

Simulasi Surge Tsunami dengan Metode Dam Break Menggunakan Reservoir Terbatas

David S.V.L Bangguna*

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Immanuel, Yogyakarta
Email: bangguna@gmail.com

Marthen M. Tangkeallo

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sintuwu Maroso, Poso
Email: tangkeallomarthen@gmail.com

Ebelhart O. Pandoyu

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sintuwu Maroso, Poso
Email: pandoyu_eo@yahoo.com

Pujiono

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sintuwu Maroso, Poso
Email: pujio73@yahoo.com

Orva E. Wuon

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sintuwu Maroso, Poso
Email: wuonelisabeth@gmail.com

Irnovia B. Pakpahan

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sintuwu Maroso, Poso
Email: pakpahanirnovia@gmail.com

Abstrak

Metode dam break untuk mensimulasikan surge tsunami di laboratorium biasanya menggunakan flume yang cukup panjang, sehingga bagian hulu flume yang merupakan ruang reservoir juga cukup panjang juga. Penggunaan reservoir yang panjang dapat memberikan gambaran waktu penjalaran surge tsunami di daratan saat simulasi yang cukup lama sehingga karakteristik surge tsunami dapat teramati dengan baik. Penggunaan flume yang pendek maka ruang reservoir yang digunakan juga terbatas panjangnya dan waktu penjalaran surge tsunami saat simulasi juga terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menggambarkan karakteristik surge tsunami hasil simulasi terhadap solusi Chanson menggunakan reservoir terbatas (pendek). Simulasi surge tsunami di saluran kering dilakukan dengan anggapan kondisi reservoir terbatas tanpa kemiringan dasar. Tinggi air di reservoir bervariasi dari (d_0) = 100 mm, 200 mm, 300 mm, dan 400 mm dan simulasi dilakukan sebanyak 3 kali untuk tiap tinggi reservoir. Simulasi surge tsunami dengan genangan hilir dilakukan dengan cara yang sama tetapi di hilir saluran diberi genangan awal dengan tinggi d_1 = 100 mm dan 150 mm dan tanpa kecepatan awal. Dari hasil analisis menunjukkan bahwa tinggi dan kecepatan surge tsunami dari simulasi untuk saluran kering dan tergenang mendekati hasil dari solusi Chanson, kondisi ini menunjukkan bahwa panjang flume yang terbatas dapat digunakan untuk mensimulasikan surge tsunami dengan metode dam break, juga simulasi dengan genangan awal dapat mensimulasikan bentuk gelombang undular bore dan fully developed bore.

Kata kunci: Simulasi, surge tsunami, dam break, reservoir terbatas

Abstract

The dam break method for simulating tsunami surges in the laboratory typically uses a sufficiently long flume, so that the upstream section of the flume, which serves as the reservoir, is also quite long. Using a long reservoir can provide a more extended simulation time for tsunami surge propagation on land, allowing the characteristics of the tsunami surge to be well observed. With a shorter flume, the reservoir space is also limited in length, and the simulation time for tsunami surge propagation is likewise constrained. This study aims to describe the characteristics of the simulated tsunami surge in comparison to the Chanson solution using a limited (short) reservoir. The tsunami surge simulation in a dry channel was conducted under the assumption of a limited reservoir with no bed slope. The water height in the reservoir varied from (d_0) = 100 mm, 200 mm, 300 mm, and 400 mm, and the simulation was performed three times for each reservoir height. The tsunami surge simulation with

* Penulis Korespondensi: bangguna@gmail.com

downstream inundation was conducted similarly, but with an initial downstream inundation height of $d1 = 100$ mm and 150 mm, without initial velocity. The analysis results showed that the height and velocity of the tsunami surge from the simulation for both dry and inundated channels approached the results from Chanson's solution. This indicates that a limited flume length can be used to simulate tsunami surges with the dam break method, and that simulations with initial inundation can simulate the waveforms of undular bore and fully developed bore.

Keywords: Simulation, tsunami surge, dam break, limited reservoir.

