

Analisis *Sequence* Fabrikasi terhadap *Constructability* Pengelasan *Beam* pada Struktur *Clump Weight* Proyek *Subsea*

Muhammad Iqbal¹, Meilani Mandhalena Manurung² and Kms M Avrieldi³

*** Politeknik Negeri Batam**

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: Muhammadiqbal7132@email.com

Abstrak

Proses fabrikasi struktur *clump weight* pada proyek *subsea* melibatkan tahapan pengelasan beam yang memerlukan urutan pengerjaan (*sequence* fabrikasi) yang tepat agar proses fabrikasi berjalan efektif dan mudah dilaksanakan di lapangan. Penelitian ini bertujuan untuk mendeskripsikan *sequence* fabrikasi pengelasan *beam* pada struktur *clump weight* berdasarkan *shop drawing* dan *Welding Procedure Specification (WPS)* proyek *subsea*. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan kualitatif dengan desain studi kasus melalui observasi lapangan, wawancara, dan analisis dokumen teknis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *sequence* fabrikasi yang diterapkan masih memiliki beberapa kendala, seperti keterbatasan akses pengelasan, dominasi posisi *overhead welding*, dan potensi distorsi akibat urutan pengelasan yang tidak simetris. Oleh karena itu, diperlukan perbaikan urutan fabrikasi dengan mendahulukan sambungan kritis, menerapkan metode pengelasan simetris, menggunakan *positioner*, serta melakukan inspeksi pada setiap tahapan fabrikasi untuk meningkatkan kemudahan pelaksanaan pengelasan dan kualitas hasil fabrikasi struktur *clump weight*.

Kata kunci: *Fabrication sequence, beam welding, constructability, clump weight, subsea project*

Abstract

The fabrication process of clump weight structures in subsea projects involves beam welding activities that require an appropriate fabrication sequence to ensure an effective and efficient fabrication process in the field. This study aims to describe the beam welding fabrication sequence in clump weight structures based on the shop drawing and Welding Procedure Specification (WPS) of a subsea project. The research method used was a qualitative approach with a case study design through field observations, interviews, and analysis of technical documents. The results showed that the implemented fabrication sequence still had several constraints, including limited welding accessibility, the dominance of overhead welding positions, and distortion potential caused by asymmetric welding sequences. Therefore, improvements in the fabrication sequence are required by prioritizing critical joints, applying symmetric welding methods, utilizing positioners, and conducting inspections at each fabrication stage to improve the ease of welding execution and the quality of clump weight structure fabrication.

Keywords : *Fabrication sequence, beam welding, constructability, clump weight, subsea project*

1 Pendahuluan

Industri *offshore* dan *subsea* membutuhkan proses fabrikasi struktur baja dengan tingkat presisi dan kualitas pengelasan yang tinggi [1]. Salah satu komponen penting dalam sistem *subsea* adalah struktur *clump weight* yang berfungsi sebagai pemberat dan penstabil instalasi bawah laut. Batam sebagai salah satu pusat industri fabrikasi *offshore* di Asia Tenggara memiliki berbagai perusahaan fabrikasi yang memproduksi komponen *subsea*, salah satunya PT. VME. Salah satu struktur *clump weight* yang difabrikasi pada proyek *subsea* di PT. VME dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 1. Struktur *clump weight* pada proyek *subsea*

Dalam proses fabrikasi, *sequence* pengelasan beam menjadi faktor penting yang berpengaruh terhadap tingkat *constructability* suatu struktur. *Sequence* fabrikasi yang kurang tepat dapat menimbulkan berbagai permasalahan, seperti terbatasnya akses *pengelasan*, kesulitan saat proses *fit-up*, terjadinya distorsi geometri, hingga bertambahnya waktu dan biaya produksi [2], [3]. Selain itu, urutan fabrikasi yang tidak sesuai juga dapat mengurangi efisiensi pekerjaan di lapangan serta memengaruhi kualitas hasil pengelasan.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas aspek *constructability* pada struktur *offshore* [1, 4, 5]. Namun, penelitian yang secara khusus mengkaji pengaruh *sequence* fabrikasi pengelasan *beam* terhadap *constructability* pada struktur *clump weight subsea* masih relatif sedikit. Hal tersebut menunjukkan adanya research gap yang perlu diteliti lebih lanjut. 145

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mendeskripsikan *sequence* fabrikasi pengelasan beam pada struktur *clump weight* proyek *subsea*.

Penelitian ini difokuskan pada struktur Clump Weight-1 (CW-1) *clump weight* yang dianalisis berdasarkan shop drawing No. 250042-VME-ST-DW-WM-00001-001 dan WPS No. VME-STR-WPS-03 Rev. 1 (PT. VME Process, Batam). Metode yang digunakan adalah penelitian kualitatif-deskriptif dengan pendekatan studi kasus serta analisis data menggunakan model interaktif Miles dan Huberman .

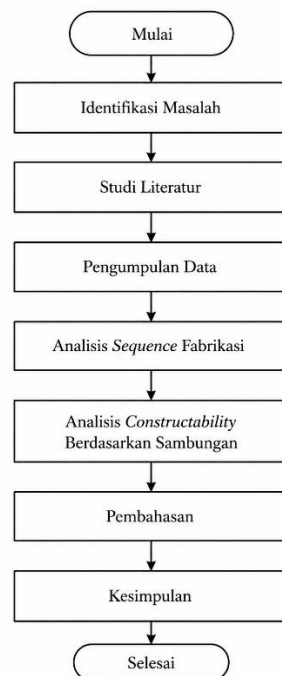
2 Metodologi Penelitian

Pendekatan kualitatif berbasis metode *case study* diterapkan dalam penelitian ini. Objek kajian difokuskan pada proses fabrikasi struktur *Clump Weight* (CW-1) dalam proyek *subsea* yang berlangsung di area fabrikasi. Penelitian ini berfokus menganalisis pengaruh *fabrication sequence* terhadap *constructability* pada pengelasan *beam*, dengan memperhatikan faktor kondisi riil di lapangan, *welding accessibility*, *welding position*, tingkat *joint complexity*, hingga potensi terjadinya *distortion* [3, 4, 6].

Alur pelaksanaan riset diawali melalui inventarisasi dokumen teknis fabrikasi, seperti *shop drawing*, *Weld Map*, *Welding Procedure Specification* (WPS), catatan inspeksi/*Non-Destructive Testing* (NDT), serta dokumentasi fabrikasi pendukung. Dokumen *Weld Map* dimanfaatkan untuk memetakan sebaran lokasi *joint*, jumlah sambungan, metode inspeksi, dan detail konstruksi struktur CW-1. Setelah itu, pengamatan lapangan (*direct observation*) dilakukan untuk memantau penerapan *welding sequence*, ketersediaan akses kerja, posisi pengelasan, alat bantu yang digunakan, serta situasi riil selama pengerjaan.

Informasi dari hasil pengamatan diperkuat melalui wawancara semi-terstruktur bersama para pelaksana teknis di lapangan, meliputi *welder*, *foreman*, serta *QC inspector*. Wawancara tersebut bertujuan untuk menggali berbagai hambatan pengelasan, khususnya terkait keterbatasan ruang gerak, posisi las, urutan pengerjaan, potensi *distortion*, hingga proses evaluasi hasil las. Seluruh data observasi dan wawancara kemudian dicocokkan dengan dokumen *shop drawing*, *Weld Map*, dan WPS guna menilai sejauh mana kesesuaian antara *sequence* rencana dan praktik pelaksanaannya di lapangan.

Pada proses penelitian melewati beberapa tahapan yang dapat dilihat melalui diagram alir pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.1 Identifikasi Masalah

Berdasarkan pengamatan awal pada proses fabrikasi struktur *Clump Weight* CW-1, teridentifikasi sejumlah kendala yang berkaitan dengan *welding sequence* dan *constructability*. Masalah tersebut mencakup keterbatasan *welding accessibility* pada area sambungan tertentu, dominasi *welding position* vertikal serta *overhead*, kompleksitas *joint* yang tinggi, hingga potensi terjadinya *distortion* akibat *sequence* pengelasan yang kurang optimal. Kondisi ini berpotensi memengaruhi tingkat kemudahan pengerjaan, efisiensi fabrikasi, dan pengontrolan kualitas hasil las.

Merujuk pada masalah di atas, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis pengaruh *fabrication sequence* terhadap *constructability* pada pengelasan *beam* struktur *Clump Weight* CW-1, memetakan area dengan tingkat *constructability* yang rendah, serta merumuskan rekomendasi perbaikan *sequence* berdasarkan kondisi riil di lapangan.

