

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Chao, Qi, dan Tang (2003) mengadakan penelitian awal terhadap pemodelan *Heat Transfer* pada proses FSW disertai validasi antara solusi analisis dengan eksperimental.. Penelitian yang dilakukan untuk mencari rumusan yang tepat mengenai model panas berjalan yang akan diterapkan pada proses simulasi terhadap logam (aluminium) yang dikenai proses FSW. Dari hasil penelitian mereka didapatkan satu rumus dalam mengaplikasikan panas pada proses FSW, serta diperoleh data suhu dan *heat flow* untuk masing – masing model, baik pada plat ataupun pahat. Pada hasil penelitian mereka didapat bahwa hanya 5% panas dari proses gesekan yang mengalir pada pahat, dan 95% sisanya pada plat, yang cukup tinggi dibanding dengan pengelasan yang lainnya yang biasanya perbandingannya adalah 60-80 (%).

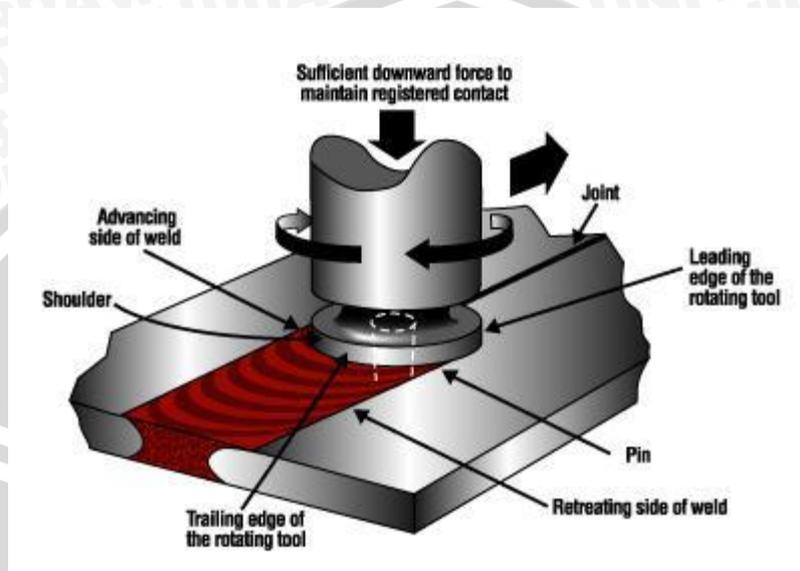
Kovacevic dan Song (2003) melakukan pemodelan untuk mendeskripsikan Perpindahan panas transient pada proses FSW 3-dimensi. Dimana proses perpindahan panas selama penetrasi pahat, proses pengelasan dan proses pelepasan pahat diteliti secara dinamis. Dengan asumsi masukan panas pada pahat sebagai panas akibat gesekan, dan masukan panas pada pin sebagai panas uniform-volumetrik yang dihasilkan akibat deformasi plastis di sekitar pin. Dengan mempertimbangkan variasi suhu selama proses FSW, diperoleh hasil yang cukup sesuai antara pemodelan dan eksperimen.

2.2 Friction Stir Welding (FSW)

Friction Stir Welding (FSW) atau Las Gesek – Putar adalah teknik las *solid state* yang ditemukan di *The Welding Institute (TWI)* pada tahun 1991. FSW berlangsung di bawah suhu solidus dari logam lasan, sehingga tidak ada pelelehan logam yang terjadi. Proses FSW merupakan pengembangan dari proses Las Gesek dan jamak digunakan untuk memproduksi lasan kontinyu pada fabrikasi plat. Sama seperti proses pengelasan lain, FSW juga bisa diterapkan pada jenis sambungan las yang bermacam – macam, juga posisi las yang bervariasi pula. Sejak ditemukan, banyak peneliti mencoba mengembangkan proses ini untuk hasil lasan FSW ke depannya yang lebih baik

2.2.1 Prinsip Kerja *Friction Stir Welding* (FSW)

Benda kerja pada proses FSW, pada kasus ini berupa plat, dicekam dengan ragum dikarenakan gaya yang timbul akibat proses FSW dapat merubah posisi benda kerja, yang tentu saja hal ini sangat tidak menguntungkan. Pahat berputar dengan atau disertai profil tertentu sepanjang sambungan pada plat yang akan dilas, juga panjang pahat dalam proses ini harus tidak boleh lebih besar daripada tebal plat.