1. Pendahuluan

Gelombang tsunami merupakan gelombang panjang yang menjalar ke daratan. Pembangkitan gelombang tsunami di alam dapat disebabkan oleh pergeseran (dislokasi) kulit bumi di dasar laut yang menimbulkan gempa bumi dengan magnitudo diatas 7 contohnya tsunami Aceh 2004 dan tsunami Jepang 2011, tsunami akibat longsoran dalam laut contohnya tsunami Palu 2018 maupun dari dataran tinggi contohnya tsunami Selat Sunda 2018, tsunami akibat letusan gunung berapi bawah laut seperti tsunami Tonga 2022, dan jatuhnya benda langit (meteor) ke permukaan air (laut, danau). Gelombang tsunami saat dibangkitkan tinggi gelombangnya pendek tetapi kecepatan jalarnya hampir sama dengan kecepatan jalar pesawat sekitar 700 km/jam. Gelombang tsunami yang mendekati daratan (surge tsunami) kecepatannya akan berkurang karena pengaruh pendangkalan (*shoaling*) tetapi tinggi gelombangnya akan berlipat ganda dari tempat pembangkitannya.

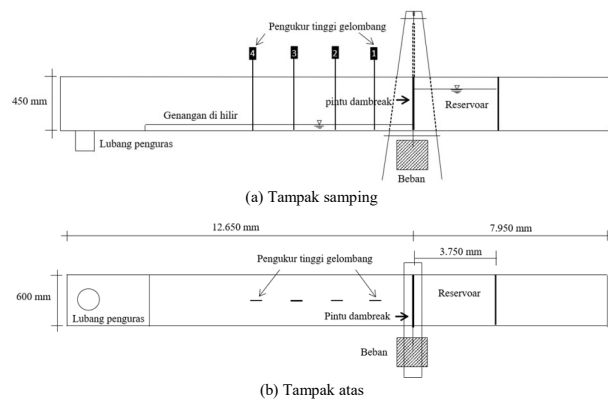
Penelitian terdahulu pemodelan gelombang tsunami di laboratorium menggunakan beberapa metode antara lain yaitu metode piston (*piston-type wave generation*) (Synolakis, 1990), (Briggs dkk. 1995), (Liu dkk. 1995), pemodelan tsunami dengan menggerakkan dasar vertikal (*vertical wave board motion*) (Raichlen, 1970), pemodelan tsunami dengan pelepasan volume air (*volume-driven wave generation*) (Rosetto dkk. 2011), (Warniyati dkk. 2018), pemodelan tsunami metode *dam break* (H. H. Yeh, 1991), (Chanson, 2005), (Chanson, 2006), (Bangguna dkk. 2016), (Kuswandi dkk. 2016), (Inabah dkk. 2020). Penelitian ini bertujuan mensimulasikan surge tsunami di laboratorium dengan metode *dam break* menggunakan reservoir terbatas. Penggunaan reservoir terbatas ini yang membedakan dengan penelitian terdahulu yang menggunakan reservoir tidak terbatas yang telah dilakukan oleh Chanson (2005). Hasil yang diharapkan dari penelitian ini yaitu panjang reservoir yang terbatas (lebih pendek) dapat digunakan untuk mensimulasikan surge tsunami dengan metode *dam break*.

2. Metodologi

Aliran air akibat *dam break* pada dasar kering dapat terjadi di dam dengan keadaan sungai yang kering, bisa juga terjadi saat tsunami menjalar ke daratan yang kering. Untuk memodelkannya perlu dibangun laboratorium set-up metode *dam break* di laboratorium yang terdiri dari dua bagian yaitu hulu (reservoir) yang berisi air dan hilir (saluran kering), kedua bagian tersebut dibatasi oleh pintu yang dapat dibuka dengan menjatuhkan beban. Pengertian reservoir terbatas dalam simulasi ini yaitu digunakan panjang reservoir



Gambar 1. Peletakan dinding pembatas reservoir di hulu pintu dambreak



Gambar 2. Sketsa laboratorium set-up simulasi surge tsunami dengan *dam break*

1.250 mm dan 3.750 mm, pemilihan panjang ini karena pada jarak tersebut terletak sambungan kaca flume sehingga peletakan dinding pembatas reservoir dapat lebih kokoh dan tidak merusak kaca flume saat simulasi (Gambar 1), dan tidak ada ketentuan khusus untuk pemilihan panjang reservoir ini. Pengurangan panjang reservoir ini bertujuan untuk membuktikan apakah metode *dam break* dengan solusi Chanson dapat diimplementasikan menggunakan flume pendek. Sketsa flume untuk simulasi surge tsunami di laboratorium menggunakan metode *dam break* dengan reservoir terbatas dapat dilihat dalam Gambar 2.

