

Pengaruh Non Linieritas Gelombang terhadap Gaya dan Momen Guling akibat Gelombang pada Dinding Vertikal di Laut Dangkal

Agung Budipriyanto

Program Diploma Teknik Sipil FTSP - ITS

email: agungbp@ce.its.ac.id

ABSTRAK

Perhitungan gaya dan momen guling akibat gelombang pada struktur pantai harus dilakukan sehingga stabilitas struktur dapat ditentukan. Ketika mendekati daerah pantai gelombang laut sering berperilaku sebagai gelombang tidak linier. Dalam tulisan ini disajikan hasil studi numerik pengaruh non linieritas (ketidak linieran) gelombang terhadap besar gaya dan momen gelombang pada dinding vertikal di laut dangkal ketika ratio kedalaman air dan panjang gelombang laut lebih kecil dari 0,125 dan angka Ursell lebih besar dari 26. Dalam studi ini panjang gelombang dihitung menurut teori linier (Airy) dan tidak linier (Fourier dan Cnoidal) sedangkan gaya dan momen guling dihitung menurut cara Sainflou, Nagai, dan Miche-Rundgren. Hasil dari studi ini mengindikasikan bahwa pengaruh non linieritas gelombang pada perhitungan tekanan gelombang dengan cara Sainflou relatif kecil. Sedangkan dengan cara Nagai dan Miche-Rundgren non linieritas gelombang perlu diperhitungkan untuk nilai perbandingan tinggi dan kedalaman gelombang (H/d) lebih besar atau sama dengan 0,4.

Kata kunci: *Gelombang tidak Linier, Gaya Gelombang, Dinding Tegak, Laut Dangkal*

1. PENDAHULUAN

Salah satu beban yang perlu diperhitungkan dalam merencanakan bangunan pantai adalah beban akibat gelombang. Gelombang akan menimbulkan tekanan horizontal pada struktur sehingga gaya dan momen guling (*overturning moment*) yang ditimbulkannya merupakan beban yang mempengaruhi stabilitas struktur tersebut.

Teori gelombang linier (Airy) didasarkan pada asumsi bahwa tinggi (H) dan panjang gelombang (L) relatif kecil bila dibandingkan dengan kedalaman laut (d). Dengan asumsi tersebut persamaan kondisi batas pada muka air laut (*free surface boundary condition*) dapat dilinierisasi; pada analisis dengan deret Taylor hanya suku pertama saja yang digunakan sedang suku orde yang lebih tinggi diabaikan. Bila gelombang laut bergerak ke pantai asumsi ini mungkin tidak valid lagi karena nilai H/d dan L/d menjadi relatif besar.

Validitas beberapa teori gelombang telah dilakukan oleh Dean (1968) kemudian Dean dan Le Mehaute (1970). Mereka memberikan daerah validitas untuk beberapa teori gelombang sebagai fungsi periode (T), tinggi gelombang (H/gT^2) serta kedalaman laut (d/gT^2). Dari hasil penelitian mereka, dapat disimpulkan bahwa untuk memodelkan gelombang di laut dangkal teori gelombang yang cocok adalah gelombang Cnoidal. Sobey dkk. (1987) menyimpulkan hal yang sama. Disamping itu mereka juga merekomendasikan teori gelombang Fourier untuk digunakan di laut dangkal maupun transisi (antara laut dangkal dan dalam).

Pada umumnya bangunan pantai didesain berdasarkan tinggi dan periode gelombang rencana serta pada kedalaman laut tertentu. Pada laut dangkal yaitu pada ratio kedalaman laut dan panjang gelombang (d/L) lebih kecil dari 0,125 serta angka

Ursell (HL^2/d^3) lebih besar dari 26 (dua puluh enam) perilaku gelombang akan lebih sesuai bila dimodelkan dengan gelombang tidak linier, misalnya Fourier dan Cnoidal (Chakrabarti, 1987). Gelombang ini mempunyai puncak terjal dengan lembah yang lebar hampir landai dan panjang gelombang yang lebih besar dari panjang gelombang linier (Airy). Akibatnya tekanan, gaya, dan momen guling akibat gelombang yang panjang gelombangnya dihitung berdasarkan asumsi gelombang linier akan lebih kecil dibandingkan panjang gelombang yang dihitung dengan gelombang tidak linier. Namun untuk menghitung panjang gelombang dari gelombang tidak linier lebih sulit sehingga dengan alasan praktis biasanya perhitungan didasarkan asumsi gelombang linier.

