

PENGARUH TIMBUNAN RINGAN MORTAR BUSA PENGGANTI TIMBUNAN BIASA PADA JEMBATAN MENGGUNAKAN KONSTRUKSI STRUKTUR BAJA BERGELOMBANG (THE EFFECT OF LIGHTWEIGHT FOAM MORTAR A SUBSTITUTE OF COMMON FILL ON BRIDGE STRUCTURE USING CORRUGATED STEEL PLATE)

Hardiansyah Putra¹⁾, Susy Kartikasari Ariestianty²⁾

^{1),2)} Balai Geoteknik Terowongan dan Struktur, Direktorat Bina Teknik, Direktorat Jendral Bina Marga

^{1),2)} Jl. A.H. Nasution No. 264, Bandung, 40294

e-mail: ¹⁾hardiansyah.putra@pu.go.id, ²⁾susy.kartika@pu.go.id

Diterima: 09 September 2022 ; direvisi: 14 Desember 2022; diterbitkan online: 30 Desember 2022.

ABSTRAK

Terdapat tiga tipe struktur baja bergelombang yaitu tipe standar korugasi 152 by 51, deep korugasi 381 by 140 dan superdeep korugasi 500 by 237. Saat ini baru tipe standar dan deep yang sudah diproduksi di Indonesia. Struktur baja bergelombang dapat difungsikan sebagai struktur jembatan yang dikombinasikan dengan timbunan pengisi di atasnya menggunakan timbunan biasa. Namun, di Indonesia beberapa proyek flyover telah menggunakan struktur baja bergelombang bentang 22 meter s/d 26 meter dengan timbunan ringan mortar busa sebagai pengganti timbunan biasa. Kajian ini dilakukan untuk melihat seberapa jauh efek penggunaan timbunan ringan mortar busa terhadap kekuatan struktur. Evaluasi dilakukan dengan mensimulasikan penerapan struktur baja bergelombang bentang 22 meter dan tebal 9 mm dengan timbunan biasa maupun timbunan ringan mortar busa menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga. Parameter kekuatan struktur masing-masing jenis timbunan kemudian dihitung dengan mengacu pada Canadian Highway Bridges Design Code. Terdapat empat parameter kekuatan struktur utama yang ditinjau yaitu kuat tekuk, sendi plastis, kuat sambungan dan pergerakan. Nilai-nilai parameter tersebut harus lebih besar dari 100%, yang menunjukkan bahwa gaya yang terjadi lebih kecil dari nilai izin, artinya struktur dalam kondisi aman. Hasil perhitungan yang diperoleh untuk nilai-nilai parameter kekuatan dengan menggunakan timbunan ringan mortar busa adalah 358% (kuat tekuk), 235% (kuat sambungan), 458% (sendi plastis) dan 319% (displacement), sedangkan evaluasi pada timbunan biasa yaitu 99% (kuat tekuk), 120% (kuat sambungan), 37% (sendi plastis) dan 27% (displacement). Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan timbunan ringan mortar busa pada struktur baja bergelombang akan meningkatkan kekuatan struktur dan membuat jembatan lebih aman.

Kata Kunci: struktur baja bergelombang, timbunan ringan mortar busa, timbunan biasa, kekuatan dinding dalam tekanan, kekuatan sambungan, sendi plastis, pergerakan.

ABSTRACT

Corrugated steel structure consist of three types, i.e. standard (corrugation 152 by 51), deep (corrugation 381 by 140) and super deep (corrugation 500 by 237), but only the standard and deep types that has already produced in Indonesia. The steel structure can be used as a bridge structure in combination with the embankment on the top using common fill material. However, several flyover projects in Indonesia used corrugated steel structures with a span of 22 meters to 26 meters and lightweight foam mortar to replace the common fill. This study was conducted to perceive the effect of the use of lightweight foam mortar on the strength of the structure. The evaluation was carried out by simulating the corrugated steel structure with a span of 22 meters and a thickness of 9 mm either with common fill or lightweight foam mortar using finite element software. Furthermore, the strength parameters for each fill material was calculated refer to the Canadian Highway Bridges Design Code. There are four structural strength parameters that was reviewed, i.e. buckling strength, seam strength, plastic hinge, and displacement. The values of these parameters must be greater than 100% that indicates the force occurs is less than the allowable value, meaning the structure is in a safe condition. The calculation result of each strength parameters by using lightweight foam mortar respectively are 358%, 235%, 458% and 319%. As for that using common fill respectively are 99%, 120%, 37% and 27%. These results show, the application of lightweight foam mortar will increase the value of the structural strength parameters that make the bridge structurally safe.

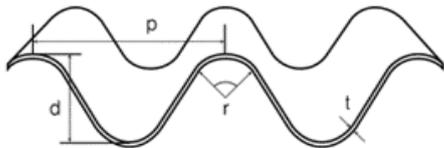
Keywords: corrugated steel structure, lightweight foam mortar, common fill, buckling strength, seam strength, plastic hinge, displacement.

PENDAHULUAN

Pembangunan jembatan kombinasi struktur baja bergelombang dengan timbunan ringan mortar busa sudah diaplikasikan di beberapa kota di Indonesia, penggunaan timbunan ringan ini bisa mengurangi beban mati struktur jembatan.