2.2 Studi Literatur

Kajian pustaka dilakukan untuk membangun landasan teori yang kuat bagi penelitian ini. Sumber yang digunakan mencakup buku teks, artikel jurnal ilmiah terindeks, dan standar teknis internasional yang berkaitan dengan *constructability* [4, 5], *sequence* fabrikasi dan pengendalian *distorsi* las [2, 3], serta metodologi analisis data kualitatif. Standar teknis yang menjadi acuan utama adalah AWS D1.1/D1.1M:2020 [6], DNV-OS-C401:2021 *Edition* [7], dan NORSOK M-101 [8] yang digunakan sebagai basis penilaian *constructability* dan inspeksi pengelasan.

2.3 Pengumpulan Data

Proses pengumpulan data dalam riset ini bertujuan untuk memperoleh seluruh informasi yang dibutuhkan guna mengkaji *fabrication sequence* serta *constructability* pada pengelasan *beam* struktur *Clump Weight* CW-1. Data yang digunakan mencakup sumber data primer dan data sekunder.

Data primer dihimpun melalui pengamatan langsung (*direct observation*) terhadap aktivitas fabrikasi dan pengelasan di area kerja, serta wawancara bersama para pelaksana teknis, seperti *welder*, *foreman*, dan *QC inspector*. Pengamatan lapangan berfokus pada pengumpulan data terkait *welding sequence*, *welding accessibility*, posisi pengelasan, pemanfaatan *jig/fixture*, hingga kondisi riil saat fabrikasi berlangsung. Sementara itu, wawancara ditujukan untuk menggali berbagai hambatan serta pertimbangan teknis selama pelaksanaan pengelasan [9].

Data sekunder didapatkan dari penelusuran dokumen teknis proyek, antara lain *shop drawing*, *Weld Map*, *Welding Procedure Specification* (WPS), catatan *Non-Destructive Testing* (NDT), dan arsip dokumentasi fabrikasi. Dokumen *Weld Map* dipakai untuk mengetahui sebaran lokasi dan jumlah *joint*, tipe sambungan, serta skema pemeriksaan. Dokumen WPS digunakan sebagai acuan baku parameter maupun prosedur pengelasan, sedangkan data NDT berfungsi sebagai pendukung dalam mengevaluasi mutu hasil las [6, 8, 9].

2.3.1 Data Shop Drawing

Tahap awal pengumpulan data dilakukan dengan menelaah *shop drawing* struktur *Clump Weight* CW-1 untuk memahami konfigurasi dan detail konstruksinya. Informasi yang diekstrak dari *shop drawing* mencakup nomor serta revisi gambar, tata letak struktur, dimensi dan spesifikasi material *beam*, *piece mark*, sebaran lokasi sambungan, hingga jenis pengelasan yang diterapkan.

Merujuk pada *shop drawing* acuan, struktur ini memanfaatkan profil HEB 200 ber bahan S355J2. Informasi mengenai variasi tipe sambungan dimanfaatkan untuk mengidentifikasi karakteristik pengerjaan las pada tiap bagian. Data ini

Material No : 1 To 12
Req'd Mtl : 12x
Material size: HEB 200, LENGTH :1190mm (61.3 Kg/Mtr).
Grade : S355J2.
Category : For Subsea Design Drawing SD274-NXF-0251 & 0257

Approved For Construction
Date: 2026.01.02 17:51:52 +0700

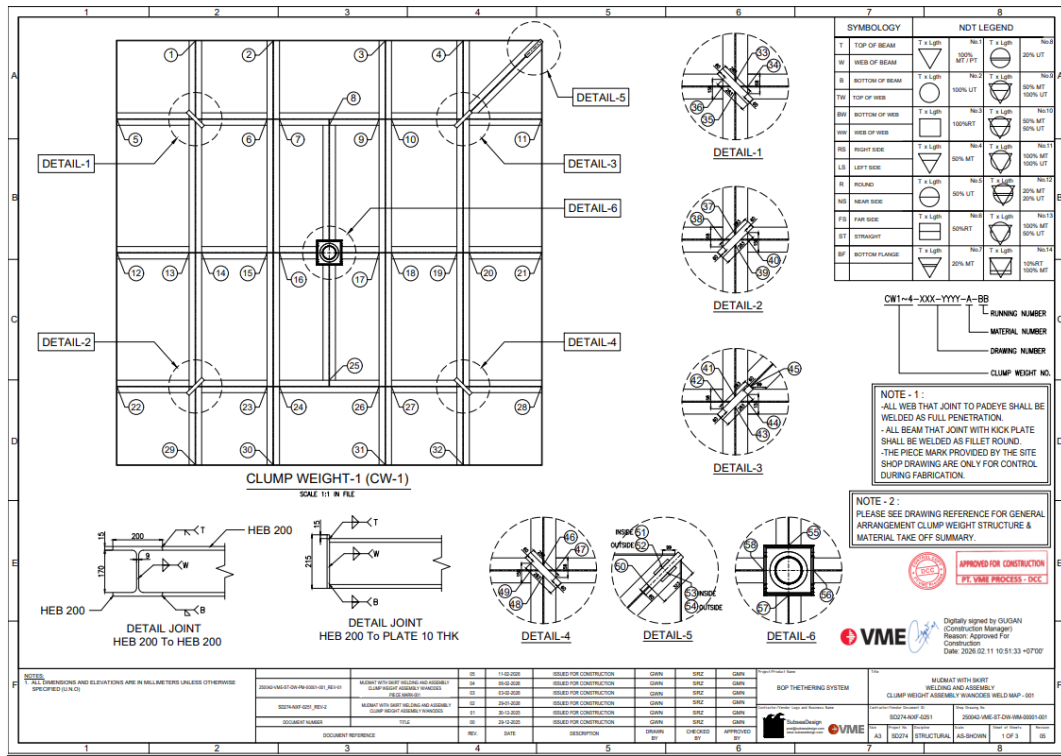
NESTING PLAN CUT-1 - 1300mm									
RAW MAT. NO.	LENGTH (mm)	CUT No.	PIECE NAME	DESCRIPTION MATERIAL	LENGTH (mm)	MTL	UNIT WEIGHT (kg/m)	QTY/MTL	REV DWG
1	1300	CUT-1	CW1-NXF-0251-01	HEB 200	1318	13552	61.3	76.20	NXP-0251
		CUT-2	CW1-NXF-0251-02	HEB 200	1318	13552	61.3	76.20	NXP-0251
		CUT-3	CW1-NXF-0251-03	HEB 200	1318	13552	61.3	76.20	NXP-0251
		CUT-4	CW1-NXF-0251-04	HEB 200	1318	13552	61.3	76.20	NXP-0251
		CUT-5	CW1-NXF-0251-05	HEB 200	1318	13552	61.3	76.20	NXP-0251
		CUT-6	CW1-NXF-0251-11	HEB 200	1366	13552	61.3	114.00	NXP-0251
		CUT-7	CUT-EX-5	HEB 200	267	13552	61.3	16.37	NXP-0251
2	1300	CUT-1	CW2-NXF-0251-01	HEB 200	1318	13552	61.3	76.20	NXP-0251
		CUT-2	CW2-NXF-0251-02	HEB 200	1318	13552	61.3	76.20	NXP-0251
		CUT-3	CW2-NXF-0251-03	HEB 200	1318	13552	61.3	76.20	NXP-0251
		CUT-4	C						

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Komponen Beam pada Struktur Clump Weight

Spesifikasi	Keterangan
Jenis profil beam	<i>Wide Flange (WF) / H-Beam</i>
Dimensi (mm)	$300 \times 150 \times 12 \times 20$
Material / Grade	<i>ASTM A36 / S355J2</i>
Tebal flange (mm)	20 mm
Tebal web (mm)	12 mm
Jenis sambungan las	<i>Fillet Weld dan Groove Weld</i>
Standar pengelasan	<i>AWS D1.1 / DNV-OS-C401</i>
No. Drawing	CW-BM-001
Jumlah beam per unit	$\pm 8 - 12$ pcs

Pengumpulan data *Weld Map* bertujuan untuk memperoleh rincian mengenai jumlah, sebaran lokasi, dan karakteristik sambungan las pada struktur CW-1. Informasi yang dihimpun meliputi *weld point*, *joint*, simbol atau tipe sambungan, panjang pengelasan, serta skema pemeriksaan NDT.

Data tersebut kemudian direkapitulasi berdasarkan detail struktur guna memetakan distribusi titik pengelasan. Rekapitulasi ini berfungsi sebagai acuan dalam menghitung volume serta persentase *joint*, sekaligus menjadi data pendukung dalam menilai tingkat *joint complexity*. Data *Weld Map* struktur CW-1 dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. *Weld Map* Struktur *Clump Weight* CW-1

2.3.3 Data *Welding Procedure Specification* (WPS)

Dokumen *Welding Procedure Specification* (WPS) digunakan untuk menyarikan informasi terkait prosedur baku dan parameter pengelasan selama proses fabrikasi. Data yang dicatat meliputi metode pengelasan, spesifikasi material, jenis serta diameter elektroda, besaran arus, tegangan, *travel speed*, *welding position*, *preheat*, *interpass temperature*, dan parameter teknis relevan lainnya.