Gambar 2.1 Prinsip FSW

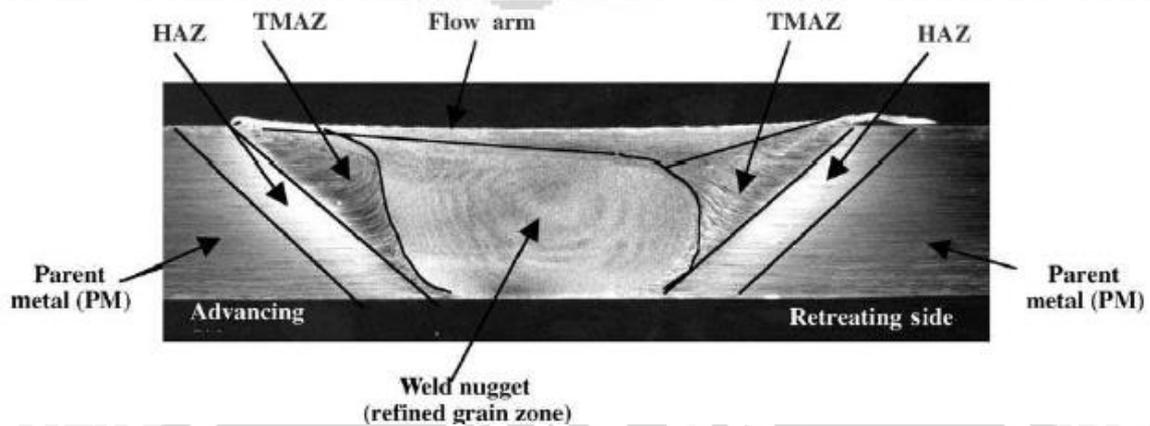
Sumber : Malde Thesis (2006)

Bersama dengan panas mekanik akibat pengadukan material yang dikenai gesekan dan putaran, panas juga utamanya dihasilkan dari proses gesekan *probe & shoulder* dari pahat terhadap plat menyebabkan material plat akan menjadi lunak, tapi tidak sampai melebur, yang memungkinkan pahat bisa bergerak sepanjang lintasan las. Akibat gerak translasi dan rotasi dari pahat, material plastis yang menghadap muka pin akan bergerak menuju belakang pin, dan hal ini berulang sampai proses penyambungan selesai.

Struktur mikro yang timbul sebagai akibat panas adalah sebagai berikut :

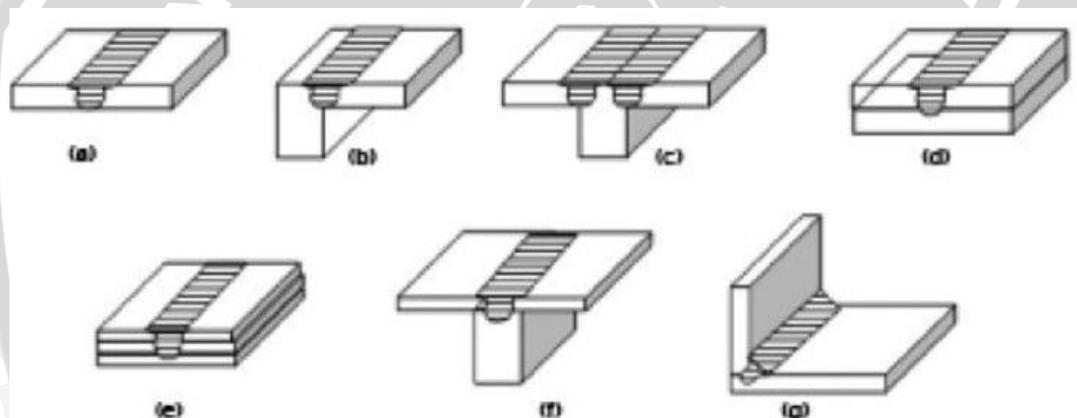
1. **Base Metal**, bagian pada plat yang tidak terkena panas selama proses FSW
2. **Heat-Affected Zone (HAZ)**, bagian yang mengalami siklus termal yang membuat struktur mikro dan sifat mekanik material berubah, tidak terjadi deformasi plastis.
3. **Thermomechanically-Affected Zone**, material terdeformasi plastis akibat gerakan pahat, pada aluminium terjadi REGANGAN plastis tanpa proses rekristalisasi.

