

THE HEAT TRANSFER FLOW ANALYSIS OF THE JIS G 3106 SM520B STEEL PLATE CUTTING PROCESS USING CNC FLAME CUTTING MACHINE IN THE MANUFACTURE OF THE BOTTOM PLATE BOX GIRDER (CASE STUDY IN PT. BUKAKA TEKNIK UTAMA, BOGOR REGENCY, WEST JAVA PROVINCE, INDONESIA)

**Angky Puspawan[I], Febriansyah[II], Agus Suandi[III], A. Sofwan F.A.[IV],
Nurul Iman Supardi[V]**
[1][II][III][IV][V] Program Studi Teknik Mesin Universitas Bengkulu

Jl. W.R. Supratman Kandang Limun, Telp: (0736) 344087, 22105 - 227Bengkulu
Email: apuspawan@unib.ac.id, angkypuspawan@yahoo.com

ABSTRACT

PT. Bukaka Teknik Utama uses CNC flame cutting technology to produce steel bridge material with the principle of thermal cutting which will cause the phenomenon of heat transfer and heat affected areas. By using the inverse method to determine the application of heat on the SM520B steel plate. The JIS G3106 SM520B steel plate is formed from a Heat Affected Area (HAZ). This happens because of differences in cutting temperature and the temperature of the Steel Plate. The analysis results obtained from conformity with the Box Girder design. In the Box Girder design, the active load is given a distance of 60 mm from the heat- area affected so as not to fatigue.

Keywords: *CNC flame cutting machine, heat transfer phenomenon, Heat Affected Zone (HAZ)*

I. PENDAHULUAN

Pada kegiatan usaha unit *steel bridge* (jembatan baja) memiliki 7 jenis konstruksi, yaitu *steel truss bridge, composite girder bridge, box girder bridge, arch steel bridge, suspension bridge, panel bridge* dan *girder multi span*. PT Bukaka Teknik Utama menggunakan jenis konstruksi *box girder bridge* pada pembangunan proyek jalan tol layang Jakarta-Cikampek.

Pada proyek jalan tol Jakarta-Cikampek, *box girder bridge* terdiri dari 4 bentangan dan tiap bentangan memiliki 5 *box girder*. Komponen utama dari *box girder bridge* terdiri dari *bottom plate, brace angle, filler plate, splice plate*, dan *t-shape*. Untuk memproduksi komponen tersebut dilakukan beberapa proses yaitu *design, procurement, incoming material, cutting, preheat, welding, drilling, galvanize* dan *assembly*. Pada proses *cutting*, PT Bukaka Teknik Utama menggunakan teknologi *CNC Flame Cutting*.

CNC Flame Cutting ini menggunakan prinsip pemotongan dengan panas (*thermal cutting*) untuk memotong plat baja. Panas yang dihasilkan merupakan pembakaran dari reaksi oksigen dan *acetyline* yang diberikan tekanan. Menggunakan prinsip pemotongan dengan panas (*thermal cutting*) akan menimbulkan fenomena perpindahan panas (*heat transfer*

phenomenon) dan daerah yang terdampak panas (*heat affected zone*)^[4].

Pada penelitian ini menganalisa fenomena perpindahan panas (*heat transfer phenomenon*) dan daerah yang terdampak panas (*heat affected zone*) yang terjadi pada plat baja *JIS G3106 SM520B* sebagai material utama pembuatan *bottom plate* selama proses pemotongan dengan menggunakan *CNC Flame Cutting* dan hasil analisa disesuaikan pada desain *box girder bridge*.

II. LANDASAN TEORI

2.1 Definisi Perpindahan Panas

Dari ilmu termodinamika, dipelajari bahwa energi dapat ditransfer oleh interaksi antara sistem dan sekitarnya. Interaksi ini termasuk transfer energi dengan panas dan kerja, serta transfer energi yang terkait dengan aliran massa. Termodinamika berhubungan dengan keadaan akhir dari proses di mana interaksi terjadi, dan juga dengan jumlah bersih transfer energi oleh panas dan kerja untuk proses^[2].

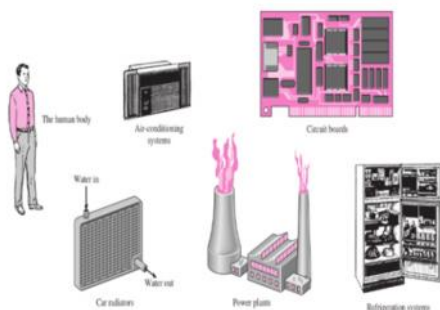
Panas merupakan bentuk energi yang dapat ditransfer dari satu sistem ke sistem lain sebagai akibat dari perbedaan temperatur. Ilmu yang berkaitan dengan penentuan tingkat transfer energi tersebut adalah perpindahan panas^[1]. Kebutuhan dasar untuk perpindahan panas adalah adanya perbedaan temperatur. Tidak ada

transfer panas bersih antara dua medium yang berada pada temperatur yang sama.

Perbedaan temperatur adalah kekuatan pendorong untuk perpindahan panas, sama seperti perbedaan tegangan adalah kekuatan pendorong untuk aliran arus listrik dan perbedaan tekanan adalah kekuatan pendorong untuk aliran fluida. Tingkat perpindahan panas dalam arah tertentu tergantung pada besarnya gradien (perbedaan temperatur per satuan panjang atau laju perubahan temperatur) ke arah itu. Semakin besar gradien, semakin tinggi tingkat perpindahan panas.