Struktur baja bergelombang yang bisa diproduksi didalam negeri masih terbatas pada tipe *deep* dan menggunakan mutu baja SS400, dimana jika dikombinasikan dengan timbunan biasa bentang jembatan terbataas antara 20 s/d 23 meter, maka untuk maksimalkan lebar bentang salah satu alternatif yang bisa digunakan dengan mengkombinasikan antara struktur baja bergelombang dan timbunan ringan mortar busa.

Corrugated Steel Structure atau struktur baja bergelombang adalah material lembaran plat baja yang dibentuk menjadi bergelombang dengan bantuan alat mekanis tertentu (Gambar 1). Perubahan bentuk tersebut meningkatkan nilai momen inersia yang membuat struktur menjadi lebih kuat dalam menahan beban. Terdapat tiga tipe baja gelombang tipe annular standar, *deep* dan *superdeep* (Tabel 1).



Keterangan:

- d (*depth*) : kedalaman
- p (*pitch*) : jarak antar puncak lengkungan
- r (*radius*) : radius
- t (*thicknes*) : tebal

Gambar 1. Bentuk penampang struktur baja bergelombang

Tabel 1. Tipe struktur baja bergelombang annular

| Tipe korugasi | Pitch, mm | Depth, mm | Tipe |
|---------------|-----------|-----------|------------------|
| 152 by 51 | 152 | 51 | standar |
| 381 by 140 | 381 | 140 | <i>deep</i> |
| 500 by 237 | 500 | 237 | <i>superdeep</i> |

Aplikasi struktur baja bergelombang sebagai struktur jembatan umumnya dikombinasikan dengan tanah timbunan dengan modulus elastis tanah terpadatkan sebesar 24 Mpa. Contoh aplikasinya di Indonesia seperti di ruas jalan lingkar Tasikmalaya (Gambar 2) dan jalan tol Semarang.



Sumber: Pusjatan (2015)

Gambar 2. Lintas atas menggunakan struktur baja bergelombang di lingkar Tasikmalaya

Tahun 2016 Puslitbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) telah melakukan uji coba skala penuh pembangunan *flyover* menggunakan struktur baja bergelombang dengan menggunakan timbunan ringan mortar busa. Lokasi uji coba terletak di daerah Antapani, Kota Bandung. Selanjutnya, kombinasi Jembatan dengan struktur baja bergelombang dan timbunan ringan ini mulai diterapkan pada beberapa lokasi lain, seperti *flyover* Manahan Solo, *flyover* Gaplek Tanggerang, jembatan pada jalan tol trans Sumatera ruas Pekanbaru-Dumai (Gambar 3).



Sumber: hkinfrastruktur.com

Gambar 3. Jembatan struktur baja bergelombang dan timbunan ringan jalan tol Pekanbaru-Dumai

Timbunan ringan mortar busa ini adalah material campuran cairan busa, pasir, air, dan semen dengan komposisi tertentu sehingga memenuhi spesifikasi khusus interim material ringan mortar busa (DJBM 2017), sebagai pengganti tanah timbunan (Tabel 2). Timbunan ringan mortar busa mempunyai densitas yang

lebih rendah dengan air, sehingga bisa mengapung jika dimasukkan kedalam air.

Tabel 2. Kuat tekan minimum (14 hari) dan densitas, timbunan ringan mortar busa

| Densitas kering maks (gr/cm ³) | Kekuatan tekan minimum (UCS) | |
|--|------------------------------|--------------------|
| | kPa | Kg/cm ² |
| 0.7-0,8 | 800 | 8 |
| 0.7-0,8 | 2000 | 20 |

Sumber: SKH Interim 2017

Evaluasi yang dilakukan dalam tulisan ini bertujuan untuk mengetahui seberapa jauh peningkatan parameter kekuatan yang terjadi pada struktur baja bergelombang jika menggunakan timbunan ringan mortar busa sebagai pengganti timbunan biasa.

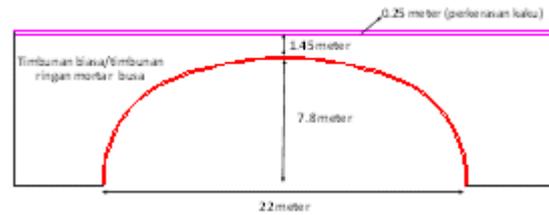
HIPOTESIS

Penggunaan mortar busa dapat memperkecil gaya yang bekerja pada baja bergelombang sehingga dapat menahan tekuk (*buckling*), kegagalan sendi plastis (*plastic hinge failure*), gagal sambungan (*connection failure*) serta mengurangi pergerakan (*displacement*) yang terjadi.

METODOLOGI

Untuk mengetahui performa penggunaan timbunan ringan mortar busa di atas struktur baja bergelombang terhadap kekuatan struktur dilakukan suatu simulasi dan evaluasi dengan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga. Perhitungan parameter kekuatan struktur baja gelombang mengacu pada *Canadian Highway Bridges Design Code* (CSA 2006). Tahapan dalam melakukan evaluasi sebagai berikut.