Metode *dam break* di laboratorium dilakukan dengan membuka pintu pembatas hulu dan hilir secara tiba-tiba (*quick release*) dengan menjatuhkan beban yang terhubung pada pintu *dam break*. Saat pintu *dam break* dibuka dengan tiba-tiba, bagian hulu reservoir akan terjadi gelombang negatif dan kedalaman air tepat di pintu *dam break* setelah dibuka tetap konstan (Chanson, 2006). Chanson (2005, 2006) memberikan solusi Persamaan untuk menggambarkan profil muka air gelombang negatif dan ujung gelombang yang berbentuk parabola. Persamaan (1) tersebut sebagai berikut.

$$\frac{x}{t\sqrt{g d_0}} = 2 - 3\sqrt{\frac{d}{d_0}} \tag{1}$$

Bangguna, dkk.

Persamaan (1) berlaku untuk kondisi:

$$-1 \leq \frac{x}{t\sqrt{gd_0}} \ll 2 \quad (2)$$

dengan x adalah jarak titik pengamatan dari pintu *dam break*, d adalah kedalaman penjalaran air setelah pintu *dam break* dibuka, d_0 adalah kedalaman air di reservoir. Kedalaman air di pintu *dam break* setelah dibuka yaitu:

$$d_{(x=0)} = 4/9 d_0 \quad (3)$$

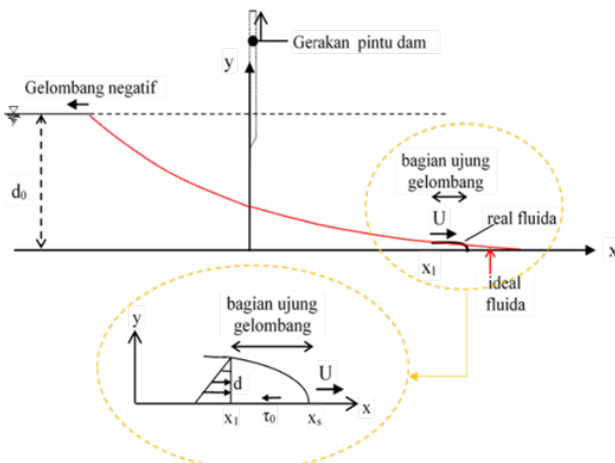
dengan $d_{(x=0)}$ adalah kedalaman air di pintu *dam break*.

Untuk dasar saluran kering, maka profil ujung dari gelombang *surge* dapat digambarkan menggunakan Persamaan berikut.

$$\frac{d}{d_0} = \sqrt{\frac{f U^2 x_s - x}{4 g d_0 d_0}} \quad (4)$$

dengan f adalah koefisien gesek dasar saluran

Bentuk dan proses terjadinya ujung *front* gelombang tsunami dan gelombang negatif digambarkan secara skematis oleh Chanson (2005) seperti dalam Gambar 3.



Gambar 3. Sketsa profil permukaan air bebas untuk fluida real (Chanson, 2005)

Dari Gambar 3. diatas menunjukkan daerah ujung gelombang ($x_1 \leq x \leq x_s$) berbentuk parabola karena adanya hambatan (f) pada aliran.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Simulasi surge tsunami di saluran kering

