

EVALUASI KEKUATAN STRUKTUR BAJA BERGELOMBANG BERDASARKAN TIPE DAN KETEBALAN (STRENGTH EVALUATION FOR CORRUGATED STEEL STRUCTURE BASED ON THICKNESS AND TYPE)

Hardiansyah Putra

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Jl. A.H. Nasution No. 264 Bandung 40294
e-mail: hardiansyah.putra@pusjatan.pu.go.id

Diterima: 5 September 2019; direvisi: 10 Desember 2019; disetujui: 18 Desember 2019.

ABSTRAK

Material konstruksi struktur baja bergelombang mempunyai tiga tipe yaitu standar, deep dan superdeep. Tiga tipe ini dibedakan dari dimensi penampang sehingga terdapat perbedaan nilai momen inersia, semakin besar momen inersia maka bentang maksimum yang diaplikasikan bisa semakin lebar. Di Indonesia material konstruksi ini sudah difungsikan sebagai struktur jembatan. Penilaian kekuatan konstruksi struktur baja bergelombang berdasarkan tiga kriteria yaitu *compression failure*, *plastic hinge*, dan *connection failure*. Pada saat perencanaan diperlukan iterasi perhitungan untuk mendapatkan pemilihan tipe dan ketebalan yang optimum, maka dilakukan perhitungan dan analisis pada lebar bentang 15 meter dengan bentuk konstruksi setengah lingkaran agar diketahui peningkatan persentase kekuatan setiap perubahan tipe dan ketebalan baja yang digunakan. Metode perhitungan berdasarkan pedoman yang dikeluarkan oleh *Canadian Highway Bridge Designs Code*. Berdasarkan hasil perhitungan semakin besar nilai momen Inersia akan semakin menambah kekuatan dari struktur baja bergelombang. Hasil evaluasi menunjukkan rata-rata penambahan kekuatan 3 parameter tinjauan pada masing-masing tipe dan ketebalan baja adalah untuk tipe standar kenaikan rata-rata nilai *wall strength compression* sebesar 9%, kenaikan rata-rata *seam strength* 3% dan kenaikan rata-rata *plastic hinge* 11%. Untuk tipe deep kenaikan rata-rata nilai *wall strength compression* sebesar 24%, kenaikan rata-rata *seam strength* 25% dan kenaikan rata-rata *plastic hinge* 19%. Untuk Tipe Superdeep kenaikan rata-rata nilai *wall strength compression* sebesar 41%, kenaikan rata-rata *seam strength* 27% dan kenaikan rata-rata *plastic hinge* 34%. Hasil tersebut memperlihatkan kenaikan rata-rata kekuatan tertinggi ada pada tipe baja bergelombang tipe superdeep.

Kata Kunci: struktur baja bergelombang, momen inersia, kekuatan dinding dalam tekanan, kekuatan sambungan.

ABSTRACT

There are three types of corrugated steel structure material, standard, deep and superdeep. These three types are distinguished by the cross-sectional dimension so that there are differences in the value of moment inertia, the greater value of moment inertia it will make maximum span can be wider. In Indonesia, this construction material has been used as a bridge structure. The assessment of the strength of corrugated steel structure seen from three criteria there are, *compression failure*, *plastic hinge*, and *connection failure*. In the planning stage iteration of calculations is needed to get the optimum selection of type and thickness, so calculation and analysis is carried out on a 15-meter wide span with a semicircular construction in order to know the percentage increase in strength of each type change and thickness of steel used. The method of calculation is based on guidelines issued by the *Canadian Highway Bridge Designs Code*. Based on the calculation results, the greater of moment Inertia will increase the strength of the corrugated steel structure. Evaluation results show that the average strength increase of 3 viewing parameters for each type and thickness of steel is, for the standard type average value of *wall strength compression* increases by 9%, the average of *seam strength* increases by 3 % and the average of *plastic hinge* increases by 11%. For deep type, average value of *wall strength compression* increases by 24%, the average of *seam strength* increases by 25 % and the average of *plastic hinge* increases by 19%. For superdeep type, average value of *wall strength compression* increases by 41%, the average of *seam strength* increases by 27% and the average of *plastic hinge* increases by 34%. These results show highest increasing of strength happen in superdeep type.

Keyword: corrugated steel structure, inertia moment, wall strength compression, seam strength, plastic hinge.

PENDAHULUAN

Sejarah teknologi struktur baja bergelombang (*Corrugated Steel Structure or Corrugated Multi Plate*) digunakan sebagai sistem drainase kemudian penggunaannya meluas digunakan sebagai struktur jembatan.

Sampai dengan tahun 2018 struktur baja bergelombang di bagi dalam berbagai tipe yaitu standar, *deep* dan *superdeep*, ketiga tipe ini bisa mengakomodir lebar bentang maksimum yang berbeda hal ini dikarenakan perbedaan propertis material.

Di Indonesia sendiri struktur baja bergelombang sudah diaplikasi sebagai sistem drainase dan struktur jembatan tetapi umumnya tipe struktur baja bergelombang yang digunakan masih tipe standar.

Meluasnya penggunaan struktur baja bergelombang ini dikarenakan keunggulan yang bisa didapat seperti fleksibilitas dimana bisa di produksi dalam berbagai bentuk, kekuatan struktural dimana sifat mekanis dikontrol dipabrik jadi bisa dibuat sesuai spesifikasi, daya tahan dimana bisa dikombinasikan dengan jenis lapisan pelindung untuk mencapai masa layan yang diinginkan, dan Nilai ekonomis dimana produk mudah dalam pemasangan (NCSA 2008).

Tulisan ini bermaksud menjelaskan seberapa jauh peningkatkan kekuatan dari struktur baja bergelombang berdasarkan tipe dan ketebalan struktur baja yang digunakan sehingga bisa menjadi rujukan bagi perencana untuk menentukan tipe dan ketebalan baja yang digunakan apabila pada perhitungan awal syarat kriteria paramater yang ditinjau tidak memenuhi nilai ijinnya.