1. Geometri penampang struktur baja bergelombang yang dimodelkan berupa setengah lingkaran dengan variasi timbunan yang dievaluasi berupa timbunan tanah dan timbunan ringan mortar busa dengan ilustrasi penampang dan dimensi diperlihatkan pada Gambar 4. Pengekangan deformasi pada arah x dan y dilakukan pada bagian dasar model dengan tujuan untuk menghindari adanya pengaruh deformasi struktur akibat pergerakan dasar model:



Gambar 4. Penampang konstruksi

2. Parameter desain baja struktur bergelombang yang digunakan pada evaluasi adalah tipe deep (Tabel 1) dengan mutu baja SS 400 dengan spesifikasi mekanis *Yield strength* minimal 245 Mpa dan *Tensile Strength* minimal 400 Mpa (KS D3505, D3506).
3. Tebal baja gelombang diasumsikan 9 mm, dengan kriteria teknis pada Tabel 3. Dengan ketebalan 9 mm tegangan ultimit baut pada sambungan tidak diatur di ASTM A796/A796M-15A, maka tegangan akhir diasumsikan sama dengan ketebalan 7.11 mm sebesar 2101 kN per M (Tabel 3).

Tabel 3. Sifat-sifat teknis baja bergelombang dengan korugasi 381 by 140

| Ketebalan t (mm) | Area A (mm ² /mm) | Momen Inersia, I (mm ⁴ /mm) | Tegangan Ultimit baut pada sambungan kN per M |
|------------------|------------------------------|--|---|
| 3.56 | 4.794 | 11710.7 | 963 |
| 4.32 | 5.846 | 14332.5 | 1270 |
| 4.79 | 6.536 | 16037.0 | 1489 |
| 5.54 | 7.628 | 18740.1 | 1853 |
| 6.32 | 8.716 | 21441.2 | 2101 |
| 7.11 | 9.807 | 24124.5 | 2101 |
| 8 | 11.19 | 27930.6 | A |
| 9 | 12.59 | 31497.4 | A |

Sumber: ASTM A796/A796M-15A

4. Diatas tanah timbunan/timbunan ringan mortar busa terdapat 25 cm perkerasan kaku.
5. Parameter tanah timbunan yang digunakan pada analisis mengacu pada ASTM D698, yaitu kelompok tanah I, yaitu pasir atau pasir kerikilan gradasi baik dengan standar *proctor* 95% dan modulus elastis 24 Mpa.
6. Parameter timbunan ringan digunakan untuk analisis memiliki densitas 0,8 ton/m³ dengan kuat tekan 800 kPa mengacu pada spesifikasi khusus interim Direktorat Bina Marga, dengan nilai modulus elastis diambil sebesar 550 Mpa.

7. Percepatan horizontal gempa diasumsikan konstan sebesar 0.15 g, sedangkan untuk percepatan vertikal (A_v)
8. dianggap $2/3 A_h$ dengan nilai 0.1 g.
9. Beban lalu lintas yang digunakan dalam analisis menggunakan beban lajur "D" dan Beban Garis Terpusat (BGT) berdasarkan SNI 1725-2016 (Gambar 5). Intensitas beban "D", adalah beban terbagi rata (BTR) yang mempunyai intensitas 1 kPa dengan besaran q , tergantung pada panjang total yang dibebani, L , seperti persamaan 1.

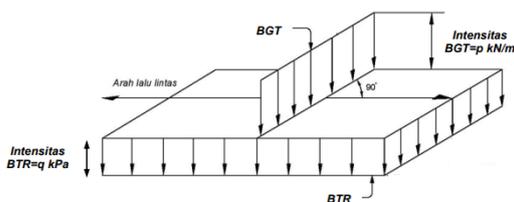
Jika $L \leq 30 \text{ m} : q = 9 \text{ kPa}$ (1)

Keterangan:

q : intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang jembatan (kPa)

L : panjang total jembatan yang dibebani (meter)

Beban Garis Terpusat (BGT) dengan intensitas p sebesar 49 kN/m diletakan di jembatan secara tegak lurus arah lalu lintas (Gambar 5).



Gambar 5. Beban Lajur "D" (SNI 1725-2016)

10. Faktor beban mati menggunakan nilai sebesar 1,25 sedangkan faktor beban hidup sebesar 1,8.
11. Perhitungan untuk mendapatkan gaya aksial maksimum, momen tekuk (*bending*) maksimum dan pergerakan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga.
12. Perhitungan kekuatan struktur mengikuti cara perhitungan dalam *Canadian Highway Bridges Design Code* (CSA 2006). Empat parameter yang akan diperiksa dalam kondisi *ultimit*, yaitu:
 - *Buckling strength*/kuat tekuk
 - *Seam strength*/kuat sambungan
 - Sendi plastis/*plastic hinge*
 - *Displacement*/pergerakan

Perhitungan yang dilakukan agar mendapatkan 4 parameter tersebut:

- a. Perhitungan gaya dorong.