Simulasi *surge* tsunami di saluran kering menggunakan metode *dam break* dilakukan dengan anggapan kondisi reservoir terbatas tanpa kemiringan dasar saluran. Kondisi saluran hilir kering dengan pengertian tidak sepenuhnya dasar saluran kering, tetapi dalam kondisi tidak ada genangan atau aliran air. Tinggi permukaan air bebas di saluran hilir diukur menggunakan *wave probe* seri WTM-800 v2. Prinsip kerjanya berdasarkan perbedaan tegangan pada *strain* yang dilalui oleh air, perbedaan tegangan tersebut dikumpulkan dalam *data logger*. Untuk menghindari pengaruh *noise* (gangguan)

pada *data logger*, maka dipasang *signal condition*. Data yang sudah terkumpul dalam *data logger* selanjutnya diubah dalam bentuk *digit* (angka) menggunakan *software*. Bentuk *wave probe* seri WTM-800 v2 seperti Gambar 4.



Gambar 4. Wave Probe Seri WTM-800 v2

Saat simulasi *wave probe* ditempatkan di Sta 1, Sta 2, Sta 3, Sta 4 yang berjarak masing-masing stasiun 1 m dari pintu dambreak arah hilir flume, dan kecepatan penjalaran ujung muka air dihitung menggunakan Persamaan berikut (R. Triatmadja, 2014).

$$U = \frac{\frac{x_{1-2}}{t_{1-2}} + \frac{x_{2-3}}{t_{2-3}} + \dots + \frac{x_{n-(n+1)}}{t_{n-(n+1)}}}{n_t} \quad (5)$$

Dengan x_{n-n+1} adalah jarak antara stasiun n dan stasiun $n+1$, t_{n-n+1} adalah waktu perambatan *surge* dari stasiun

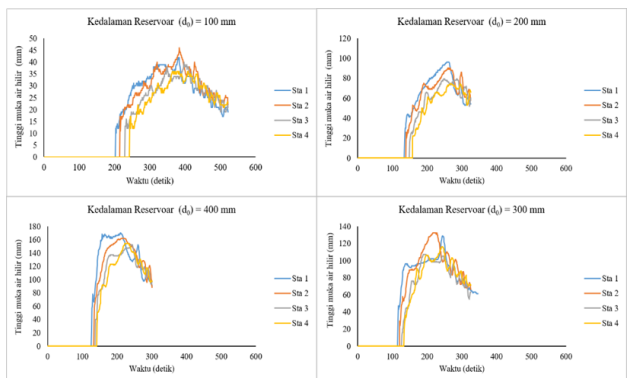


(a) Penjalaran muka air saat $t = 0,01$ detik setelah pintu *dam break* dibuka



(b) Penjalaran muka air saat $t = 1,19$ detik setelah pintu *dam break* dibuka

Gambar 5. Simulasi *dam break* dengan saluran hilir kering



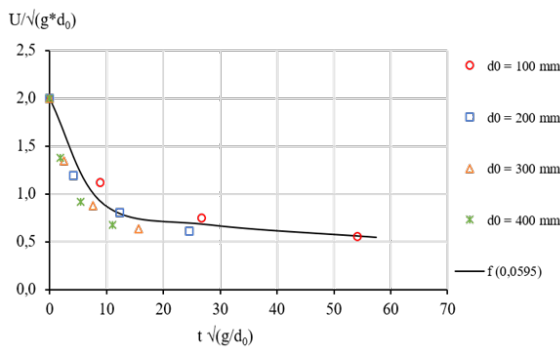
Gambar 6. Hasil pengukuran tinggi muka air pada titik pengamatan dengan saluran kering

n ke stasiun $n+1$, dan n_t adalah jumlah jarak antar *wave probe*.

Simulasi dilakukan dengan tinggi air di reservoir (d_0) = 100 mm, 200 mm, 300 mm, dan 400 mm dan simulasi dilakukan sebanyak 3 kali untuk tiap tinggi reservoir, pelaksanaan simulasi dapat dilihat dalam **Gambar 5** dan profil tinggi permukaan air bebas di saluran hilir setelah pintu *dam break* terbuka ditunjukkan dalam **Gambar 6**.