2.1.1 Aplikasi Perpindahan Panas

Perpindahan panas umumnya ditemui dalam sistem rekayasa dan aspek lain dari kehidupan. Tubuh manusia secara konstan menolak panas ke sekelilingnya, dan kenyamanan manusia terkait erat dengan tingkat penolakan panas ini. Banyak peralatan rumah tangga biasa dirancang, secara keseluruhan atau sebagian, dengan menggunakan prinsip-prinsip perpindahan panas. Contoh sistem pemanas dan pendingin udara, kulkas dan freezer, pemanas air, setrika, dan komputer. Rumah hemat energi dirancang atas dasar meminimalkan kehilangan panas di musim dingin dan peningkatan panas di musim panas. Perpindahan panas memainkan peran utama dalam desain banyak perangkat lain, seperti radiator mobil, kolektor surya, berbagai komponen pembangkit listrik, dan bahkan pesawat ruang angkasa. Ketebalan isolasi optimal di dinding dan atap rumah, pada pipa air panas atau uap, atau pada pemanas air sekali lagi ditentukan berdasarkan analisis perpindahan panas dengan pertimbangan ekonomi. Aplikasi perpindahan panas dapat dilihat pada Gambar 1^[1].



Gambar 1. Aplikasi Perpindahan Panas^[1,2,3,4].

2.1.2 Mekanisme Perpindahan Panas

Secara umum ilmu perpindahan panas terbagi atas tiga mekanisme dasar yaitu:

1. Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas yang terjadi dari benda bertemperatur tinggi ke benda bertemperatur rendah pada medium tetap^[1,2,3,4,5].

$$q_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

dimana:

q = Laju perpindahan panas (W)

K = Konduktivitas termal bahan ($W/m \cdot ^\circ C$)

A = Luas penampang perpindahan panas (m^2)

dT = Perbedaan temperatur melewati bahan ($^\circ C$)

dx = Tebal bahan (m)

$\square$ = Tanda negatif menunjukkan arah perpindahan temperatur tinggi ke temperatur rendah

2. Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas terjadi antara permukaan benda padat dan fluida (cair atau gas) yang bergerak disekelilingnya^[1,2,3,4,5].

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_\infty - T_w) \quad (2)$$

dimana:

q_{conv} = Laju perpindahan panas konveksi (W)

h = Koefisien perpindahan panas ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A = Luas penampang perpindahan panas (m^2)

T_∞ = Temperatur sekeliling ($^\circ C$)

T_w = Temperatur dinding ($^\circ C$)

3. Perpindahan Panas Radiasi

Perpindahan panas oleh perjalanan foton yang tak terorganisasi. Setiap benda terus menerus memancarkan foton secara serampangan didalam arah, waktu, dan energi neto yang dipindahkan oleh foton tersebut, diperhitungkan sebagai panas^[1,2,3,4,6].

$$q = \alpha \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

dimana:

q = Laju perpindahan panas (W)

α = Konstanta Josef Stefan-Ludwig Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$

A = Luas penampang perpindahan panas (m^2)

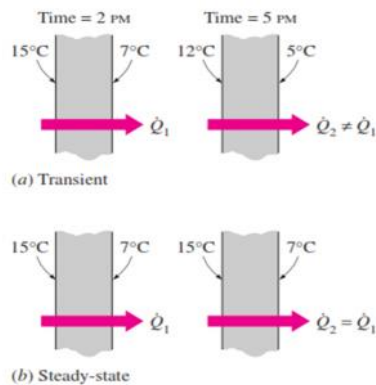
T_1, T_2 = Temperatur permukaan titik 1 dan titik 2 ($^\circ C$)

2.2 Perpindahan Konduksi

Ketika gradien temperatur ada dalam media stasioner, berupa padatan atau fluida, konduksi merupakan istilah untuk merujuk pada transfer panas yang terjadi di seluruh medium itu. Mekanisme fisik konduksi melibatkan konsep-konsep aktivitas atom dan molekuler, yang menopang transfer energi dari partikel-partikel yang lebih energik ke partikel yang kurang energik karena interaksi antar partikel^[1,2,3,4].

2.2.1 Perpindahan Panas Konduksi Steady State vs Transient

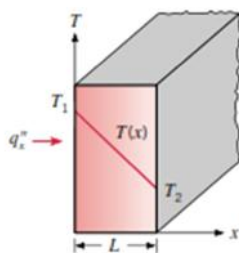
Masalah perpindahan panas dapat diklasifikasikan sebagai stabil (*steady state*) atau sementara (*transient* atau *unsteady*). Istilah *steady state* menyiratkan tidak ada perubahan dengan waktu pada setiap titik di dalam medium, sementara *transient* menyiratkan variasi dengan ketergantungan terhadap waktu. Oleh karena itu, temperatur atau fluks panas tetap tidak berubah dengan waktu selama perpindahan panas yang stabil melalui suatu medium di lokasi manapun, walaupun kedua kuantitas dapat bervariasi dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Perpindahan panas konduksi *steady state* vs *transient* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. *Steady State vs Transient*^[1,2,3].

