

Analisa Pengaruh *Flange Angle*, *Toe Radius*, dan *Preparation Angle* Terhadap Deformasi dan Tegangan Sisa pada Pengelasan *Butt Joint* dengan Kampuh Double V Ganda Menggunakan Metode Elemen Hingga

Dimas Valditya Dewangga, Totok Yulianto

Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: totoky@na.its.ac.id

Abstrak— Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui deformasi dan tegangan sisa akibat distribusi panas yang tidak merata selama proses pengelasan sampai pendinginan pada sambungan tumpul pada pelat datar dengan variasi *flank angle*, *toe radius*, dan *preparation angle*. Penelitian ini dilakukan dengan metode elemen hingga dan validasi hasil dilakukan dengan experiment yang telah dilakukan oleh Higashida Y, Burk JD, dan Lawrence FV. Material untuk pengujian adalah ASTM A36 dengan kampuh V ganda. Semua analisa ditinjau saat suhu material sama dengan suhu ruang. Pemodelan dilakukan dengan memvariasi besaran *flank angle* (sudut mahkota), *toe radius* (radius kaki mahkota) dan *preparation angle* (sudut alur). Dari variasi yang dilakukan diperoleh pengelasan terbaik yang menghasilkan deformasi dan tegangan sisa terkecil yaitu pengelasan yang menggunakan sudut 20° pada variasi sudut mahkota, 2.5 milimeter untuk variasi radius kaki mahkota, dan sudut 40° untuk variasi sudut alur.

Kata Kunci—*sudut mahkota, sudut alur, tegangan sisa, toe angle, metode elemen hingga.*

I. PENDAHULUAN

Penggunaan teknik pengelasan sampai saat ini memiliki peranan yang sangat penting dalam bidang konstruksi. Salah satu jenis pengelasan yang paling sering dipakai adalah pengelasan antar pelat datar yang sering digunakan pada bidang perkapalan, *offshore structure*, konstruksi jembatan, *pressure vessel*, boiler serta berbagai macam industri rancang bangun.

Di antara elemen-elemen pelat serta simpul-simpul penyambungan pelat hampir semuanya dilakukan dengan pengelasan, maka sudah barang tentu salah satu masalah yang sangat penting dan dapat menentukan sifat dan kekuatan sambungan las adalah adanya tegangan sisa yang terjadi baik selama proses lasan ataupun sejak material diproses/akibat pengerjaan mesin pada material tersebut.

Dalam bidang maritime dan bidang perkapalan, deformasi pada sambungan pelat perlu untuk diperhatikan sangat diperhatikan. Hal ini ditunjukkan pada berbagai *standard-standard* yang memberikan batas toleransi untuk

deformasi maksimal [1]. Toleransi yang diberikan untuk deformasi sampai dengan 6 milimeter. Hal yang perlu diperhatikan adalah banyaknya sambungan pelat pada struktur bangunan laut, yang dapat mempengaruhi penyambungan pelat yang lain. Sehingga deformasi yang kecil akan menyebabkan ketidaklurusan pada struktur

Pada penelitian sebelumnya [2], sudut distorsi dar sambungan tumpul V tunggal merupakan obyek yang diteliti menggunakan metode elemen hingga. Model yang telah terbagi lalu diberikan beban pengelasan yang kemudian dapat dianalisa berapa besar deformasi dan tegangan sisa yang terjadi pada pemodelan tersebut. Kemudian dapat juga dianalisa dengan variasi ketebalannya.

Pada sambungan las tumpul, berbagai cara telah terbukti dapat memberikan tegangan sisa dan deformasi yang lebih kecil, misalnya dengan memberikan tanggem dan mengatur arah serta urutan dari pengelasan. Dalam penelitian ini, akan diteliti salah satu cara yang dapat juga memberikan tegangan sisa dan deformasi yang kecil, yaitu dengan memvariasikan sudut mahkota, sudut alur, dan radius kaki mahkota. Untuk itu, harus diadakan penelitian untuk mengetahui besaran sudut dan *radius* mana yang menghasilkan tegangan sisa dan deformasi paling kecil.