Data WPS ini menjadi acuan dalam mengevaluasi kesesuaian parameter pengelasan serta menghitung besaran *heat input* selama proses penyambungan [6, 9]. WPS yang digunakan dalam proses fabrikasi struktur CW-1 dapat dilihat pada gambar berikut.

VME
 Jl. Tamalatea RT 004 RW 003,
 Kelurahan Tanjung Senghuang
 Batu Ampar, Batam 29452, Indonesia

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)

In accordance with : DNV-OS- C401; 2021 Edition

WPS No. : VME-STR-WPS-03 Rev. 1	Date : 11-Mar-23	Authorized By: QA/QC Manager
Supporting PQR No. : VME-AWS-PQR- 42 & 43	Date : 27-Nov-15	
Welding Process : FCAW-GS	Type : Semi-Automatic	

JOINT DETAILS

T-joint type: : Single "V" or Single "Bevel" or Double: V" or Double "Bevel"	Weld Types: : Complete Joint Penetration (CJP), Partial Joint Penetration (PJP), Fillet Weld (FW)
: Single [√] Double Weld [√]	
Backing: : With / Without	Backing Material: : Weld Metal / Base Material
Root Opening : : 2.0 - 4.0 mm	Root Face Dimension(f): : 1.0 - 2.0 mm
Groove Angle: : 60° - 70°	Bevel Angle : : 40° - 50°
Back Gouging: : Yes [√] No []	Method: : (Where accessible) Arc Air Gouging or Grinding

Refer to Engineering shop drawing standard joint details

BASE METALS:

Material Grade Specification Type and Grade (Actual):	: DNV Grade E36
Base Material Qualified	: DNV A, D, E32, E36 Grades, S275J2+N, S275N, S275M, S355J2+N, S355J2+M, S355N, S355J2+M, S355M, API 5L Grade B/X42, API 5L Gr. X52
Thickness Qualified (T):	: 6.0 mm To 24.0 mm
Diameter Qualified - CJP / PJP (Pipe):	: > 500 mm OD & Over
Fillet Size:	: 25 mm Max.
Chemical Composition:	: C = 0.21 max.; Ceq. = 0.44 max.

POSITION

Position Qualified (Groove & Fillet):	: 1G (F), 2G (HOR), 3G (VERT), 4G (OH)
Vertical Progression:	: UP [√] DOWN []

FILLER METAL

Filler Wire (Electrode) Trade Name:	: Refer to Below Note
AWS Specification:	: A5.29
AWS Classification:	: E 71T-FC
Note: Electrode Brand Name: Kobelco or Oerlikon or Hobart or ESAB or Lincoln or Avasta or Bohler, Atlantic	

PREHEAT

Preheat Temp. Min.:	: 33°C
Preheating Method:	: Flame Heating by Torch
Interpass Temp. :	: Max.: 110°C

POST WELD HEAT TREATMENT

Temperature:	: N/A
Holding Time:	: N/A
Note: WT - Material Wall Thickness	

SHIELDING

Flux:	: N/A
Gas:	: CO2 (Carbon Dioxide)
Flow Rate:	: 15 Lpm to 20 Lpm

ELECTRO-FLUX (CLASS):

Composition:	: N/A
Gas Cup Size:	: 100.00 %
	: 12mm to 15mm

DNV

Page 1 of 2

Gambar 5. Welding Procedure Specification (WPS)

2.3.4 Data Non-Destructive Testing (NDT)

Data *Non-Destructive Testing* (NDT) dihimpun dari laporan resmi hasil inspeksi pengelasan. Informasi yang dicakup meliputi metode uji yang digunakan, jumlah serta lokasi titik inspeksi, hingga status/hasil pengujian.

Catatan NDT ini dimanfaatkan sebagai data pendukung untuk memetakan distribusi inspeksi pada *weld point* dan membantu mengevaluasi mutu akhir pengelasan pada struktur CW-1 [10]. Berikut gambar proses *magnetic particle testing* (MT).



Gambar 6. Proses *Magnetic particle testing* (MT)

2.3.5 Data observasi

Data observasi diperoleh melalui pengamatan langsung (*direct observation*) terhadap tahapan fabrikasi dan pengelasan struktur CW-1 di area kerja. Pengamatan berfokus pada *fabrication sequence*, *welding accessibility*, *welding position*, situasi lingkungan kerja, pemanfaatan *jig/fixture* maupun alat bantu, urutan pengerjaan antar-sambungan, serta potensi munculnya *distortion*.

Temuan dari observasi ini digunakan untuk membandingkan antara *sequence* yang direncanakan dalam dokumen teknis dengan fakta pelaksanaan di lapangan. Dokumentasi hasil observasi proses fabrikasi dan pengelasan struktur CW-1 dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 7. Dokumentasi hasil observasi proses fabrikasi

2.3.6 Data wawancara

Informasi tambahan digali melalui wawancara semi-terstruktur bersama personel teknis yang terlibat langsung, yaitu

welder, foreman, dan QC inspector. Wawancara ini bertujuan untuk mengidentifikasi berbagai hambatan teknis saat pengelasan, seperti keterbatasan ruang gerak, kesulitan posisi las, urutan pengerjaan, penggunaan alat bantu, ancaman *distortion*, hingga proses evaluasi hasil las [9].

2.3.7 Data Evaluasi *Constructability*

Seluruh data yang telah terhimpun selanjutnya diolah untuk melakukan evaluasi *constructability*. Informasi tersebut diklasifikasikan ke dalam empat parameter penilaian, yaitu *welding accessibility*, *welding position*, *joint complexity*, dan potensi *distortion*. Masing-masing parameter diberi bobot nilai berdasarkan kondisi riil yang dijumpai pada tiap detail sambungan.

Hasil pembobotan tersebut digunakan untuk mengkalkulasi *Constructability Score* (CS) aktual. Selanjutnya, temuan kendala di lapangan dijadikan dasar dalam merancang usulan *fabrication sequence* baru serta menghitung nilai CS usulan dengan menggunakan kriteria dan bobot penilaian yang sama.

2.4 Metode Perhitungan dan Evaluasi

Persentase jumlah *joint* digunakan untuk mengetahui seberapa besar proporsi sambungan pada masing-masing detail terhadap total keseluruhan sambungan pada struktur CW-1. Perhitungan ini dilakukan dengan membandingkan jumlah *joint* pada setiap detail dengan jumlah seluruh *joint* yang terdapat pada struktur. Hasil persentase tersebut dapat digunakan untuk melihat distribusi pekerjaan pengelasan pada masing-masing detail dan menjadi data pendukung dalam mengidentifikasi bagian struktur yang memiliki jumlah sambungan lebih banyak.

Perhitungan persentase jumlah *joint* dilakukan menggunakan persamaan:

$$\text{Joint}(\%) = \frac{n_i}{N} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

- n_i = jumlah *joint* pada detail ke- i
- N = total keseluruhan jumlah *joint*

2.5 Persentase panjang las

Persentase panjang las dihitung untuk mengetahui proporsi kontribusi panjang pengelasan pada tiap detail terhadap total panjang pengelasan secara keseluruhan.

$$Li(\%) = \frac{Li}{L_{total}} 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

- L_i = panjang las pada detail ke- i
- L_{total} = total keseluruhan panjang las

2.6 Perhitungan *Heat Input*

Perhitungan ini diterapkan untuk menentukan besaran masukan energi panas (*heat input*) yang tersalurkan selama proses pengelasan berlangsung.

$$HI = \frac{V \times I \times 60}{1000 \times S} \quad (3)$$

Keterangan:

- HI = *heat input* (kJ/mm)
- V = tegangan listrik (Volt)
- I = kuat arus listrik (Ampere)
- S = *travel speed* atau kecepatan pengelasan (mm/menit)

2.7 *Constructability Score* (CS)

Constructability Score (CS) merupakan indikator kuantitatif untuk mengevaluasi tingkat *constructability* berdasarkan empat parameter utama, yaitu *welding accessibility*, *welding position*, *joint complexity*, dan potensi *distortion*.

$$CS = \sum_{i=1}^n (w_i \times s_i) \quad (4)$$

Keterangan:

- CS = *Constructability Score*
- w_i = bobot untuk parameter ke- i
- s_i = skor penilaian parameter ke- i

Rincian pembobotan parameter yang digunakan disajikan pada Tabel berikut:

Tabel 2. Rincian pembobotan parameter

Parameter	Bobot
Welding accessibility	30%
Welding position	30%

Joint complexity	20%
Potensi distortion	20%
Total	100%

2.8 Persentase Perubahan CS

Persentase perubahan CS digunakan untuk mengukur tingkat efektivitas dan perbandingan antara nilai *constructability* kondisi aktual dengan *sequence* rekomendasi/usulan.

$$\text{Perubahan} = \frac{CS \text{ aktual} - CS \text{ usulan}}{CS \text{ aktual}} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan:

- CS aktual = nilai *Constructability Score* pada kondisi riil/aktual
- CS usulan = nilai *Constructability Score* setelah perbaikan *sequence*

2.9 Keabsahan data

Keabsahan data dijamin melalui teknik triangulasi sumber - membandingkan dan mengonfirmasi data dari tiga sumber independen [9]:

1. Observasi lapangan di workshop Departemen Construction PT. VME Process, Batu Ampar, Batam.
2. Wawancara mendalam dengan tiga informan kunci (welder, foreman, QC Inspector).
3. Dokumen teknis berupa shop drawing Weld Map No. 250042-VME-ST-DW-WM-00001-001 dan WPS No. VME-STR-WPS-03 Rev. 1.