A. Steady State Heat Transfer Satu Dimensi

Untuk konduksi panas, persamaan laju sebagai hukum *Fourier*. Untuk bidang dinding satu dimensi ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. *Perpindahan Panas Konduksi 1D*^[1,2,3].

memiliki distribusi temperatur $T(x)$, persamaan laju dinyatakan:

$$q = -k \cdot A \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Konstanta proporsionalitas k adalah properti transportasi yang dikenal sebagai konduktivitas termal bahan ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$), dan merupakan karakteristik dari bahan dinding. Tanda minus adalah konsekuensi dari fakta bahwa panas ditransfer ke arah penurunan temperatur.

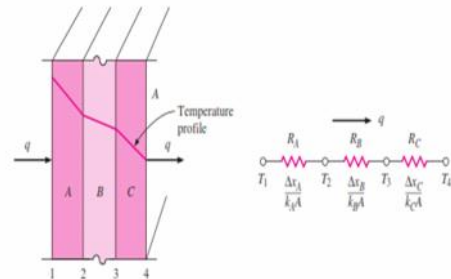
Ketika konduktivitas termal dianggap konstan, ketebalan dinding adalah dx , dan T_1 dan T_2 adalah temperatur dinding. Jika konduktivitas termal bervariasi dengan temperatur sesuai dengan beberapa hubungan linear $k = k_0 (1 + \beta T)$ persamaan yang dihasilkan untuk aliran panas adalah:

$$q = -\frac{k_0 A}{dx} \left[(T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2} (T_2^2 - T_1^2) \right] \quad (5)$$

Jika lebih dari satu material, seperti pada dinding *multilayer* yang ditunjukkan pada Gambar 4, analisis akan berjalan sebagai berikut: gradien temperatur pada ketiga material ditunjukkan, dan aliran panas dapat ditulis.

$$q = -k_A A \frac{T_2 - T_1}{dx} = -k_B A \frac{T_3 - T_2}{dx} = -k_C A \frac{T_4 - T_3}{dx} \quad (6)$$

Perhatikan bahwa aliran panas harus sama melalui semua bagian^[3].



Gambar 4. *Perpindahan Panas 1D Melalui Dinding Komposit dan Analog Listriknya*^[1,2,3].

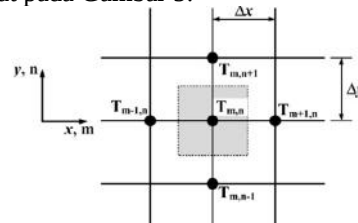
B. Steady State Heat Transfer Dua Dimensi

Persamaan umum untuk perpindahan panas konduksi 2-D yang tidak terdapat sumber panas dari dalam, sementara nilai konduktivitas termalnya konstan adalah berlaku persamaan *Laplace*^[6]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

a. Kasus Perpindahan Panas Konduksi 2 Dimensi untuk Node Bagian Dalam.

Untuk node bagian dalam dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. *MEH Node Bagian Dalam Pada arah x,*

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\bigg|_{m,n} &= \frac{\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{m+1/2,n} - \frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{m-1/2,n}}{\Delta x} \\ &= \frac{\frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} - \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x}}{\Delta x} \\ &= \frac{T_{m+1,n} - 2T_{m,n} + T_{m-1,n}}{(\Delta x)^2}\end{aligned}\quad (8)$$

Dengan cara yang sama pada arah y, diperoleh:

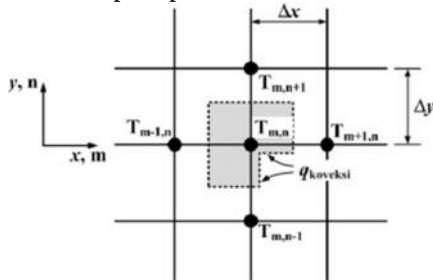
$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\bigg|_{m,n} = \frac{T_{m,n+1} - 2T_{m,n} + T_{m,n-1}}{(\Delta y)^2}\quad (9)$$

Dengan mengasumsikan bahwa $\Delta x = \Delta y$, dan substitusikan persamaan (2) dan (3) ke persamaan (1), maka diperoleh:

$$T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 4T_{m,n} = 0\quad (10)$$

- b. Kasus Perpindahan Panas Konduksi 2 Dimensi untuk Node Bagian Dalam dengan Batas Konveksi.

Untuk node bagian dalam berbatasan dengan aliran perpindahan panas konveksi, seperti pada Gambar 6.



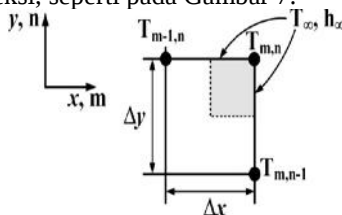
Gambar 6. MEH Node Bagian Dalam dengan Batas Konveksi

Maka persamaan untuk kasus ini:

$$\begin{aligned}2(T_{m-1,n} + T_{m,n+1}) + (T_{m+1,n} + T_{m,n-1}) + 2\frac{h\Delta x}{k}T_c \\ - 2\left(3 + \frac{h\Delta x}{k}\right)T_{m,n} = 0\end{aligned}\quad (11)$$

- c. Kasus Perpindahan Panas Konduksi 2 Dimensi untuk Node Bagian Luar dengan Batas Konveksi.

Untuk sudut node bagian luar berbatasan dengan aliran perpindahan panas konveksi, seperti pada Gambar 7.