Penelitian sebelumnya [3] telah memperkenalkan sudut-sudut dan radius yang menjadi objek dalam penelitian ini. Tetapi dalam penelitian tersebut tegangan sisa yang dihasilkan dari perhitungan numerik akan menjadi masukan lanjutan dalam analisa kepecahan dan kelelahannya, dalam penelitian tersebut juga tidak ditampilkan bentuk deformasi dan besar deformasi yang terjadi setelah proses pengelasan. Pengujian [4] yang pernah dilakukan, menjadi bahan rujukan utama dari penelitian tersebut, dan penelitian yang menggunakan metode elemen hingga ini.

II. DASAR TEORI

A. Deformasi

Deformasi yang dihasilkan dalam penelitian ini berawal dari pergerakan elemen-elemen terbagi yang memuai karena energi panas yang ada. Pada elemen terbagi yang letaknya dekat dengan material lasan, akan memuai terlebih dahulu bila dibandingkan dengan elemen terbagi yang letaknya jauh dari material lasan. Hal ini juga disebabkan distribusi panas

yang tidak merata, dengan demikian pemuaihan yang terjadi tidak merata pula. Deformasi yang terjadi pada elemen terkait terjadi secara volumetric, yaitu memuai kearah tiga sumbu derajat kebebasan yang berlaku (x,y, dan z). Pada penelitian ini, deformasi terbesar terjadi pada arah sumbu y. hal ini dapat dimengerti bahwa kondisi batas yang berada pada ujung-ujung tumpuan adalah tidak bergerak pada segala arah, sedangkan yang tidak terletak pada tumpuan, tidak bergerak pada arah sumbu x dan z. Pada perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini, memberikan fitur untuk perhitungan deformasi resultan, sehingga resultan inilah yang digunakan sebagai pembanding dengan model-model lainnya.

B. Tegangan Sisa

Tegangan yang dihasilkan akibat pengelasan berawal dari distribusi panas yang tidak rata, sehingga terjadi pemuaihan material volumetric yang tidak seragam pula. Pada saat material memasuki tahap pendinginan, suhu material akan kembali ke suhu ruang. Plastisitas dari material tersebut yang membuat material menyusut. Namun adanya volum material yang terlebih dahulu mendingin, menjadi penghalang dan menjadi penyebab terjadinya tegangan pada pengelasan

Tegangan *Von Mises* merupakan tegangan yang didapatkan melalui perhitungan yang melibatkan strain pada semua arah sumbu (x, y, dan z). Dengan demikian dapat disimpulkan tegangan *Von Mises* merupakan tegangan total dan merupakan resultan tegangan yang terjadi pada pelat. Sehingga tegangan *Von Mises* dapat dijadikan tolak ukur indikasi besarnya tegangan sisa yang terjadi tanpa memperhatikan arah tegangan tersebut. Substansi tegangan yang masuk dalam perhitungan tegangan *Von Mises* merupakan tegangan sumbu yang bergerak searah tiga sumbu, seperti yang lazim ditemui dalam perhitungan tegangan. Hanya saja, dalam penelitian ini yang berhubungan dengan distribusi panas, sehingga strain yang dihasilkan mendapat tambahan dari regangan yang terjadi akibat adanya perbedaan temperatur, antara suhu material dan suhu ruangan. [5]

C. Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang rekayasa seperti geometri, pembebanan dan sifat-sifat dari material yang sangat rumit. Hal ini sulit diselesaikan dengan solusi analisa matematis. Pendekatan metode element hingga adalah menggunakan informasi-informasi pada titik simpul (*node*). Dalam prosese penentuan titik simpul yang di sebut dengan pendeskritan (*discretization*), suatu sisitem di bagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada bagian-bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi secara menyeluruh.[6]