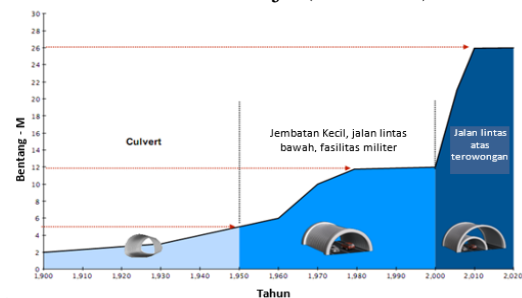
KAJIAN PUSTAKA

Struktur baja bergelombang (*Corrugated steel structure*)

Struktur baja bergelombang adalah suatu struktur plat baja yang kekakuan/kekerasannya diperkuat oleh bentuk bergelombang, yang mana nilai modulus plastisnya dapat meningkat 10 hingga 50 kali (Rhee 2014).

Pada tahun 1931, suatu struktur plat pipa bergelombang besar telah dikembangkan dan berhasil dirakit di luar pabrik yaitu pada lokasi proyek. Hal ini memungkinkan untuk membuat struktur plat bergelombang dengan ukuran

diameter yang lebih besar hingga mencapai diameter 8 m dan panjang hingga 18 m. Seiring waktu lebar diameter struktur baja bergelombang yang dapat diproduksi dari tahun ke tahun semakin berkembang hingga bisa mencapai lebar bentang 35 m, penggunaan teknologi ini pun meluas ke berbagai bidang dan tidak hanya berfungsi sebagai saluran air atau fasilitas drainase saja (Gambar1).



Gambar 1. Perkembangan produksi dan aplikasi struktur baja bergelombang (Rhee 2014)

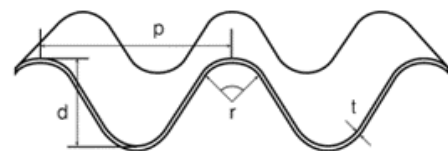
Bahan material struktur baja bergelombang di buat dari coil baja dengan spesifikasi mekanis seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Mutu plat baja

Mutu Baja	Spesifikasi Mekanis	
	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
SS400	245≤	400≤
SS490	285≤	490≤
SS540	400≤	540≤
SS590	450≤	590≤

sumber: KS D 3503(2017 a) dan KS D 3506 (2017 b)

Berdasarkan ASTM A796/A796M-15A (2015) struktur baja bergelombang berbentuk gelang (annular) dibagi dalam 3 tipe korugasi (Tabel 2) berdasarkan jarak antar puncak gelombang dan kedalaman gelombang (Gambar 2).



Keterangan:

- d (*depth*) : kedalaman lengkungan
- p (*pitch*) : panjang antara dua puncak lengkungan
- r (*radius*) : jari-jari lengkungan
- t (*thicknes*) : ketebalan

Gambar 2. Tipikal penampang Struktur baja bergelombang

Tabel 2. Tipe struktur baja bergelombang annular

Tipe korugasi	Pitch, mm	Depth, mm	Istilah Tipe
152 by 51	152	51	standar
381 by 140	381	140	deep
500 by 237	500	237	superdeep

Tipe-tipe korugasi memiliki beberapa ketebalan tertentu dan setiap ketebalan mempunyai sifat propertis tertentu ini ditunjukkan pada Tabel 3, Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 3. Propertis struktur baja bergelombang tipe korugasi 152 by 51

Ketebalan t (mm)	Area A (mm ² /mm)	Momen Inersia, I (mm ⁴ /mm)	Tegangan Ultimit baut pada sambungan kN per M
2,82	3,294	990,06	613
3,56	4,240	1280,93	905
4,32	5,184	1575,89	1182
4,79	5,798	1769,80	1357
5,54	6,771	2079,8	1634
6,32	7,743	2395,25	1926
7,11	8,719	2717,53	2101
8,08	9,887	3113,54	3430
9,65	11,881	3801,80	4159

sumber: ASTM A796/A796M-15A (2015)

Tabel 4. Propertis struktur baja bergelombang tipe 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 (2015)

A = dikarenakan ASTM tidak mengatur untuk ketebalan 8 dan 9mm maka nilai tegangan ultimit diasumsikan sama dengan ketebalan 7.11mm

Tabel 5. Propertis struktur baja bergelombang tipe korugasi 500 by 237

Ketebalan t (mm)	Area A (mm ² /mm)	Momen Inersia, I (mm ⁴ /mm)	Tegangan Ultimit baut pada sambungan kN per M
3	4,575	30363,231	1621 ^A
4	6,104	40578,557	1927 ^A
5	7,635	50841,278	2233 ^A
6	9,169	61151,55	2539 ^A
7,11	10,627	70803,75	2875
8,1	12,144	81036,10	3181
9,65	14,509	97031,45	3897

(sumber: ASTM A796/A796M-15A)

A = nilai diambil berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan oleh pyungsan, karena untuk ketebalan tersebut tidak diatur oleh ASTM

Aplikasi Struktur baja bergelombang di Indonesia

Semakin besar nilai momen inersia maka bentang yang bisa diaplikasikan akan semakin besar, perkiraan rentang lebar yang dapat di aplikasikan pada Tabel 5.

Tabel 6. Tipe dan lebar maksimum struktur baja bergelombang yang bisa di aplikasikan (Pyungsan, 2014)

Tipe	Ketebalan (mm)	Lebar maksimum
standard	3,2~9.65	9 m
deep	3,4~9.0	27 m
superdeep	3,0~9.0	35 m

(sumber: Pyungsan,2014)

Struktur baja bergelombang yang diaplikasikan di Indonesia umumnya difungsikan sebagai drainase akan tetapi beberapa sudah juga yang diaplikasikan sebagai jalan lintas atas di beberapa kota yaitu di Tasikmalaya (Gambar 3) dan Semarang tipe korugasi yang digunakan adalah 152 by 51(tipe standar).



Gambar 3. Lintas atas di jalan menggunakan struktur baja bergelombang tipe 152 by 51 di lingkas Tasikmalaya (Aldiamar dkk. 2015)

Aplikasi struktur baja bergelombang tipe korugasi 381 by 140 (*deep*) dan 500 by 237 (*superdeep*) di Indonesia ada di Jalan lintas Antapani, Bandung yang di bangun pada 2016 oleh Puslitbang jalan dan Jembatan, Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Aldiamar dkk 2016).