Pada kasus gelombang tidak pecah tekanan gelombang pada dinding vertikal dapat dihitung dengan beberapa cara antara lain Sainflou, Molitor, Miche-Rundgren, Nagai, dan Goda (Shore Protection Manual (SPM), 1984 dan Coastal Engineering Manual, 2004). Pada studi ini, sebagai perbandingan, tekanan akibat gelombang dihitung menurut tiga cara yang sering dipakai yaitu Sainflou, Nagai, dan Minche-Rundgren.

Menurut Sainflou gelombang dengan ketinggian H , dan panjang gelombang L yang membentur dinding tegak akan terefleksi sehingga gelombang tegak (*standing wave*) akan terbentuk. Selanjutnya gelombang tersebut akan berosislasi pada ketinggian tertentu dari muka air tenang (*SWL*). Tekanan gelombang yang diperhitungkan merupakan tekanan dinamis akibat hantaman gelombang (Bretschneider, 1966).

Berdasarkan hasil eksperimen, Nagai mengusulkan perumusan empiris untuk menghitung tekanan gelombang baik di laut sangat dangkal, dangkal maupun dalam (Bruun, 1981). Miche-Rundgren mengusulkan perhitungan tekanan gelombang yang sesuai untuk gelombang terjal (*steepwave*) yaitu gelombang dengan ratio tinggi dan panjang gelombang yang relatif besar ($H/L \approx 0,1$) (Dean dan Harleman, 1966 dan SPM, 1984). Jenis gelombang ini dapat ditemui pada

gelombang yang mendekati pantai sebelum pecah.

Dalam tulisan ini dipaparkan hasil studi numerik pengaruh non linieritas gelombang terhadap gaya dan momen guling akibat gelombang pada dinding tegak khususnya di laut dangkal. Parameter gelombang dihitung dengan teori gelombang linier Airy dan dua teori gelombang non linier, Cnoidal dan Fourier. Gaya dan momen guling dihitung dengan teori Sainflou, Nagai, dan Miche-Rundgren. Gaya dan momen guling yang diteliti adalah akibat tekanan pada saat posisi puncak gelombang berada pada struktur dinding tersebut. Pada studi ini dinding mempunyai elevasi yang lebih tinggi dari amplitudo gelombang laut sehingga tidak ada limpasan (*overtop*) air laut ke sisi lain dari bangunan tersebut. Panjang gelombang, gaya, dan momen akibat gelombang pada studi ini dihitung untuk kedalaman air laut (d) antara 0,50m sampai dengan 20,0m dan tinggi gelombang (H) antara 0,50m sampai dengan 5,0m.

2. DASAR TEORI

Teori yang dipakai untuk menghitung parameter gelombang adalah Airy, Fourier, dan Cnoidal. Pembahasan mengenai teori gelombang dapat diperoleh misalnya di Chakrabarti (1987) dan Sobey dkk (1987).

Teori gelombang Airy adalah teori gelombang yang paling sederhana dan sering digunakan. Teori ini biasa disebut teori gelombang linier atau gelombang sinus yang didasarkan asumsi bahwa tinggi gelombang relatif kecil bila dibandingkan dengan panjang gelombang dan kedalaman air. Bila *velocity potential* Φ , dituliskan dalam bentuk (Dean dan Dalrymple, 1984),

$$\Phi = \frac{H g}{2 \sigma} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \cos kx \sin \sigma t \dots (1)$$

dengan g adalah percepatan gravitasi, T adalah perioda gelombang, k adalah nomor gelombang ($2\pi/L$), L adalah panjang gelombang, d adalah kedalaman

air laut dan σ adalah frekwensi sudut gelombang ($\sigma = 2\pi/T$). Kecepatan gelombang (C) dapat diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan (1) pada persamaan syarat batas pada permukaan air laut ($z = 0$) sebagai berikut,

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(2)$$

sehingga diperoleh,

$$C^2 = \frac{g}{k} \tanh kd \dots\dots\dots(3)$$

Bila $C = L/T$ dan $k = 2\pi/L$ maka panjang gelombang dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini,

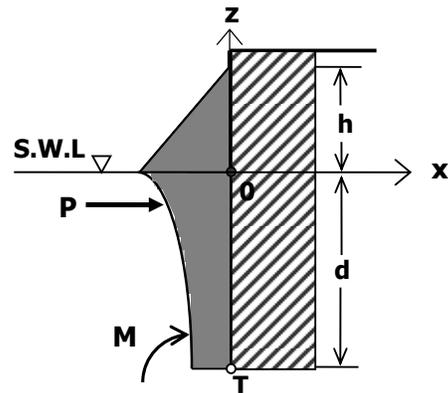
$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \dots\dots\dots(4)$$

Karena ruas kanan dan kiri pada persamaan (4) terdapat besaran L maka biasanya digunakan cara iterasi untuk menyelesaikannya. Dalam studi ini Persamaan (4) tidak disederhanakan untuk aplikasi laut dangkal sehingga definisi laut dangkal yang dipakai seperti yang telah disebutkan dalam pendahuluan tulisan ini yaitu $(d/L) < 1/8$ dan $(HL^2/d^3) > 26$.

