

EFEKTIFITAS KONSEP RUANG EKSTRA SEBAGAI ALTERNATIF MITIGASI PENJALARAN TSUNAMI DI SUNGAI

Rajuli Amra¹, Samsunan¹

¹⁾ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar
Jl. Alue Penyareng, Meureubo, Aceh Barat, 23615

email: rajuliamra@utu.ac.id, samsunan@utu.ac.id

Abstract: Tsunami could penetrate up far upstream of the river and brought serious damage to in-river structures and flooded the residential area. Mitigating propagated wave conventionally by raising the river embankment was ineffective and amplified tsunami force in the river. Relocating the river embankment in specific configuration which resulted the “extra room”, successfully dissipate the tsunami flow in river. The effectivity of this approach was constrained by room capacity and layout. This research investigated the most effective layout for “extra-room” application against tsunami in the meandering river. The investigation conducted numerically using COMCOT model to simulate 60-minutes tsunami for 2m wave height. The symmetric moderate sinous-river planform ($\theta_0=60^\circ$, length=1 km, width= 0,4 km) was modelled using sine-generated curve, while the bed topography adopted the transversal bed elevation concept. Using the stiff-assumption for various layout scenario, the result revealed that along-river enlargement proved more effective in dissipating the tsunami height by 63%, compare to lateral-river expansion. In addition, enlarging the river capacity at the inflection point gave less effect, compare than widening the room at the river mouth area. The applicability of the proposed mitigation concept was not applied universally, in which the embankment overtopping and riverine inundation might still occur when intial tsunami wave height exceeds the tsunami design amplitude.

Keywords : Tsunami, extra-room, alternative mitigation, meandering river, numerical simulation.

Abstrak: Penjalaran tsunami ke dalam sungai dapat menyebabkan kerusakan yang serius bagi infrastruktur wilayah sungai dan berpotensi menyebabkan banjir ke area pemukiman. Meninggikan tanggul sungai terbukti tidak efektif dalam mengurangi efek yang ditimbulkan oleh intrusi tsunami. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa penambahan ruang untuk aliran sungai (*extra-room*) dapat mereduksi ketinggian tsunami di sungai. Ruang tambahan untuk sungai diperoleh dengan merelokasi tanggul sungai dengan konfigurasi tertentu. Penelitian ini merupakan kajian awal yang bertujuan untuk mengetahui bentuk *layout* yang efektif dalam mengurangi ketinggian tsunami yang menjalar di sungai. Terdapat dua variasi kapasitas ruang tambahan yang diuji. Untuk kapasitas 100 ha, *layout* yang digunakan adalah *river mouth expansion* (ERv1) dan *inflection point expansion* (ERv2). Sedangkan untuk kapasitas 150 ha, *layout* yang digunakan adalah *along river expansion* (ERv3) dan *lateral river expansion* (ERv4). Aliran tsunami dimodelkan menggunakan model COMCOT dengan ketinggian gelombang awal 2 m dan waktu simulasi adalah 60 menit. Model sungai yang digunakan berbentuk *meander* simetris yang mengadopsi konsep *sine generated curve*. Sedangkan topografi dasar sungai dimodelkan menggunakan konsep *transversal bed elevation*. Dimensi sungai yang disimulasikan adalah panjang 1 km, lebar 400 m, kedalaman acuan 10 m dan sudut pembelokan maksimum sebesar 60 derajat. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi ERv3 lebih signifikan dalam mereduksi ketinggian tsunami, yaitu sebesar 63% lebih kecil dibandingkan dengan kondisi awal. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa perluasan ruang di titik awal pembelokan sungai (ERv2) tidak berkontribusi secara signifikan dalam mengurangi tinggi tsunami. Efektifitas konsep ruang tambahan tidak berlaku secara menyeluruh dan sangat dipengaruhi oleh ketinggian tsunami rencana.

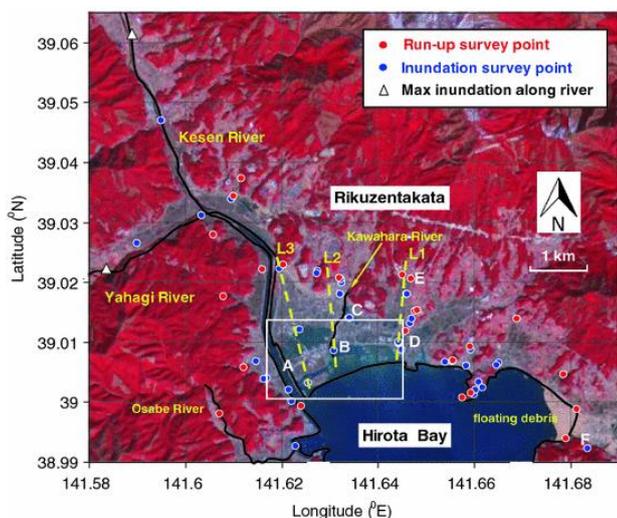
Kata kunci : Tsunami, ruang tambahan, mitigasi alternative, sungai bermeander, simulasi numerik

1. PENDAHULUAN

Beberapa kejadian tsunami terdahulu membuktikan bahwa daerah yang jauh dari pesisir pantai juga memiliki resiko terdampak tsunami. Hasil survei pasca-tsunami Aceh 2004

mengungkapkan bahwa tsunami dapat merambat hingga 14 km dari bibir pantai melalui proses intrusi Sungai *Krueng Aceh* [1]. Tsunami yang merambat ke sungai dapat menyebabkan kerusakan bagi struktur jembatan, dermaga dan juga membahayakan pemukiman di sekitar sungai. Pada kasus

Tsunami Jepang 2011, genangan yang diakibatkan oleh tsunami juga terjadi di pemukiman penduduk yang berada di daerah dataran tinggi. Tsunami dapat merambat hingga mencapai dataran tinggi tersebut dengan mengintrusi Sungai Yahagi, sebagaimana yang ditampilkan pada **Gambar 1** [2].



Gambar 1. Hasil survei pasca-Tsunami Jepang 2011 di daerah Rikuzentakata. Garis hitam mengindikasikan batas garis pantai dan sungai sebelum tsunami.