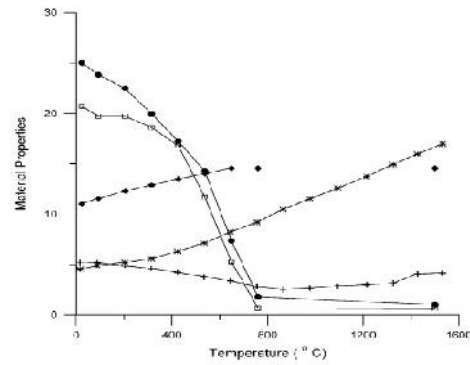
III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Pembuatan Model

Pada pemodelan penelitian ini material yang digunakan untuk adalah logam dengan jenis *carbon steel* yang banyak

digunakan dalam bidang konstruksi perkapalan. Carbon steel yang digunakan disini adalah ASTM A 36. Tipe ini memiliki banyak keunggulan antara lain memiliki tingkat keuletan yang tinggi, dan mudah untuk diproses,yaitu dipotong,dibentuk, dan dilas, sehingga baja jenis ini memang lazim digunakan dalam industri konstruksi.

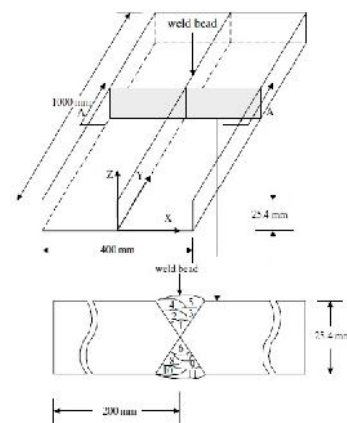
Carbon steel A36 memiliki nilai material properties yang tidak sama jika diukur pada suhu yang berbeda. Sehingga kita bisa memilih perlakuan panas yang tepat untuk mendapatkan hasil yang maksimal. Hubungan antara material properties dengan temperatur ditunjukkan pada gambar di bawah ini :



| Symbol | Material Properties | Unit |
|----------------------|---------------------|-------------------------|
| ● --- σ _y | Yield stress | 10 ⁷ Pa |
| □ --- E | Young's modulus | 10 ¹¹ Pa |
| ◆ --- α | Thermal expansion | µm/m °C |
| + --- k | Conductivity | 10 W/m °C |
| * --- c | Specific heat | 10 ² J/Kg °C |

Gambar 1. Properti material dari ASTM A36. [3]

Dari properti material yang telah ada, lalu dibuat model menggunakan metode elemen hingga. Tahap selanjutnya adalah pembuatan geometri dari material. Pembuatan geometri ini sangat lah penting sampai tahap dikritisasi elemen, yaitu tahap dimana penyelesaian masalah dilakukan pada bagian-bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi secara menyeluruh. Gambar dibawah ini menjelaskan tentang pembuatan geometri hingga selesainya proses diskritisasi elemen.



Gambar 2. Geometri Model Pengelasan.

B. Pembebanan

Pembebanan merupakan salah satu tahap dalam metode elemen hingga. Beban yang diberikan dalam proses pengelasan adalah beban panas (*heat flux*), yang dihasilkan melalui proses perubahan energi, dari energi listrik ke energi panas. Dibawah ini merupakan perhitungan beban *heat flux*

yang dinotasikan sebagai q :

$$Q = yUI \tag{1}$$

$$q_e = Q / A_e \tag{2}$$

$$q_e = q_e (A_l / A_f) \tag{3}$$

Dimana, q_{el} adalah *heat flux* yang diberikan pada elemen (W/m^2), q_e adalah *heat flux* efektif (W/m^2), Q adalah *heat input* bersih (Watt), y adalah efisiensi busur las., U adalah *voltage* dari busur las (Volt), I adalah arus listrik (Ampere), A_e adalah luas *electrode* (m^2), A_l adalah luas elemen (m^2), dan A_f adalah luas *flux* yang diberikan pada material (m^2). [7]

Setelah perhitungan dilakukan, langkah berikutnya adalah memasukkan beban per layer tersebut dengan parameter pengelasan yang telah ada, yaitu :

- Panjang Material = 1000 milimeter
- Pembagian Elemen = 70 elemen
- Panjang 1 elemen = 1000 / 70 = 12.8 milimeter
- Kecepatan = 3.34 milimeter/s
- Arus = 190 Ampere