Gambar 6 diatas menunjukkan bentuk profil permukaan air bebas untuk tiap kedalaman reservoir berfluktuasi pada tiap titik pengukuran yang disebabkan terjadinya pembendungan air di depan silinder *wave probe* saat terkena aliran air. Jarak antar puncak profil permukaan air bebas pada saluran kering terlihat lebih renggang bila dibandingkan dengan profil permukaan air bebas dengan genangan awal yang lebih rapat (**Gambar 7**), hal ini menunjukkan adanya hambatan permukaan dasar saluran kering akibat aliran air.

Waktu terbentuknya puncak aliran untuk reservoir $d_0 = 100$ mm lebih lama dibandingkan dengan kedalaman reservoir yang lain, hal ini terjadi karena pengaruh volume air di reservoir, yang mana makin tinggi air di reservoir ($> d_0$) maka kecepatan jalar air setelah pintu *dam break* dibuka akan semakin cepat ($> U$) dan angka Froude yang merupakan fungsi dari kecepatan air juga akan meningkat ($> Fr$). Kondisi ini dapat dilihat dari



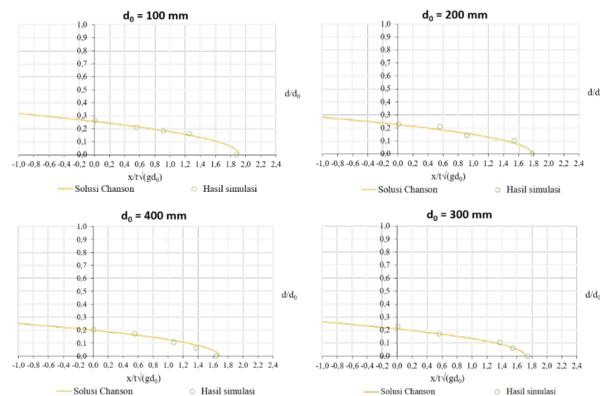
Gambar 7. Grafik koefisien gesek dasar saluran

hasil analisis kecepatan aliran dan nilai angka Froude dari hasil simulasi dan Chanson dalam **Tabel 1** di bawah.

Hasil simulasi penjalaran air dengan dasar saluran kering selanjutnya dianalisis menggunakan solusi Chanson untuk mengetahui nilai koefisien gesek dasar saluran yang merupakan fungsi angka Froude terhadap waktu. Hasil analisis nilai koefisien gesek dapat dilihat dalam **Gambar 7**.

Perbandingan karakteristik permukaan air bebas hasil simulasi *dam break* dan solusi Chanson untuk saluran kering dengan panjang reservoir berbeda dapat dilihat dalam **Tabel 1**.

Data hasil simulasi **Tabel 1** dengan menggunakan **Persamaan (1)** dan **(4)** dari solusi Chanson digunakan untuk menggambarkan profil permukaan air bebas di hulu saluran (negatif) dan hilir saluran (positif), yang selanjutnya diploting dengan hasil digitasi foto simulasi *dam break*. Ploting permukaan air bebas hanya dilakukan dengan digitasi simulasi *dam break* arah hilir saluran (positif) karena tidak dilakukan perekaman gambar untuk hulu saluran (negatif) dan simulasi lebih fokus untuk gelombang positif. Profil permukaan air bebas untuk saluran kering tiap kedalaman reservoir yang berbeda dapat dilihat dalam **Gambar 8**.



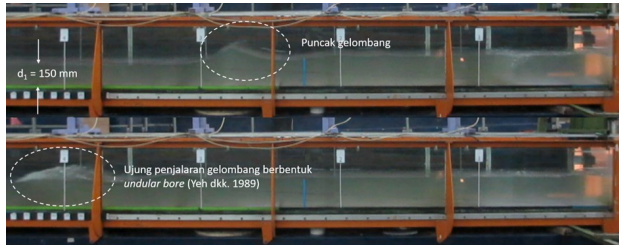
Gambar 8. Hasil simulasi *dam break* dengan reservoir terbatas dan analisis Chanson

