, breakwater, maupun vegetasi pantai yang memadai. Pada pantai landai dengan adanya dinding penahan pantai juga mengalami kerusakan karena mekanisme gerusan (*scouring*) akibat tsunami. Tsunami dapat mengikis pantai berpasir dan landai dan mengakibatkan garis pantai terkikis yang tidak beraturan pada skala kecil namun pada skala yang lebih luas pola garis pantai tetap sama [35]. Sepanjang pantai pada kawasan sempadan pantai pada umumnya bukan merupakan jalur hijau, tetapi telah berubah menjadi aktivitas manusia berupa permukiman, hotel, cottage dan kawasan wisata [13].

Selain itu area ini merupakan wilayah dengan penutupan lahan berupa vegetasi hutan dan perkebunan dan tidak memiliki pelindung pantai. Dengan tidak adanya bangunan pelindung pantai seperti breakwater [36], tembok pantai, maupun vegetasi pantai maka gelombang tsunami yang datang langsung menerjang lahan yang berada di belakang pantai sehingga potensi kerusakannya lebih besar jika dibandingkan dengan daerah yang memiliki pelindung pantai atau vegetasi pantai.

Vegetasi pantai telah dikenal luas sebagai metode alami untuk mengurangi energi gelombang tsunami [37-38]. Vegetasi pantai terutama mangrove jenis *Rhizophora apiculata* dan *R. mucronata* serta tanaman pandan pantai (*Pandanus odoratissimus*) sangat efektif dalam memberikan perlindungan pantai dari Tsunami karena memiliki struktur akar yang berada diatas tanah yang kompleks [39].

Selain menyebabkan adanya abrasi, Tsunami juga menyebabkan penambahan daratan (akresi). Namun demikian jika dilihat dari Gambar 2 dan 3 dapat dilihat jika wilayah yang mengalami akresi sangat sedikit dibandingkan dengan wilayah yang mengalami abrasi. Akresi tertinggi terjadi pada transek 92 yang berada di bagian timur Pantai Tanjung Lesung pada Desa Tanjung Jaya, Kecamatan Panimbang dengan nilai 10.41 m. Akresi terjadi karena pengendapan sedimen dari penggenangan air tsunami dengan tinggi 100-562 cm sehingga terjadi penimbunan material di daerah tersebut [13].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Tsunami yang terjadi di Banten pada 22 Desember 2018 menyebabkan perubahan garis pantai yang cukup signifikan di Pantai Tanjung Lesung, Desa Tanjung Jaya, Kecamatan Panimbang, Kabupaten Pandeglang, Banten. Perubahan tersebut didominasi oleh abrasi dengan nilai tertinggi 18.89 m yang berada di Barat Tanjung karena bagian tersebut berhadapan langsung dengan Gunung Anak Krakatau. Selain itu kontur pantai yang landai dan tidak adanya bangunan pelindung pantai turun meningkatkan resiko kerusakan akibat Tsunami.

Tsunami yang telah terjadi menyebabkan kerusakan infrastruktur dan merenggut nyawa penduduk Tanjung Lesung, oleh karena itu perlu dilakukan penataan kawasan pesisir dan pembangun bangunan pelindung pantai yang dapat mengurangi energi gelombang Tsunami. Selain itu perlu dilakukan penyusunan dan sosialisasi jalur evakuasi Tsunami sebagai langkah mitigasi untuk mencegah adanya korban jiwa.

DAFTAR PUSTAKA

1. Boak, E. H., Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, 21(4): 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
2. Dolan, R., Hayden, B.P., May, P., May, S. (1980). The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48(4), 22–29.
3. Alharbi, O.A., Phillips, M.R., Williams, A.T., Thomas, T., Hakami, M., Kerbe, J., Niang, A.J., Hermas, E., Al-Ghamdi, K. (2017). Temporal shoreline change and infrastructure influences along the southern Red Sea coast of Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(16), 360. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3109-7>
4. Triatmodjo, B. (1999). *Teknik pantai*. Beta Offset.
5. Mentaschi, L., Vousdoukas, M.I., Pekel, J.F., Voukoulalas, E., Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8(1), 12876. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>
6. Ghosh, M.K., Kumar, L., Roy, C. (2015). Monitoring the coastline change of Hatiya Island in Bangladesh using remote sensing techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.12.009>
7. Harley, M.D., Turner, I.L., Kinsela, M.A., Middleton, J.H., Mumford, P.J., Splinter, K.D., Phillips, M.S., Simmons, J.A., Hanslow, D.J., Short, A.D. (2017). Extreme coastal erosion enhanced by anomalous extratropical storm wave direction. *Scientific Reports*, 7(1), 6033. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05792-1>