IV. KONVERGENSI DAN VALIDASI

A. Konvergensi

Pengecekan akan kesesuaian jumlah elemen sangat dibutuhkan dalam suatu analisa struktur atau thermal dalam pemodelan elemen hingga.. Pada prinsipnya semakin banyak jumlah elemen akan semakin baik, karena nilai analisa yang didapatkan akan semakin mendekati nilai yang didapat dari sebuah pengujian, terlebih dapat mendekati nilai exact atau nilai yang sebenarnya. Akan tetapi jika elemen yang dianalisa semakin besar maka semakin berat pula kerja komputer untuk melakukan *solving* atau pencarian solusi. Oleh karena itu, konvergensi jumlah pembagian elemen ini sangat diperlukan, agar hasil pendekatan dari metode elemen hingga menghasilkan solusi yang paling mendekati nilai yang sebenarnya dengan tingkat kesalahan tidak terlalu besar.

Dari gambar dibawah memperlihatkan bahwa pada jumlah elemen sebanyak 25200 elemen, sudah tidak ada lagi perubahan nilai yang signifikan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pengambilan jumlah elemen minimal, sudah menghasilkan nilai yang paling baik.



Gambar 3. Konvergensi Mesh terhadap Tegangan Sisa.

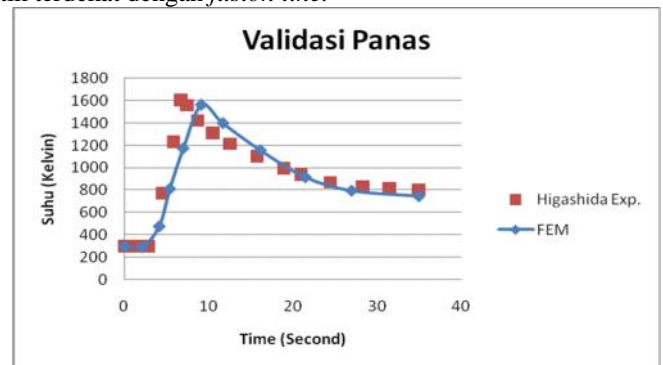
B. Validasi

Dalam sebuah penelitian yang berbasis pendekatan numerik, dalam hal ini metode elemen hingga, validasi merupakan hal penting yang harus dilakukan. Validasi harus dilakukan untuk memeriksa hasil yang didapat dari proses *solving*, dan telah menyerupai nilai yang dihasilkan dari pengujian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Validasi ini juga digunakan untuk menjamin hasil dari pendekatan numerik. Sehingga hasil yang diperoleh dapat dipertanggung jawabkan, meskipun hanya dengan metode numerik.

Hasil dari analisa struktur yang akan divalidasi dengan hasil pengujian dari peneliti sebelumnya [4] adalah nilai tegangan sisa serarah longitudinal sumbu Z setelah pengelasan berlangsung. Hasil pemodelan dianggap telah mendekati benar apabila grafik atau kurva yang dihasilkan dari pemodelan memiliki kecenderungan bentuk yang sama, dan nilai yang dihasilkan memiliki kecenderungan error yang kecil. Demikian juga apabila nilainya tidak terlalu jauh perbedaannya, makasudah bias dianggap benar.

1) Validasi Thermal

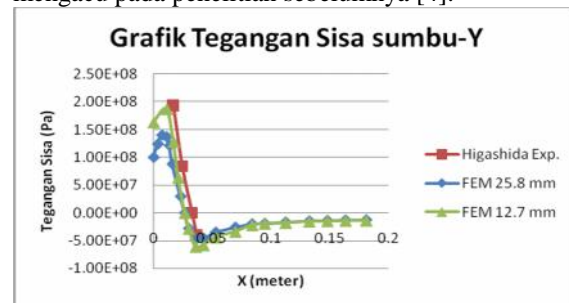
Untuk memastikan temperatur yang dimodelkan menggunakan metode elemen hingga, perlu dilakukan validasi nilai panas material melalui titik yang sama dengan pengujian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya [4], yaitu titik terdekat dengan *fusion line*.