Gambar 4. Lintas atas Antapani Bandung

Material timbunan

Persyaratan untuk material timbunan diatas strktur baja bergelombang adalah sebagai berikut:

1. Material timbunan harus memiliki kualitas minimal sama atau lebih bagus daripada *sub-grade*, seperti ditunjukkan pada Tabel 7

Tabel 7. Klasifikasi tanah

Ukuran butir	Jenis tanah	Simbol klasifikasi asi USCS
Kasar (I)	Pasir atau kerikil pasiran gradasi baik	GW
	Pasir atau kerikil pasiran gradasi buruk	GP
	Pasir atau pasir kerikilan gradasi baik	SW
	Pasir atau pasir kerikilan gradasi buruk	SP
Sedang (II)	Kerikil lempungan atau kerikil pasiran-lempungan	GC
	Pasir lempungan atau pasir kerikilan-lempungan	SC
	Pasir lanauan atau pasir kerikilan-lanauan	SM

2. Nilai modulus *secant* berdasarkan derajat pemadatan relatif yang dapat digunakan ditunjukkan pada Tabel 8

Tabel 8. Modulus *secant* tanah, E_s , untuk berbagai jenis tanah

Kelompok tanah*	Densitas standar Proctor, %**	E_s , MPa
I	85	6
	90	12
	95	24
	100	30
II	85	3
	90	6
	95	12
	100	15

*lihat Tabel 7

**berdasarkan ASTM D 698

Metode Perhitungan Struktur Baja Bergelombang

Tata cara perhitungan struktur Baja bergelombang diatur dalam Canadian Highway Bridges Design Code (CHBDC, 2006) pada bab 7 mengenai *buried structure* ada 3 parameter utama yang harus di tinjau pada kondisi batas ultimit yaitu

1. *Compression Failure*
2. *Plastic hinge*
3. *Connection failure*

Alur perhitungan yang harus dilakukan untuk mendapatkan tiga parameter utama diatas adalah:

Mendapatkan Gaya Dorong

Gaya dorong, T_f , pada dinding struktur baja bergelombang akibat beban hidup dan beban mati terfaktor harus dihitung untuk kondisi batas ultimit (*Ultimate Limit States*, ULS) sebagai berikut:

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

Keterangan:

- α_D : faktor beban mati
- α_L : faktor beban hidup
- T_D : beban mati yang bekerja
- T_L : beban hidup yang bekerja
- DLA : beban dinamik yang di ijinan

T_D dan T_L dihitung sesuai persamaan 2 dan persamaan 4 berikut beban dinamis yang diizinkan, *DLA* (*dynamic load allowance*), Gaya dorong, T_D , pada dinding struktur baja bergelombang akibat timbunan (*overflow*) harus dihitung sebagai berikut:

$$T_D = 0.5 (1.0 - 0.1C_s) A_f W \dots \dots \dots (2)$$

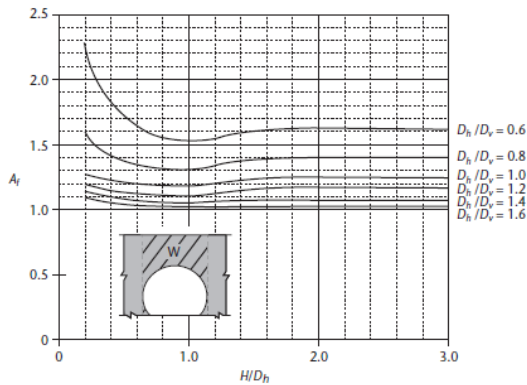
Keterangan:

C_s : parameter kekakuan aksial, yang dihitung sebagai berikut:

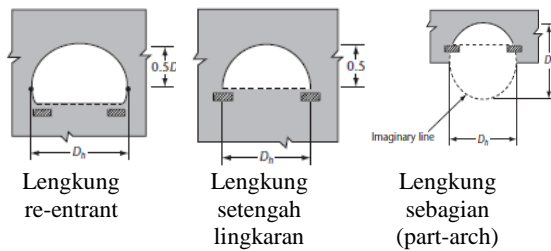
$$C_s = \frac{1000 E_s D_v}{EA} \dots \dots \dots (3)$$

A_f : diperoleh dari Gambar 5 untuk nilai yang relevan dari D_h/D_v dan H/D_h , dengan D_h dan D_v seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Untuk H/D_h lebih kecil dari 0,2, A_f harus diperoleh dengan ekstrapolasi grafis atau numerik, asalkan nilai H tidak lebih kecil dari kedalaman minimal penutup yang diizinkan.

W : adalah berat tanah dan perkerasan di atas struktur baja ber-gelombang, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Nilai A_f



Gambar 6. D_h dan D_v untuk berbagai bentuk struktur baja bergelombang

Gaya dorong, T_L , harus diasumsikan konstan sekeliling dinding struktur baja bergelombang, dan nilainya dihitung menggunakan persamaan 4.

$$T_L = 0.5D_h\sigma_L m_f \dots\dots\dots(4)$$

$$= 0.5l_t\alpha_L m_f \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan:

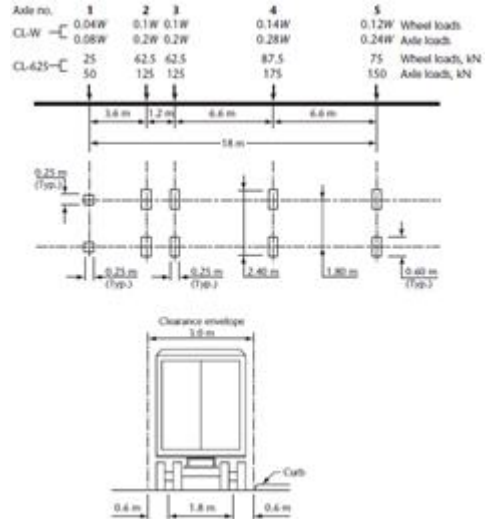
- l_t : adalah jarak antara as roda/gandar terluar, termasuk jejak kaki ban, yang ditempatkan sesuai dengan Butir (c) (i) ditambah $2H$;
- m_f : adalah faktor modifikasi untuk pembebanan beberapa lajur (*multi-lane loading*) yang diperoleh dari Tabel 9, sesuai dengan jumlah kendaraan yang dipertimbangkan;