Gaya dorong, T_f , pada dinding struktur baja bergelombang diakibatkan oleh beban mati dan beban hidup yang dihitung pada kondisi batas ultimit (ULS, *Ultimate Limit States*) menggunakan persamaan 2.

$$T_f = \alpha_D T_D + \alpha_L T_L (1 + DLA) \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

- α_D : faktor beban mati
- α_L : faktor beban hidup
- T_D : beban mati
- T_L : beban hidup
- DLA : beban dinamik ijin

- b. Kekuatan dinding saat terjadi tekanan (*wall strength compression*).

Segmen dinding baja bergelombang dibagi menjadi dua segmen zona atas dan zona bawah pemisahan berdasarkan garis radial yang sama yang berpusat di kelengkungan busur di mahkota. Untuk sudut θ_0 , pada radian, dari vertikal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.

$$\theta_0 = 1.6 + 0.2 \log \left[\frac{EI}{E_m R^3} \right] \dots \dots \dots (3)$$

Dalam batas ultimit, tegangan kompresi (*compressive stress*), $\sigma = T_f/A$, harus mempunyai nilai lebih kecil dari tegangan kompresi keruntuhan terfaktor (*factored failure compressive stress*), f_b , perhitungan dilakukan berdasarkan persamaan 4 dan persamaan 5 sebagai berikut:

- 1) Untuk $R < R_e$:

$$f_b = \phi_t F_m \left[F_y - \frac{(F_y K R)^2}{12 E r^2 \rho} \right] \dots \dots \dots (4)$$

- 2) Untuk $R > R_e$:

$$f_b = \frac{3 \phi_t \rho F_m E}{\left[\frac{K R}{r} \right]^2} \dots \dots \dots (5)$$

dengan:

- (i) ϕ_t untuk faktor tahanan material diambil berdasarkan Tabel 4.

Tabel 4. Faktor tahanan material

| Jenis struktur | Komponen tahanan | Faktor tahanan material |
|--|---|-------------------------|
| Tanah-logam dengan gelombang 381x140 (dalam/deep) dan 500x237 (exscor) | Kuat tekan (<i>compressive strength</i>) | $\phi_i = 0,80$ |
| | Sendi Plastis /plastic hinge | $\phi_h = 0,85$ |
| | Sendi plastis/plastic hinge selama konstruksi | $\phi_{hc} = 0,90$ |
| | Sambungan/koneksi | $\phi_j = 0,70$ |

- (ii) $F_m = 1.0$ untuk struktur dengan satu saluran/bukaan, sedangkan untuk struktur dengan beberapa bukaan menggunakan persamaan 6.

$$\left[0.85 + \frac{0.35}{D_h}\right] \leq 1.0 \dots\dots\dots (6)$$

Dengan S adalah jarak bersih melintang paling kecil antara bukaan yang berdekatan dan D_h sesuai dengan bukaan terbesar dalam struktur. Nilai F_m akan diambil 1.0 untuk bagian atas di interaksi antara tanah-baja pada tipe tipe *deep* dan *superdeep*.

- (iii) R_e dihitung menggunakan persamaan 7.

$$R_e = \frac{r}{K} \left[\frac{6E\rho}{F_y} \right]^{0.5} \dots\dots\dots (7)$$

- (iv) Kemudian ρ dihitung menggunakan persamaan 8.

$$\rho = \left[1000 \frac{(H+H')}{R_c} \right]^{0.5} \leq 1.0 \dots\dots\dots (8)$$

- (v) K diperoleh dari persamaan 9.

$$K = \lambda \left[\frac{EI}{E_m R^3} \right]^{0.25} \dots\dots\dots (9)$$

- (vi) E_m pada sisi bawah dan samping baja bergelombang harus mempunyai nilai yang sama dengan E_s , akan tetapi di 1/4 bagian atas dinding struktur baja bergelombang, dihitung menggunakan persamaan 10.

$$E_m = E_s \left[1 - \left[\frac{R_c}{R_c + 1000[H+H']} \right]^2 \right] \dots\dots\dots (10)$$

- (vii) λ untuk segmen atas dinding struktur baja bergelombang dari semua struktur kecuali jika rasio

lebih kecil dari dari 0,4 harus dihitung dengan persamaan 11.

$$\lambda = 1.22 \left[1.0 + 1.6 \left[\frac{EI}{E_m R_c^3} \right]^{0.25} \right] \dots\dots (11)$$

Pada semua kondisi, nilai λ adalah 1,22.

Keterangan:

- fb : *wall strength compression*
- E : modulus elastis Baja bergelombang
- E_s : modulus elastis timbunan
- E_m : modulus elastis penutup (bagian bawah $E_m = E_s$)
- K : kekakuan relatif struktur dan timbunan
- ρ : faktor resisten dengan pertimbangan tinggi lapisan penutup
- R_c : radius bagian atas struktur baja
- R_e : persamaan jari-jari kelengkungan struktur baja
- λ : nilai dari K , faktor pengaruh (bagian bawah = 1,22)
- ϕ_t : *compressive strength factor*

- c. Kekuatan tekuk pada dinding (*bending*) dan kompresi (*compression*).