Gambar 4. Validasi Panas dari Metode Elemen Hingga dan Pengujian dari peneliti sebelumnya [4].

2) Validasi Struktural

Untuk validasi hasil analisa struktural digunakan kurva tegangan sisa yang terjadi setelah proses pengelasan yang mengacu pada penelitian sebelumnya [4].



Gambar 5. Validasi Struktural dari Metode Elemen Hingga dan Pengujian dari peneliti sebelumnya [4].

Kurva tegangan yang dijadikan validasi adalah kurva tegangan sisa secara longitudinal atau searah dengan arah kampuh las. namun dari penelitian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya, memiliki beberapa kekurangan yaitu hanya menampilkan 3 titik saja dalam grafik tegangan sisa.

Maka dari itu untuk menyesuaikan kontur, digunakan analisa peneliti yang menggunakan metode yang sama dengan penulis, namun dengan *software* yang berbeda.

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

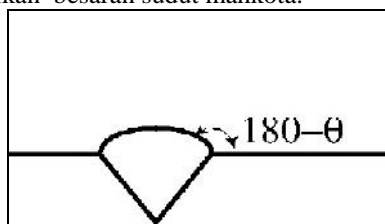
Setelah dilakukan proses pemodelan dan pembebanan, proses berikutnya adalah pembacaan hasil dan perbandingan hasil. Material yang digunakan memiliki tebal 12.7 milimeter. Hasil yang akan dianalisa dalam penelitian ini adalah tegangan sisa total dan deformasi total yang dihasilkan material yang telah mengalami proses pendinginan setelah pengelasan. Dalam penelitian ini, obyek variasi yang akan dianalisa adalah besaran sudut mahkota, sudut alur, dan radius kaki mahkota material seperti yang tertera pada tabel 1 dibawah ini :

Tabel 1. Variasi Pengelasan yang Dimodelkan

| Varian | Flank Angle | Preparation Angle | Toe Radius |
|--------|-------------|-------------------|------------|
| I | 20° | 20° | 0 |
| II | 20° | | |
| III | 20° | | |
| IV | 20° | 20° | 0 |
| V | | 20° | |
| VI | | 20° | |
| VII | 20° | 20° | 0.8 mm |
| VIII | | | 1.2 mm |
| IX | | | 2.5 mm |

A. Variasi Sudut mahkota (Varian I – III)

Sudut mahkota merupakan sudut yang dibentuk oleh material induk dan mahkota las. Besaran sudut yang akan divariasikan adalah 20°, 40°, dan 60° kemudian besaran sudut alur tetap pada nilai 60° serta tidak memiliki radius kaki mahkota. Pemilihan penetapan sudut alur sebesar 60° berdasarkan pada aplikasi di lapangan. Dalam aplikasinya setiap sambungan las harus disertai dengan *WPS (Welding Procedures Specification)* yang mengacu pada rules dari material pelat yang dipakai [8]. Gambar dibawah ini akan mendeskripsikan besaran sudut mahkota.



Gambar 6. Sudut mahkota.

Tabel 2. Perbandingan Hasil dari Variasi Sudut Mahkota

| No. | Hasil Analisa | Flank Angle | | |
|-----|------------------------------|-------------|----------|----------|
| | | 20° | 40° | 60° |
| 1 | Tegangan Sisa | | | |
| | Tegangan Sisa Maksimal (Mpa) | 189 | 190 | 211 |
| 2 | Deformasi | | | |
| | Deformasi Total | 7.72E-05 | 7.75E-05 | 8.61E-05 |

Dari perbandingan diatas dapat disimpulkan bahwa, semakin besar sudut mahkota, maka semakin besar tegangan sisa dan deformasi yang dihasilkan. Hal ini dapat dimengerti dikarenakan pada sudut terbesar, memiliki luas melintang material lasan yang lebih besar. Sehingga deposit material lasan yang dihasilkan jumlahnya lebih besar. Dengan demikian, masukan panas yang diterima material induk sebagai beban thermal akan semakin besar pula beban yang

diterima, sehingga mempercepat dan memperbesar terjadinya pemuaiian yang dapat menyebabkan terjadinya tegangan.