Tabel 9. Faktor modifikasi untuk pembebanan multi-jalur (*lane*)

Jumlah jalur desain beban	Faktor modifikasi
1	1,00
2	0,90
3	0,80
4	0,70
5	0,60
6 atau lebih	0,5

Model beban akan mencapai ultimit saat mencapai nilai maksimum yang dihasilkan $\alpha_L m_f$. α_L yang diperoleh sebagai berikut:

1. Pada bentang arah memanjang, posisi sejumlah as roda/gandar dari truk CL-W (Gambar 7) atau truk di permukaan jalan di atas struktur baja bergelombang akan memberikan total beban maksimum;



Gambar 7. Truk CL-W

2. Mendistribusikan beban roda persegi panjang melalui timbunan ke bagian mahkota dengan kemiringan vertikal : horizontal = 1:1 ke arah melintang struktur baja bergelombang dan kemiringan vertikal : horisontal = 2:1 ke arah memanjang; dan
3. Tekanan terdistribusi merata, σ_L , didapatkan dengan cara mengasumsikan bahwa total beban roda yang dipertimbangkan dalam butir (i) terdistribusi secara merata di atas area persegi panjang seperti dinyatakan pada butir (ii).

Kekuatan Dinding Saat Mengalami Tekanan (*Wall Strength Compression*)

Untuk keperluan bagian ini, dinding struktur baja bergelombang harus dibagi menjadi zona bawah dan atas yang dipisahkan satu sama lain oleh dua garis radial simetris dengan pusat pada pusat kelengkungan busur di mahkota, dan dengan sudut θ_0 , pada radian, dari vertikal dihitung menggunakan persamaan 5:

$$\theta_0 = 1.6 + 0.2 \log \left[\frac{EI}{E_m R^3} \right] \dots\dots\dots(5)$$

Pada kondisi batas ultimit, tegangan kompresi (*compressive stress*), $\sigma = T_f/A$, tidak boleh melebihi tegangan kompresi keruntuhan terfaktor (*factored failure compressive stress*),

f_b , yang dihitung menggunakan persamaan 6 dan 7 sebagai berikut:

Untuk $R < R_e$:

$$f_b = \phi_t F_m \left[F_y - \frac{(F_y K R)^2}{12 E r^2 \rho} \right] \dots\dots\dots (6)$$

Untuk $R > R_e$:

$$f_b = \frac{3 \phi_t \rho F_m E}{\left[\frac{K R}{r} \right]^2} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

ϕ_t : faktor tegangan kompresi yang diperoleh Tabel 10

Tabel 10. Faktor tahanan material

Jenis struktur	Komponen tahanan	Faktor tahanan material
Tanah-logam dengan tipe gelombang 150x50 (standar)	Kuat tekan (<i>compressive strength</i>)	$\phi_c = 0,80$
	Sendi plastis (<i>plastic hinge</i>) selama konstruksi	$\phi_{hc} = 0,90$
	Koneksi/sambungan	$\phi_j = 0,70$
Tanah-logam dengan gelombang 381x140 (dalam/deep dan 500x237 (<i>exscor</i>))	Kuat tekan (<i>compressive strength</i>)	$\phi_c = 0,80$
	Sendi plastis (<i>plastic hinge</i>)	$\phi_h = 0,85$
	Sendi plastis (<i>plastic hinge</i>) selama konstruksi	$\phi_{hc} = 0,90$
	Koneksi/sambungan	$\phi_j = 0,70$

F_m : = 1,0 untuk struktur dengan satu saluran (bukaan)
 = $\left[0,85 + \frac{0,3 S}{D_h} \right] \leq 1,0$ untuk struktur dengan beberapa bukaan :

S : adalah jarak bersih melintang paling kecil antara bukaan yang berdekatan dan

D_h : sesuai dengan bukaan terbesar dalam struktur dan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Nilai F_m harus diasumsikan 1.0 untuk bagian atas struktur tanah-baja dengan tipe *deep* dan *superdeep*.

$$R_e = \frac{r}{K} \left[\frac{6 E \rho}{F_y} \right]^{0,5} \dots\dots\dots (8)$$

$$\rho = \left[1000 \frac{(H+H')}{R_c} \right]^{0,5} \leq 1,0 \dots\dots\dots (9)$$

$$K = \lambda \left[\frac{E I}{E_m R^3} \right]^{0,25} \dots\dots\dots (10)$$

E_m untuk bagian sisi dan bawah dinding struktur baja bergelombang harus sama dengan E_s , tetapi untuk seperempat bagian atas dinding struktur baja

bergelombang, harus dihitung sebagai berikut:

$$E_m = E_s \left[1 - \left[\frac{R_c}{R_c + 1000 [H+H']} \right]^2 \right] \dots\dots\dots (11)$$

Jika dinding struktur baja bergelombang didukung/ditimbun oleh kombinasi tanah yang dipadatkan dan CLSM (*Controlled Low-Strength Material*), nilai E_m harus didasarkan pada nilai E_s yang lebih rendah untuk dua material; dan

λ untuk segmen atas dinding struktur baja bergelombang dari semua struktur kecuali bagian-lengkungan satu-radius dengan rasio *rise-to-span* kurang dari 0,4 harus dihitung sebagai berikut:

$$\lambda = 1,22 \left[1,0 + 1,6 \left[\frac{E I}{E_m R_c^3} \right]^{0,25} \right] \dots\dots\dots (12)$$

Untuk semua kasus, nilai λ adalah 1.22.