4. **Weld Nugget**, area yang menghasilkan sambungan yang mengalami kristalisasi, disebut juga *Stir Zone*



Gambar 2.2 Heat Zone pada FSW

Sumber : Deden Rahayu (2012)



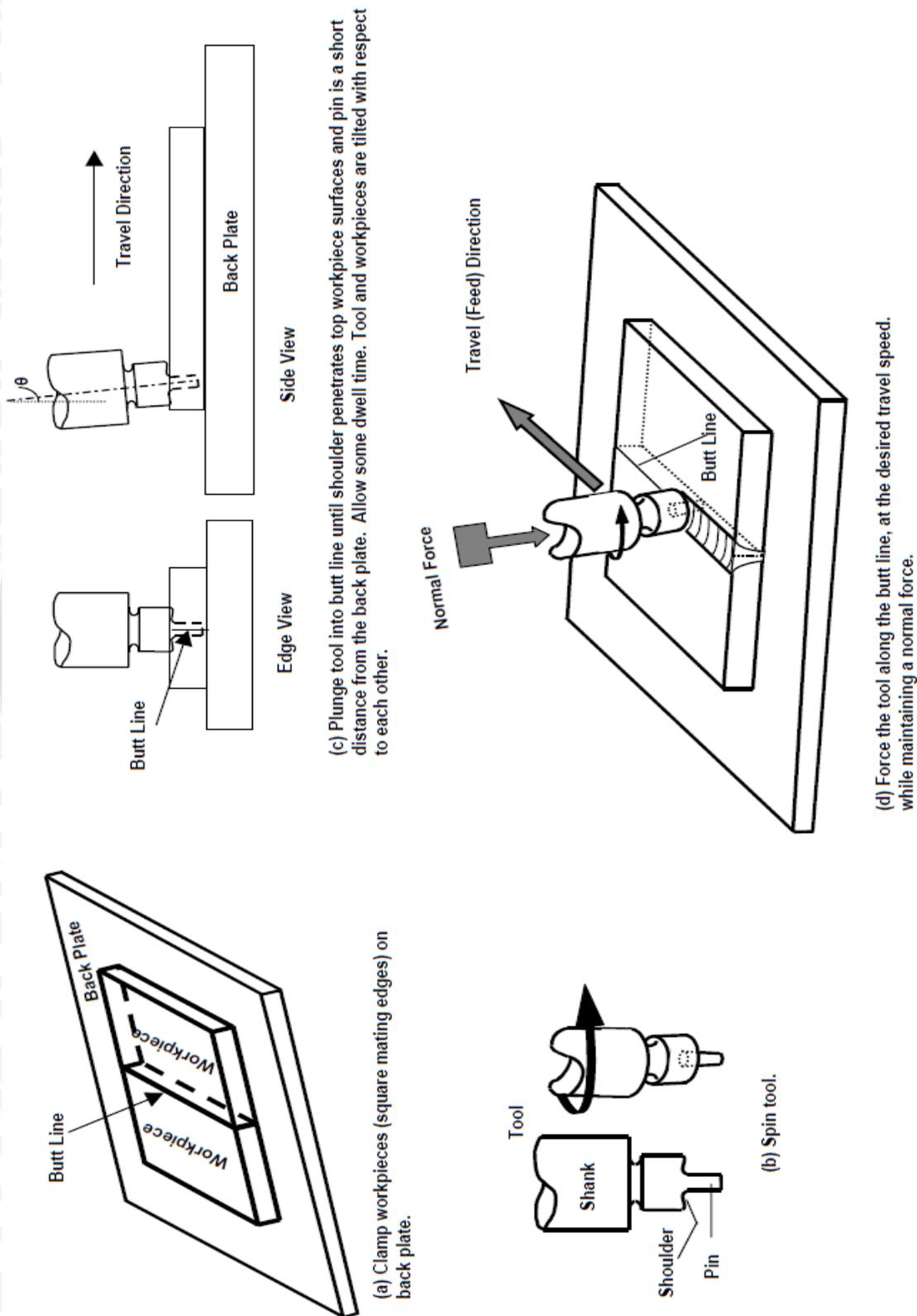
Gambar 2.3 Macam – macam Sambungan Las

Sumber : Samsi Suardi (2008)

Pengembangan FSW pada industri penerbangan juga sangat mempermudah proses perakitan pada pesawat terbang dimana proses penyambungan ini dapat mengurangi berat komponen sambungan dengan mereduksi jumlah pemakaian pengencang (*fastener*) konvensional seperti baut, rivet&joint, dll.