Setiap ketidaksesuaian antar sumber ditindaklanjuti melalui *member check*, di mana informan diminta mengonfirmasi dan mengklarifikasi kembali pernyataan mereka. Pendekatan ini memastikan setiap temuan penelitian didukung oleh lebih dari satu sumber data yang independen, serta selaras dengan prinsip *credibility* dan *confirmability* dalam penelitian kualitatif [9].

3 Analisa Data dan Pembahasan

3.1 Gambaran Umum Objek Penelitian

Objek kajian dalam penelitian ini adalah unit pertama struktur *Clump Weight* (*Clump Weight*-1/CW-1) pada proyek *BOP Tethering System* yang difabrikasi oleh PT. VME Process, Batam. Riset ini berpatokan pada dokumen *shop drawing Weld Map* No. 250042-VME-ST-DW-WM-00001-001 serta *cutting plan* No. 250042-VME-ST-DW-CP-00001-001. CW-1 merupakan bagian dari rangkaian struktur *Clump Weight* (CW-1 hingga CW-4) yang berfungsi sebagai pemberat dan

penstabil sistem *tethering* pada instalasi *subsea*. Penelitian difokuskan pada CW-1 sebagai sampel representatif untuk mengkaji pengaruh *fabrication sequence* terhadap *constructability* pengelasan *beam*.

Rangka utama struktur CW-1 dibangun menggunakan profil baja HEB 200 ber-spesifikasi material S355J2 yang dihubungkan dengan *base plate* setebal 10 mm ber-material AH36. Berdasarkan dokumen *cutting plan*, terdapat beberapa tipe potongan utama profil HEB 200 yang digunakan dalam pembentukan kerangka, dengan dimensi panjang dan konfigurasi yang disesuaikan pada kebutuhan konstruksi. Pada bagian ujung *beam*, dilakukan persiapan pemotongan berupa *bevel* dan *chamfer* untuk menyesuaikan geometri sambungan dengan kebutuhan proses pengelasan.

Merujuk pada *shop drawing*, teridentifikasi 32 titik sambungan *beam to beam* (*point location*) yang terdistribusi pada *point location* No. 1 hingga 32. Ke-32 titik sambungan *beam to beam* tersebut dijadikan objek utama dalam analisis *constructability* riset ini. Di luar sambungan *beam to beam*, struktur CW-1 juga dilengkapi beberapa sambungan detail lain yang mencakup komponen pendukung seperti batang diagonal, *padeye*, serta anoda proteksi katodik.

Berdasarkan *database* pengelasan, total keseluruhan struktur CW-1 mencakup 192 titik las (*weld point*). Angka tersebut mencerminkan keseluruhan aktivitas pengelasan CW-1, sedangkan penelitian ini membatasi fokus analisis pada 32 sambungan *beam to beam*. Dengan demikian, data 192 *weld point* dimanfaatkan sebagai data sekunder/pendukung untuk memberikan gambaran umum seluruh pekerjaan las, sementara evaluasi *constructability*, pembobotan *welding accessibility*, *welding position*, *joint complexity*, potensi *distortion*, hingga kalkulasi *Constructability Score* (CS) difokuskan penuh pada 32 sambungan *beam to beam* tersebut.

Prosedur pengelasan struktur CW-1 berpedoman pada *Welding Procedure Specification* (WPS) No. VME-STR-WPS-03 Rev. 1 yang mengacu pada standar DNV-OS-C401:2021. Metode yang diterapkan adalah *Flux Cored Arc Welding-Gas Shielded* (FCAW-GS) menggunakan elektroda AWS E71T-1C berdiameter 1,2 mm. Dokumen WPS ini mencakup kualifikasi ketebalan material rentang 6,0–24,0 mm serta rentang *welding position* 1G/2G/3G/4G untuk *groove weld* dan 1F/2F/3F/4F untuk *fillet weld*. Informasi parameter ini menjadi dasar dalam mengidentifikasi posisi pengelasan yang diterapkan pada 32 titik sambungan *beam to beam* selama analisis *constructability*.

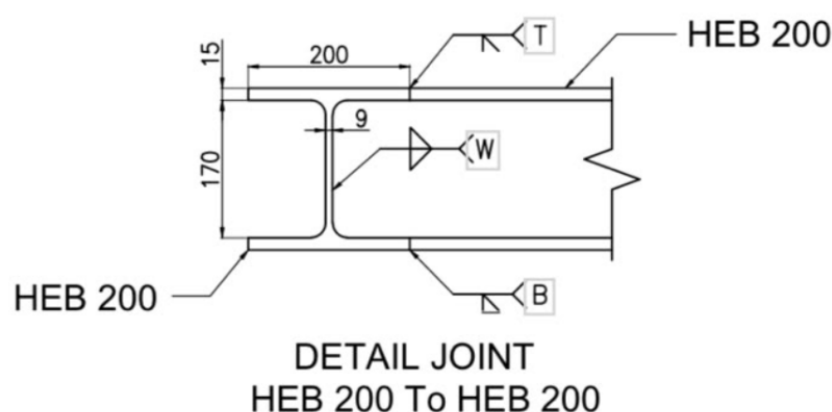
Berikut kondisi aktual area fabrikasi clump weight.



Gambar 8. Kondisi aktual area fabrikasi struktur *clump weight* CW-1 di PT. VME Process, Batam

3.2 Analisis Sequence Fabrikasi Pengelasan Beam

Berdasarkan penelaahan dokumen gambar kerja *Weld Map*, urutan (*sequence*) fabrikasi pengelasan *beam* berjalan searah mengikuti penomoran titik sambungan (*point location*) dari titik 1 hingga titik 32, yaitu dari baris A menuju baris D mengikuti arah kolom 1 menuju kolom 8. Pada tiap *point location*, proses pengelasan dilakukan mencakup tiga posisi utama secara berurutan: sisi atas *flange* (simbol T), badan *beam* atau *web* (simbol W), dan sisi bawah *flange* (simbol B). Ilustrasi detail sambungan beserta penempatan simbol T, W, dan B disajikan pada Gambar 9, sedangkan rekapitulasi *sequence* fabrikasi untuk 5 titik awal dirangkum pada Tabel 3.



Gambar 9. Detail Sambungan (*Joint*) HEB 200 to HEB 200 beserta Simbol Pengelasan T, W, B

Tabel 3. *Sequence* Fabrikasi Pengelasan Beam Clump Weight-1

Titik Lokasi	No. Joint	Simbol	Piece Mark A	Piece Mark B	Tebal (mm)	Panjang Las (mm)	Persiapan Bevel
1	1	T	CW1-NXF-0251-6-01	CW1-NXF-0251-24-01	15	200	Double Fillet
1	2	W	CW1-NXF-0251-6-01	CW1-NXF-0251-24-01	9	340	Single Bevel
1	3	B	CW1-NXF-0251-6-01	CW1-NXF-0251-24-01	15	200	Double Fillet
2	4	T	CW1-NXF-0251-10-01	CW1-NXF-0251-24-01	15	200	Double Fillet
2	5	W	CW1-NXF-0251-10-01	CW1-NXF-0251-24-01	9	340	Single Bevel
2	6	B	CW1-NXF-0251-10-01	CW1-NXF-0251-24-01	15	200	Double Fillet
3	7	T	CW1-NXF-0251-10-02	CW1-NXF-0251-24-01	15	200	Double Fillet

Sumber: Diolah dari database Weld Map proyek, 2026. Data lengkap 192 titik las terlampir pada gambar kerja Weld Map No. WM-00001-001[7].

Pola penomoran ini mengindikasikan bahwa *sequence* fabrikasi disusun demi kemudahan pembacaan gambar teknik (bergerak dari sudut kiri-atas ke kanan-bawah), bukan berpatokan pada azas keseimbangan panas pengelasan (*heat balance*). Dampaknya, sambungan di baris A dan kolom-kolom awal (titik 1–11) dikerjakan lebih dahulu dan mengalami

akumulasi *heat input* yang tinggi sebelum area berseberangan mulai dilas. Kondisi ini berpotensi memicu *distortion* non-simetris, sebagaimana diuraikan pada Sub-bab 3.7.