Tsunami yang merambat ke daerah aliran sungai memiliki karakteristik yang berbeda, bila dibandingkan dengan penjalaran tsunami di pantai terbuka [3]. Pada [4] menyimpulkan bahwa struktur pelindung daerah bantaran sungai, seperti tanggul sungai (*river embankment*) tidak efektif dalam menanggulangi tsunami yang menjalar di sungai. Ketika tsunami melanda Jepang pada tahun 2011, limpasan tsunami dan kerusakan tanggul banyak ditemukan pada daerah belokan sungai (*bending section*). Hal ini disebabkan oleh dinamika gaya yang diakibatkan oleh tsunami mengalami amplifikasi di bagian lingkaran luar sungai (*outer bank*) [5]. Perbedaan standar desain juga mempengaruhi rusak atau tidaknya tanggul sungai. Umumnya, tanggul sungai direncanakan untuk memitigasi debit banjir yang berlebih, bukan debit dari aliran tsunami. Secara konvensional, peningkatan elevasi tanggul sungai menjadi opsi yang layak dalam menanggulangi resiko limpasan akibat tsunami. Namun, semakin tinggi elevasi tanggul akan mengakibatkan level banjir di sungai ikut meningkat [6]. Peningkatan level banjir, dalam konteks ini merupakan ketinggian tsunami (*tsunami flowdepth*), akan

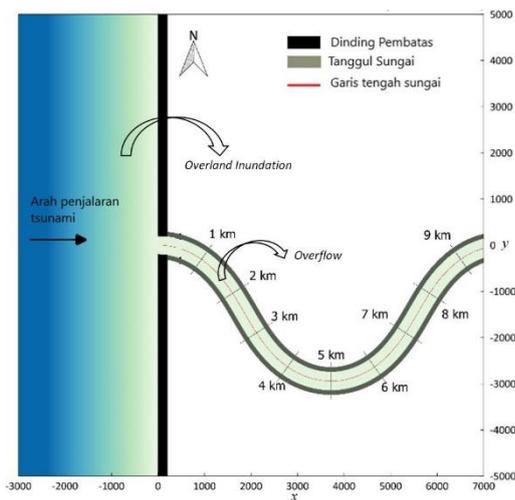
diikuti oleh meningkatnya kecepatan aliran dan *drag force* tsunami [7]. Seiring dengan meningkatnya *drag force*, maka kekuatan tanggul sungai juga perlu ditingkatkan (*reinforced*) dan proses ini tentunya membutuhkan biaya yang besar (*costly*).

Salah satu cara mengurangi tinggi aliran di dalam sungai adalah dengan memberikan ruangan tambahan (*extra room*) yang dapat menampung debit aliran yang meningkat [6]. Aplikasi yang telah diterapkan untuk program pengurangan resiko banjir di Belanda ini dipengaruhi oleh kapasitas ruang dan bentukruang tambahan. Namun, aplikasi ini menggunakan perspektif aliran dari hulu ke hilir. Penerapan konsep serupa untuk mitigasi tsunami memerlukan modifikasi dengan mengubah perspektik banjir dari arah hilir ke bagian hulu. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bentuk ruang tambahan yang paling efektif dalam mengurangi tinggi aliran tsunami di sungai. Investigasi dilakukan menggunakan permodelan numerik dan dibagi ke dalam dua tahapan, tahap sebelum dan sesudah konsep ruang tambahan diaplikasikan. Terdapat beberapa titik pengamatan yang diletakkan di sungai. Perbandingan reduksi ketinggian gelombang antar titik tersebut menjadi acuan dalam menentukan efektif atau tidaknya *layout* ruang tambahan.

2. METODE PENELITIAN

Area Simulasi

Area simulasi berbentuk persegi dengan luasan 10x10 km², seperti yang ditampilkan dalam **Gambar 2**. Area simulasi terbagi ke dalam tiga wilayah, yaitu area pembangkitan tsunami (laut), area penjalaran (sungai) dan area terdampak genangan (*floodplain*). Detail area simulasi disajikan dalam **Tabel 1**.



Gambar 2. Ilustrasi area simulasi numerik.

Tabel 1. Detail area simulasi

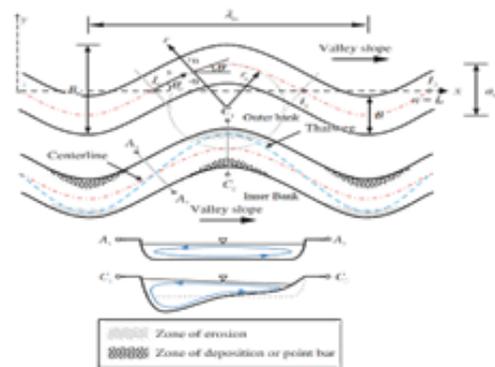
Area	Keterangan
Pembangkitan (Laut)	Koordinat: kartesian $X = -3000$ (start), 0 (end); $Y = -5000$ (start), 5000 (end); Slope = 0.125, mulai dari $X = -2500$; Kedalaman (H) max = 30 m; Shoreline (dry area) $H = 0$ m, $X = 0, 0$; H dinding pembatas = 10 m.
Floodplain	Koordinat: kartesian $X = 0$ (start), 10000 (end); $Y = -5000$ (start), 5000 (end); H = 0 m.
Penjalaran (sungai)	Panjang (L) = 10 km, lebar sungai (B) = 400 m Kedalaman acuan (H) = 10 m; Posisi titik pengamatan: per 1 km lateral sungai di tengah sungai (river centerline); H tanggul sungai awal = 1,5 m

Pemisahan genangan yang berasal dari gelombang run-up (*overland inundation*) dan limpasan dari gelombang intrusi (*overflow*) dilakukan dengan membuat dinding pembatas yang diletakkan di garis pantai. Pemisahan genangan diperlukan untuk menandai lokasi terjadinya limpasan yang diakibatkan oleh intrusi tsunami, khususnya di daerah hilir sungai di mana genangan akibat run-up dan limpasan tsunami di sungai dapat bercampur.

Dinding pembatas dan tanggul sungai (*river embankment*) diasumsikan sebagai struktur yang stabil dan tidak akan hancur akibat gaya yang ditimbulkan oleh tsunami. Oleh karena itu, penelitian ini tidak mengkaji mekanisme keruntuhan tanggul dan perubahan momentum yang diakibatkan oleh perubahan *layout* tanggul sungai. Di samping mekanisme keruntuhan tanggul, hubungan variasi bentuk

muara (*river mouth*) terhadap karakteristik penjalaran gelombang juga tidak dibahas. Untuk memperoleh geometri area penjalaran dengan konsep *symmetric minimum variance*, maka tipe mulut sungai yang digunakan berbentuk persegi [8].