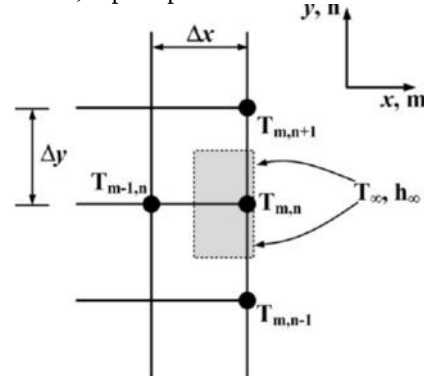
Gambar 7. MEH Node Bagian Luar dengan Batas Konveksi

Maka persamaan untuk kasus ini:

$$(T_{m,n-1} + T_{m-1,n}) + 2\frac{h\Delta x}{k}T_{\infty} - 2\left(\frac{h\Delta x}{k} + 1\right)T_{m,n} = 0\quad (12)$$

- d. Kasus Perpindahan Panas Konduksi 2 Dimensi untuk Node pada Permukaan Batas Konveksi.

Untuk node pada permukaan berbatasan dengan aliran perpindahan panas konveksi, seperti pada Gambar 8.



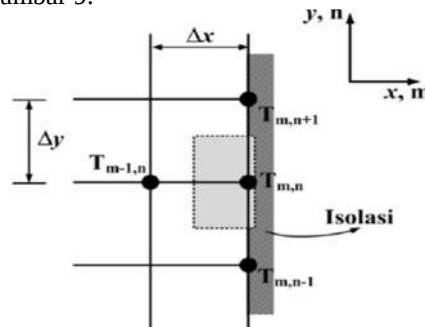
Gambar 8. MEH Node pada Permukaan Batas Konveksi

Maka persamaan untuk kasus ini:

$$\begin{aligned}(2T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) + 2\frac{h\Delta x}{k}T_{\infty} \\ - 2\left(\frac{h\Delta x}{k} + 2\right)T_{m,n} = 0\end{aligned}\quad (13)$$

- e. Kasus Perpindahan Panas Konduksi 2 Dimensi untuk Node Batas Isolasi.

Untuk node pada permukaan berbatasan dengan isolasi, seperti pada Gambar 9.



Gambar 9. MEH Node Batas Isolasi

Maka persamaan untuk kasus ini:

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m,n+1} + 2T_{m-1,n} - 4T_{m,n} = 0\quad (14)$$

2.3 Metode Elemen Hingga (MEH)

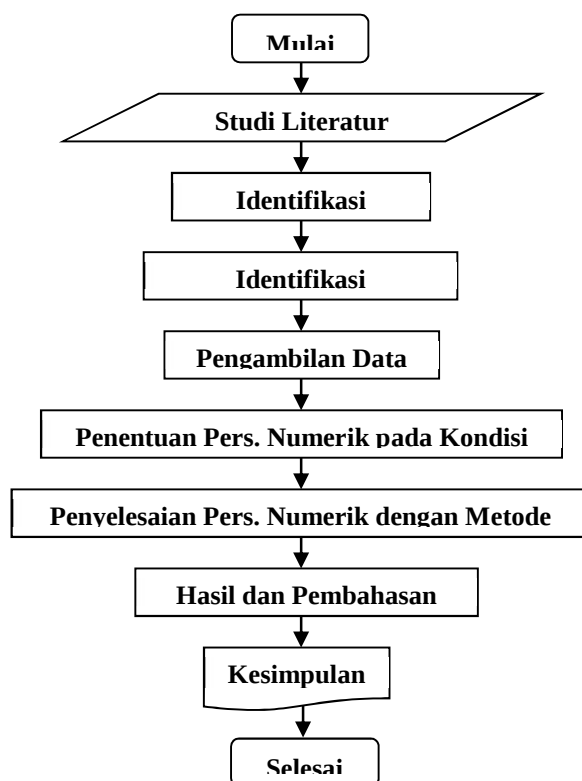
Metode Elemen Hingga (MEH) awalnya dikembangkan untuk industri pesawat terbang pada tahun 1950-an oleh Boeing dan Bell Aerospace. Artikel jurnal pertama tentang metode ini ditulis oleh Turner, et al. Tulisan ini menjabarkan bagaimana formulasi elemen ditemukan dan elemental matriks dibentuk. Pada saat itu

mereka belum menggunakan istilah *Finite Element Method (FEM)*. Istilah Metode Elemen Hingga (MEH) pertama kali digunakan oleh *Clough* pada tahun 1960 lewat tulisannya mengenai elastisitas. Seiring dengan perkembangan perangkat komputer maka permasalahan yang dapat dipecahkan semakin bervariasi dan berbagai program komputer ditulis. Hal ini diikuti dengan berkembangnya beberapa program komersial MEH, seperti *NASTRAN* yang dikembangkan oleh *NASA* pada tahun 1965, *ANSYS* yang dibuat oleh *John Swanson* dan dikomersialkan pada tahun 1969, *ABAQUS* pada tahun 1978 yang dibuat khusus untuk problem nonlinear, dan *LS-DYNA* yang khusus untuk non-linear problem oleh *John Hallquist* di *Livermore National Laboratory* [6].

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Diagram penelitian ini seperti Gambar 10.



Gambar 10. Diagram Alir Peneliti

3.2 Data

Data penelitian dibagi menjadi dua tipe, yaitu:

3.2.1 Data Spesifikasi Alat, Bahan & Property

Data spesifikasi alat, bahan & *Property* pada Tabel 1, 2, dan 3.