Juga penghematan bisa lebih dimaksimalkan dikarenakan jumlah bagian konstruksi berkurang akan mengurangi juga biaya desain, manufaktur, pemeliharaan. Selain itu, sambungan FSW konsentrasi stressnya lebih rendah pada area sambungan dibanding pengencang (*fastener*) konvensional serta mengurangi resiko korosi akibat kontak material *fastener* yang berasal dari logam yang berbeda jenisnya.

2.2.2 Parameter Proses FSW pada Sambungan *Butt*



Gambar 2.4 Proses FSW pada sambungan *Butt*. a. Pencekaman benda kerja. b. pahat FSW c. *tool* pengelasan dan kemiringan las. d. Gaya yang terjadi pada proses FSW

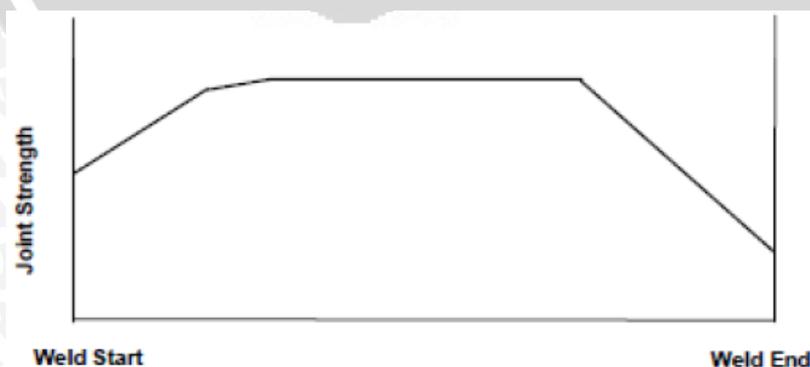
Sumber : Khaled, Therry (2005)

Berdasar ketentuan Colligan, benda kerja FSW dibagi menjadi 2 bagian, yaitu *advancing side* (sarah pengeelasan) & *retreating side* (berlawanan arah pengelasan). Plat yang akan dilas dijepit pada *clamp* atau ragum supaya tidak terjadi pergeseran akibat berputar dan Bergeraknya pahat terhadap sambungan plat pada saat proses FSW. Pahat terdiri dari *shank*, *probe*, *shoulder* berputar dengan kecepatan dan kemiringan tertentu. Pada saat proses *dwelling* atau penetrasi pahat terhadap plat benda kerja, *dwell time* yang singkat dapat membangkitkan panas untuk *preheating* dan pelunakan material sepanjang garis sambungan las. Kurangnya penetrasi (*Open Root*) memungkinkan sambungan yang terbentuk tidak sempurna

Seperti juga halnya *probe* atau pin ketika selesai ditarik akan menghasilkan lubang di ujung jalur sambungan las, *shoulder* yang kontak dengan plat akan meninggalkan bekas *semi circular plate* seperti ilustrasi pada Gambar 2.4 di atas. Saat proses pengadukan material, bagian muka pahat putar yang bergerak sejalan dengan jalur sambungan las dibantu dengan kontak material terhadap *shoulder*, akan memaksa material yang terdeformasi plastis untuk berpindah menuju muka pahat bagian belakang.

Khaled, Therry (2005) meyakini bahwa gerakan berputar bisa memecah oksigen pada permukaan plat, sehingga ikatan antar sambungan menghasilkan permukaan yang bersih, dengan catatan sambungan penuh dihasilkan dengan jarak pin, *shoulder*, dan plat yang terjadi kontak diusahakan sedekat mungkin.

Pada Gambar 2.4 di atas terlihat adanya kemiringan terhadap sumbu *spindle*. Kemiringan semacam ini bisa diperoleh dengan memiringkan *spindle* atau sudut plat. Kemiringan seperti ini bertujuan untuk membantu pemadatan material pada bagian belakang pin, sebaliknya juga menambahkan kelemahan pada proses FSW berupa berkurangnya kecepatan pengelasan.



Gambar 2.5 Variasi kekerasan sepanjang sambungan *Butt* pada FSW

Sumber : Khaled, Therry (2005)

Akibat dari proses FSW, pada akhir sambungan las terjadi lubang bekas pencabutan pin. Apalagi jika material benda kerja yang dipakai bukan aluminium, diperlukan lubang awal berdiameter kecil atau *predrill* untuk mengurangi gaya penetrasi pahat yang besar akibat kekuatan material plat yang besar. Pada akhir sambungan yang memiliki bekas lubang, diperlukan adanya proses *finishing* karena kekuatan pada area ini lebih rendah daripada area sambungan lainnya secara keseluruhan.