Kekuatan Dinding pada Tekuk (*Bending*) dan Kompresi (*Compression*)

Untuk struktur tanah-baja dengan tipe *deep* dan *superdeep* yang telah selesai dibangun, efek gabungan dari momen tekuk dan gaya dorong aksial pada kondisi batas ultimit tidak boleh melebihi kapasitas momen plastis terfaktor dari bagian/segmen, gabungan momen tekuk dan gaya dorong aksial dihitung menggunakan persamaan 13:

$$\left[\frac{T_f}{P_{pf}} \right]^2 + \left[\frac{M_f}{M_{pf}} \right] \leq 1,0 \dots\dots\dots (13)$$

dengan T_f dihitung sesuai persamaan 1 dan P_{pf} , M_f , dan M_{pf} dihitung sebagai berikut:

$$P_{pf} = \phi_h A F_y \dots\dots\dots (14)$$

$$M_f = |\alpha_D M_1 + \alpha_D M_D| + \alpha_L M_L (1 + DLA) \dots\dots\dots (15)$$

Keterangan:

$$M_1 = k_{M1} R_b \gamma D_h^3 \dots\dots\dots (16)$$

$$M_D = -k_{M2} R_b \gamma D_h^2 H_e \dots\dots\dots (17)$$

Keterangan:

H_e = lebih kecil dari H dan $D_h/2$

$$M_L = \frac{k_{M3} R_u D_h A_L}{k_4} \dots\dots\dots (18)$$

dengan mana k_{M1} , k_{M2} , k_{M3} , dan R_B diperoleh dari persamaan 19 s/d 23.

$$k_{M1} = 0,0046 - 0,0010 \log_{10}(N_F) \text{ untuk } N_F \leq 5000 \\ = 0,0009 \text{ untuk } N_F > 5000 \dots\dots\dots (19)$$

$$k_{M2} = 0,018 - 0,004 \log_{10}(N_F) \text{ untuk } N_F \leq 5000$$

$$= 0,0032 \text{ untuk } N_F > 5000 \dots\dots\dots (20)$$

$$k_{M3} = 0,120 - 0,018 \log_{10}(N_F) \text{ for } N_F \leq 100000$$

$$= 0,030 \text{ untuk } N_F > 100000 \dots\dots\dots (21)$$

$$R_B = 0,67 + 0,87[(D_v/2D_h) - 0,2] \text{ untuk } 0,2 \leq$$

$$D_v/2D_h \leq 0,35 \dots\dots\dots (22)$$

$$= 0,80 + 1,33[(D_v/2D_h) - 0,35] \text{ untuk } 0,35 <$$

$$D_v/2D_h \leq 0,50 \dots\dots\dots (23)$$

$$= D_v/D_h \text{ untuk } D_v/2D_h > 0,5 \dots\dots\dots (24)$$

A_L adalah berat poros kedua dari truk CL-W, dan k_4 diperoleh dengan interpolasi dari Tabel 11.

Tabel 11. Nilai k_4 untuk menghitung beban garis setara (*equivalent line loads*)

Tebal penutup, m	k_4 , m		
	2 roda per gandar	4 roda per gandar	8 roda per gandar
0,3	1,3	1,5	2,6
0,6	1,6	2,0	2,8
0,9	2,1	2,7	3,2
1,5	3,7	3,8	4,1
2,1	4,4	4,4	4,5
3,0	4,9	4,9	4,9
4,6	6,7	6,7	6,7
6,1	8,5	8,5	8,5
9,1	12,2	12,2	12,2

Untuk H hingga 3,0 m. Untuk H lebih besar dari 3,0 m, k_4 harus diasumsikan 4,9 m. R_U harus dihitung berdasarkan persamaan 25:

$$R_U = \frac{0,265 - 0,053 \log_{10} N_F}{(H / D_h)^{0,75}} \leq 1,0 \dots\dots\dots (25)$$

$$M_{pf} = \phi_t M_p \dots\dots\dots (26)$$

$$\left| \frac{M_f}{M_{pf}} \right| = \text{nilai absolut dari rasio } M_f / M_{pf}$$

Kekuatan Sambungan (*Seam Strength*)

Kekuatan terfaktor sambungan memanjang dinding struktur baja bergelombang, $\phi_t S_s$, tidak boleh kurang dari T_f , dengan kekuatan persentil kelima, S_s , dapat dievaluasi secara eksperimental atau diperoleh dari data uji yang telah disetujui atau standar yang telah diterbitkan, kekuatan pada sambungan pada tiap-tiap tipe baja bergelombang berdasarkan ASTM ini bisa dilihat pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5.

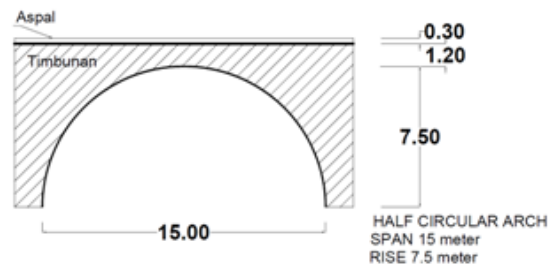
HIPOTESIS

Perubahan penggunaan tipe korugasi dari 152 by 51, 380 by 140 sampai 500 by 237 dan juga peningkatkan ketebalan akan meningkatkan kekuatan nilai *plastic hinge*, kekuatan dinding (*wall strength compression*) dan kekuatan sambungan (*seam strength*) dari struktur baja bergelombang.

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan:

1. Penampang struktur baja bergelombang di hitung berdasarkan informasi berikut (Gambar 8)
Tipe penampang: Setengah lingkaran
Lebar bentang : 15 meter
tinggi timbunan diatas mahkota css: 1,5 m
mutu baja strukur baja bergelombang SS 400 (Tabel 1)



Gambar 8. Penampang konstruksi

2. Di atas tanah timbunan diasumsikan terdapat perkerasan lentur dengan tebal 30 cm
3. Tanah timbunan diambil berdasarkan Tabel 8 dengan kelompok tanah I, standar proctor 95% dan elastic modulus 24 Mpa.
4. Nilai percepatan horizontal (A_h) gempa diambil nilai konstan 0,27, dan percepatan vertikal (A_v) sebesar $2/3 A_h$ didapat 0,18
5. Faktor beban untuk beban mati ditetapkan 1,25 sedangkan untuk faktor beban hidup ditetapkan 1,75
6. Dilakukan perhitungan trust (T_f) berdasarkan tipe baja gelombang pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5.
7. Dilakukan perhitungan *wall strength compression* berdasarkan tipe baja gelombang pada Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5.
8. Dilakukan cek kekuatan pada dinding truktur baja bergelombang terhadap tekuk (*buckling*) yang menghasilkan nilai *plastic hinge* saat struktur baja selesai terbangun

berdasarkan tipe baja gelombang pada Tabel 3, Tabel 4 dan Tabel 5.