Di samping sambungan utama, teridentifikasi 6 area sambungan detail (Detail-1 s.d. Detail-6) dengan tingkat *joint complexity* yang tinggi. Sebagai contoh, area Detail-4 (titik 45) memiliki hingga 18 *joint* las pada satu titik karena menjadi simpul (*node*) pertemuan antara batang diagonal, *kick plate*, dan pelat *padeye*. Merujuk pada catatan gambar kerja (*Note-1*), seluruh sambungan *web* yang menyatu dengan *padeye* diwajibkan menerapkan pengelasan penetrasi penuh (*full penetration weld*), sedangkan sambungan *beam* dengan *kick plate* menggunakan *fillet round weld*.

3.3 Hasil Observasi Lapangan

Observasi lapangan telah dilaksanakan pada hari Jumat, 13 Maret 2026 pukul 10.00–11.00 WIB di *workshop* fabrikasi *Department Construction* PT. VME Process, Batu Ampar, Batam, didampingi oleh *Lead Project Engineer*. Hasil pengamatan terhadap 7 (tujuh) parameter pelaksanaan fabrikasi dirangkum dalam Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Observasi Lapangan Proses Fabrikasi *Beam Clump Weight*

No	Item Observasi	Ya	Tidak	Catatan
1	Area fabrikasi beam cukup luas	✓		-
2	Tersedia jig/fixture khusus beam		✓	Hanya support manual
3	Akses welder bebas dari halangan		✓	Beberapa sambungan sempit
4	Pengelasan dominan posisi flat		✓	Banyak posisi horizontal/vertical
5	Tersedia alat handling material	✓		Crane & chain block
6	Sequence fabrikasi memudahkan welding		✓	Ada beam penghalang
7	Distorsi beam minim		✓	Ada tarikan setelah weld

Standar rujukan: item observasi disusun berdasarkan kriteria constructability Tabel 5 [10].

Hasil observasi menunjukkan bahwa dari 7 parameter yang dievaluasi, hanya 2 parameter yang terpenuhi (ketersediaan area kerja dan alat *handling material*), sedangkan 5 parameter lainnya belum optimal. Absennya *jig/fixture* khusus menyebabkan penahanan *beam* hanya mengandalkan penyangga manual, sehingga meningkatkan risiko kemiringan/pergeseran (*misalignment*) saat pengelasan. Selain itu, dominasi posisi pengelasan vertikal dan horizontal—bukan posisi datar (*flat*)—sejalan dengan pengaturan posisi 3G/3F dan 4G/4F pada WPS No. VME-STR-WPS-03, yang menuntut keahlian *welder* lebih tinggi serta menghasilkan *deposit rate* yang relatif lebih rendah dibanding posisi *flat* (1G/1F).

3.4 Hasil Wawancara

Wawancara semi-terstruktur dilakukan terhadap tiga informan kunci (*key informants*), yaitu *welder*, *foreman* fabrikasi, dan *QC inspector*. Temuan wawancara ditriangulasikan dengan hasil observasi lapangan (Sub-bab 3.3) serta analisis dokumen (Sub-bab 3.2), menghasilkan tiga tema utama:

1. Keterbatasan *Welding Accessibility*: Terutama pada area Detail-4 hingga Detail-6, di mana jarak antar-komponen (*kick plate*, *padeye*, dan anoda) sangat berdekatan, sehingga *welder* beroperasi pada ruang gerak yang sempit dengan sudut elektroda yang terbatas.
2. Dominasi *Welding Position Overhead* dan Vertikal: Terjadi pada sambungan *web-to-padeye* yang mewajibkan *full penetration weld*, sehingga membutuhkan durasi pengerjaan dan tingkat kehati-hatian yang lebih tinggi.
3. Potensi *Distortion* Geometri: Dipicu oleh *welding sequence* yang belum memperhitungkan distribusi panas yang seimbang. Hal ini terkonfirmasi dari temuan deformasi/tarikan pada *beam* pasca-pengelasan di lapangan.

Ketiga tema ini memperkuat indikasi awal bahwa *constructability* proses fabrikasi dapat ditingkatkan melalui perbaikan *sequence* dan penggunaan alat bantu kerja (*welding positioner/fixture*).

3.5 Analisis *Constructability* Berdasarkan Detail Sambungan

Evaluasi *constructability* dilaksanakan pada enam titik sambungan detail, yaitu Detail-1 hingga Detail-6. Penilaian ini berpedoman pada empat parameter utama, mencakup *welding accessibility*, *welding position*, *joint complexity*, dan potensi *distortion*. Keempat variabel ini digunakan untuk mengukur tingkat kemudahan eksekusi pengelasan pada tiap area sambungan.

Berdasarkan hasil observasi, Detail-1 dan Detail-2 memiliki tingkat *welding accessibility* yang memadai, *welding position* vertikal/*overhead*, serta *joint complexity* dan potensi *distortion* pada tingkatan sedang. Detail-3 memiliki aksesibilitas terbatas dengan dominasi *overhead position*, sedangkan Detail-4 menunjukkan aksesibilitas terbatas, posisi *overhead* dominan, serta *joint complexity* yang tinggi dengan kepadatan hingga 18 *joint* pada satu titik nodus. Detail-5 memiliki aksesibilitas terbatas dengan posisi vertikal/*overhead* dan kompleksitas *round joint* yang tinggi. Sementara itu, Detail-6 memiliki aksesibilitas memadai dengan posisi *overhead* pada area *base plate* dan kompleksitas sambungan tingkat sedang.

Guna memperoleh pembobotan kuantitatif, setiap parameter diberi bobot sesuai dengan metodologi riset yang ditetapkan. Bobot *welding accessibility* sebesar 30%, *welding position* sebesar 30%, *joint complexity* sebesar 20%, dan potensi *distortion* sebesar 20%.

Nilai *Constructability Score* (CS) dikalkulasi menggunakan persamaan berikut:

$$CS = \sum_{i=1}^n (w_i \times s_i) \quad (6)$$

Keterangan:

- CS = *Constructability Score*
- w_i = bobot untuk parameter ke- i
- s_i = skor penilaian parameter ke- i

Pada kalkulasi ini, kriteria kualitatif dikonversikan menjadi skor numerik kuantitatif, yaitu Baik = 3, Cukup = 2, dan Kurang = 1.

Sebagai kalkulasi pada Detail-1, hasil evaluasi menunjukkan bahwa variabel *welding accessibility* berada pada kategori cukup, *welding position* vertikal/*overhead*, *joint complexity* sedang, serta potensi *distortion* sedang. Secara umum, Detail-1 mengantongi tingkat *constructability* pada level cukup.

Dengan mengorelasikan skor 2 untuk seluruh variabel, maka kalkulasi *Constructability Score* untuk Detail-1 adalah:

$$CS = (0.30 \times 2) + (0.30 \times 2) + (0.20 \times 2)$$

$$CS = 0.60 + 0.60 + 0.40 = 2.00$$

Melalui perhitungan tersebut, Detail-1 memperoleh nilai *Constructability Score* sebesar 2,00.

Merujuk pada hasil evaluasi kualitatif, Detail-3, Detail-4, dan Detail-5 merupakan area dengan indikator *constructability* paling rendah. Rendahnya performa ini dipengaruhi oleh keterbatasan ruang gerak (*accessibility*), dominasi posisi pengelasan *overhead*, serta tingginya kompleksitas sambungan. Oleh sebab itu, ketiga area tersebut menjadi prioritas utama dalam optimasi *fabrication sequence* serta penyediaan alat bantu penunjang seperti *jig* atau *welding positioner*.

Hasil penilaian disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Matriks Penilaian *Constructability* Berdasarkan Area Sambungan Detail

Area Detail	Aksesibilitas	Posisi Pengelasan	Kompleksitas Sambungan	Potensi Distorsi	Penilaian Umum
Detail-1	Cukup	Vertikal/Overhead	Sedang (4 joint)	Sedang	Cukup
Detail-2	Cukup	Vertikal/Overhead	Sedang (4 joint)	Sedang	Cukup
Detail-3	Terbatas	Overhead dominan	Tinggi (4 joint)	Tinggi	Kurang
Detail-4	Terbatas	Overhead dominan	Tinggi (18 joint)	Tinggi	Kurang
Detail-5	Terbatas	Vertikal/Overhead	Tinggi (round joint)	Tinggi	Kurang
Detail-6	Cukup	Overhead (base plate)	Sedang (4 joint)	Sedang	Cukup

Catatan: Penilaian kualitatif "Baik/Cukup/Kurang" merupakan hasil integrasi dari *direct observation*, wawancara, dan rekapitulasi joint per titik pada Weld Map.