Sobey dkk (1997) mengusulkan sebuah teori gelombang yang penyelesaiannya dalam bentuk deret Fourier berbentuk

$$u(x, z) = -\ddot{u}(d + z) + \left[\frac{g}{k^3} \right]^{1/2} \sum_{j=1}^N \frac{\sinh jk(d + z)}{\cosh jkd} \cos jkx \dots\dots(5)$$

\ddot{u} adalah kecepatan rata rata gelombang, N jumlah koefisien Fourier. Dengan menghitung N koefisien Fourier yang memenuhi suatu sistim persamaan serentak maka akan diperoleh parameter gelombang termasuk panjang gelombang.



Gambar 1: Diagram tekanan gelombang pada dinding tegak yang diteliti

Seperti halnya gelombang Fourier, gelombang Cnoidal merupakan gelombang tidak linier. Gelombang ini merupakan gelombang periodik dengan puncak tajam yang dipisahkan oleh lembah yang lebar.

Panjang gelombang Cnoidal dapat dihitung dengan persamaan,

$$L = \left[\frac{16d^3}{3H} \right]^{1/3} k \cdot K(k) \dots\dots\dots(6)$$

k adalah nomor gelombang dan $K(k)$ adalah integral eleptik kompleks (Chakrabarty, 1987).

Seperti telah disebutkan sebelumnya dalam studi ini tekanan gelombang dihitung pada saat posisi puncak gelombang pada dinding. Diagram tekanan gelombang yang diteliti diberikan pada Gambar 1. d adalah kedalaman air laut, sedangkan h dapat dinyatakan sebagai

$$h = H + h_{oc} \dots\dots\dots(7)$$

H adalah tinggi gelombang dan h_{oc} adalah tinggi osilasi gelombang diatas S.W.L.

Menurut Sainflou gaya (P) akibat beban gelombang dan momen guling (M) terhadap dasar dinding (titik T pada Gambar 1) dapat dinyatakan sebagai

$$P = 0.5 p_1 (H + h_{oc}) + 0.5 p_1 d + 0.5 p_0 d \quad (8)$$

$$M = 0.5 p_1 (H + h_{oc}) \left[\frac{H + h_{oc}}{3} + d \right] + [0.5 p_1 d] \frac{2}{3} d + [0.5 p_0 d] \frac{1}{3} d \quad (9)$$

dengan

$$p_0 = \frac{\gamma H}{\coth kd} \quad (10)$$

$$p_1 = (\gamma + p_0) \frac{H + h_{oc}}{H + h_{oc} + d} \quad (11)$$

$$h_{oc} = \frac{\pi H^2}{L} \coth kd \quad (12)$$

Nagai membagi 3(tiga) daerah perairan untuk menghitung gaya dan momen guling akibat gelombang yaitu perairan sangat dangkal, dangkal, dan dalam.

Untuk perairan sangat dangkal yaitu ($d/L \leq 0.135$) maka $h_{oc} = 0,3H$ dan

$$P = \gamma \left(\frac{H}{k} \tanh kd + 0.15H d + \frac{1}{2} (1.3H)^2 \right) \quad (13)$$

$$M = \gamma \left\{ \left(\frac{H}{k} \tanh kd + 0.15H d \right) \times (d + \bar{z}) + \left(\frac{1}{2} (1.3H)^2 \right) \left(\frac{1}{3} 1.3H + d \right) \right\} \quad (14)$$

dengan

$$\bar{z} = \frac{\left[\frac{1}{\cosh kd} - 1 \right] - 0.05d^2}{k \tanh kd + 0.15d} \quad (15)$$