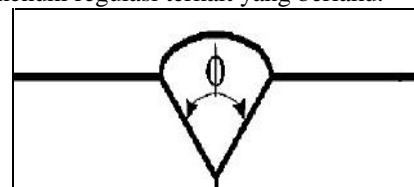
Gambar 9. Deformasi Total pada Variasi Sudut Mahkota.



Gambar 10. Tegangan Sisa pada Variasi Sudut Mahkota.

B. Variasi Sudut alur (Varian IV – VI)

Sudut alur merupakan sudut yang dibentuk oleh dua material induk, sudut alur ini juga lazim disebut juga sudut bevel, seperti yang dijelaskan pada gambar dibawah ini. Variasi dilakukan pada besaran sudut alur, yaitu sebesar 40°, 50°, dan 60°. Sehingga terdapat dua variable yang tidak divariasikan (fixed), yaitu sudut mahkota sebesar 20°, dan tidak ada radius kaki mahkota. Pemilihan sudut mahkota sebesar 20° sebagai fixed variable, karena besaran sudut ini menghasilkan keunggulan pada variasi pengelasan sebelumnya, yaitu menghasilkan deformasi dan tegangan sisa yang paling kecil dibanding besaran sudut yang lain. Selain itu pemilihan besaran sudut ini juga mengacu pada standart yang direkomendasikan [1], yang mengatur bahwa sudut sudut mahkota tidak boleh kurang dari sama dengan 60°. Sehingga pemilihan sudut 20° sebagai fixed variable, telah memenuhi regulasi terkait yang berlaku.

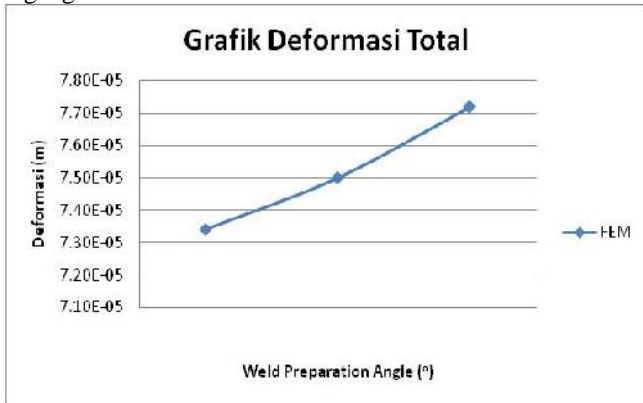


Gambar 11. Sudut alur.

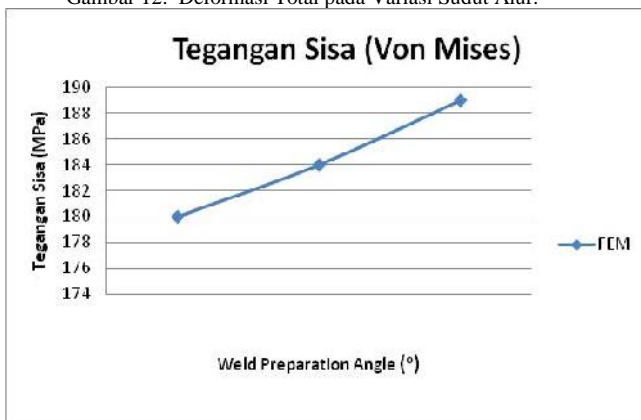
Tabel 3. Perbandingan Hasil dari Variasi Sudut Alur.

| No. | Hasil Analisa | Weld Preparation Angle | | |
|-----|------------------------------|------------------------|----------|----------|
| | | 40° | 50° | 60° |
| 1 | Tegangan Sisa | | | |
| | Tegangan Sisa Maksimal (Mpa) | 180 | 184 | 189 |
| 2 | Deformasi | | | |
| | Deformasi Total | 7.34E-05 | 7.50E-05 | 7.72E-05 |