Tabel 1. Karakteristik permukaan air bebas metode dam break di saluran kering

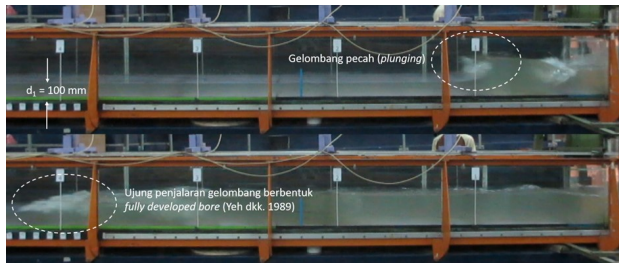
| d_0 (m) | Simulasi | | Chanson | | Angka Froude | | | Koefisien gesek |
|--------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|--------------|---------|----------------|-----------------|
| | Tinggi rerata (m) | Kecepatan surge (m/detik) | Tinggi rerata (m) | Kecepatan surge (m/detik) | Simulasi | Chanson | Perebedaan (%) | |
| Panjang Reservoir 1,25 m | | | | | | | | |
| 0,10 | 0,036 | 1,058 | 0,031 | 1,020 | 1,07 | 1,03 | 3,88 | 0,0595 |
| 0,20 | 0,065 | 1,614 | 0,049 | 1,611 | 1,15 | 1,15 | 0,00 | 0,0595 |
| 0,30 | 0,062 | 2,084 | 0,063 | 2,095 | 1,21 | 1,22 | 0,82 | 0,0595 |
| 0,40 | 0,064 | 2,463 | 0,073 | 2,523 | 1,24 | 1,27 | 2,36 | 0,0595 |
| Panjang Reservoir 3,50 m | | | | | | | | |
| 0,10 | 0,031 | 1,034 | 0,032 | 1,014 | 1,04 | 1,02 | 1,96 | 0,0595 |
| 0,20 | 0,061 | 1,52 | 0,049 | 1,588 | 1,09 | 1,13 | 3,54 | 0,0595 |
| 0,30 | 0,083 | 2,084 | 0,061 | 2,099 | 1,21 | 1,22 | 0,82 | 0,0595 |
| 0,40 | 0,093 | 2,498 | 0,073 | 2,53 | 1,26 | 1,28 | 1,56 | 0,0595 |

Tabel 2. Simulasi karakteristik surge tsunami dengan genangan awal hilir saluran

| d_0 (m) | d_1 (m) | Simulasi | | Chanson | | Angka Froude | | |
|-----------|-----------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|--------------|---------|----------------|
| | | Tinggi rerata (m) | Kecepatan surge (m/detik) | Tinggi rerata (m) | Kecepatan surge (m/detik) | Simulasi | Chanson | Perebedaan (%) |
| 0,30 | 0,10 | 0,20 | 1,79 | 0,18 | 1,61 | 1,04 | 0,94 | 10,64 |
| 0,40 | 0,10 | 0,23 | 2,26 | 0,22 | 1,86 | 1,14 | 0,94 | 21,28 |
| 0,30 | 0,15 | 0,23 | 1,72 | 0,22 | 1,62 | 1,00 | 0,94 | 6,38 |
| 0,40 | 0,15 | 0,28 | 1,96 | 0,26 | 1,86 | 0,99 | 0,94 | 5,32 |