Untuk perairan dangkal yaitu ($0.135 < d/L \leq 0.35$) maka $h_{oc} = 0$ dan

$$P = \gamma \left(\frac{H}{k} \tanh kd + 0.5H^2 \right) \quad (16)$$

$$M = \gamma \left\{ \frac{H}{k} \tanh kd \times (d + \bar{z}) + \left(0.5H^2 \right) \left(\frac{1}{3} H + d \right) \right\} \quad (17)$$

dengan

$$\bar{z} = \frac{\left[\frac{1}{\cosh kd} - 1 \right]}{k \tanh kd} \quad (18)$$

Untuk perairan dalam yaitu ($d/L \geq 0.35$) maka $h_{oc} = 0$ dan

$$P = \frac{\gamma}{\cosh k(d + H)} \left(\frac{1}{2} H^2 \cosh kd + \frac{H}{2k} \sinh kd \right) \quad (19)$$

$$M = \frac{\gamma}{\cosh k(d+H)} \left\{ \frac{1}{2} H^2 \cosh kd \left(\frac{H}{3} + d \right) + \frac{H}{2k} \sinh kd (d + \bar{z}) \right\} \dots\dots\dots(20)$$

$$h_{oc} = \frac{\pi H^2}{L} \coth kd \left(1 + \frac{3}{4 \sinh^2 kd} - \frac{1}{4 \cosh^2 kd} \right) \dots\dots\dots(24)$$

$$\bar{z} = \frac{1 - \cosh kd}{k \sinh kd} \dots\dots\dots(21)$$

γ adalah berat volume air laut (10,25 kN/m³), H adalah tinggi gelombang, k adalah nomor gelombang ($2\pi/L$), L adalah panjang gelombang, d adalah kedalaman air laut dan \bar{z} adalah titik berat gaya gelombang yang berada dibawah SWL diukur dari SWL. Pada studi ini perhitungan dilakukan untuk perairan sangat dangkal dan dangkal.

Menurut Miche-Rundgren gaya dan momen guling akibat gelombang dapat dihitung dengan persamaan

$$P = \gamma \times \left\{ \frac{H}{k} \tanh kd + \frac{\pi H^2}{L} \tanh kd \times \left[\frac{3 \sinh 2kd}{8 k \sinh^4 kd} + d \right] + 0.5(h_{oc} + H) \times \left(H + \frac{\pi H^2}{L} \tanh kd \left[\frac{3 \cosh 2kd}{4 \sinh^4 kd} - 1 \right] \right) \right\} \dots\dots\dots(22)$$

$$M = \gamma \times \left\{ \left(\frac{H}{k} \tanh kd + \frac{\pi H^2}{L} \tanh kd \times \left[\frac{3 \sinh 2kd}{8 k \sinh^4 kd} + d \right] \right) \times (d + z) + \left(0.5(h_{oc} + H) \times \left(H + \frac{\pi H^2}{L} \tanh kd \left[\frac{3 \cosh 2kd}{4 \sinh^4 kd} - 1 \right] \right) \right) \times \left(\frac{H + h_{oc}}{3} + d \right) \right\} \dots\dots\dots(23)$$

Persamaan Sainflou, Nagai, dan Miche-Rundgren diatas jelas menunjukkan bahwa gaya dan momen guling akibat gelombang merupakan fungsi dari panjang gelombang. Dalam tulisan ini akan dibahas pengaruh nilai panjang gelombang yang dihitung dengan teori gelombang linier dan tak linier terhadap nilai gaya dan momen guling akibat gelombang pada dinding vertikal.

3. METODOLOGI

Untuk periode gelombang T , 1 detik sampai dengan 20 detik, nilai H/gT^2 antara 0,001 sampai dengan 0,030, H/d antara 0,1 sampai dengan 0,7, $(d/L) < 0,125$, dan $(HL^2/d^2) > 26$ dapat dihitung nilai tinggi gelombang. Pada studi ini dibatasi kedalaman laut (d) antara 0,50m sampai dengan 20,0m dan tinggi gelombang (H) antara 0,50m sampai dengan 5,0m.

Data yang diperoleh dipakai untuk menghitung parameter gelombang Cnoidal, kemudian parameter gelombang Airy dan Fourier orde ke 10. Perhitungan parameter gelombang (panjang dan kecepatan gelombang) dilakukan dengan bantuan program komputer ACES (Leenknecht dkk, 1992).

Panjang gelombang yang dihitung dengan teori linier Airy dan teori gelombang tidak linier, Fourier dan Cnoidal dipakai untuk menghitung gaya dan momen guling akibat gelombang menurut cara Sainflou, Nagai, dan Miche-Rundgren. Dengan demikian akan diperoleh informasi pengaruh ketidak linieran gelombang terhadap gaya dan momen guling akibat gelombang.

Kemudian besar perbedaan relatif (yang dinyatakan dalam %) dihitung dari hasil perhitungan gaya dan momen gelombang berdasarkan teori gelombang linier dan tidak linier.