Konsep *symmetric minimum variance* digunakan untuk menyederhanakan permodelan geometri sungai yang memiliki tingkat ketidakteraturan yang tinggi [9]. Dalam penelitian ini, geometri sungai berbentuk melengkung (*meander*) dengan sudut lengkung maksimum sebesar 60 derajat. Dalam sistem klasifikasi Rosgen, sungai dengan sudut lengkung maksimum 60 derajat diklasifikasikan sebagai sungai bermeander sedang [10]. Permodelan geometri sungai dilakukan melalui pendekatan *sine generated curve* yang dimuat dalam Persamaan (1) [10].



Gambar 3. Notasi matematika model sine generated curve dan ilustrasi elevasi dasar sungai bermeander. Sumber: Subhasish (2011).

Sungai yang bermeander memiliki elevasi dasar yang unik, sebagaimana yang diilustrasikan dalam Gambar 3. Untuk simplifikasi model dasar sungai (*bed model*), maka digunakan pendekatan *transversal bed elevation* yang dimuat dalam Persamaan (4) [11].

$$\theta(s) = \theta_0 \cos 2\pi \frac{s}{L} \quad (1)$$

Geometri sungai yang diperoleh dari Persamaan (1) memiliki orientasi *curvelinear* (s,n). Transformasi proyeksi *curvelinear* ke proyeksi kartesian (x,y) dilakukan menggunakan Persamaan (2) dan (3) [10].

$$x(t) = \int_0^t \cos(\theta(s)) ds \quad (2)$$

$$y(t) = \int_0^t \sin(\theta(s)) ds \quad (3)$$

dimana:

$$\frac{\Delta x}{\Delta s} = \cos \theta; \quad \frac{\Delta y}{\Delta s} = \sin \theta; \quad s: 0 < s < L; \quad t: 2\pi \frac{s}{L}$$

$$\theta_0 = 60^\circ; L = 10 \text{ km}; s = 100 \text{ m}; \pi = 3.14$$

s : segmen perubahan posisi arah transversal sungai (m);

L : panjang aliran sungai (m);

θ : perubahan sudut aliran sungai (derajat);

θ_0 : sudut maksimum (derajat);

x : posisi arah x dalam koordinat kartesian

y : posisi arah y dalam koordinat kartesian

Model transversal bed elevation (notasi mengikuti Gambar 3):

$$h = \left(1 - \frac{h_c}{S_t n}\right) \| S_t n, 0 \| + \frac{h_c}{S_t n} \text{Exp}\left(-S_t \frac{n}{H}\right) \| S_t n, 0 \| \quad (4)$$

$$A = 3.8 \left(1 + \frac{B}{6.96H} \text{Exp}\left(\frac{-6.96H}{B}\right)\right) \quad (5)$$

dimana:

$$S_t = -AHC; \quad C = \frac{\partial \theta}{\partial s}$$

h : nilai kedalaman lateral (cross) sungai (m);

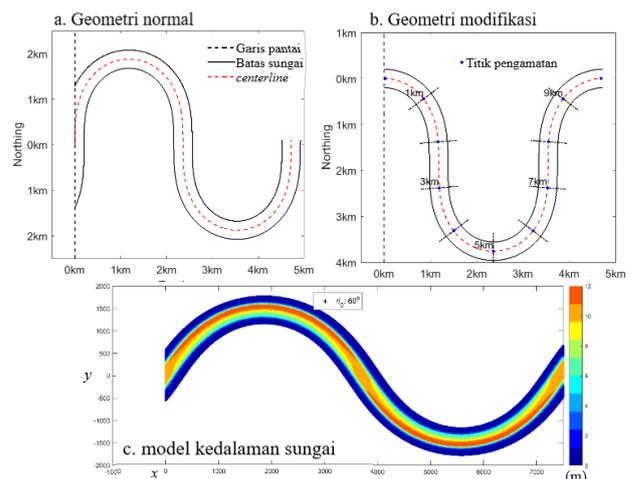
h_c : nilai kedalaman di centerline ($B/2$) (m);

B : lebar sungai (m) = 400 m;

H : kedalaman acuan (m) = 10 m;

n : segmen perubahan posisi arah lateral sungai (m)

Untuk menyesuaikan geometri sungai yang diperoleh dari persamaan Persamaan (1) dan (4) dengan geometri mulut sungai yang berbentuk persegi, maka dilakukan geometri sungai dimodifikasi agar memenuhi kaidah *symmetric minimum variance*, sebagaimana yang diilustrasikan dalam Gambar 4 [10].



Gambar 4. Geometri sungai bermeander: a. sebelum fitting, b. setelah fitting, c. bed model berdasarkan Persamaan (4)

Model Aliran Tsunami

Dalam penelitian ini, aliran tsunami disimulasikan menggunakan model matematika COMCOT. Model ini menggunakan persamaan gelombang tunggal sebagai sumber pembangkit tsunami [12]. Penggunaan gelombang tunggal (*solitary wave*) dalam beberapa penelitian terkait tsunami sudah sering dilakukan [13].

Model COMCOT menggunakan persamaan air dangkal dua dimensi sebagai dasar perhitungan aliran massa air dan momentum. Model ini telah divalidasi menggunakan beberapa studi kasus, khususnya untuk bagian run-up gelombang, luas genangan dan waktu tempuh aliran [12]. Persamaan air dangkal diformulasikan dalam dua bagian, yaitu kontinuitas fluktuasi muka air dan momentum. Dari persamaan yang menghitung fluktuasi muka air, diperoleh ketinggian gelombang tsunami yang merambat ke sungai. Untuk komponen kecepatan diperoleh dari perhitungan persamaan momentum. Namun, model matematika ini memiliki beberapa kekurangan, di antaranya adalah tidak dapat memodelkan karakter gelombang pecah. Hal ini menyebabkan karakteristik aliran yang disimulasikan memiliki beberapa batasan.