(a) $d_0 = 300$ mm, $d_1 = 150$ mm



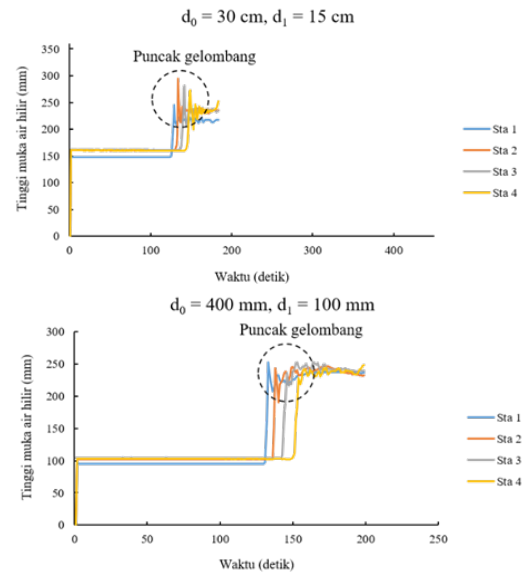
(b) $d_0 = 400$ mm, $d_1 = 100$ mm

Gambar 9. Simulasi surge tsunami dengan genangan awal di hilir saluran

Gambar 8 menunjukkan makin tinggi kedalaman reservoir ($> d_0$) maka nilai perbandingan kedalaman permukaan air bebas pada saluran kering (d) terhadap kedalaman reservoir (d_0) yang dihasilkan akan semakin kecil ($< d/d_0$), hal ini juga terjadi pada panjang ujung permukaan air bebas (x_s) makin tinggi kedalaman reservoir ($> d_0$) maka panjang ujung permukaan air bebas akan semakin pendek ($< x_s$). Kondisi ini terjadi karena reservoir yang dalam ($> d_0$) akan menghasilkan ketebalan permukaan aliran yang besar ($> d$) yang memberikan tekanan yang besar juga ($> p$) pada dasar saluran saat penjalaran air di saluran kering setelah pintu *dam break* terbuka, sehingga gesekan (f) antara permukaan dasar saluran dengan aliran air merupakan parameter yang sangat berpengaruh pada simulasi surge tsunami untuk saluran kering dengan metode *dam break*.

3.2. Simulasi surge tsunami dengan adanya genangan awal di hilir saluran

Simulasi surge tsunami dengan genangan awal di hilir dilakukan dengan cara yang sama dengan simulasi surge tsunami saluran kering, yang membedakan adalah di hilir saluran diberi genangan awal dengan tinggi $d_1 = 100$ mm dan 150 mm tanpa kecepatan aliran. Gambar 9 dan 10 adalah pelaksanaan simulasi dan profil simulasi surge tsunami dengan adanya genangan awal di hilir saluran. Gambar 9a simulasi dengan kedalaman reservoir $d_0 = 400$ mm dan genangan awal $d_1 = 100$ mm menunjukkan terbentuknya gelombang pecah (*plunging*) setelah pintu



Gambar 10. Hasil pengukuran tinggi muka air pada titik pengamatan dengan genangan awal di hilir saluran

dam break terbuka yang selanjutnya penjalaran ujung gelombangnya berbentuk *bore*. Gelombang pecah (*plunging*) tersebut terjadi akibat dari pengaruh kedalaman genangan awal yang dangkal ($d_1 = 100$ mm) dan kecepatan aliran air saat pintu *dam break* dibuka. Untuk genangan awal yang lebih dalam ($d_1 = 150$ mm) saat pintu *dam break* dibuka gelombang yang terjadi belum pecah yang selanjutnya penjalaran ujung gelombangnya berbentuk *bore* seperti ditunjukkan Gambar 9b.

Gambar 9 menunjukkan bahwa metode *dam break* menggunakan flume dengan reservoir terbatas dapat juga mensimulasikan gelombang *bore*. Yeh dkk. (1989) menyatakan untuk perbandingan $d_0/d_1 = 2$ bentuk penjalaran ujung gelombang adalah *undular bore*, dan untuk $d_0/d_1 > 2$ bentuk penjalaran ujung gelombang adalah *fully developed bore*.

Hasil pengukuran profil permukaan air bebas pada Gambar 10 diatas menunjukkan untuk titik pengukuran Sta. 2, Sta. 3, dan Sta. 4 (orange, abu-abu, kuning) terlihat tinggi awal pengukuran di Sta tersebut tidak sama dengan tinggi awal titik Sta 1 (biru), hal ini terjadi karena adanya penambahan volume air pada genangan awal dari reservoir saat pintu *dam break* terbuka. Perbandingan karakteristik surge tsunami dari simulasi dan solusi Chanson untuk genangan awal di saluran hilir dapat dilihat dalam Tabel 2.

Prosentase perbedaan angka Froude dari simulasi dan solusi Chanson untuk saluran kering antara 0,00 % sampai 3,88 %, dan untuk saluran dengan genangan awal di hilir saluran prosentase perbedaan antara 5,32 % sampai 21,28 %. Kondisi ini menunjukkan bahwa flume dengan reservoir terbatas dapat digunakan untuk mensimulasikan surge tsunami dengan metode *dam break*.