9. Cek kekuatan pada sambungan/*check seam strength*
10. Melakukan perbandingan hasil perhitungan *buckling strength, seam strength* dan *plastic hinge* pada setiap tipe baja bergelombang

HASIL DAN ANALISIS

Perhitungan dilakukan pada struktur baja bergelombang pada tipe standar, deep dan juga *superdeep* dengan variasi ketebalan berdasarkan ASTM A796/A 796M-17. Tabel 12 memperlihatkan hasil perhitungan yang menghasilkan 3 kriteria yang di tinjau untuk menyimpulkan kehandalan dari struktur baja bergelombang.

Hasil perhitungan konstruksi struktur baja bergelombang setengah lingkaran dengan bentang 15 meter dengan 3 kriteria yaitu *wall strength compression* terhadap *compression stress*, kekuatan pada sambungan (*allowable seam strength*) dan *plastic hinge* menunjukkan pada tipe standar (korugasi 152 by 51) hanya pada ketebalan (t) 9,65 mm yang bisa memenuhi 3 kriteria, untuk *tipe deep* (korugasi 381 by 140) mulai dari ketebalan (t) 4,32 s/d 9 mm sedangkan tipe *superdeep* (korugasi 500 by 237) mulai ketebalan 4 s/d 9 mm.

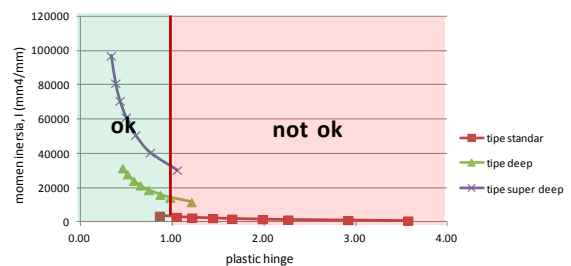
Untuk memudahkan pemahaman pemenuhan tiga kriteria kemudian di konversikan dalam bentuk presentase dengan melakukan perbandingan antara batasan nilai ijin dengan nilai yang terjadi berdasarkan hasil perhitungan sehingga apabila ketiga kriteria didapat nilai diatas 100% bisa disimpulkan struktur baja bergelombang aman secara perhitungan struktur (Tabel 13). Nilai presentase ini juga menggambarkan besaran faktor aman (*safety factor*) jadi semakin besar nilai presentase maka semakin besar faktor keamanan yang didapat.

Gambar 9 menunjukkan grafik perbandingan antara kriteria *plastic hinge* vs momen inersia, batasan nilai *plastic hinge* yang aman jika nilai yang dihasilkan dibawah 1, sedangkan semakin besar nilai momen inersia akan terkait dengan tipe dari struktur baja bergelombang.

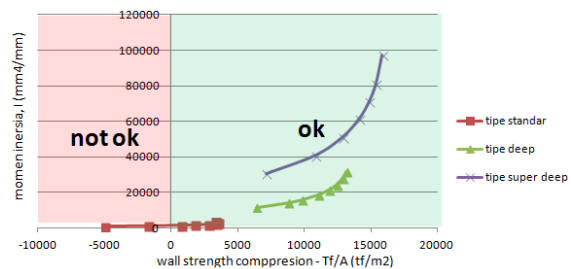
Gambar 10 menunjukkan grafik perbandingan kekuatan dinding (*wall strength compression*) dikurangi dengan *compression stress* vs momen inersia, jika nilai kekuatan

dinding (*wall strength compression*) dikurangi dengan *compression stress* dihasilkan lebih besar >0 (positif) menggambarkan kekuatan dinding bisa menahan tegangan yang terjadi akibat tekanan.

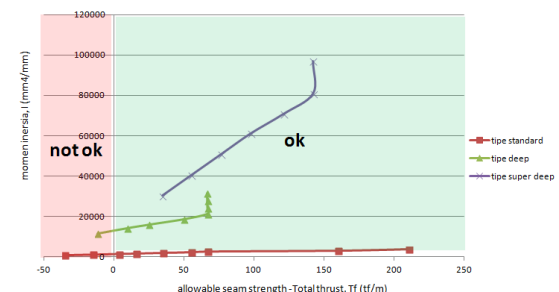
Gambar 11 menunjukkan grafik perbandingan kekuatan ijin sambungan di kurangi dengan total gaya yang bekerja (*total thrust*) vs momen inersia, jika nilai kekuatan ijin sambungan - total gaya (*total thrust*) dihasilkan nilai > 0 (positif) menggambarkan kekuatan sambungan bisa menahan gaya yang bekerja pada struktur baja bergelombang.



Gambar 9. Grafik perbandingan kriteria *plastic hinge* vs momen inersia untuk bentang 15 m bentuk konstruksi setengah lingkaran



Gambar 10. Grafik perbandingan kekuatan dinding (*wall strength compression*) - *compression stress* (Tf/A) vs momen inersia untuk bentang 15 m bentuk konstruksi setengah lingkaran



Gambar 11. Grafik perbandingan kekuatan ijin sambungan - total gaya (*Total Thrust*, Tf) vs momen inersia untuk bentang 15 m bentuk konstruksi setengah lingkaran

Tabel 12. Hasil perhitungan struktur baja bergelombang setengah lingkaran bentang 15 meter