Dari perbandingan diatas dapat disimpulkan bahwa, semakin besar sudut alur, maka semakin besar tegangan sisa dan deformasi yang dihasilkan. Hal ini dapat dimengerti dikarenakan pada sudut terbesar, memiliki luas melintang material lasan yang lebih besar. Sehingga deposit material lasan yang dihasilkan jumlahnya lebih besar. Dengan demikian, masukan panas yang diterima material induk sebagai beban thermal akan semakin besar pula beban yang diterima, sehingga mempercepat dan memperbesar terjadinya pemuaihan yang dapat menyebabkan terjadinya tegangan.



Gambar 12. Deformasi Total pada Variasi Sudut Alur.

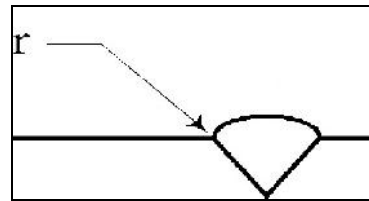


Gambar 13. Tegangan Sisa pada Variasi Sudut Alur.

C. Variasi Radius Kaki Mahkota (Varian VII – IX)

Radius kaki mahkota merupakan radius yang dibentuk oleh mahkota las. Radius ini terletak pada mahkota las yang dekat pada HAZ, seperti yang dijelaskan pada gambar 5.21. Semakin besar radius kaki mahkota, maka akan semakin landai sudut yang dibentuk oleh mahkota las, namun besaran radius ini berbeda dengan sudut mahkota. Besaran radius yang akan divariasikan adalah 0.8; 1.2; 2.5 milimeter. Dalam pemodelan ini juga terdapat variabel-variabel yang tetap nilainya. Misalnya sudut mahkota sebesar 40o dan sudut alur sebesar 60°. Pemilihan besaran sudut mahkota kali ini tidak didasarkan regulasi yang ada, namun yang menjadi perhatian adalah ketinggian dari mahkota las yang direkomendasikan [1], untuk kurang dari sama dengan 6 milimeter diukur dari material induk terdekat. Selain itu yang harus diperhatikan adalah pemodelan yg dilakukan menggunakan metode elemen hingga. Pada sudut mahkota 20°, akan menghasilkan sudut yang cukup tajam pada mahkota las, sehingga sudut ini tidak dapat digunakan karena bertolak belakang dengan aplikasi dilapangan apabila ditinjau dari smoothness model mahkota las. Lalu pada variasi sudut mahkota sebesar 40° dan 60°, setelah dilakukan pemodelan kedua tersebut menunjukkan kehalusan model yang diharapkan. Namun pada

saat pembagian elemen menggunakan software, ditemukan *warning*, dikarenakan sudut pada elemen terbagi, sangat kecil sehingga tidak dapat dilakukan *solving*. Sehingga pemilihan sudut 40°, merupakan sudut optimal yang bias dilakukan dalam pemodelan itu. Selain itu sudut ini telah memenuhi regulasi terkait. Kemudian, untuk pemilihan sudut alur sebesar 60°, telah dijelaskan pada penjelasan sebelumnya.



Gambar 14. Radius kaki mahkota.

Tabel 4. Perbandingan Hasil dari Variasi Radius Kaki Mahkota.

| No. | Hasil Analisa | Toe Radius | | |
|-----|------------------------------|------------|----------|----------|
| | | 0,8 mm | 1,2 mm | 2,5 mm |
| 1 | Tegangan Sisa | | | |
| | Tegangan Sisa Maksimal (Mpa) | 189 | 188 | 186 |
| 2 | Deformasi | | | |
| | Deformasi Total | 7.87E-05 | 7.84E-05 | 7.74E-05 |

Dari perbandingan diatas dapat disimpulkan bahwa, semakin kecil radius kaki mahkota, maka semakin besar tegangan sisa dan deformasi yang dihasilkan. Hal ini dapat dimengerti dikarenakan pada radius terkecil, memiliki luas melintang material lasan yang lebih besar. Sehingga deposit material lasan yang dihasilkan jumlahnya lebih besar. Dengan demikian, masukan panas yang diterima material induk sebagai beban thermal akan semakin besar pula beban yang diterima, sehingga mempercepat dan memperbesar terjadinya pemuaihan.