Pada interaksi struktur antara tanah dan baja yang sudah selesai konstruksi, untuk baja gelombang jenis *superdeep* dan *deep* dalam kondisi batas ultimit gabungan antara gaya dorong aksial dan momen tekuk harus mempunyai nilai lebih kecil dari nilai kapasitas momen plastis terfaktor. Gabungan antara gaya dorong aksial dan momen tekuk dihitung berdasarkan persamaan 12.

$$\left[\frac{T_f}{P_{pf}} \right]^2 + \left| \frac{M_f}{M_{pf}} \right| \leq 1.0 \dots\dots\dots (12)$$

dengan T_f dihitung menggunakan persamaan 2 sedangkan P_{pf} , M_f , dan M_{pf} menggunakan persamaan 13 dan persamaan 14.

$$P_{pf} = \phi_h A F_y \dots\dots\dots (13)$$

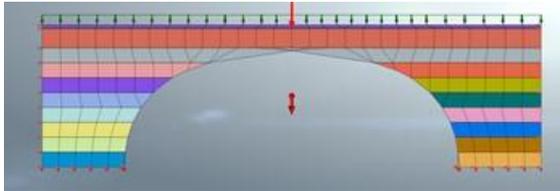
$$M_f = |\alpha_D M_1 + \alpha_D M_D| + \alpha_L M_L (1 + DLA) \dots\dots\dots (14)$$

- d. Pergerakan ijin saat konstruksi. Defleksi yang terjadi pada hasil analisis tidak boleh melebihi kriteria batas yang disyaratkan saat konstruksi, yaitu 2%

dari tinggi struktur baja bergelombang (CHBDC-2006).

HASIL DAN ANALISIS

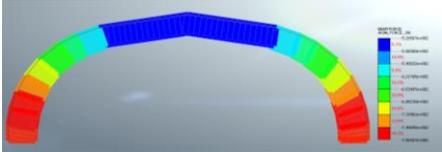
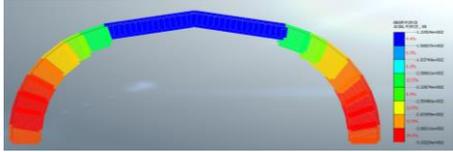
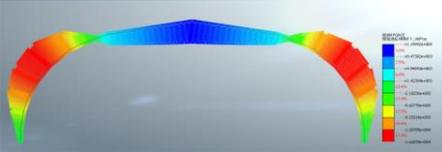
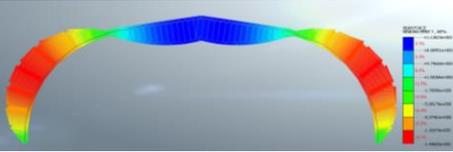
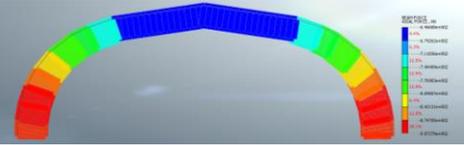
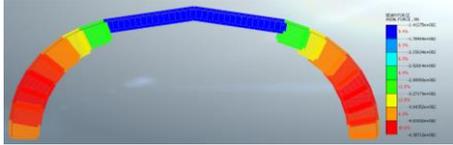
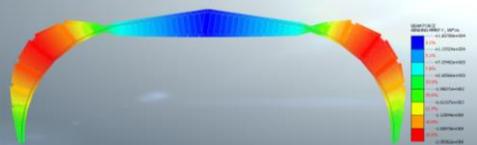
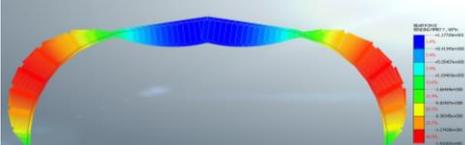
Perhitungan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga dilakukan dengan tahapan penimbunan per satu meter hingga tahap akhir (*final stage*) dan kemudian beban diterapkan (Gambar 6).

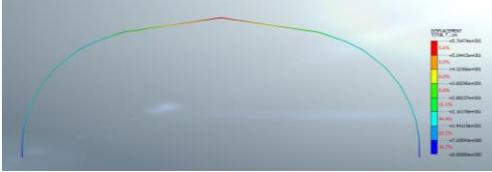
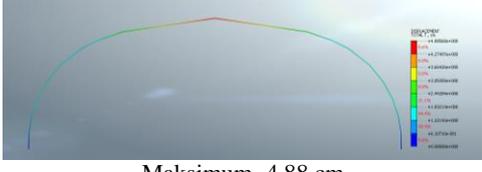


Gambar 6. Tahapan konstruksi dan beban

Hasil perhitungan berupa gaya aksial, momen tekuk (*bending*), dan pergerakan yang terjadi pada baja struktur bergelombang menggunakan 2 (dua) tipe timbunan, yaitu timbunan biasa dan timbunan ringan mortar busa diperlihatkan pada Tabel 5. Berdasarkan hasil permodelan perangkat lunak berbasis elemen hingga diketahui bahwa penggunaan timbunan ringan mortar busa sebagai pengganti timbunan biasa pada struktur baja bergelombang secara signifikan dapat mengurangi gaya aksial, momen tekuk dan pergerakan yang terjadi pada struktur baja bergelombang (Tabel 5).