4. HASIL DAN DISKUSI

Data panjang gelombang yang dipakai pada studi ini sebanyak 1237. Data tersebut kemudian dipergunakan untuk menghitung gaya dan momen guling akibat gelombang untuk masing masing cara yang dipakai dalam studi ini yaitu Sainflou, Nagai, dan Miche-Rundgren. Pada tulisan ini dilaporkan kesimpulan dari hasil studi numerik ini. Hasil studi secara lengkap dapat dilihat di Budipriyanto (1997).

Seperti telah diperkirakan sebelumnya panjang gelombang yang dihitung berdasarkan teori linier (Airy) lebih kecil bila dibandingkan dengan panjang gelombang yang dihitung berdasarkan teori tidak linier (Fourier dan Cnoidal). Selisih panjang gelombang dari hasil perhitungan tersebut berkisar antara 0,60% sampai dengan 29,02%. Hasil perhitungan tersebut juga memperlihatkan bahwa untuk nilai H/gT^2 yang sama, prosentase perbedaan akan semakin besar dengan bertambahnya nilai H/d .

Pada nilai periode (T), tinggi gelombang (H), dan kedalaman air (d) yang sama, nilai gaya dan momen guling akibat gelombang yang dihitung dengan persamaan Sainflou lebih kecil dari nilai yang diperoleh dengan persamaan Nagai. Sedangkan nilai gaya dan momen yang dihitung dengan persamaan Miche-Rundgren lebih besar dari hasil dengan persamaan Sainflou maupun Nagai.

Untuk $T > 3$ detik dan nilai $(H/d) > 0,4$ pada nilai H/gT^2 yang sama, harga gaya dan momen guling yang dihitung dengan persamaan Sainflou dan Nagai bertambah kecil sedangkan dengan cara Miche-Rundgren nilai gaya dan momen guling secara konsisten bertambah besar.

Dengan persamaan tekanan gelombang yang diusulkan Sainflou, selisih perhitungan (antara gelombang linier dan tidak linier) untuk gaya gelombang berkisar antara 0,16% sampai dengan 2,99% sedangkan untuk momen guling selisihnya berkisar antara 0,24% hingga 1,68%.

Dengan persamaan Sainflou selisih perhitungan baik untuk gaya maupun

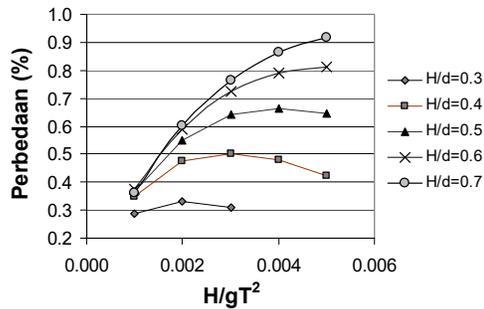
momen giling akibat gelombang relatif kecil. Akan tetapi perlu pula diingat bahwa persamaan Sainflou tidak sesuai bila dipergunakan pada kasus kasus gelombang terjal sebab persamaan Sainflou akan memberikan harga gaya dan momen guling yang lebih rendah (*under estimate*). Oleh karena itu SPM (1984) memadukannya dengan persamaan Miche Rundgren untuk menghitung tekanan akibat gelombang.

Dengan persamaan yang diberikan oleh Nagai diperoleh selisih untuk gaya gelombang berkisar antara 0,18% hingga 35,19% sedangkan untuk momen guling selisihnya antara 0,11% hingga 51,88%. Perhitungan berdasarkan persamaan Nagai untuk $T > 10$ detik selisih dari perhitungan dengan menggunakan gelombang linier dan non linier lebih kecil dari 1,5%. Dari studi terungkap bahwa untuk $T < 10$ detik dan nilai $H/d \geq 0,4$ perhitungan seyogyanya berdasarkan gelombang tidak linier karena perbedaan perhitungan maksimumnya bisa lebih besar dari 10%.

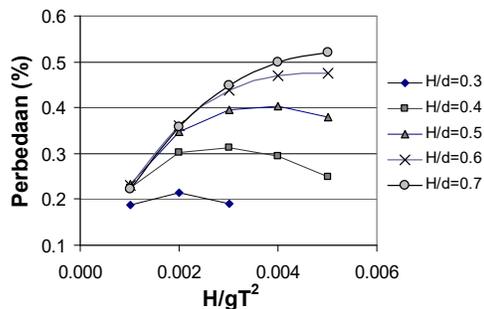
Perhitungan dengan persamaan Miche-Rundgren memberikan variasi perbedaan yang lebih besar dibandingkan dengan Sainflou maupun Nagai yaitu antara 0,31% sampai dengan 62,89% untuk gaya akibat gelombang dan antara 0,16% sampai dengan 101,99% untuk momen guling. Dengan menggunakan cara ini selisih perhitungan akan menjadi lebih signifikan (sekitar 10% atau lebih) terutama untuk nilai $H/d \geq 0,4$ dan $H/gT^2 \leq 0,04$. Oleh sebab itu pada nilai tersebut diatas perhitungan dianjurkan dengan memakai gelombang non linier. Gambar 1, 2, dan 3 menunjukkan perbedaan nilai gaya dan momen gelombang (dalam %) yang dihitung dengan cara Sainflou, Nagai, dan Miche-Rundgren berdasar panjang gelombang linier dan tidak linier untuk periode gelombang 10 detik.