Kesimpulan

Dari hasil simulasi dapat diambil kesimpulan berikut ini.

1. *Dam break* dengan reservoir terbatas (pendek) hasil simulasi memberikan hasil yang mirip dengan karakteristik surge tsunami solusi Chanson.
2. *Dam break* dengan reservoir terbatas (pendek) hasil simulasi dan solusi Chanson untuk saluran kering menghasilkan perbedaan angka Froude 0,00 % sampai 3,88 % untuk saluran kering, dan 5,32 % sampai 21,28 % untuk saluran dengan genangan awal di hilir saluran.
3. *Dam break* dengan genangan awal pada saluran hilir dapat mempresentasikan gelombang *undular bore* dan *fully developed bore*.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepala Dr. Kuswandi, S. T. M.T atas supportnya, dan teknisi Laboratorium Hidraulik dan Hidrologi Pusat Studi Ilmu Teknik (PSIT) UGM yang telah membantu pelaksanaan penelitian selama di laboratorium.

Daftar Pustaka

- Bangguna, D. S. V. L., Triatmadja, R., & Yuwono, N. (2016). *Simulation of Tsunami Attack on Seawall Caisson*. Poceeding of 20th Congress of IAHR-APD 2016, Colombo, Sri Lanka, 1–6.
- Briggs, M. J., Synolakis, C. E., Harkins, G. S., & Hughes, S. T. (1995). *Large Scale Three-Dimensional Laboratory Measurements of Tsunami Inundation*. *Tsunamis: Progress in Prediction, Disaster Prevention and Warning*, May 2014, 129–149. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8565-1_9
- Chanson, H. (2005). *Application of the Saint-Venant Equations and Method of Characteristics to the Dam Break Wave Problem* (Issue June).
- Chanson, H. (2006). *Tsunami surges on dry coastal plains: Application of dam break wave equations*. *Coastal Engineering Journal*, 48(4), 355–370. <https://doi.org/10.1142/S0578563406001477>
- Inabah, R. W., Bangguna, David .S.V.L. Kuswandi. Legono, D., & Yuwono, Nur. Triatmadja, R. (2020). *Mechanism of Seawall Destruction Due to Tsunami*. *Journal of Tsunami Society International*, 29(3), 168–182.
- Kuswandi, Radiana Triatmadja, I. (2016). *Velocity Around a Cylinder Plie During Scouring Process Due to Tsunami*. Poceeding of 20th Congress of IAHR-APD 2016, Colombo, Sri Lanka, 1–14.
- Philip L.-F. Liu, Yong-Sik Cho, Michael J. Briggs, Utku Kanog Lu, C. E. S. (1995). *Runup of Solitary Waves on A Circular Island*. *Journal of Fluid Mechanics*, 302, 259–285.
- R. Triatmadja, B. (2014). *Simulation of Tsunami Force on Rows of Buildings in Aceh Region After Tsunami Disaster in 2004*. *The International Journal Og the Tsunami Society*, 33(3), 156–169.
- Raichlen, F. (1970). *Tsunamis Some Laboratory and Field Observations*. *Coastal Engineering*, 2103–2122.
- Synolakis, C. E., & Raichlen, F. (2007). *The Runup of Long Waves* (Issue January 1986).
- Tiziana Rosetto, William Allsop, Ingrid Charvet, D. I. R. (2016). *Physical modelling of tsunami using a new pneumatic wave generator*. *Coastal Engineering*, 6(August), 128.
- Warniyati, Radiana Triatmadja, Nur Yuwono, Bangguna, D. (2018). *Design of a Facility for Tsunami run up Generation on Study Tsunami and Seawall Interaction*. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 4(3), 201. <https://doi.org/10.22146/jcef.36857>
- Yeh, H., Ghazali, A., & Marton, I. (1989). *Experimental Study of Bore Run-up*. *Journal of Fluid Mechanics*, 206, 563–578. <https://doi.org/10.1017/S0022112089002417>
- Yeh, H. H. (1991). *Tsunami bore runup*. *Natural Hazards*, 4(2–3), 209–220. <https://doi.org/10.1007/BF00162788>