Tabel 5. Hasil perhitungan gaya aksial, momen tekuk (*bending*) dan pergerakan yang terjadi

| Uraian | Struktur Baja Bergelombang+Timbunan Biasa | Struktur Baja Bergelombang+ Timbunan Ringan Mortar Busa |
|--|---|---|
| Gaya Aksial (Beban Mati) |  Maksimum 780,42 kN |  Maksimum 333 kN |
| Momen Tekuk/ <i>bending</i> (Beban Mati) |  Maksimum 162,03 kN*m |  Maksimum 14,96 kN*m |
| Pergerakan (Beban Mati) |  Maksimum -45.4 cm |  Maksimum -4.73 cm |
| Gaya Aksial (Beban Mati+Beban Hidup) |  Maksimum 907,27 kN |  Maksimum 439 kN |
| Momen Tekuk (Beban Mati+Beban Hidup) |  Maksimum 205,36 kN*m |  Maksimum 15,1 kN*m |

| Uraian | Struktur Baja Bergelombang+Timbunan Biasa | Struktur Baja Bergelombang+ Timbunan Ringan Mortar Busa |
|-------------------------------------|--|---|
| Pergerakan (Beban Mati+Beban Hidup) |  Maksimum -57,6 cm |  Maksimum -4,88 cm |

Hasil perhitungan gaya-gaya pada struktur baja bergelombang dengan perangkat lunak *Midas GTS NX* selanjutnya digunakan untuk melakukan perhitungan T_f (gaya dorong berdasarkan persamaan 2), dan T_f/A *compressive stress* yang terjadi, kemudian dilakukan perhitungan wall strength compression (f_b) untuk dibandingkan dengan nilai ijin. Hasil penilaian kuat tekuk dan kuat sambungan untuk penggunaan timbunan biasa dan timbunan ringan mortar busa diperlihatkan pada Tabel 6.

Hasil perhitungan sendi plastis berdasarkan persamaan 12 dan pergerakan yang terjadi yang telah disandingkan dengan kriteria batas diperlihatkan pada Tabel 7.

Tabel 8 dan Gambar 7 memperlihatkan perbandingan antara nilai terhitung dan kesesuaian terhadap kriteria batas yang dipersyaratkan untuk empat kriteria penilaian pada struktur baja bergelombang dengan

timbunan biasa dan timbunan ringan mortar busa. Nilai diatas 100% memberikan informasi bahwa nilai izin lebih besar dari nilai terhitung, dan hal ini mengindikasikan kondisi struktur baja bergelombang yang aman.

Pada perhitungan struktur baja bergelombang terdapat 4 kriteria yang ditinjau dan semua harus dipenuhi yaitu *wall strength compression*, sendi plastis, pergerakan, dan kuat sambungan. Pada struktur baja bergelombang dengan dengan timbunan biasa, terdapat 3 kriteria yang mempunyai nilai dibawah 100%, ini menunjukkan kondisi struktur tidak aman sedangkan Pada struktur baja bergelombang dengan timbunan ringan mortar busa empat kriteria parameter yang ditinjau menghasilkan nilai di atas 100%. Hal ini berarti pada struktur baja bergelombang yang dikombinasikan dengan timbunan ringan mortar busa, untuk bentang yang sama yaitu 22 m dan ketebalan baja 9 mm, kekuatan struktur berada dalam kondisi aman.

Tabel 6. Hasil penilaian kuat tekuk dan kuat sambungan, untuk struktur baja bergelombang tebal 9 mm, bentang 22 meter

| Uraian | T_f (Total Thrust) (kN/m) | Area, A (mm ² /mm) | Compressive stress, T_f/A (Mpa) | Wall strength compression (Mpa) | Kuat ijin sambungan - Allowable seam strength (kN/m) | Kuat tekuk - Buckling Strength, Wall strength compression > T_f/A | Kuat sambung an-Seam strength, Allowable seam strength> T_f |
|--|-----------------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------------|--|--|--|
| Struktur baja bergelombang + Timbunan biasa | 1226,7 | 12,59 | 97,434 | 96,63 | 1470,7 | tidak terpenuhi | terpenuhi |
| Struktur baja bergelombang + Timbunan ringan mortar busa | 626,13 | 12,59 | 49,732 | 178,196 | 1470,7 | terpenuhi | terpenuhi |