8. Tanaka, H., Adityawan, M.B., Mano, A. (2014). Morphological changes at the Nanakita River mouth after the Great East Japan Tsunami of 2011. *Coastal Engineering*, 86, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.01.002>
9. Kurniadin, N., Fadlin, F. (2021). Analisis Perubahan Morfologi Garis Pantai Akibat Tsunami di Teluk Palu Menggunakan Data Citra Sentinel-2. *Geoid*, 16(2), 240–247.
10. Puspita, D., Mubarak., Nursyirwani. (2021). Analysis of Coastline Changes in Rupert Island using Remote Sensing Data and Geographic Information Systems. *Asian Journal of Aquatic Sciences*, 4(3), 236–246. <https://doi.org/https://doi.org/10.31258/ajoas.4.3.236-246>
11. Rachmanita, T., Hutabarat, S., Purwanti, F. (2018). Analisis Kesesuaian Kegiatan Wisata di Kawasan Pantai Tanjung Lesung, Kabupaten Pandeglang, Banten. *Journal of Management of Aquatic Resources*, 6(1), 87–94. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/marj.v6i1.19815>
12. Jalaludin, M., Setiawan, C., Zid, M., Utomo, R.T. (2020). Analysis of Shoreline Changes Before and After the Tsunami at Tanjung Lesung Beach, Banten Province of Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 412(1): 12004.
13. Memed, W., Soehaimi, A., Gunawan, H. (2019). Dinamika Geologi Selat Sunda dalam Pembangunan Berkelanjutan. *Badan Geologi, Bandung, Indonesia*, 30.
14. Rohani, E.D., B. Ramadhan. (2019). Pengembangan Kawasan Buffer Zone Tanjung Lesung Sebelum Terjadi Tsunami pada Kecamatan Panimbangan dan Cigeulis. *Pesona Jurnal Pariwisata*, 4(1): 42-49
15. Chapkanski, S., Brocard, G., Lavigne, F., Tricot, C., Meilianda, E., Ismail, N., Majewski, J., Goiran, J., Alfian, D., Daly, P. (2021). Fluvial and coastal landform changes in the Aceh River delta (Northern Sumatra) during the century leading to the 2004 Indian Ocean Tsunami. *Earth Surface Processes and Landforms*.
16. Julianto, F.D., Fathurohman, C.R., Rahmawati, S.D., Ihsanudin, T. (2021). Shoreline Changes After The Sunda Strait Tsunami on The Coast of Pandeglang Regency, Banten. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)*, 17(2), 201–208.
17. Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24.
18. Amriyah, Q., Arief, R., Dyatmika, H. S., Maulana, R. (2019). Analisis Perbandingan Data Level-1 Sentinel 1A/B (Data SLC dan GRD) Menggunakan Software SNAP dan GAMMA. *Prosiding Seminar Nasional Penginderaan Jauh 2019: Peningkatan Pemanfaatan IPTEK Penginderaan Jauh untuk Mendukung Pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs)*, 533–543
19. Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M. G., Farris, A.S. (2018). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.0 User Guide*. US Geological Survey.
20. Sambah, A.B., Sartimbul, A., Iranawati, F., Yona, D., Fuad, M.A.Z., Harlyan, L.I., Hidayati, N., Sari, S.H.J., Rahman, M.A. (2020). *Aplikasi Sistem Informasi Geografis dalam Bidang Perikanan dan Kelautan*. Universitas Brawijaya Press.
21. Muskananfolo, M. R., Supriharyono, Febrianto, S. (2020). Spatio-temporal analysis of shoreline change along the coast of Sayung Demak, Indonesia using Digital Shoreline Analysis System. *Regional Studies in Marine Science*, 34, 101060. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101060>
22. Fuad, M.A.Z., Yunita, N., Kasitowati, R.D., Sartimbul, A., Hidayati, N. (2019). Pemantauan Perubahan Garis Pantai Jangka Panjang dengan Teknologi Geo-Spasial di