Selanjutnya dari hasil studi ini diperoleh informasi bahwa perbedaan perhitungan (dalam %) dari panjang gelombang yang besar belum tentu memberikan perbedaan yang besar pada gaya dan momen guling. Hal ini bisa dimengerti karena persamaan persamaan yang digunakan untuk menghitung tekanan gelombang bukan

(a) gaya gelombang



(b) momen guling

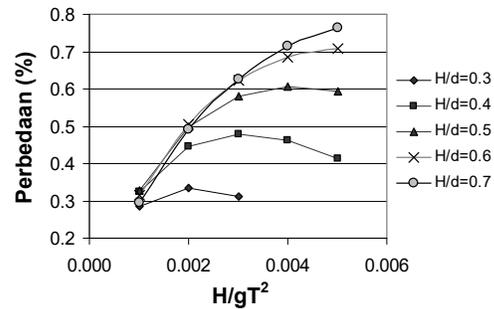


Gambar 2: Perbedaan (dalam %) nilai gaya gelombang dan momen guling dengan cara Sainflou yang dihitung dengan gelombang linier dan tak linier pada periode gelombang $T = 10$ detik

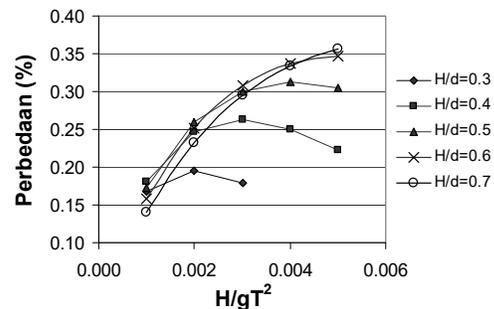
persamaan linier dan panjang gelombang bukan satu satunya parameter yang menentukan besar tekanan gelombang; masih ada tinggi gelombang dan kedalaman laut.

Dari hasil studi ini dapat dikatakan secara umum perbedaan nilai gaya dan momen akan semakin bertambah besar pada nilai perbandingan tinggi gelombang dan kedalaman air (H/d) yang semakin besar. Pada Tabel 1 sampai dengan 3 disajikan selisih maksimum (dalam %) gaya dan momen guling yang dihitung masing masing dengan persamaan Sainflou, Nagai, dan Miche-Rundgren untuk periode gelombang yang diteliti. Perlu dicatat bahwa nilai H/d dan H/gT^2 serta prosentase selisih

(a) gaya gelombang



(b) momen guling

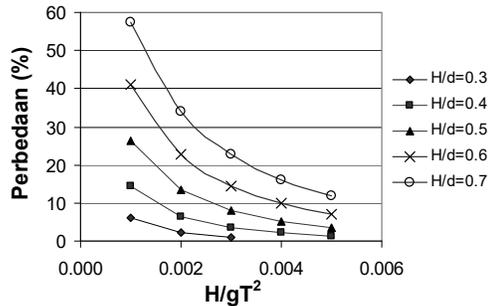


Gambar 3: Perbedaan (dalam %) nilai gaya gelombang dan momen guling dengan cara Nagai yang dihitung dengan gelombang linier dan tak linier pada periode gelombang $T = 10$ detik.

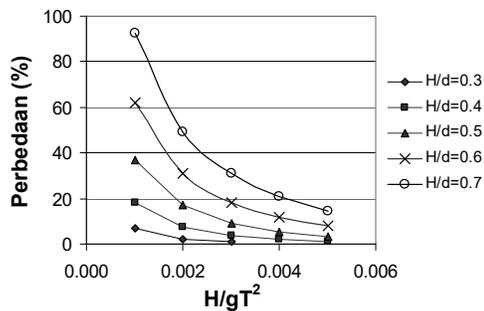
panjang gelombang dan momen guling pada tabel tersebut menyatakan besar nilai pada perbedaan gaya gelombang maksimum. Pada beberapa kasus perbedaan panjang gelombang dan momen guling maksimum terjadi pada harga H/d dan H/gT^2 yang berbeda dengan harga yang tercantum pada tabel tersebut.