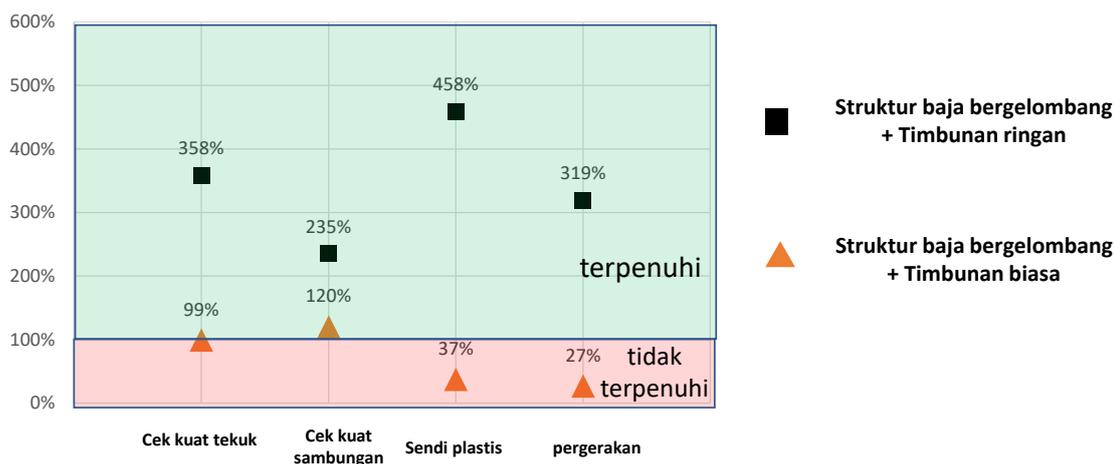
Tabel 7. Hasil penilaian sendi plastis dan pergerakan untuk struktur baja bergelombang tebal 9 mm, bentang 22 meter

| Uraian | T_f (Total Thrust) (kN/m) | Area A (mm ² /mm) | Sendi Plastis /Plastic hing | Pergerakan izin 2% dari tinggi struktur CSS (cm) | Pergerakan yang terhitung (cm) | Sendi plastis <1 | Pergerakan yang terhitung < dari pergerakan izin |
|--|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|--------------------------------|------------------|--|
| Struktur baja bergelombang + Timbunan biasa | 1226,7 | 12,59 | 2,67 | 15,6 | 57,6 | tidak terpenuhi | tidak terpenuhi |
| Struktur baja bergelombang + Timbunan ringan | 626,13 | 12,59 | 0,218 | 15,6 | 4,8 | terpenuhi | terpenuhi |

Tabel 8. Persentase antara nilai izin dan nilai terhitung dan selisih persentase kenaikan keamanan

| Uraian | Ketebalan, t (mm) | Area, A (mm ² /mm) | Kuat tekuk (Buckling Strength), wall strength compression > T/A | Kuat sambungan (seam strength) | Sendi plastis (plastic hinge) <1 | Pergerakan | Kesimpulan (dari 4 kriteria kekuatan struktur) |
|--|-------------------|-------------------------------|---|--------------------------------|----------------------------------|------------|--|
| Struktur baja bergelombang + Timbunan biasa | 9,00 | 12,59 | 99% | 120% | 37% | 27% | tidak terpenuhi |
| Struktur baja bergelombang + Timbunan ringan | 9,00 | 12,59 | 358% | 235% | 458% | 319% | terpenuhi |
| Selisih | | | 259% | 115% | 421% | 292% | |

Keterangan: Jika nilai yang didapat diatas 100% berarti struktur aman atau menggambarkan nilai izin lebih dari nilai yang dibandingkan berdasarkan hasil perhitungan



Keterangan: Jika marker ada di area merah menunjukkan struktur tidak aman sedangkan jika berada pada area hijau menunjukkan struktur aman

Gambar 7. Perbandingan persentase kriteria penilaian struktur baja bergelombang

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil kajian, kondisi saat ini tipe struktur baja bergelombang yang bisa diproduksi di Indonesia baru sampai dengan tipe *deep* dengan mutu baja yang dipakai umumnya SS 400, akan tetapi dengan

kombinasi dengan mortar busa panjang bentang dapat di optimalkan dan jika lebar bentang melebihi batas maksimum jembatan bisa dibuat dengan *multi span* seperti pada Gambar 2. Penggunaan struktur jembatan ini dapat diaplikasikan hampir pada semua kondisi

selama persyaratan teknis dapat dipenuhi. Pembahasan efek penggunaan timbunan ringan mortar busa dibandingkan dengan timbunan biasa diatas struktur baja bergelombang dijelaskan berdasarkan pengecekan empat parameter.

Perbandingan penilaian kuat tekuk dan kuat sambungan pada struktur baja bergelombang dengan timbunan biasa ditunjukkan pada Tabel 6. Nilai *compressive stress*, T_f/A , yang terjadi, yaitu 97,434 Mpa, melebihi dari nilai *wall strength compression* 96,63 Mpa. Hal ini mengindikasikan struktur tidak aman (kriteria kuat tekuk: tidak terpenuhi). Namun, untuk nilai kuat sambungan menunjukkan nilai yang aman (kriteria kuat sambungan terpenuhi), karena nilai T_f sebesar 1226,7 kN/m tidak melebihi nilai izin yaitu 1470 kN/m. Adapun pada struktur baja bergelombang dengan menggunakan timbunan ringan mortar busa, kedua kriteria ini, *compressive stress*, sebesar 49,732 Mpa, dan T_f , sebesar 626,13 kN/m, mempunyai nilai di bawah nilai izin.