Gambar 15. Tegangan Sisa pada Variasi Radius Kaki Mahkota.



Gambar 16. Tegangan Sisa pada Variasi Radius Kaki Mahkota.

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

Sebagai penutup pada bab ini akan diuraikan beberapa

kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan analisa dari hasil percobaan dan pemodelan pengelasan sambungan pelat datar dengan kampuh V ganda dengan variasi sudut mahkota, sudut alur, dan radius kaki mahkota yang terbaik yaitu yang menghasilkan deformasi dan tegangan sisa terkecil. Dalam bab ini juga akan disampaikan beberapa saran yang bisa dibahas sebagai kelanjutan dari penelitian ini.

A. Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil pemodelan pengelasan pada pipa yang menembus pelat dan dari hasil analisa yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Semakin besar sudut yang dapat menambah luasan material lasan, maka semakin besar pula deformasi dan tegangan sisa yang terbentuk, karena akan memiliki deposit material lasan yang jumlahnya lebih besar, sehingga panas yang dapat menyebabkan material memuai, akan semakin besar pula.
- Pada variasi sudut mahkota, dengan sudut alur dan radius kaki mahkota sebagai *fixed variable*, sudut mahkota sebesar 20° (varian I) menghasilkan tegangan sisa dan deformasi terkecil.
- Pada variasi sudut alur, dengan sudut mahkota dan radius kaki mahkota sebagai *fixed variable*, sudut alur sebesar 40° (varian IV) menghasilkan tegangan sisa dan deformasi terkecil.
- Pada variasi radius kaki mahkota, dengan sudut alur dan sudut mahkota sebagai *fixed variable*, radius kaki mahkota sebesar 2,5 milimeter (varian IX) menghasilkan tegangan sisa dan deformasi terkecil.

B. Saran

Karena terdapat banyaknya kekurangan dalam Penelitian ini, maka penulis memberikan beberapa saran untuk perbaikan pada penelitian selanjutnya, yaitu :

- Untuk mendapatkan hasil deformasi dan tegangan sisa yang lebih kecil, disarankan untuk dilakukan *preheating* dan *post weld heat treatment* pada material.
- Melengkapi parameter-parameter dalam proses pembebanan pada metode elemen hingga seperti *enthalpy* dan *emissivity*, akan memberikan hasil analisa yang lebih akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Direktorat Pendidikan Tinggi, dan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya yang telah mendukung penuh hingga jurnal ini dapat terselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IACS no.47 for *Shipbuilding and Repair Quality Standard*. IACS Standard (1996).
- [2] Firmanda, Topan, "Analisa Perilaku Tegangan Sisa dan Perubahan Sudut Distorsi pada Sambungan Tumpul dengan Variasi Tebal Pelat Menggunakan Metode Elemen Hingga". Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember (2007).
- [3] Teng, Tso-Liang, Fung, Chin-Ping, dan Peng, Hsiang-Chang, "Effect of Weld Geometry and Residual Stress on Fatigue Butt Weld." *International Journal of Pressure Vessel and Piping* (2002).
- [4] Higashida, Y., Burk, J.D., dan Lawrence, F.V., "Starin Controlled Fatigue Behaviour of ASTM A36 and A514 grade F steels and 5083-0 Aluminium Weld Materials," (1978).
- [5] Astamar, Z., "Mekanika Teknik Edisi Kedua." New York: Erlangga (1995).

- [6] L.L. Daryl, "A First Course in the Finite Element Method". Boston : PWS Publishing Company (1993)
- [7] Soemarto, W., "Teknologi Pengelasan Logam," Jakarta; Pradnya Paramitha (1996).
- [8] AWS D.1.1. *Structural Welding Code – Steel*. American Welding Society (2010).