Hasil penilaian menegaskan bahwa area Detail-3, Detail-4, dan Detail-5 memiliki tingkat *constructability* paling rendah akibat tingginya konsentrasi *joint* dalam satu simpul, dominasi posisi *overhead*, serta keterbatasan ruang gerak. Ketiga area ini diprioritaskan dalam perbaikan *fabrication sequence* maupun penyediaan alat bantu seperti *jig* atau *welding positioner*.

3.6 Evaluasi Efisiensi *Sequence* Fabrikasi

Evaluasi efisiensi *sequence* fabrikasi dihitung berdasarkan data pengelasan pada struktur CW-1 yang mencakup 192 *weld point*. Kalkulasi ini diterapkan untuk memetakan distribusi jumlah *joint* serta kontribusi panjang pengelasan pada tiap simbol sambungan, meliputi *Top of Flange* (T), *Web of Beam* (W), *Bottom of Flange* (B), dan *Round* (R).

3.6.1 Perhitungan Persentase Jumlah Joint

Persentase jumlah *joint* pada tiap simbol dikalkulasi dengan membandingkan kuantitas *joint* masing-masing simbol terhadap total keseluruhan *joint*. Persamaan matematika yang diterapkan adalah :

$$\text{Joint}(\%) = \frac{ni}{N} \times 100\% \quad (7)$$

Keterangan:

- ni = jumlah *joint* pada detail ke- i
- N = total keseluruhan jumlah *joint*

Tabel 6. Rekap Data Pengelasan Berdasarkan Joint (CW-1)

Simbol	Keterangan	Jumlah Joint	Total Panjang Las (mm)	Rata-rata Panjang (mm)	Persentase Jumlah Joint
T	Top of Flange	67	12.633	188,6	34,9%
W	Web of Beam	54	27.256	504,7	28,1%
B	Bottom of Flange	67	12.633	188,6	34,9%
R	Round (padeye/anoda)	4	1.47	367,4	2,1%
Total	-	192	53.992	-	100%

pada simbol T (*Top of Flange*), jumlah *joint* yang terdata adalah 67 *joint* dari total keseluruhan 192 *joint*. Maka kalkulasinya adalah:

$$\text{Joint } T(\%) = \frac{67}{192} \times 100\% = 34,9\%$$

pada simbol W (*Web of Beam*), jumlah *joint* yang terdata adalah 54 *joint* dari total keseluruhan 192 *joint*. Maka kalkulasinya adalah:

$$\text{Joint } W(\%) = \frac{54}{192} \times 100\% = 28,1\%$$

pada simbol B (*Bottom of Flange*), jumlah *joint* yang terdata adalah 67 *joint* dari total keseluruhan 192 *joint*. Maka kalkulasinya adalah:

$$\text{Joint } B(\%) = \frac{67}{192} \times 100\% = 34,9\%$$

pada simbol R (*Round /padeye*), jumlah *joint* yang terdata adalah 4 *joint* dari total keseluruhan 192 *joint*. Maka kalkulasinya adalah:

$$Joint R (\%) = \frac{4}{192} \times 100\% = 2,1\%$$

Meskipun jumlah *joint* pada badan *beam* (simbol W) hanya sebesar 28,1% dari total *joint*, kontribusinya terhadap total panjang pengelasan mencapai 50,5% (27.256 mm dari 53.992 mm) dengan rata-rata panjang per *joint* (504,7 mm) jauh melampaui simbol T dan B. Hal ini berbanding lurus dengan persyaratan *full penetration weld* pada sambungan *web-to-padeye* (Note-1 gambar kerja), yang menuntut durasi, *pass* pengelasan, dan *heat input* terbesar. Dari perspektif *sequence* fabrikasi, sambungan *web* idealnya dijadikan prioritas utama perencanaan urutan pengelasan karena menentukan *cycle time* penyelesaian satu titik sambungan.

3.6.2 Perhitungan Persentase Panjang Las

Kalkulasi persentase panjang las ditujukan untuk menentukan porsi kontribusi panjang pengelasan pada tiap simbol terhadap akumulasi panjang las struktur CW-1 secara keseluruhan. Persamaan yang digunakan adalah :

$$Li(\%) = \frac{Li}{Ltotal} 100\% \quad (8)$$

Keterangan:

- Li = panjang las pada detail ke-i
- L total= total keseluruhan panjang las

$$Lt(\%) = \frac{12.633}{53.992} 100\% = 23.40\%$$

$$Lw(\%) = \frac{27.256}{53.992} 100\% = 50.48\%$$

$$Lb(\%) = \frac{12.633}{53.992} 100\% = 23.40\%$$

$$Lr(\%) = \frac{1.47}{53.992} 100\% = 2.72\%$$

Kalkulasi tersebut membuktikan bahwa meskipun secara kuantitas porsi *joint* simbol W hanya 28,1% dari total *joint*, kontribusi panjang lasnya mendominasi hingga 50,5% dari total keseluruhan panjang pengelasan. Hal ini mengindikasikan bahwa area sambungan *web* menyerap porsi pekerjaan las yang sangat signifikan dalam total aktivitas fabrikasi.

3.6.3 Perhitungan Rata-Rata Panjang Las

Perhitungan rata-rata panjang las berfungsi untuk mengetahui estimasi panjang pengelasan rerata pada tiap *joint*. Persamaan yang diterapkan adalah:

$$Li = \frac{Li}{ni}$$

(

Keterangan:

- Li = rata-rata panjang las per *joint* pada simbol ke- i (mm/joint)
- Li = total panjang las pada simbol ke- i (mm)
- ni = jumlah *joint* pada simbol ke- i

$$Lt = \frac{12.633}{67} \times 1000 = 188,55 \text{ mm/joint}$$

$$Lw = \frac{27.256}{54} = 504,7 \text{ mm/joint}$$

$$Lb = \frac{12.633}{67} = 188,55 \text{ mm/joint}$$

$$Lr = \frac{1.47}{4} = 367,50 \text{ Bmm/joint}$$

Hasil kalkulasi menunjukkan bahwa simbol W memiliki rerata panjang las mencapai 504,7 mm/joint. Nilai ini melampaui rerata panjang las pada simbol T dan B yang masing-masing tercatat sebesar 188,6 mm/joint.

Merujuk pada temuan tersebut, sambungan *web* menjadi area paling krusial yang memerlukan perhatian khusus dalam perancangan *fabrication sequence*. Hal ini mengingat kontribusi panjang pengelasannya yang paling dominan serta adanya ketentuan pengelasan penetrasi penuh (*full penetration weld*), yang berimplikasi pada membengkaknya *cycle time* pengerjaan dan *heat input* yang dialokasikan.

Perhitungan rata-rata panjang las berfungsi untuk mengetahui estimasi panjang pengelasan rerata pada tiap *joint*. Persamaan yang diterapkan adalah:

Hasil inspeksi *fit-up*, visual, dan *Non-Destructive Testing* (NDT) terhadap 192 titik las CW-1 disajikan pada Tabel 7. Metode NDT terbagi menjadi 2 kategori utama berdasarkan legenda gambar kerja: 100% MT/PT (103 titik) dan 100% UT+MT (89 titik).

Tabel 7. Rekapitulasi Hasil Inspeksi *Fit-Up*, Visual, dan NDT

Tahap Inspeksi	Jumlah Diperiksa	Hasil Diterima (ACC)	Persentase Diterima	Metode NDT
Fit-Up	192	192	100%	-
Visual	192	192	100%	-
NDT (MT/PT 100%)	103	103	100%	Magnetic Particle Test

NDT (UT+MT 100%)	89	87 (2 REP → repair → ACC)	100% (setelah repair)	Ultrasonic + Magnetic Particle Test
---------------------	----	---------------------------	-----------------------	--

Sumber: Diolah dari data induk Weld Map proyek CW-1, 2026. Pembagian 103 titik (Legend No. 1: 100% MT/PT) dan 89 titik (Legend No. 11: 100% MT + 100% UT) difilter menggunakan fungsi COUNTIF. Sambungan single bevel dites dengan UT+MT, sedangkan fillet/double fillet cukup diperiksa MT/PT.

Catatan NDT memperlihatkan bahwa 2 dari 89 titik pengujian UT (2,2%)—yaitu titik 6 (sambungan T, *piece mark* CW1-NXF-0251-9-01) dan titik 10 (sambungan B, *piece mark* CW1-NXF-0251-9-02)—sempat berstatus *reject-repair* (REP) pada uji UT awal, sebelum akhirnya diperbaiki dan diterima (*accepted*/ACC) pada pengujian ulang (revisi R1). Temuan ini memberikan bukti kuantitatif bahwa meskipun tingkat penerimaan akhir mencapai 100%, terdapat kerentanan cacat las pada tahap awal yang berkorelasi dengan isu *distortion* dan *sequence* fabrikasi yang kurang optimal.