Hasil simulasi dari model COMCOT yang digunakan sebagai dasar analisis terbatas pada nilai

ketinggian dan kecepatan tsunami maksimum di tiap-tiap titik pengamatan, serta distribusi genangan di sekitar sungai apabila terjadi luapan. Transformasi bentuk aliran ketika tsunami memasuki daerah sungai tidak ditinjau dalam kajian ini. Di samping itu, tanggul sungai juga diasumsikan sebagai struktur yang *rigid*, sehingga mekanisme keruntuhan tanggul sungai yang dapat diakibatkan oleh tsunami tidak akan dibahas.

Karakteristik aliran tsunami di dalam sungai dipengaruhi oleh beberapa komponen lain. Beberapa penelitian terdahulu menyebutkan bahwa interaksi antara tsunami, pasang surut dan debit sungai akan mempengaruhi kecepatan dan elevasi tsunami di sungai [14], [15]. Interaksi komponen aliran tersebut juga mempengaruhi waktu tempuh tsunami mencapai daerah hulu sungai. Di samping interaksi aliran tersebut, penjalaran tsunami hingga ke daerah hulu sungai juga dipengaruhi oleh kemiringan dasar sungai [1], [16]. Demi simplifikasi skenario simulasi, komponen pasang surut dan debit sungai tidak dijadikan bagian dari parameter simulasi. Selain itu, pengaruh kemiringan sungai juga tidak dikaji, sehingga nilai kemiringan sungai yang digunakan berupa nilai tunggal. Parameter simulasi yang digunakan dimuat dalam **Tabel 2**. Simulasi akan dilakukan dalam dua tahapan, yaitu sebelum dan sesudah pendekatan ruang tambahan diaplikasikan. Detail mengenai skenario simulasi dimuat dalam **Tabel 3**.

Modifikasi *Layout* Tanggul Sungai

Peningkatan daya tampung aliran di sungai dapat dilakukan dengan pengerukan atau merelokasi posisi tanggul ke arah yang lebih jauh dari lokasi awal, sehingga diperoleh ruang tambahan [17]. Dalam penelitian ini, ruang tambahan diperbesar dengan merelokasi bagian dari tanggul ke arah tertentu, sebagaimana yang ditampilkan dalam **Gambar 5**.

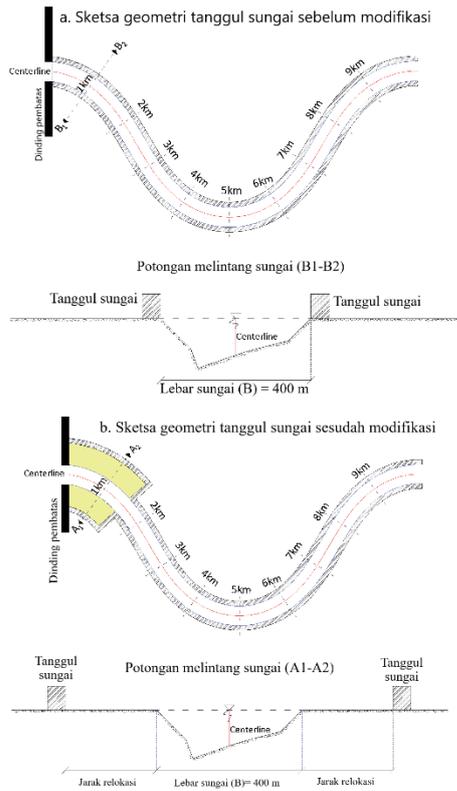
Tabel 2. Parameter simulasi

Parameter	Keterangan
<i>Flow simulated time, T</i>	6000 s
<i>Time step, Δt</i>	0.05 s
Ukuran grid, Δx, Δy	10 m
Tinggi gelombang awal	2 m
Koefisien manning, n	0.025
Percepatan gravitasi	9.81 m/s ²
<i>Boundary condition</i>	<i>Open boundary</i>
Kemiringan	Laut= 0.125 Sungai=0.001
Jumlah titik pengamatan	10

Tabel 3. Skenario simulasi

Skenario	Keterangan
Tahapan I	
Kondisi normal (I-A)	Elevasi tanggul 1,5 m
Kondisi tidak terjadi limpasan (I-B)	Nilai ketinggian tsunami maksimum berdasarkan hasil simulasi skenario I-A akan menjadi nilai elevasi tanggul yang baru
Tahapan II	
Modifikasi <i>layout</i> tanggul sungai untuk memperoleh ruang tambahan	Empat <i>layout</i> modifikasi dengan kapasitas ruang tambahan sebesar 100 ha dan 150 ha

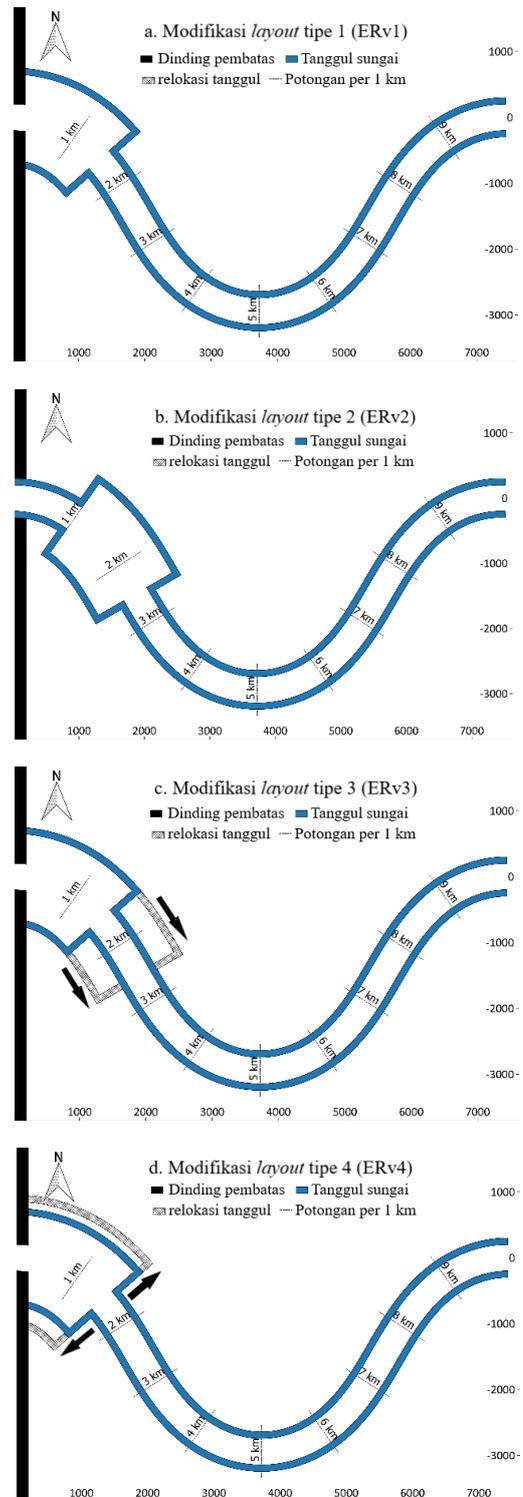
Modifikasi *layout* tanggul sungai yang pertama dilakukan dengan memperhatikan karakteristik tsunamidi sungai. [18] menyebutkan genangan yang diakibatkan oleh limpasan tsunami cenderung dominan di daerah hilir sungai. Hal ini sejalan dengan distribusi elevasi tsunami yang juga lebih tinggi di daerah hilir sungai. Berdasarkan temuan tersebut, modifikasi tanggul sungai dilakukan dengan memperbesar kapasitas ruang aliran di daerah hilir sungai. Skenario modifikasi ini selanjutnya disebut dengan skenario ERv1. Relokasi posisi tanggul untuk skenario ERv1 dilakukan sejauh 350 m dari posisi semula ke arah *floodplain*. Titik relokasi dimulai dari titik 0 km sampai dengan titik 1,5 km sungai, sehingga diperoleh kapasitas ruang tambahan sebesar 100 ha.