Untuk perbandingan kriteria penilaian sendi plastis dan pergerakan yang terjadi pada struktur baja bergelombang ditunjukkan Tabel 7. Pada struktur yang menggunakan timbunan biasa, nilai parameter sendi plastis yang terjadi adalah 2,67 dan pergerakan sebesar 57,6 cm. Sendi plastis mempunyai nilai lebih dari 1 begitu juga dengan nilai pergerakan yang lebih besar dari 15,6 cm. Nilai kedua parameter kekuatan ini melebihi nilai izin, yang mengindikasikan struktur tidak aman. Untuk struktur baja bergelombang dengan menggunakan timbunan ringan mortar busa, dua kriteria tersebut semua menunjukkan nilai di bawah nilai izin, yaitu sendi plastis 0,218 dan pergerakan yang terjadi 4,8 cm. Tabel 8 dan Gambar 7 dapat dilihat kenaikan persentase 4 kriteria penilaian kekuatan struktur baja bergelombang ketika timbunan biasa diganti menjadi timbunan ringan mortar busa, yaitu:

1. Pemenuhan terhadap kriteria kuat tekuk meningkat menjadi 259%
2. Kuat sambungan meningkat 115%
3. Pemenuhan terhadap kriteria sendi plastis meningkat menjadi 421%
4. Pemenuhan terhadap kriteria pergerakan meningkat menjadi 292%

Data-data diatas menunjukkan bahwa penggantian timbunan biasa menjadi timbunan ringan mortar busa pada struktur baja bergelombang akan meningkatkan parameter kekuatan dari struktur baja bergelombang yang awalnya tidak aman menjadi aman secara struktur. Kenaikan nilai parameter kekuatan ini mencapai dua hingga lima kalinya, dengan kenaikan minimum yaitu pada parameter kuat sambungan dan yang terbesar pada nilai sendi plastis.

Kenaikan parameter kekuatan dengan penggunaan timbunan ringan mortar busa diatas struktur baja bergelombang, akan memungkinkan optimasi penggunaan struktur baja bergelombang dengan lebar bentang lebih dari 22 meter.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penggunaan timbunan ringan mortar busa sebagai pengganti timbunan biasa pada struktur baja bergelombang secara signifikan menurunkan gaya aksial, momen tekuk dan pergerakan yang terjadi pada struktur baja bergelombang.

Timbunan ringan mortar busa yang diterapkan pada struktur baja bergelombang bentang 22 meter, tebal 9 mm, membuat struktur menjadi aman dan memenuhi semua parameter penilaian kekuatan.

Kenaikan parameter kekuatan dari penggunaan timbunan ringan mortar busa mencapai antara dua sampai lima kali, jika dibandingkan dengan timbunan biasa. Kenaikan nilai parameter kekuatan secara berturut turut adalah sebesar: kuat tekuk 259%, kuat sambungan 115%, sendi plastis 421% dan pergerakan 292%.

Saran

Hasil evaluasi penerapan timbunan ringan mortar busa di atas struktur baja bergelombang untuk bentang 22 meter dan tebal 9 mm, telah meningkatkan dan membuat kekuatan struktur masih berada dalam batas aman. Oleh karena itu, penggunaan timbunan ringan mortar busa diharapkan dapat diuji coba untuk bentang yang lebih lebar (>22 m) untuk mendapatkan bentang maksimal dengan kondisi tipe struktur baja bergelombang yang ada di Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagai wujud penghargaan dengan selesainya tulisan ini, kami mengucapkan terima kasih kepada Bapak Kepala Balai Geoteknik Terowongan dan Struktur, Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR yang telah memberikan dukungan dan bantuan.

DAFTAR PUSTAKA

- American Standard Testing and Material (ASTM). 2012. *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort* (D698-12e2). United State: ASTM International.
- American Standard Testing and Material (ASTM). 2015. *Standard Practice for Structural Design of Corrugated Steel Pipe, Pipe-Arches, and Arches for Storm and Sanitary Sewer and Other Buried Application* (A796/A796M-15A). United State: ASTM International.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2016. *Pembebanan untuk Jembatan* (SNI 1725:2016). Jakarta: BSN.
- Canadian Standard Association (CSA). 2006. *Canadian Highway Bridge Design Code*.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2017. *Spesifikasi Khusus Interim Material Ringan Mortar Busa*
- Korean Standard (KS). 2007 *Rolled Steels for General Structure* (D 3503).
- Korean Standard (KS). 2007. *Hot-Dip Zinc-Coated Steel Sheets and Coils* (D 3506).
- National Corrugated Steel Pipe Association (NCSIPA). 2008. *Corrugated Steel Pipe Design Manual*.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan (Pusjatan). 2015. *Kajian Perencanaan Struktur Baja Bergelombang untuk Lintas Atas & Penanganan Longsoran Lereng Jalan*. Laporan Internal. Bandung: [s.n].
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan (Pusjatan). 2016. *Penerapan Teknologi Struktur Baja Bergelombang untuk Lintas Atas Jalan Perkotaan*. Laporan Internal. Bandung: [s.n].
- Pyungsan SI, LTD. 2014. *Corrugated Steel Plate Structure Catalogue*.
- Rhee, Jong Wha. 2014. *Variouus Structural Applicatons of Corrugated Steel Structure*.