Dari aspek distribusi beban kerja, 192 *joint* pada CW-1 dikerjakan oleh 11 *welder* bersertifikat. Tiga *welder* dengan alokasi terbanyak (kode *welder* VME-2673 sebanyak 39 *joint*, VME-1064 sebanyak 32 *joint*, dan VME-2676 sebanyak 19 *joint*) mengoperasikan 90 *joint* atau 46,9% dari keseluruhan *joint*, sementara 8 *welder* sisanya berbagi 53,1% pengerjaan. Ketimpangan pembagian beban kerja ini dapat memicu kelelahan (*fatigue*) pada *welder* tertentu sekaligus mengindikasikan belum meratanya *welder assignment sequence*.

3.7 Analisis Pengaruh *Sequence* Fabrikasi terhadap Distorsi *Welding*

3.7.1 Perhitungan Heat Input

Kalkulasi *heat input* dilaksanakan untuk menentukan besarnya masukan energi panas yang tersalurkan selama proses pengelasan. Parameter pengelasan yang diterapkan berpedoman pada dokumen WPS No. VME-STR-WPS-03 Rev. 1. Dokumen WPS tersebut mengaplikasikan metode *Flux Cored Arc Welding-Gas Shielded* (FCAW-GS) dengan parameter yang disesuaikan terhadap rentang *welding position*.

Persamaan *heat input* yang diterapkan adalah:

$$HI = \frac{V \times I \times 60}{1000 \times S} \quad (9)$$

Keterangan:

- HI = *heat input* (kJ/mm)
- V = tegangan listrik (Volt)
- I = kuat arus listrik (Ampere)
- S = *travel speed* atau kecepatan pengelasan (mm/menit)

Sebagai kalkulasi, diambil parameter pengelasan posisi 3G pada *pass Fill* yang mengacu pada WPS No. VME-STR-WPS-03 Rev. 1. Parameter yang dikorelasikan mencakup tegangan maksimum sebesar 26 Volt, kuat arus maksimum sebesar 180 Ampere, serta *travel speed* minimum sebesar 120 mm/menit.

Maka kalkulasi *heat input* adalah sebagai berikut:

$$HI = \frac{26 \times 180 \times 60}{120 \times 1000}$$

$$HI = \frac{280.800}{120.000}$$

$$HI = 2.34 \text{ kJ/mm}$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai *heat input* sebesar 2,34 kJ/mm. Angka ini presisi dengan batas nilai masukan panas maksimum yang disyaratkan dalam WPS untuk posisi 3G pada *pass Fill*, yaitu sebesar 2,34 kJ/mm.

Besaran *heat input* tersebut mencerminkan intensitas energi panas yang diserap oleh material selama proses penyambungan. Pada skema *multi-pass welding*, akumulasi *heat input* memerlukan kontrol ketat karena berdampak langsung pada siklus termal pemanasan-pendinginan material serta memperbesar potensi munculnya *distortion*. Oleh sebab itu, pengaturan *fabrication sequence* menjadi instrumen krusial untuk mengendalikan distribusi panas secara merata pada seluruh komponen struktur CW-1.

3.8 Identifikasi Risiko Fabrikasi

Berdasarkan hasil analisis dokumen, observasi lapangan, wawancara, dan evaluasi data pengelasan, disusun tabel identifikasi risiko fabrikasi sebagaimana Tabel 8, yang mencakup risiko utama, penyebab, dampak, tingkat risiko, dan usulan mitigasi.

Tingkat risiko fabrikasi dievaluasi berdasarkan kombinasi probabilitas kemunculan risiko serta besarnya konsekuensi yang ditimbulkan terhadap aktivitas fabrikasi. Kalkulasi skor risiko menggunakan persamaan berikut:

$$R = L \times I$$

Keterangan:

- R = skor risiko (*Risk Score*)
- L = nilai kemungkinan (*Likelihood*)
- I = nilai dampak (*Impact*)

Sebagai kalkulasi, potensi risiko keterbatasan *welding accessibility* memiliki indeks kemungkinan sebesar 3 dan indeks dampak sebesar 3. Maka proses perhitungannya adalah:

$$R = 3 \times 3 = 9$$

Merujuk pada hasil kalkulasi tersebut, variabel keterbatasan *welding accessibility* mengantongi *risk score* sebesar 9. Nilai ini selanjutnya dikonversikan ke dalam matriks risiko dan kriteria tingkatan yang telah dirumuskan dalam riset ini.

Sebagai pembanding, apabila suatu potensi kendala memiliki nilai kemungkinan sebesar 2 dan nilai dampak sebesar 2, maka kalkulasinya adalah:

$$R = 2 \times 2 = 4$$

Dengan demikian, variabel tersebut memperoleh *risk score* sebesar 4. Hasil penentuan kriteria tingkatan risiko ini digunakan untuk menetapkan hierarki langkah perbaikan.

Seluruh akumulasi *risk score* ini menjadi dasar utama penentuan prioritas penanganan mitigasi terhadap kendala yang teridentifikasi selama proses fabrikasi. Risiko dengan skor tertinggi secara otomatis menjadi prioritas utama untuk memperoleh tindakan pengendalian dan mitigasi lebih awal.

Tabel 8.1 Rentang Skor dan Kategori Tingkat Risiko

Skor (Kemungkinan x Dampak)	Tingkat Risiko
1 - 2	Rendah
3 - 4	Sedang
5 - 9	Tinggi

Tabel 8.2 Identifikasi Risiko *Sequence* Fabrikasi Pengelasan *Beam Clump Weight-1*

No	Risiko	Penyebab	Dampak	Kemungkinan (L)	Nilai Dampak (I)	Skor (L x I)	Tingkat Risiko	Mitigasi
1	Akses pengelasan terbatas	Sambungan sempit pada area Detail-3/4/5	Kualitas sambungan menurun, waktu pengerjaan bertambah	2	2	4	Sedang	Gunakan positioner dan rencanakan urutan akses sebelum fit-up
2	Dominasi posisi overhead/vertikal	WPS mengizinkan 3G/3F & 4G/4F; geometri struktur kompleks	Produktivitas menurun, risiko cacat las meningkat	3	2	6	Tinggi	Gunakan positioner/turning roll agar posisi mendekati flat
3	Ketiadaan jig/fixture khusus	Penahanan beam hanya dengan support manual	Ketidaktepatan fit-up, potensi misalignment	2	2	4	Sedang	Sediakan jig/fixture standar untuk beam HEB 200
4	Distorsi geometri non-simetris	Sequence penomoran searah tanpa pola simetris; berpotensi menimbulkan distorsi kumulatif pada sambungan web full-penetration	Tarikan/deformasi geometri struktur, rework las	2	3	6	Tinggi	Terapkan metode pengelasan simetris (back-step/skip welding), mulai dari titik tengah ke arah luar
5	Beban kerja welder tidak merata	3 welder menangani ~47% total joint	Kelelahan welder, risiko keterlambatan jadwal	2	2	4	Sedang	Distribusi ulang penugasan welder secara proporsional
6	Beam penghalang pada urutan tertentu	Komponen berdekatan menghalangi akses sequence berikutnya	Sequence fabrikasi tidak efisien, rework logistik	2	2	4	Sedang	Susun ulang prioritas titik kritis sebelum titik non-kritis
7	Input panas tinggi pada las penetrasi penuh	Seluruh sambungan web-padeye wajib full penetration	Risiko distorsi dan retak akibat panas berlebih	3	3	9	Tinggi	Kendalikan preheat (min. 33°C) dan interpass (maks. 110°C) sesuai WPS

Sumber: hasil analisis peneliti berdasarkan data dokumen, observasi, dan wawancara, 2026.

3.9 Usulan Perbaikan *Sequence* Fabrikasi

Berdasarkan hasil evaluasi komprehensif pada Sub-bab 3.2 hingga 3.8, diusulkan beberapa rekomendasi perbaikan *sequence* fabrikasi sebagai berikut:

1. Prioritas Sambungan Kritis: Memprioritaskan pengelasan sambungan kritis (sambungan *web-to-padeye* ber-status *full penetration* serta area Detail-3, Detail-4, dan Detail-5) pada tahap awal ketika ruang gerak dan *welding accessibility* masih maksimal sebelum komponen pelengkap (*kick plate*, anoda) terpasang.
2. Penerapan *Symmetrical Welding Method*: Menerapkan teknik pengelasan simetris (*back-step welding* atau *skip welding*) yang dimulai dari sumbu tengah struktur menuju ke arah luar secara bergantian pada kedua sisi guna menyeimbangkan distribusi *heat input* dan menekan *distortion* non-simetris.
3. Penyediaan *Jig/Fixture* dan *Positioner*: Menggunakan *jig/fixture* presisi untuk mengunci posisi *beam* selama *fit-up* dan pengelasan, serta mengaplikasikan *welding positioner* guna memutar posisi kerja mendekati posisi *flat* (1G/1F).
4. Pemerataan Penugasan *Welder*: Mengatur ulang alokasi penugasan *welder* berdasarkan kapasitas dan riwayat beban kerja untuk mencegah kelelahan (*fatigue*) serta menjaga konsistensi mutu las.
5. Pelaksanaan *Progressive Inspection*: Menerapkan pengawasan/inspeksi bertahap di setiap *milestone* fabrikasi untuk mendeteksi potensi *distortion* atau cacat las sejak dini pada sambungan dengan *heat input* tinggi.