Tabel 1. Data Spesifikasi *CNC Flame Cutting* (*Globe Heat Treatment Service Ltd*)^[5]

Parameter	Besaran
Type of Machine	CNCSG-8000
Cutting Size	6000x25000 mm
Cutting Thickness	60-120 mm
Series Number	17052906
Power	220 V 50 Hz
Total Power	15 kW
Manufacture Date	2017.5

Alat *CNC Flaming Cutting* seperti pada Gambar 11.



Gambar 11. Alat *CNC Flame Cutting*

Bahan atau material yang digunakan adalah plat baja *JIS G3106 Grade SM520B* dengan dimensi tebal 30-40 mm. Plat baja ini standar *JIS* pada divisi *Ferrous Materials and Metallurgy*, berada pada kelas *rolled steels for welded structure* dan memiliki kekuatan tarik 520 MPa serta merupakan jenis baja karbon rendah, seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Plat Baja *JIS G3106 Grade SM520B* tebal 30-40 mm

Tabel 2. Data Spesifikasi Bahan (Komposisi Kimia Plat Baja *JIS G3106 Grade SM520B*)^[5,10]

Parameter	Berat (%)
Ferro, Fe	97,5799-99,9999
Mangan, Mn	0,0-1,600
Silikon, Si	0,0-0,550
Carbon, C	0,0-0,200
Sulfur, S	0,0-0,035
Posfor, P	0,0-0,035

Tabel 3. Data Sifat Bahan (Property) Plat Baja JIS G3106 Grade SM520B)^[1,2,3,5]

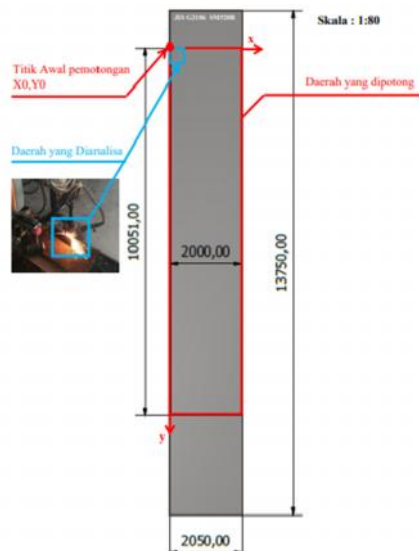
Parameter	Besaran
k	58 W/m $^{\circ}$ C
ρ	7,823 kg/m 3
C_p	0,457 kJ/kg $^{\circ}$ C (457 J/kg $^{\circ}$ C)

Tabel 4. Sifat Mekanis Plat Baja JIS G3106 Grade SM520B

Parameter	Besaran
Thickness	<16, >16-40, >40-75 mm
Yield Strength	365, 355, 335 MPa
Tensile Strength	490-520, 520-640, 520-640 MPa
Elongation	19, 15, 19 %

3.2.2 Proses Pemotongan (Aktual)

Area proses pemotongan plat baja JIS G3106 Grade SM520B seperti pada Gambar 13.



Gambar 13. Area Pemotongan Plat Baja

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

4.1.1 Data Hasil Proses Pemotongan

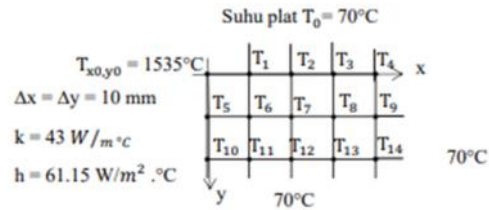
Adapun data yang diperoleh selama proses pemotongan berlangsung, dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Hasil Proses Pemotongan

Parameter	Besaran
Temperatur daerah pemotongan, saat preheat (T_0)	70 $^{\circ}$ C
Temperatur di Sumbu X_0, Y_0 , saat pemotongan (T_{x_0,y_0})	1535 $^{\circ}$ C
Move Speed (n)	7000 mm/min
Tebal Plat (t)	22 mm
Panjang Plat (p)	12 m
Lebar Plat (l)	2 m

4.1.2 Hasil Penentuan Persamaan Numerik

Mekanisme menentukan persamaan Numerik daerah analisa yang berukuran 40 mmx20 mm dapat dilihat pada Gambar 14. Diketahui:



Gambar 14. Penentuan Persamaan Numerik

4.1.3 Perhitungan

a. Menghitung Node Bagian Dalam

Menentukan persamaan $T_1, T_2, T_3, T_4, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}$. Dengan menggunakan persamaan (2.10) didapat persamaan tiap node sebagai berikut:

- Node 1

$$T_2 + 1535^{\circ}\text{C} + 70^{\circ}\text{C} + T_6 - 4T_1 = 0$$

$$-4T_1 + T_2 + T_6 = -1605$$
- Node 2

$$T_3 + T_1 + 70^{\circ}\text{C} + T_7 - 4T_2 = 0$$

$$T_1 - 4T_2 + T_3 + T_7 = -70$$
- Node 3

$$T_4 + T_2 + 70^{\circ}\text{C} + T_8 - 4T_3 = 0$$

$$T_2 - 4T_3 + T_4 + T_8 = -70$$
- Node 4

$$70^{\circ}\text{C} + T_3 + 70^{\circ}\text{C} + T_9 - 4T_4 = 0$$

$$T_3 - 4T_4 + T_9 = -140$$
- Node 6

$$T_7 + T_5 + T_1 + T_{11} - 4T_6 = 0$$

$$T_1 + T_5 - 4T_6 + T_7 + T_{11} = 0$$
- Node 7

$$T_6 + T_0 + T_2 + T_{12} - 4T_7 = 0$$

$$T_2 + T_6 - 4T_7 + T_8 + T_{12} = 0$$
- Node 8

$$T_7 + T_9 + T_3 + T_{13} - 4T_8 = 0$$

$$T_3 + T_7 - 4T_8 + T_9 + T_{13} = 0$$
- Node 9

$$70^{\circ}\text{C} + T_8 + T_{14} + T_4 - 4T_9 = 0$$

$$T_4 + T_8 - 4T_9 + T_{14} = -70$$
- Node 11

$$T_{10} + T_{12} + T_6 + 70^{\circ}\text{C} - 4T_{11} = 0$$

$$T_6 + T_{10} - 4T_{11} + T_{12} = -70$$

• Node 12

$$T_{11} + T_{13} + T_7 + 70^\circ\text{C} - 4 T_{12} = 0$$

$$T_7 + T_{11} - 4 T_{12} + T_{13} = -70$$

• Node 13

$$T_{12} + T_{14} + T_8 + 70^\circ\text{C} - 4 T_{13} = 0$$

$$T_8 + T_{12} - 4 T_{13} + T_{14} = -70$$

• Node 14

$$T_{13} + 70^\circ\text{C} + T_9 + 70^\circ\text{C} - 4 T_{14} = 0$$

$$T_9 + T_{13} - 4 T_{14} = -140$$

b. Node pada Permukaan dengan Batas Konveksi

Menentukan persamaan T_5 , T_{10} , dengan menggunakan persamaan (2.13) didapat persamaan sebagai berikut:

• Node 5

$$(2T_6 + 1535 + T_{10}) + 2 \left(\frac{61,15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C} \cdot (0,01\text{m})}{43 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}} \right) \times 35 - 2 \left(\frac{61,15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C} \cdot (0,01\text{m})}{43 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}} \right) + 2) T_5 = 0$$

$$(2 T_6 + T_{10} + 1535) + 0,995 - 4,028 T_5 = 0$$

$$2 T_6 + T_{10} + 1535,995 - 4,028 T_5 = 0$$

$$-4,028 T_5 + 2 T_6 + T_{10} = -1535,995$$

• Node 10

$$(2T_{11} + T_5 + 70) + 2 \left(\frac{61,15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C} \cdot (0,01\text{m})}{43 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}} \right) \times 35 - 2 \left(\frac{61,15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C} \cdot (0,01\text{m})}{43 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}} \right) + 2) T_{10} = 0$$

$$(2 T_{11} + T_5 + 70) + 0,995 - 4,028 T_{10} = 0$$

$$2 T_{11} + T_5 + 70,995 - 4,028 T_{10} = 0$$

$$T_5 - 4,028 T_{10} + 2 T_{11} = -70,995$$

c. Penyelesaian

Maka persamaan beda hingga dari semua node (node 1 sampai dengan node 14) adalah:

$$\begin{aligned} -4T_1 + T_2 + 0T_3 + 0T_4 + 0T_5 + T_6 + 0T_7 + 0T_8 + 0T_9 + 0T_{10} + 0T_{11} + 0T_{12} + 0T_{13} + 0T_{14} &= - \\ T_1 - 4T_2 + T_3 + 0T_4 + 0T_5 + 0T_6 + T_7 + 0T_8 + 0T_9 + 0T_{10} + 0T_{11} + 0T_{12} + 0T_{13} + 0T_{14} &= - \\ 0T_1 + T_2 - 4T_3 + T_4 + 0T_5 + 0T_6 + 0T_7 + T_8 + 0T_9 + 0T_{10} + 0T_{11} + 0T_{12} + 0T_{13} + 0T_{14} &= - \\ 0T_1 + 0T_2 + T_3 - 4T_4 + 0T_5 + 0T_6 + 0T_7 + 0T_8 + T_9 + 0T_{10} + 0T_{11} + 0T_{12} + 0T_{13} + 0T_{14} &= - \\ 0T_1 + 0T_2 + 0T_3 + 0T_4 + -4,028T_5 + 2T_6 + 0T_7 + 0T_8 + 0T_9 + T_{10} + 0T_{11} + 0T_{12} + 0T_{13} + 0T_{14} &= - \\ T_1 + 0T_2 + 0T_3 + 0T_4 + T_5 - 4T_6 + T_7 + 0T_8 + 0T_9 + 0T_{10} + T_{11} + 0T_{12} + 0T_{13} + 0T_{14} &= - \\ 0T_1 + T_2 + 0T_3 + 0T_4 + 0T_5 + T_6 - 4T_7 + T_8 + 0T_9 + 0T_{10} + 0T_{11} + T_{12} + 0T_{13} + 0T_{14} &= - \\ 0T_1 + 0T_2 + T_3 + 0T_4 + 0T_5 + 0T_6 + T_7 - 4T_8 + T_9 + 0T_{10} + 0T_{11} + 0T_{12} + T_{13} + 0T_{14} &= - \\ 0T_1 + 0T_2 + 0T_3 + T_4 + 0T_5 + 0T_6 + 0T_7 + T_8 - 4T_9 + 0T_{10} + 0T_{11} + 0T_{12} + 0T_{13} + T_{14} &= - \\ 0T_1 + 0T_2 + 0T_3 + 0T_4 + T_5 + 0T_6 + 0T_7 + 0T_8 + 0T_9 - 4,028T_{10} + 2T_{11} + 0T_{12} + 0T_{13} + 0T_{14} &= - \\ 0T_1 + 0T_2 + 0T_3 + 0T_4 + 0T_5 + T_6 + 0T_7 + 0T_8 + 0T_9 + T_{10} - 4T_{11} + T_{12} + 0T_{13} + 0T_{14} &= - \\ 0T_1 + 0T_2 + 0T_3 + 0T_4 + 0T_5 + 0T_6 + T_7 + 0T_8 + 0T_9 + 0T_{10} + T_{11} - 4T_{12} + T_{13} + 0T_{14} &= - \\ 0T_1 + 0T_2 + 0T_3 + 0T_4 + 0T_5 + 0T_6 + 0T_7 + T_8 + 0T_9 + 0T_{10} + 0T_{11} + T_{12} - 4T_{13} + T_{14} &= - \\ 0T_1 + 0T_2 + 0T_3 + 0T_4 + 0T_5 + 0T_6 + 0T_7 + 0T_8 + T_9 + 0T_{10} + 0T_{11} + 0T_{12} + T_{13} - 4T_{14} &= - \end{aligned}$$