- Pesisir Bagian Barat Kabupaten Tuban, Jawa Timur. *Jurnal Geografi*, 11(1). <https://doi.org/10.24114/jg.v11i1.11409>
23. Fuad, M.A.Z., Fais, D.A.M. (2017). Automatic Detection of Decadal Shoreline Change on Northern Coastal of Gresik, East Java - Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 98(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/98/1/012001>
 24. Santos, C.A.G., Nascimento, T.V.M. do, Mishra, M., Silva, R.M. da. (2021). Analysis of long- and short-term shoreline change dynamics: A study case of João Pessoa city in Brazil. *Science of the Total Environment*, 769, 144889. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144889>
 25. Kankara, R.S., Selvan, S.C., Markose, V.J., Rajan, B., Arockiaraj, S. (2015). Estimation of long and short term shoreline changes along Andhra Pradesh coast using remote sensing and GIS techniques. *Procedia Engineering*, 116(1), 855–862. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.374>
 26. Nugraha, I.N.J., Karang, I. W.G.A., Dharma, I.G.B.S. (2017). Studi Laju Perubahan Garis Pantai di Pesisir Tenggara Bali Menggunakan Citra Satelit Landsat (Studi Kasus Kabupaten Gianyar dan Klungkung). *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 3(2), 204. <https://doi.org/10.24843/jmas.2017.v3.i02.204-214>
 27. Aiello, A., Canora, F., Pasquariello, G., Spilotro, G. (2013). Shoreline variations and coastal dynamics: A space-time data analysis of the Jonian littoral, Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 129, 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.06.012>
 28. Ratih, D. (2013). Kajian Erosi Pantai di Kawasan Pantai Muarareja Kota Tegal, Provinsi Jawa Tengah. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
 29. Besset, M., Gratiot, N., Anthony, E.J., Bouchette, F., Goichot, M., Marchesiello, P. (2019). Mangroves and shoreline erosion in the Mekong River delta, Viet Nam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 226(February), 106263. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106263>
 30. Solihuddin, T., Salim, H.L., Husrin, S., Daulat, A., Purbani, D. (2020). Dampak Tsunami Selat Sunda di Provinsi Banten dan Upaya Mitigasinya. *Jurnal Segara*, 16(1), 15–28.
 31. Ten Brink, U.S., Chaytor, J.D., Geist, E.L., Brothers, D.S., Andrews, B.D. (2014). Assessment of tsunami hazard to the US Atlantic margin. *Marine Geology*, 353, 31–54
 32. Sambah, A.B., Miura, F. (2016). Spatial data analysis and remote sensing for observing tsunami-inundated areas. *International Journal of Remote Sensing*, 37(9), 2047–2065.
 33. Sambah, A. B., Miura, F. (2014). Integration of spatial analysis for tsunami inundation and impact assessment. *Journal of Geographic Information System*, 2014.
 34. Zhang, Y., Li, D., Fan, C., Xu, H., Hou, X. (2021). Southeast Asia island coastline changes and driving forces from 1990 to 2015. *Ocean & Coastal Management*, 215, 105967. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105967>
 35. Setyawan, W.B. (2021). Meulaboh Tombolo Response to Large Tsunami, West Coast of Sumatra Island, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 750(1), 12019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/750/1/012019>
 36. Yamanaka, Y., Shimozono, T. (2022). Tsunami inundation characteristics along the Japan Sea coastline: effect of dunes, breakwaters, and rivers. *Earth, Planets and Space*, 74(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01579-5>
 37. Tanaka, N. (2009). Vegetation bioshields for tsunami mitigation: review of effectiveness, limitations, construction, and sustainable management. *Landscape and Ecological Engineering*, 5(1), 71–79. <https://doi.org/10.1007/s11355-008-0058-z>

38. Irtem, E., Gedik, N., Kabdasli, M.S., Yasa, N.E. (2009). Coastal forest effects on tsunami run-up heights. *Ocean Engineering*, 36(3): 313–320.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.11.007>
39. Tanaka, N., Sasaki, Y., Mowjood, M.I.M., Jinadasa, K.B.S.N., Homchuen, S. (2007). Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: experience of the recent Indian Ocean tsunami. *Landscape and Ecological Engineering*, 3(1), 33–45.
<https://doi.org/10.1007/s11355-006-0013-9>