Gambar 5. Ilustrasi modifikasi *layout* tanggul sungai untuk menambah kapasitas ruang tambahan.

Modifikasi *layout* tanggul sungai untuk skenario berikutnya (ERv2) dilakukan dengan memperhatikan sifat aliran di geometri yang melengkung. Blanckaert (2011) menyebutkan bahwa titik awal perubahan sudut (*inflection point*) dari suatu saluran bergeometri melengkung akan mempengaruhi kecepatan aliran. Dalam model sungai yang digunakan, *inflection point* terletak di titik 1 km sungai. Maka, titik relokasi dimulai dari titik 1 km sampai dengan titik 2,5 km sungai, dengan kapasitas ruang tambahan masih sebesar 100 ha. Untuk skenario berikutnya (ERv3), kapasitas ruang tambahan akan diperbesar hingga 200 ha. Hal ini untuk mengetahui pengaruh penambahan kapasitas ruang terhadap reduksi ketinggian tsunami. Peningkatan kapasitas ruang tambahan ini merupakan modifikasi dari skenario ERv1. Untuk skenario ERv3, jarak relokasi tanggul akan diperbesar mengikuti bentuk sungai (*along river expansion*). Sedangkan untuk skenario ERv4, jarak relokasi tanggul akan diperbesar mengikuti bentuk melintang sungai (*lateral river expansion*). Hasil

modifikasi *layout* tanggul sungai ditampilkan dalam Gambar 6.

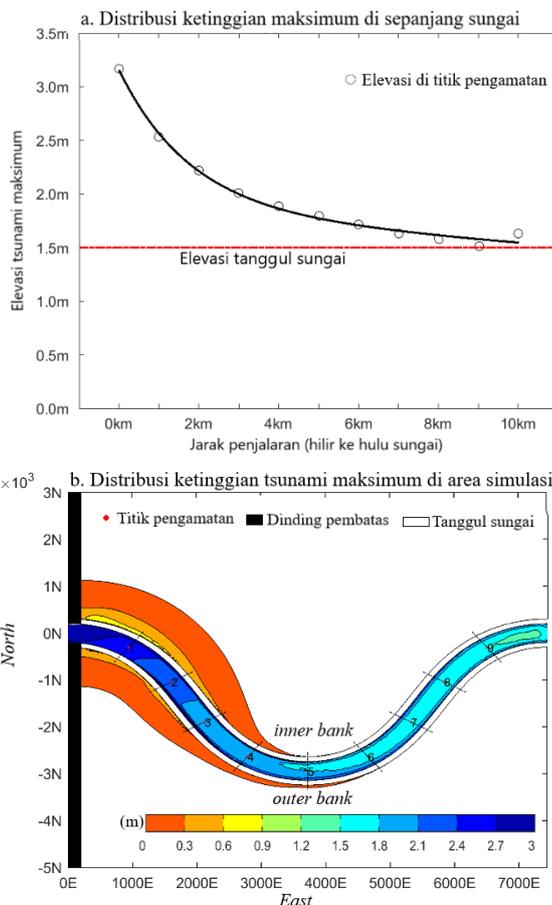


Gambar 6. Modifikasi *layout* tanggul sungai untuk skenario: a. ERv1, b. ERv2, c. ERv3 dan d. ERv4

3. HASIL PENELITIAN

Tahapan Pertama

Pola perambatan ketinggian tsunami maksimum di sungai berdasarkan hasil simulasi skenario I-A ditampilkan dalam **Gambar 7a**. Berdasarkan gambar tersebut, ketinggian maksimum tsunami di sepanjang sungai melewati elevasi tanggul sungai. Ketinggian tsunami yang merambat ke sungai lebih signifikan di daerah hilir dan akan berkurang seiring dengan bertambahnya jarak perambatan. Hal ini menyebabkan limpasan tsunami menjadi lebih dominan di daerah hilir sungai, mengingat elevasi tanggul sungai yang seragam dari hulu hingga hilir sungai, sebagaimana yang ditampilkan dalam **Gambar 7b**.