Notasi matriksnya ialah

$$[A] \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \\ T_8 \\ T_9 \\ T_{10} \\ T_{11} \\ T_{12} \\ T_{13} \\ T_{14} \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} -1605 \\ -70 \\ -70 \\ -140 \\ -1535,995 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -70 \\ -70,995 \\ -70 \\ -70 \\ -70 \\ -140 \end{bmatrix}$$

Untuk menyelesaikan matriks, digunakan metode perkalian invers seperti berikut.

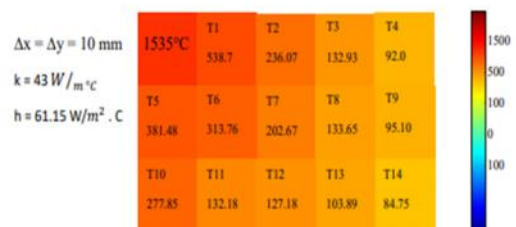
$$\{T\} = [A]^{-1} \{C\}$$

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \\ T_8 \\ T_9 \\ T_{10} \\ T_{11} \\ T_{12} \\ T_{13} \\ T_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4,028 & 2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1605 \\ -70 \\ -70 \\ -140 \\ -1535,995 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -70 \\ -70,995 \\ -70 \\ -70 \\ -70 \\ -140 \end{bmatrix}$$

Dengan aplikasi *ms. Excel* diperoleh:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \\ T_8 \\ T_9 \\ T_{10} \\ T_{11} \\ T_{12} \\ T_{13} \\ T_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 538.710735 \\ 236.079085 \\ 132.934985 \\ 92.0094265 \\ 381.489651 \\ 313.763856 \\ 202.67062 \\ 133.651429 \\ 95.102721 \\ 277.857146 \\ 132.18442 \\ 127.188108 \\ 103.897391 \\ 84.750028 \end{bmatrix}$$

Sehingga diperoleh gradien temperatur seperti pada Gambar 15.

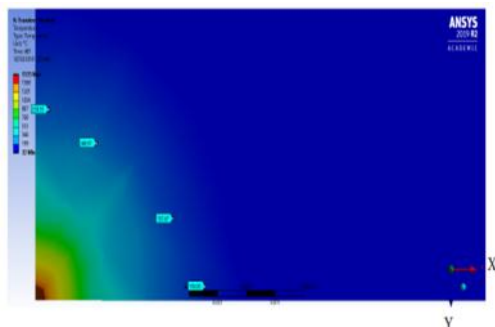


Gambar 15. Gradien Temperatur

4.2 Pembahasan

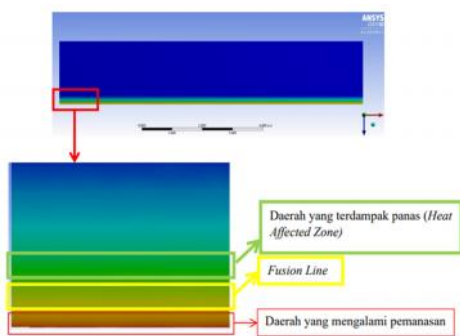
Dibawah ini merupakan Gambar 16 grafik hasil simulasi fenomena perpindahan

panas dan daerah yang mendapat dampak atau efek panas. Hal ini untuk mengetahui fenomena perpindahan panas dan daerah yang berdampak panas pada plat baja plat baja *JIS G3106 Grade SM520B* ketika proses pemotongan terjadi. Titik-titik pengukuran temperatur ketika proses pemotongan terjadi adalah menunjukkan fungsi gradien temperatur yang diwakilkan oleh warna.



Gambar 16. Hasil Simulasi Fenomena Perpindahan Panas dan Daerah Berdampak Panas

Agar dapat mengasumsikan daerah yang terdampak panas (*Heat Affected Zone*) dilakukanlah simulasi pada daerah plat baja *JIS G3106 Grade SM520B* sumbu X_0, Y_0 hingga $X10051, Y_0$ seperti dapat dilihat pada Gambar 17 dibawah ini.