<i>Thickness</i> t(mm)	<i>Area</i> A(mm ² /mm)	<i>Momen Inersia</i> I(mm ⁴ /mm)	<i>Tf (Total Thrust)</i> (tf/m)	<i>Compressive stress ,Tf/A</i> (tf/m ²)	<i>Wall strength compressio n</i> (tf/m ²)	<i>Allowable seam strength</i> (tf/m)	<i>Plastic hinge <1</i> (ok)	<i>Wall strength compressio n > Tf/A</i> (ok)	<i>Seam strength Allowable seam strength> Tf</i> (ok)
Tipe Standar (korugasi 152 by 51)									
2,82	3,294	990,06	77,85	23635,14	18615,37	42,91	3,57 (not ok)	not ok	not ok
3,56	3,97	1280	78,47	19764,88	17973,99	63,35	2,92 (not ok)	not ok	not ok
4,32	4,97	1575,89	79,07	15908,86	16661,10	82,74	2,26 (not ok)	ok	ok
4,79	5,59	1769,8	79,33	14191,66	15936,37	94,99	1,98 (not ok)	ok	ok
5,54	6,59	2079,8	79,65	12086,95	14827,92	114,38	1,65 (not ok)	ok	ok
6,32	7,46	2395,25	79,86	10705,45	14030,90	134,82	1,44 (not ok)	ok	ok
7,11	8,71	2717,53	80,09	9195,24	12644,22	147,07	1,22 (not ok)	ok	ok
8,08	9,89	3113,54	80,25	8116,97	11620,77	240,10	1,04 (not ok)	ok	ok
9,65	11,88	3801,8	80,45	6771,62	10018,44	291,13	0,86 (ok)	ok	ok
Tipe deep(korugasi 381 by 140)									
3,56	4,79	11710,70	78,98	16474,66	22872,85	67,41	1,21 (not ok)	ok	not ok
4,32	5,85	14332,50	79,42	13586,08	22340,03	88,90	0,98 (ok)	ok	ok
4,79	6,54	16037,00	79,64	12184,54	22007,70	104,23	0,87 (ok)	ok	ok
5,54	7,63	18740,10	79,90	10474,26	21507,66	129,71	0,74 (ok)	ok	ok
6,32	8,72	21441,20	80,09	9189,02	21035,72	147,07	0,65 (ok)	ok	ok
7,11	9,81	24124,50	80,24	8182,19	20580,65	147,07	0,58 (ok)	ok	ok
8,00	11,19	27930,60	80,39	7184,27	20070,13	147,07	0,51 (ok)	ok	ok
9,00	12,59	31497,40	80,51	6394,74	19545,93	147,07	0,46 (ok)	ok	ok
Tipe superdeep(korugasi 500 by 237)									
3,00	4,58	30363,23	78,86	17237,42	24378,61	113,47	1,05 (not ok)	ok	ok
4,00	6,10	40578,56	79,51	13025,86	23835,22	134,89	0,76 (ok)	ok	ok
5,00	7,64	50841,28	79,90	10464,86	23337,87	156,31	0,60 (ok)	ok	ok
6,00	9,17	61151,55	80,16	8742,36	22873,37	177,73	0,50 (ok)	ok	ok
7,11	10,63	70803,75	80,34	7559,61	22451,86	201,25	0,43 (ok)	ok	ok
8,10	12,14	81036,10	80,48	6626,75	22037,85	222,67	0,38 (ok)	ok	ok
9,55	14,53	97031,00	80,64	5550,71	21418,22	222,67	0,34 (ok)	ok	ok

Tabel 13. Nilai presentase antara nilai ijin dan nilai berdasrkan hasil perhitungan

Thickness t(mm)	Area A(mm ² / mm)	Momen Inersia I(mm ⁴ / mm)	Wall strength comppressio n > Tf/A	Seam strength	Plastic hinge <1	Kesimpulan dari 3 kriteria tinjauan
Tipe Standar (korugasi 152 by 51)						
2,82	3,294	990,06	79%	55%	28%	not ok
3,56	3,97	1280	91%	81%	34%	not ok
4,32	4,97	1575,89	105%	105%	44%	not ok
4,79	5,59	1769,8	112%	120%	50%	not ok
5,54	6,59	2079,8	123%	144%	60%	not ok
6,32	7,46	2395,25	131%	169%	69%	not ok
7,11	8,71	2717,53	138%	184%	82%	not ok
8,08	9,89	3113,54	143%	299%	96%	not ok
9,65	11,88	3801,8	148%	362%	116%	ok
Tipe deep(korugasi 381 by 140)						
3,56	4,79	11710,70	139%	85%	83%	not ok
4,32	5,85	14332,50	164%	112%	102%	ok
4,79	6,54	16037,00	181%	131%	115%	ok
5,54	7,63	18740,10	205%	162%	134%	ok
6,32	8,72	21441,20	229%	184%	153%	ok
7,11	9,81	24124,50	252%	183%	172%	ok
8,00	11,19	27930,60	279%	183%	195%	ok
9,00	12,59	31497,40	306%	183%	218%	ok
Tipe superdeep(korugasi 500 by 237)						
3,00	4,58	30363,23	141%	144%	95%	not ok
4,00	6,10	40578,56	183%	170%	132%	ok
5,00	7,64	50841,28	223%	196%	167%	ok
6,00	9,17	61151,55	262%	222%	201%	ok
7,11	10,63	70803,75	297%	251%	233%	ok
8,10	12,14	81036,10	333%	277%	262%	ok
9,55	14,53	97031,00	386%	276%	298%	ok

Keterangan : nilai diatas 100% menunjukkan struktur aman atau nilai ijin lebih besar dari nilai yang terjadi berdasarkan perhitungan

PEMBAHASAN

Dari Tabel 13 memperlihatkan masing-masing presentase dari kriteria yang harus dipenuhi pada perhitungan struktur baja bergelombang. Semakin besar momen inersia maka tingkat kekuatannya akan semakin besar dalam menahan beban yang bekerja dan berdasarkan perhitungan untuk bentang 15 meter yang memenuhi 3 kriteria pada tipe standar (korugasi 152 by 51) pada ketebalan (t) 9.65 mm, untuk *tipe deep* (korugasi 381 by 140) mulai dari ketebalan (t) 4.32 s/d 9 mm sedangkan tipe *superdeep* (korugasi 500 by 237) mulai ketebalan 4 s/d 9 mm.

Tabel 13 juga menunjukkan kriteria yang paling kritis dari 3 kriteria yang di tinjau adalah nilai *plastic hinge* dimana berdasarkan hasil perhitungan secara presentase nilai *plastic hinge* umumnya lebih kecil dibandingkan ini menandakan kriteria *plastic hinge* merupakan nilai yang paling kritis jika dibandingkan dengan 2 kriteria yang lain.