Untuk tekanan gelombang yang dihitung dengan persamaan Sainflou dan Miche-Rundgren terlihat nilai perbedaan maksimum gaya dan momen guling untuk periode gelombang yang diteliti berada pada H/d berkisar antar 0,6 dan 0,7, lihat Tabel 1 dan 3.

(a) gaya gelombang



(b) momen guling



Gambar 4: Perbedaan (dalam %) nilai gaya gelombang dan momen guling dengan cara Miche-Rundgren yang dihitung dengan gelombang linier dan tak linier pada periode gelombang $T = 10$ detik.

Sedang gaya dan momen guling akibat gelombang yang dihitung dengan persamaan Nagai perbedaan maksimum pada nilai H/d berkisar antara 0,4 sampai dengan 0,7, lihat Tabel 2.

Tabel 1: Perbedaan maksimum gaya (ΔP) dan momen guling (ΔM) yang dihitung dengan cara Sainflou untuk berbagai nilai periode gelombang, tinggi gelombang, dan kedalaman laut.

T detik	$\frac{H}{gT^2}$	$\frac{H}{d}$	Selisih Maksimum (%)		
			ΔL	ΔP	ΔM
2,0	0,010	0,6	6,921	1,527	0,792
3,0	0,011	0,6	6,938	1,629	0,817
4,0	0,011	0,6	6,934	1,631	0,825
5,0	0,011	0,6	6,934	1,630	0,818
6,0	0,012	0,6	12,644	2,992	1,470
7,0	0,011	0,6	6,939	1,630	0,819
8,0	0,008	0,6	7,271	1,360	0,741
9,0	0,006	0,7	29,024	2,968	1,676
10,0	0,005	0,7	11,606	1,206	0,687
11,0	0,004	0,7	12,686	1,058	0,613
12,0	0,004	0,7	12,680	1,059	0,615
13,0	0,003	0,7	18,895	0,882	0,520
14,0	0,003	0,7	14,086	0,883	0,521
15,0	0,002	0,7	16,007	0,664	0,401
16,0	0,002	0,7	16,005	0,663	0,403
17,0	0,002	0,6	13,024	0,655	0,401
18,0	0,001	0,6	15,895	0,390	0,244
19,0	0,001	0,6	15,896	0,394	0,247
20,0	0,001	0,6	18,899	0,394	0,248

Tabel 2: Perbedaan maksimum gaya (ΔP) dan momen guling (ΔM) yang dihitung dengan cara Nagai untuk berbagai nilai periode gelombang, tinggi gelombang, dan kedalaman laut.

T detik	$\frac{H}{gT^2}$	$\frac{H}{d}$	Selisih Maksimum (%)		
			ΔL	ΔP	ΔM
2,0	0,009	0,6	7,044	33,838	48,950
3,0	0,009	0,6	7,042	33,837	48,950
4,0	0,009	0,6	7,050	33,840	48,851
5,0	0,011	0,7	5,009	35,195	51,880
6,0	0,009	0,6	7,338	33,838	48,950
7,0	0,009	0,6	7,010	33,830	48,946
8,0	0,006	0,4	3,033	29,319	41,680
9,0	0,006	0,4	3,033	29,319	41,697
10,0	0,005	0,7	11,606	1,001	0,469
11,0	0,004	0,7	12,686	0,876	0,421
12,0	0,004	0,7	12,687	0,876	0,421
13,0	0,003	0,6	14,084	0,728	0,359
14,0	0,003	0,6	11,165	0,728	0,360
15,0	0,002	0,6	13,026	0,561	0,286
16,0	0,002	0,6	13,024	0,561	0,286
17,0	0,002	0,6	13,024	0,561	0,286
18,0	0,001	0,5	12,474	0,346	0,189
19,0	0,001	0,5	12,475	0,346	0,189
20,0	0,001	0,5	12,471	0,346	0,188

Tabel 3: Perbedaan maksimum gaya (ΔP) dan momen guling (ΔM) yang dihitung dengan cara Miche-Rungren untuk berbagai nilai periode gelombang, tinggi gelombang, dan kedalaman laut.