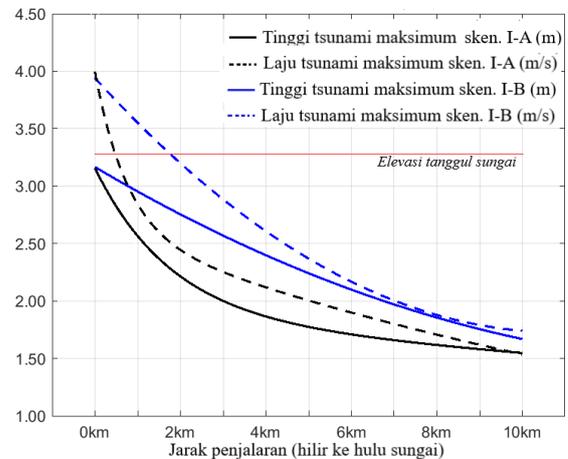


Gambar 7. Distribusi ketinggian maksimum tsunami di: a. sepanjang sungai, b. Seluruh area simulasi

Hasil simulasi skenario I-A juga menunjukkan bahwa pola limpasan lebih dominan di sisi *outer bank*. Sebagaimana yang dimuat di **Gambar 7b**, genangan

hampir mencapai jarak 6 km. Sementara pada sisi *inner bank*, genangan bahkan tidak mencapai jarak 5 km. Hasil survei [5] juga mengungkapkan pola limpasan yang yang dominan di sisi *outer bank* pada kasus Tsunami Jepang 2011. Namun, mengingat keterbatasan model matematika yang digunakan dalam penelitian ini, diperlukan kajian yang lebih mendalam untuk memvalidasi kemiripan pola limpasan antara hasil survei pasca-tsunami dan hasil simulasi.

Secara konvensional, aliran tsunami yang melimpas dapat ditanggulangi dengan meningkatkan elevasi tanggul. Dalam skenario I-B, elevasi tanggul sungai ditingkatkan hingga mencapai 3,25 m. Hasil simulasi skenario I-B ditampilkan dalam **Gambar 8**.



Gambar 8. Distribusi ketinggian dan kecepatan tsunami sebelum dan sesudah elevasi tanggul sungai ditingkatkan.

Hasil simulasi skenario I-B membuktikan bahwa peningkatan elevasi tanggul dapat memproteksi daerah sekitar sungai dari risiko limpasan tsunami. Namun, preservasi aliran tsunami untuk tetap berada di sungai malah meningkatkan debit aliran, yang pada akhirnya akan meningkatkan ketinggian dan kecepatan tsunami di sungai.

Jika kecepatan aliran tsunami linier terhadap gaya yang diakibatkan oleh tsunami, maka meningkatkan elevasi tanggul sungai, dapat diasumsikan, juga ikut meningkatkan risiko terhadap tanggul sungai dan tiang jembatan. Berbeda dengan skenario sebelumnya (I-A),

limpasan yang terjadi memungkinkan debit aliran berkurang, sehingga elevasi tsunami yang merambat ke hulu sungai lebih rendah bila dibandingkan dengan skenario I-B. Peningkatan elevasi dan kecepatan tsunami pada skenario I-B juga memiliki korelasi dengan luas ruang aliran, di mana peningkatan debit aliran tidak diikuti oleh peningkatan kapasitas ruang alir. Hal ini memungkinkan aliran tsunami untuk mengalir lebih cepat. Oleh karena itu, penambahan ruang aliran diperlukan guna mengurangi kecepatan aliran tsunami.

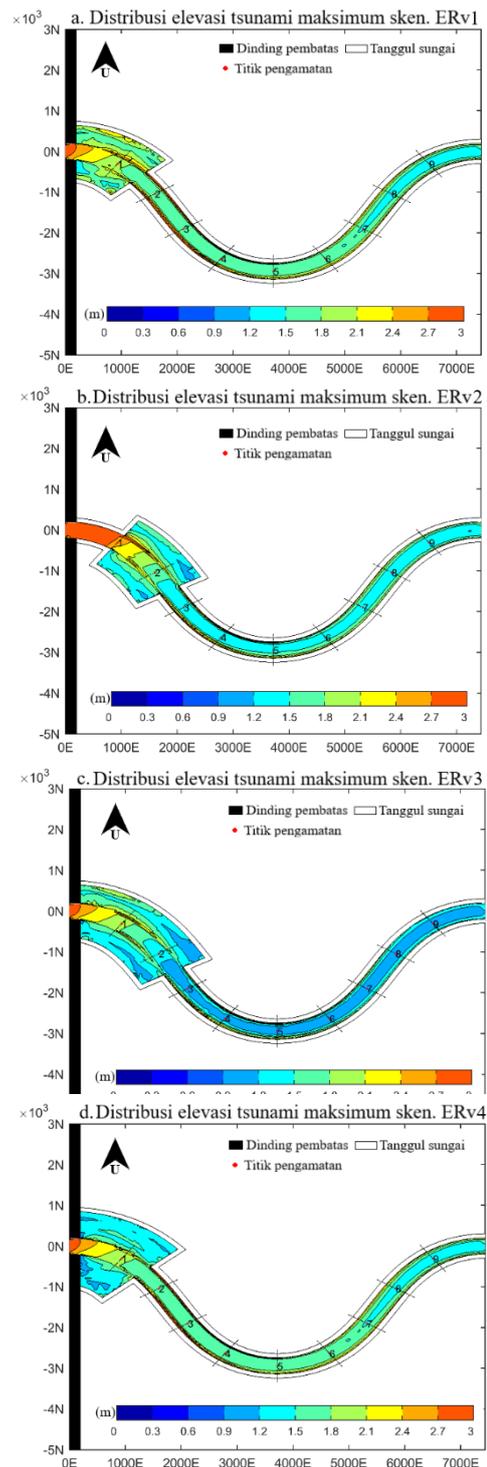
Tahapan Kedua

Perbandingan tingkat reduksi ketinggian tsunami sebelum dan sesudah penambahan ruang alir dimuat dalam **Tabel 4**. Persentase reduksi tsunami kumulatif dihitung dengan membandingkan perbedaan tinggi gelombang yang menjalar dari titik 0 km (titik kontrol) ke titik pengamatan selanjutnya. Mengingat jarak relokasi tanggul terjauh hanya mencapai titik 2,5 km dari mulut sungai (**Gambar 6**), maka tingkat reduksi yang ditampilkan hanya sampai dengan jarak 5 km. Di samping itu, perubahan tinggi tsunami pada titik pengamatan berikutnya tidak begitu signifikan, sebagaimana yang ditampilkan **Gambar 9**.