Kekuatan dari struktur baja bergelombang akan naik seiring dengan penambahan ketebalan dari baja yang di gunakan ini terkait dengan penambahan nilai momen inersia, penambahan presentase pada masing-masing tipe apabila dilakukan penambahan ketebalan sesuai ASTM A796/A 796M-17 ditunjukkan pada Tabel 14. Sebagai contoh pada tipe *superdeep* (korugasi 500 by 237) apabila melakukan penambahan ketebalan dari 6 mm ke 7.11 mm maka akan terjadi penambahan kekuatan *wall strength compression* sebesar 41%, *seam strength* 27% dan *plastic hinge* 34%. Khusus untuk *seam strength* pada tipe *deep* (korugasi 381 by 140) dari ketebalan 6,32 mm s/d 9 mm dan tipe *superdeep* (korugasi 500 by 237) dari ketebalan 8.11 mm s/d 9 mm dari pada Tabel 13 dan Gambar 11 didapat kenaikan nilai presentase nya hampir tidak ada hal ini dikarenakan tegangan ultimit baut pada sambungan tidak mengalami peningkatan atau tidak ada mengenai data ini dapat dilihat pada Tabel 4, dan Tabel 5.

Tabel 14. Kenaikan presentase kekuatan 3 kriteria setiap penambahan ketebalan struktur baja bergelombang

Tipe Korugasi	Kenaikan rata-rata nilai Wall strength compression > Tf/A	Kenaikan rata-rata nilai Seam strength	Kenaikan rata-rata nilai Plastic hinge <1
Standar	9%	3 %	11%
Deep	24%	25%	19%
Superdeep	41%	27%	34%

Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11 menunjukkan semakin besar momen inersia akan meningkatkan kekuatan nilai *plastic hinge*, kekuatan dinding (*wall strength compression*) dan kekuatan sambungan (*seam strength*) pada struktur baja bergelombang untuk menahan beban struktur diatasnya. Ketiga Gambar grafik juga menggambarkan penambahan kekuatan pada masing-masing kriteria berdasarkan tipe dan ketebalan baja yang digunakan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Hasil analisis menunjukkan struktur baja bergelombang bentang 15 meter dengan bentuk setengah lingkaran bisa menahan beban yang bekerja jika menggunakan tipe standar (korugasi 152 by 51) dengan ketebalan 9 mm, pada tipe *deep* (korugasi 381 by 140) dari ketebalan 4 s/d 9 mm sedangkan untuk tipe *superdeep* (korugasi 500 by 237) dari ketebalan 4 s/d 9,55 mm.

Hasil perhitungan pada masing-masing tipe dan ketebalan struktur baja bergelombang dapat di perkirakan penambahan rata-rata nilai kekuatan dinding (*wall strength compression*), kekuatan sambungan (*seam strength*) dan *plastic hinge* (Tabel 14). Dimana hasil evaluasi menunjukkan rata-rata penambahan kekuatan 3 parameter tinjauan pada masing-masing tipe dan ketebalan baja adalah untuk tipe standar kenaikan rata-rata nilai *wall strength compression* sebesar 9%, kenaikan rata-rata *seam strength* 3% dan kenaikan rata-rata *plastic hinge* 11%. Untuk tipe *deep* kenaikan rata-rata nilai *wall strength compression* sebesar 24%, kenaikan rata-rata *seam strength* 25% dan kenaikan rata-rata *plastic hinge* 19%. Untuk Tipe *Superdeep* kenaikan rata-rata nilai *wall*

strength compression sebesar 41%, kenaikan rata-rata *seam strength* 27% dan kenaikan rata-rata *plastic hinge* 34%. maka nilai rata-rata penambahan ini dapat menjadi dasar bagi desainer dalam memperkirakan kebutuhan tipe dan ketebalan yang dibutuhkan jika hasil hitungan awal tidak memenuhi tiga kriteria yang dibutuhkan agar mendapatkan konstruksi yang optimum. Hasil perhitungan menunjukkan peningkatan rata-rata kekuatan terjadi pada struktur baja bergelombang tipe *superdeep*.

Saran

Hasil analisa berdasarkan struktur baja bergelombang bentang 15 meter dengan bentuk setengah lingkaran, untuk mengkonfirmasi perilaku yang sama, maka diperlukan bentang dan bentuk yang berbeda.

Tata cara perhitungan yang dilakukan secara manual mengacu pada *Canadian Highway Bridge Design Code* 2006, tetapi bisa juga dilakukan menggunakan alat bantu *software* finit elemen untuk mengetahui apakah hasil perhitungannya sama atau tidak.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menghaturkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu mewujudkan kegiatan ini sehingga bisa terwujudnya karya tulis ini, khususnya kepada Puslitbang Jalan dan Jembatan yang telah memfasilitasi kegiatan ini dan DR. Ir. Eddie Sunaryo, M.Sc yang telah memberikan masukan yang berharga.

DAFTAR PUSTAKA

Aldiamar, F., Susy K. Ariestianty, Hardiansyah Putra, Ahmad Numan, Widi Nugraha, Disi N. Hanafiah, Natalia Tanan, Achmad Sidhi Purnama, dan Taufik S. Sumardi. 2015 *Kajian Perencanaan Struktur Baja Bergelombang untuk Lintas Atas & Penanganan Longsoran Lereng Jalan*. Naskah Ilmiah. Puslitbang Jalan dan Jembatan.

Aldiamar, F., Hardiansyah Putra, Susy K. Ariestianty, Ahmad Numan, Maulana Iqbal, Vederieq Y. Enderzon. 2016 *Penerapan Teknologi Struktur Baja Bergelombang untuk Lintas Atas Jalan Perkotaan*. Naskah Ilmiah. Puslitbang Jalan dan Jembatan.

ASTM D698-12e2. 2012, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*, ASTM International.

ASTM A796/A796M-15A. 2015, *Standard Practice for Structural Design of Corrugated Steel Pipe, Pipe-Arches, and Arches for Storm and Sanitary Sewer and Other Buried Application*, ASTM International.

CSA.2006. *Canadian Highway Bridge Design Code*. Canadian Standar Association Ontario, Canada.

KS D 3503.2007 *Rolled Steels for General Structure*, Korean Satandard

KS D 3506. 2007 *Hot-Dip Zinc-Coated Steel Sheets and Coils*, Korean Standard

NCSPA,2008. *Corrugated Steel Pipe Design Manual*. National Corrugated Steel Pipe Assocation, Dallas.

Pyungsan SI, LTD.2014. *Corrugated Steel Plate Structure Catalogue*.

Rhee, Jong Wha. 2014. *Variouus Structural Applicatons of Corrugated Steel Struucture*. International Joint Seminar (HAKI-KSSC-KIABSE).