T detik	$\frac{H}{gT^2}$	$\frac{H}{d}$	Selisih Maksimum (%)		
			ΔL	ΔP	ΔM
2,0	0,008	0,6	7,260	5,717	5,320
3,0	0,004	0,7	12,644	20,772	26,970
4,0	0,003	0,7	14,101	27,599	37,796
5,0	0,002	0,7	16,001	39,007	57,154
6,0	0,001	0,7	18,853	62,425	101,21
7,0	0,001	0,7	18,931	62,734	101,77
8,0	0,001	0,7	18,909	62,649	101,61
9,0	0,001	0,7	29,024	62,625	101,57
10,0	0,001	0,7	18,890	62,569	101,77
11,0	0,001	0,7	18,910	62,650	101,62
12,0	0,001	0,7	18,903	62,623	100,57
13,0	0,001	0,7	18,895	62,593	101,51
14,0	0,001	0,7	18,961	62,855	101,99
15,0	0,001	0,7	18,952	62,819	101,92
16,0	0,001	0,7	18,958	62,844	101,97
17,0	0,001	0,7	18,955	62,830	101,94
18,0	0,001	0,7	18,958	62,841	101,96
19,0	0,001	0,7	18,953	62,825	101,93
20,0	0,001	0,7	18,958	62,844	101,97

5. KESIMPULAN

Tulisan ini menyajikan hasil studi numerik pengaruh non linieritas (ketidak linieran) gelombang terhadap gaya dan momen guling akibat gelombang pada dinding vertikal di daerah perairan dangkal. Tekanan gelombang dihitung pada saat posisi puncak gelombang berada pada dinding tegak. Gelombang linier (Airy) dan dua gelombang tak linier, Fourier dan Cnoidal, digunakan dalam studi ini. Gaya gelombang dan momen guling dihitung dengan cara Sainflou, Nagai, dan Miche-Rundgren. Dari studi ini disimpulkan bahwa pengaruh ketidak linieran gelombang pada perbedaan gaya dan momen akibat gelombang yang dihitung dengan cara Sainflou lebih kecil dari 3%. Hasil dengan cara Nagai menunjukkan selisih maksimum untuk gaya dan momen guling sebesar 35,2% dan 51,9%. Hasil perhitungan dengan cara Miche-Rundgren perbedaan maksimum gaya gelombang dan momen guling masing masing adalah 62,9% dan 102%.

Dengan menggunakan cara Nagai gelombang non linier disarankan digunakan pada $H/d \geq 0,4$ dan periode gelombang (T) kurang dari 10 detik. Sedangkan dengan persamaan Miche-Rundgren perhitungan gaya dan momen guling disarankan didasarkan dengan gelombang non linier pada nilai $H/d \geq 0,4$ dan $H/gT^2 \leq 0,04$. Dengan demikian pengaruh non linieritas gelombang pada gaya gelombang dan momen guling pada struktur dinding tegak perlu diperhitungkan khususnya untuk nilai ratio tinggi dan kedalaman gelombang lebih besar dari nilai tersebut diatas.

6. DAFTAR ACUAN

- Bretschneider, C.L., 1966. Wave Refraction, Diffraction and Reflection. Dalam A.T. Ippen (ed.) *Estuary and Coastline Hydrodynamics*, Engineering Societies Monograph, Mc Graw Hill , 276-279.
- Bruun, P. 1981. *Port Engineering*, Gulf Publishing Co., 295-296.
- Budipriyanto, A. 1997. *Pengaruh Non-linieritas Gelombang pada Gaya dan Momen Guling Akibat Gelombang pada Dinding Tegak di Laut Dangkal*, Laporan penelitian, Lembaga Penelitian ITS, 279p.
- Chakrabarti, S.K., 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Computational Mechanics Publication.
-, 2004. *Coastal Engineering Manual (CEM)*, Department of the Army Corps of Engineers, Wahington, D.C.
- Dean, R.G., 1968. *Relative Validity of Water Waves Theories*. Preceedings on Civil Engineering in Ocean, ASCE San Fransisco.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A, 1984. *Water Waves Mecahnics for Engineers and Scientists*, Prentice Hall.
- Dean, R.G., Harleman, D.R.F., 1966. Interaction of Structures and Waves. Dalam A.T. Ippen (Ed.) *Estuary and Coastline Hydrodynamics*, Engineering Societies Monograph Mc Graw Hill, 376-377.
- Dean, R.G., LeMehaute, B., 1970. *Experimental Validity of Water Waves Theories*, Strutural Engineering Conference, ASCE, Portland Oregon.
- Leenknecht, D.A., Szuwalski, A., Sherlock, A., R., 1992. *Automated Coastal Engineering System*. Coastal Engineering Reasearch Center., Department of teh Army Vicksburg, Mississippi.
- Sobey, R.J., Goodwing, P., Thieke, R.J., Westberg, Jr., R.J., 1987. *Application of Stokes, Cnoidal and Fourier Wave Theories*, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 113, No.6, 565-587.
-, 1984. *Shore Protection Manual (SPM)*, Department of the Army Corps of Engineers, Wahington, D.C.