Tabel 4. Reduksi ketinggian tsunami secara kumulatif

Jarak	Tingkat reduksi (%)					
	Skenario	I-B	ERv1	ERv2	ERv3	ERv4
0 km	0	0	0	0	0	0
1 km	9	38	19	38	38	38
2 km	15	44	48	58	44	44
3 km	19	47	54	62	47	47
4 km	23	48	55	63	48	48
5 km	26	48	55	63	48	48

Distribusi ketinggian tsunami maksimum yang ditampilkan dalam **Gambar 9** menunjukkan bahwa ketinggian tsunami berkurang secara substansial di area ruang tambahan. Namun setelah melewati ruang tambahan, ketinggian tsunami cenderung seragam. Pola ini berlaku pada semua tipe *layout*. Tingkat reduksi pada



Gambar 9. Distribusi ketinggian maksimum tsunami pada skenario: a. ERv1, b. ERv3, c. ERv3 dan d. ERv4

titik pengamatan setelah ruang tambahan hanya berkurang rata-rata sebesar 5% dan pada akhirnya menuju 0%. Hal ini mengindikasikan bahwa ruang tambahan berfungsi sebagai peredam turbulensi aliran. Tingkat reduksi gelombang yang rendah dijadikan sebagai indikator

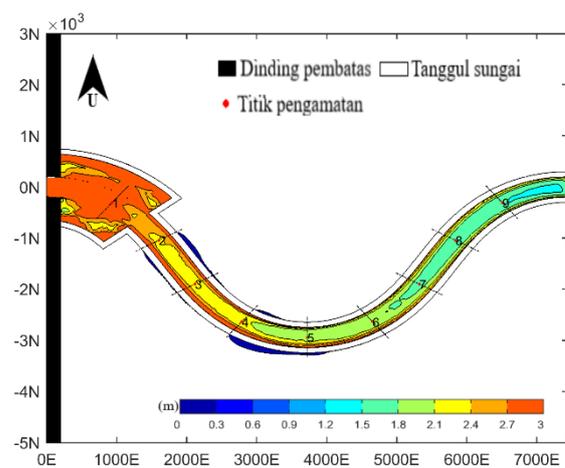
bahwa aliran tsunami di sungai lebih stabil. Tentunya, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk membuktikan dugaan ini.

Pada kasus ERv1, ERv3 dan ERv4, ketinggian tsunami pada titik 1 km berkurang hingga 38%. Berbanding terbalik dengan tiga skenario sebelumnya, ketinggian tsunami pada titik yang sama hanya berkurang sebesar 19% pada skenario ERv2 dan jauh lebih kecil (9%) pada kasus tanpa ruang tambahan (I-B). Hal ini menunjukkan bahwa posisi ruang tambahan berpengaruh terhadap pola reduksi tinggi gelombang. Semakin dekat posisi ruang tambahan dengan mulut sungai, maka semakin cepat pula laju reduksi tinggi gelombang. Namun, laju penurunan tinggi tsunami yang lebih cepat tidak menyebabkan tinggi gelombang yang merambat ke hulu sungai menjadi lebih kecil. Sebagai contoh, tingkat reduksi gelombang pada skenario ERv1 di titik 5 km hanya sebesar 48%, lebih kecil 7% bila dibandingkan dengan tingkat reduksi pada kasus ERv2. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh reduksi gelombang sudah terjadi sebelum memasuki ruang tambahan, sehingga tingkat reduksi gelombang kumulatif pada kasus ERv2 menjadi lebih besar. Titik awal ruang tambahan yang berada jauh dari mulut sungai akan menimbulkan zonasi di wilayah sungai, yaitu zona sebelum ruang tambahan, zona ruang tambahan dan zona setelah ruang tambahan. Sebagaimana yang dimuat dalam **Gambar 9b**, ketinggian tsunami di zona sebelum ruang tambahan lebih signifikan dibandingkan dengan dua zona lainnya. Dengan asumsi bahwa ketinggian gelombang yang merambat proporsional terhadap kecepatan dan gaya yang ditimbulkan, maka struktur tanggul sungai yang berada di zona tersebut akan menerima gaya yang lebih besar. Semakin besar gaya yang bekerja terhadap struktur tanggul, maka resiko keruntuhan tanggul juga akan semakin tinggi. Jika hal ini terjadi, maka daerah sekitar sungai akan digenangi oleh aliran tsunami.

Sementara itu, pada kasus ERv3 penambahan kapasitas ruang tambahan terbukti dapat meningkatkan reduksi ketinggian tsunami secara kumulatif. Pada kasus

ERv3, reduksi gelombang pada titik 5 km mencapai 63%, dengan ketinggian gelombang yang merambat berada pada rentang 0,9 m hingga 1,2 m. Sedangkan pada kasus ERv1, tinggi tsunami pada titik yang sama masih berada pada rentang 1,5 m sampai 1,8 m. Berbeda halnya dengan kasus ERv3, penambahan kapasitas ruang aliran pada kasus ERv4 tidak membuat laju reduksi gelombang meningkat. Secara kumulatif, skenario ERv4 menunjukkan pola reduksi yang sama dengan kasus ERv1. Hal ini dapat menjadi indikator bahwa perambatan aliran tsunami ke arah sejajar sungai lebih cepat daripada arah melintang sungai. Namun, diperlukan beberapa skenario tambahan untuk mendukung dugaan awal ini.

Selain dari *layout* dan kapasitas ruang, efektifitas ruang tambahan juga dipengaruhi oleh faktor tinggi gelombang awal. Ketika tinggi gelombang awal dinaikkan menjadi 3 m, maka limpasan akan kembali terjadi, sebagaimana yang ditampilkan dalam **Gambar 10**. Oleh karena itu, penentuan tinggi gelombang rencana merupakan faktor yang krusial dalam merencanakan struktur ruang tambahan. Tentunya, diperlukan penelitian lanjutan untuk mengetahui hubungan antara gelombang rencana, *layout* dan kapasitas ruang tambahan secara detail



Gambar 10. Distribusi ketinggian maksimum tsunami untuk skenario ERv1, di mana tinggi gelombang awal sebesar 3 m.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Perbandingan hasil simulasi tahap satu dan dua menunjukkan bahwa penambahan ruang aliran dapat

mengurangi tinggi tsunami yang menjalar ke hulu sungai. Tingkat reduksi gelombang memiliki keterkaitan dengan *layout*, posisi dan kapasitas ruang tambahan. Secara posisi, ruang tambahan sebaiknya diposisikan di daerah paling hilir sungai. Ruang tambahan yang dekat dengan mulut sungai akan menyebabkan laju reduksi yang lebih cepat. Selain itu, lokasi ruang tambahan yang tidak menempel dengan mulut sungai akan menimbulkan zona sebelum ruang tambahan. Keberadaan zona ini akan meningkatkan resiko keruntuhan bagi struktur tanggul sungai. Kapasitas ruang tambahan juga memiliki keterkaitan yang erat dengan bentuk *layout*. Penambahan kapasitas ruang alir dengan bentuk *lateral-river expansion* terbukti tidak dapat meningkatkan laju reduksi gelombang. Sebaliknya, *layout* dengan bentuk *along-river expansion* mampu mengurangi tinggi gelombang yang menjalar ke hulu sungai hingga 63% lebih rendah. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa *layout* ruang tambahan yang paling efektif dalam memitigasi penjalaran tsunami di sungai berbentuk *along-river expansion* yang diposisikan dekat dengan muara sungai.