Gambar 17. Hasil Simulasi Fenomena Perpindahan Panas dan Daerah Berdampak Panas pada Sumbu X_0, Y_0 hingga $X10051, Y_0$

Dengan Dengan simulasi menggunakan *software ANSYS 2019 R2* didapat temperature tiap titik sumbu, yang dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Temperatur Tiap Titik Sumbu

Temperatur Titik Sumbu (T)	Satuan ($^{\circ}\text{C}$)
	1312.6
	1105.5
	920.89
	758.75
	1289.0
	1221.4
	1028.8
	854.71
	703.06
	1081.6
	1019.4
	956.16
	788.36
	647.2

Analisa perpindahan panas yang telah dilakukan meliputi perhitungan perpindahan panas dengan metode matriks dan analisa perpindahan panas dengan metode *Finite Element Analysis* menggunakan *software ANSYS* versi 2019 R2. Dari kedua analisa yang dilakukan, metode *Finite Element Analysis* menggunakan *software ANSYS* versi 2019 R2 lebih unggul dibanding penyelesaian manual menggunakan metode matriks. Pada penyelesaian manual menggunakan metode matriks sering terjadi kesalahan dalam perhitungan dan juga matriks yang memiliki ordo banyak sering terjadi kesalahan dalam memasukkan angka. Sebaliknya dengan menggunakan metode *Finite Element Analysis* menggunakan *software* mempermudah perhitungan dan memasukkan angka dalam penyelesaian serta dengan fitur *software* dapat memberikan efek visual yang menjelaskan hasil dari analisa.

Proses pemotongan dengan menggunakan metode *thermal cutting* memberikan pengaruh terhadap daerah sekitar pemotongan. Dapat dilihat pada Gambar 16 saat proses *preheat* pada sumbu X_0, Y_0 dan pada Gambar 16 saat proses pemotongan, dari kedua proses tersebut terbentuk daerah terdampak panas atau *Heat Affected Zone* (HAZ). Ini dikarenakan pada saat Proses *Pre Heat* terjadi perbedaan temperatur yang signifikan antara daerah pemotongan dan daerah lainnya. Dengan adanya daerah yang terdampak panas atau *Heat Affected Zone* (HAZ) akan merubah struktur mikro pada daerah tersebut. Dan tentunya akan menurunkan *Physical Properties* di daerah tersebut. Daerah

tersebut cenderung getas dan akan mengakibatkan patah.

Dengan mengkaitkan hasil analisa perpindahan panas pada proses pemotongan Plat Baja *JIS G3106 Grade SM520B* dengan desain *box girder*. Maka hasil analisa ini sangat sesuai (berkesesuaian) dengan desain *box girder*. Pada desain *box girder*, Daerah yang terdampak panas pada *bottom plate* diberi jarak 60 mm tiap sisi *box girder*. Tujuan dari pemberian Jarak tersebut ialah agar daerah yang terdampak panas atau *Heat Affected Zone* (HAZ) tidak mendapatkan beban aktif dari jembatan *box girder*. Sehingga *box girder* Tidak mengalami patah pada daerah yang terdampak panas atau *Heat Affected Zone* (HAZ).

V. KESIMPULAN

Dari hasil pengamatan, perhitungan, simulasi, gambar berupa grafik dan Analisa/pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemotongan Plat Baja *JIS G3106 SM520B* menggunakan *CNC Flame Cutting* menggunakan oksigen dan gas asitelin sebagai bahan bakar, menggunakan temperatur pemotongan sebesar 1535°C dan *move speed* sebesar 7000 mm/min.
2. Perpindahan panas konveksi terjadi pada permukaan plat baja *JIS G3106 SM520B* dengan aliran udara, sedangkan perpindahan panas konduksi terjadi pada tiap node plat baja *JIS G3106 SM520B* yang mengakibatkan perpindahan panas secara spontan dan menghasilkan daerah yang terdampak panah (*Heat Affected Zone*).

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Cengel, Yunus A. Cengel. 2002. "*Heat Transfer: A Practical Approach*", The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- [2]. Shapiro, Moran & Dewitt, Munson. 2003. "*Introduction to Thermal Systems Engineering Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer*", John Wiley & Sons Inc., New York.
- [3]. Holman, J.P. 2010. "*Heat Transfer Tenth Edition*", The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- [4]. Buchori, Luqman. "Perpindahan Panas (*Heat Transfer*)", Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang, Semarang.
- [5]. <http://www.bukaka.com/web/about/brief-profile-milestones.html> (diakses online 19 Agustus 2018).
- [6]. Kamiran, Vimala. 2015. "Simulasi Perpindahan Panas pada Lapisan Tengah Plat Menggunakan Metode Elemen Hingga", Jurnal Sain dan Seni ITS, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [7]. Polban, Digilib. 2007. Buku Ajar Perpindahan Panas 130620, Indonesia.
- [8]. Sucipto, Priangkoso, Tabah. & Darmanto. 2013. Analisa Konduktivitas Termal Baja ST-37 dan Kuningan. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim Semarang, Semarang.
- [9]. Wuryanti, Sri. & Iriani, Purwinda. 2018. Investigasi Eksperimental Konduktivitas Panas pada Berbagai Logam. Departemen Teknik Konversi Energi Politeknik Negeri Bandung, Bandung.
- [10]. <https://chemdemos.uoregon.edu/demos/Which-metal-heats-up-fastest-Aluminum-Copper-or-Silver> (diakses online 19 Agustus 2018).