3.10 Evaluasi Persentase Perubahan *Constructability Score* (CS)

Evaluasi persentase perubahan CS dilakukan untuk mengukur tingkat efektivitas usulan perbaikan *sequence* fabrikasi (Sub-bab 3.9) terhadap peningkatan *constructability* dibandingkan kondisi aktual (Sub-bab 3.5). Nilai CS aktual diperoleh dari hasil penilaian kualitatif pada Tabel 5, sedangkan nilai CS usulan bersifat proyektif karena rekomendasi perbaikan pada Sub-bab 3.9 belum diimplementasikan secara aktual di lapangan. Nilai CS usulan dihitung melalui penalaran logis (*expert judgment*) berdasarkan hasil observasi dan wawancara pada Sub-bab 3.3 dan 3.4, dengan mengasumsikan penerapan rekomendasi perbaikan pada Sub-bab 3.9, yaitu penyediaan *jig/fixture* dan *positioner*, serta penerapan metode pengelasan simetris. Penerapan rekomendasi tersebut diasumsikan meningkatkan skor variabel *welding accessibility*, *welding position*, dan potensi *distortion* pada area dengan tingkat *constructability* rendah, sedangkan variabel *joint complexity* tidak berubah karena bersifat tetap terhadap desain sambungan.

Tabel 9. Perbandingan *Constructability Score* (CS) Aktual dan Usulan per Area Detail

Area Detail	CS Aktual	CS Usulan	Perubahan (%)
Detail-1	2,00	2,50	-25,0%
Detail-2	2,00	2,50	-25,0%
Detail-3	1,00	1,80	-80,0%
Detail-4	1,00	1,80	-80,0%
Detail-5	1,30	2,10	-61,5%
Detail-6	2,00	2,50	-25,0%
Rata-rata	1,55	2,20	-41,9%

Catatan: Nilai CS usulan merupakan proyeksi/estimasi logis (bukan hasil pengukuran lapangan) berdasarkan penerapan rekomendasi perbaikan *sequence* pada Sub-bab 3.9, dengan asumsi peningkatan satu tingkat skor (skala 1-3) pada variabel *welding position* dan potensi *distortion* di seluruh area detail, serta *welding accessibility* pada Detail-3, Detail-4, dan Detail-5 melalui penyediaan *jig/fixture*. Angka ini disusun sebagai proyeksi awal dan disarankan divalidasi lebih lanjut melalui re-assessment atau *expert judgment* terstruktur (misalnya FGD dengan foreman/QC Inspector) apabila *sequence* usulan telah diimplementasikan di lapangan.

Berdasarkan Tabel 9, diperoleh rata-rata CS aktual sebesar 1,55 dan rata-rata CS usulan sebesar 2,20. Persentase perubahan CS dihitung menggunakan Persamaan (5) sebagai berikut:

$$\text{Perubahan} = \frac{1,55 - 2,20}{1,55} \times 100\% = -41,9\%$$

Tanda negatif pada hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai CS usulan lebih tinggi dibandingkan CS aktual, yang mengindikasikan peningkatan *constructability*. Dengan demikian, penerapan usulan perbaikan *sequence* fabrikasi berpotensi meningkatkan *Constructability Score* rata-rata sebesar 41,9% dibandingkan kondisi aktual, dengan peningkatan paling signifikan terjadi pada Detail-3 dan Detail-4 (80,0%) yang sebelumnya berada pada kategori Kurang akibat keterbatasan akses dan tingginya kompleksitas sambungan.

Perlu dicatat bahwa nilai CS usulan pada evaluasi ini merupakan proyeksi berbasis penalaran logis, bukan hasil pengukuran aktual, mengingat rekomendasi perbaikan *sequence* belum diterapkan pada proses fabrikasi CW-1. Oleh karena itu, angka persentase perubahan CS pada sub-bab ini lebih tepat dimaknai sebagai proyeksi potensi peningkatan, dan validasi lanjutan melalui re-assessment lapangan setelah implementasi *sequence* usulan disarankan sebagai kajian lanjutan.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan yang telah diuraikan pada Bab 3, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut. *Sequence* fabrikasi pengelasan *beam* pada *struktur Clump Weight-1* (CW-1) mengikuti urutan penomoran titik sambungan (*point location* 1 s.d. 32) sesuai gambar kerja *Weld Map*, dengan setiap titik dikerjakan melalui tiga posisi utama (*top flange*, *web*, *bottom flange*) secara berurutan, ditambah 6 area sambungan detail dengan tingkat kerumitan tinggi (hingga 18 *joint* dalam satu titik pada Detail-4). Di samping itu, *sequence* fabrikasi yang diterapkan saat ini masih memiliki kendala *constructability*, yaitu keterbatasan akses pengelasan pada area sambungan detail, dominasi posisi pengelasan *vertikal* dan *overhead* (bukan posisi *flat*), serta ketiadaan *jig/fixture* khusus sehingga penahanan *beam* hanya mengandalkan *support manual*.

Pada aspek evaluasi kuantitatif, evaluasi terhadap 192 titik las pada CW-1 menunjukkan bahwa sambungan *web* (simbol W) memberikan kontribusi 50,5% dari total panjang las meski proporsi jumlah *joint*-nya hanya 28,1% dari total *joint*, sehingga menjadi elemen paling menentukan durasi siklus fabrikasi. Hasil inspeksi menunjukkan tingkat penerimaan akhir 100% pada seluruh 192 titik las, serta *distribusi* beban kerja *welder* yang masih timpang (3 dari 11 *welder* menangani sekitar 47% total *joint*). Dari sisi manajemen risiko, teridentifikasi 7 risiko utama dalam pelaksanaan *sequence* fabrikasi CW-1, dengan 3 risiko berkategori tinggi, yaitu dominasi posisi pengelasan *overhead/vertikal*, distorsi *non-simetris* akibat *sequence* yang tidak seimbang, dan tingginya input panas pada sambungan penetrasi penuh.

Sementara itu, evaluasi *Constructability Score* (CS) pada enam area sambungan detail menghasilkan rata-rata CS aktual sebesar 1,55 (kategori Kurang-Cukup), dengan Detail-3, Detail-4, dan Detail-5 sebagai area ber-CS terendah (1,00-1,30) akibat keterbatasan akses, dominasi posisi *overhead*, serta tingginya kompleksitas dan potensi distorsi sambungan. Sebagai tindak lanjut, rekomendasi perbaikan *sequence* fabrikasi yang diusulkan (prioritas sambungan kritis, *symmetrical welding method*, penyediaan *jig/fixture* dan *positioner*, pemerataan penugasan *welder*, serta *progressive inspection*) diproyeksikan mampu meningkatkan *Constructability Score* rata-rata sebesar 41,9%, dengan peningkatan paling signifikan pada Detail-3 dan Detail-4 (80,0%). Nilai ini bersifat proyeksi berbasis penalaran logis dan perlu divalidasi lebih lanjut melalui re-assessment lapangan apabila usulan telah diimplementasikan.

5 Daftar Pustaka

- [1] L. Malik, "Analysis and Design of Structural Components in Offshore and Marine Engineering," vol. 10, no. 2, pp. 1–6, 2024.
- [2] W. Distortion, "Welding Distortion," 2023.

- [3] S. Afonso and M. Rodr, “applied sciences Effect of Welding Sequence in Angular Distortion on Butt Joint GMAW Process,” 2022.
- [4] A. Faraji, S. H. Arya, E. Ghasemi, and H. Soleimani, “A Constructability Assessment Model Based on BIM in Urban,” 2023.
- [5] P. Lokuge, I. Wimalaratne, and U. Kulatunga, “‘ Buildability ’ in the Digital Age : A Phenomenological Discourse of Industry Practitioners ’ Perceptions,” pp. 1–23, 2023.
- [6] A. American and N. Standard, *Structural Welding Code — Steel Structural Welding Code — Steel*. 2020.
- [7] D. N. V As, “Fabrication and testing of offshore structures,” no. July, 2021.
- [8] T. Norsok, T. Federation, N. Industry, T. Federation, and N. Industry, “NORSOK STANDARD Structural steel fabrication,” no. October, pp. 1–62, 2011.
- [9] A. Rijali, “Analisis Data Kualitatif Ahmad Rijali UIN Antasari Banjarmasin,” vol. 17, no. 33, pp. 81–95, 2018.