Penelitian ini merupakan penelitian awal. Keterbatasan model matematika, skenario dan metode analisis yang digunakan membuat luaran yang dihasilkan dari penelitian ini membutuhkan validasi lanjutan. Beberapa hal yang perlu diperhatikan untuk kepentingan penelitian lanjutan adalah:

1. Model matematika yang digunakan dalam penelitian ini tidak mengakomodasi sifat dispersi gelombang, sehingga karakteristik gelombang yang dihasilkan berbeda dengan karakteristik tsunami di alam. Oleh karena itu, dianjurkan untuk menggunakan model matematika yang mampu mereplikasi karakter tsunami di alam, sehingga hasil yang diperoleh mendekati kondisi sesungguhnya;
2. Dalam penelitian ini, tanggul sungai diasumsikan stabil dan tidak akan terpengaruh oleh gaya yang diakibatkan oleh aliran tsunami. Untuk penelitian lanjutan, disarankan untuk menambah skenario

keruntuhan tanggul dengan menganalisis gaya yang bekerja pada struktur tanggul. Hal ini dianggap penting, mengingat banyaknya tanggul sungai yang dilaporkan hancur selama Tsunami Jepang 2011.

3. Dalam kondisi sesungguhnya, intrusi aliran tsunami dipengaruhi oleh kondisi pasang surut dan aliran sungai. Interaksi ketiga aliran tersebut tentunya akan berdampak pada jumlah debit air yang mengalir di sungai. Fluktuasi debit aliran tentunya akan berpengaruh pada kapasitas ruang tambahan dan pola limpasan tsunami;
4. Penggunaan geometry sungai dengan konsep *symmetric minimum variance* merupakan simplifikasi dari geometri sungai yang sebenarnya. Untuk mengetahui efektifitas aplikasi ruang tambahan dalam kondisi sesungguhnya, dianjurkan untuk menambah variasi geometri sungai;
5. Dalam penelitian lanjutan, gaya yang bekerja di dalam ruang tambahan hendaknya dikaji secara lebih detail, sehingga diperoleh *layout* ruang tambahan yang memiliki resiko keruntuhan yang kecil.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. B. Adityawan, H. Tanaka, dan H. Nagabayashi, "Investigation Of The River Mouth Morphology Changes In Samegawa River Induced By The 2011 Great East Japan Earthquake Tsunami," *J. Japan Soc. Civ. Eng. Ser. B1 (Hydraulic Eng.)*, 2013.
- [2] H. Liu *dkk.*, "The 11 March 2011 Tohoku Tsunami Survey in Rikuzentakata and Comparison with Historical Events," *Pure Appl. Geophys.*, 2013.
- [3] H. Yasuda, "One-dimensional study on propagation of tsunami wave in river channels," *J. Hydraul. Eng.*, 2010.
- [4] N. Mori, T. Takahashi, T. Yasuda, dan H. Yanagisawa, "Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up," *Geophysical Research Letters*. 2011.
- [5] Y. S. Tanaka N., Yagisawa J., "Overflow Pattern and the Formation of Scoured Region by the Tsunami Propagated in River Channels in Great East Japan Earthquake," pp. 2-9, 2012.
- [6] N. E. M. Asselman dan F. Klijn, "Making room

- for rivers: Quantification of benefits from a flood risk perspective,” *E3S Web Conf.*, 2016.
- [7] J. Song, R. De Risi, dan K. Goda, “Influence of flow velocity on tsunami loss estimation,” *Geosci.*, vol. 7, no. 4, 2017.
- [8] M. Roh, X. T. Nguyen, dan H. Tanaka, “Effect of river mouth morphology on tsunami propagation ascending rivers,” *J. Japan Soc. Civ. Eng. Ser. A2 (Applied Mech.)*, 2011.
- [9] D. Subhasish, *Fluvial Hydrodynamics*. 2011.
- [10] USDA, “Stream Restoration Design,” 2007.
- [11] J. D. Abad dan M. H. García, “Hydrodynamics in Kinoshita-generated meandering bends: Importance for river-planform evolution,” in *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2005 - Proceedings of the 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, 2006.
- [12] X. Wang dan W. L. Power, *COMCOT: a tsunami generation, propagation and run-up model*, no. August. 2011.
- [13] C. E. Synolakis dan E. N. Bernard, *Standards and procedures for NOAA evaluation of tsunami 1 numerical models*. Seattle, WA: U.S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Oceanic and Atmospheric Research, Pacific Marine Environmental Laboratory, 2007.
- [14] K. D. Kalmbacher dan D. F. Hill, “Effects of tides and currents on tsunami propagation in large rivers: Columbia River, United States,” *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.*, vol. 141, no. 5, 2015.
- [15] E. Tolkova, H. Tanaka, dan M. Roh, “Tsunami Observations in Rivers from a Perspective of Tsunami Interaction with Tide and Riverine Flow,” *Pure Appl. Geophys.*, vol. 172, pp. 953–968, 2015.
- [16] H. Tanaka, K. Kayane, M. B. Adityawan, M. Roh, dan M. Farid, “Study on the relation of river morphology and tsunami propagation in rivers,” *Ocean Dyn.*, vol. 64, pp. 1319–1332, 2014.
- [17] JICA, “Technical Standards and Guidelines for Planning and Design Flood Control and Sabo Engineering of the DPWH,” 2002.
- [18] K. Abe, “Tsunami propagation in rivers of the Japanese Islands,” *Cont. Shelf Res.*, 1986.
- [19] K. Blanckaert, “Hydrodynamic processes in sharp meander bends and their morphological implications,” *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2011.