Siklus dari proses FSW dibagi menjadi beberapa langkah sebagai berikut :

1. **Dwell Time.** Setelah mesin dinyalakan, pahat yang dibiarkan berputar tanpa adanya gerak translasi (stasioner). Proses penetrasi dilakukan pada langkah ini dengan material plat dipanaskan oleh gesekan pahat yang berputar
2. **Transient Heating.** Sesaat sebelum tool bergerak translasi sepanjang sumbu sambungan las, suhu di sekitar pahat menjadi tidak stabil hingga akhirnya bergerak dan berubah menjadi keadaan *steady-state*
3. **Pseudo Steady-State.** Secara mikro, pada area sekitar pahat sudah stabil, walaupun terjadi fluktuasi suhu
4. **Post Steady-State.** Menjelang akhir proses pengelasan, panas akan meningkat di sekitaran pahat

Juga, terdapat beberapa macam gaya yang terlibat dalam proses FSW , antara lain :

1. **Downward Force.** Gaya yang berguna untuk menahan pahat pada saat mengelas
2. **Transverse Force.** Gaya yang arah geraknya sama dengan pergerakan pahat, naiknya suhu kerja akan mengurangi *transverse force* dikarenakan material yang melunak mempermudah proses pergerakan translasi dari pahat
3. **Lateral Force.** Reaksi dari gaya *downward force*
4. **Torsi.** Dipakai untuk memutar pahat, besarnya bergantung pada *downward force* dan koefisien gesek dari plat benda kerja

Adapun variabel proses yang mempengaruhi proses FSW adalah sebagai berikut :

1. **Desain pahat,** meliputi bentuk dan dimensi *shoulder* dan pin
2. **Kecepatan gerak translasi dan kecepatan putar pahat,** mempengaruhi *heat input*
3. **Kemiringan pahat,** bergantung bentuk dan ukuran *shoulder* pahat
4. **Ketebalan Material,** mempengaruhi gradien suhu dan tingkat pendinginan material

5. **Paduan material**, untuk tiap material dengan paduan berbeda, memiliki parameter FSW yang tidak sama

2.2.3 Keuntungan dan Kelemahan FSW

Proses FSW telah menunjukkan beberapa keunggulan dibandingkan proses pengelasan konvensional, diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Suhu proses FSW lebih rendah daripada proses las konvensional, yang dapat mencegah permasalahan yang timbul pada fasa cair, seperti porositas dan *cracking*
2. Prosesnya dapat secara mudah diotomasi
3. Reduksi biaya *finishing* karena permukaan hasil proses FSW lebih bagus
4. Tidak perlu *filler* dan *shielding gas*
5. Dapat dilakukan dengan posisi vertikal atau *overhead*, juga bisa di dalam air
6. Ramah lingkungan karena tidak ada percikan, asap atau radiasi UV selama Proses

Meskipun memiliki sejumlah keuntungan , yang termasuk dalam salah satu kelemahan proses FSW adalah wajib adanya penjepit yang kokoh yang membatasi proses FSW hanya bisa dilakukan ketika plat sudah *clamped* secara sempurna. Juga, timbulnya lubang pada proses pencabutan pin di area ujung sambungan las. Lubang ini menjadikan bagian plat tersebut menjadikan area tersebut tidak bisa digunakan

2.3 Material Aluminium

Aluminium dibagi menjadi dua jenis, yaitu Aluminium Tempa dan Aluminium Tuang dibagi lagi menjadi *Heat & Non – Heat Treatable*. 85% dari materialnya biasanya dipakai sebagai material tempa dalam bentuk plat rol, *sheet* dan ekstrusi. Aluminium tuang biaya produksinya relatif lebih rendah dibanding yang tempa karena titik leburnya rendah, sehingga energi pembentukannya juga rendah, namun kekuatan tariknya juga ikut rendah.



(a)

(b)

Gambar 2.6 Aluminium Tempa (a), Aluminium Tuang (b)

Sumber : Bustanul, Bambang (2012)

Material berbahan aluminium banyak dipakai untuk berbagai macam *part* yang menginginkan beban yang ringan dan tahan karat, karena memiliki berat jenis rendah dan ketahanan korosi yang baik. Beberapa karakter utama Aluminium adalah sebagai berikut :

1. *Weight to Strength Ratio* yang sangat baik
2. Sifat mampu mesin, mampu cor, permukaan dan daya tahan korosi tinggi serta konduktivitas panas dan listrik yang baik
3. Ringan, dengan berat jenis sepertiga baja ($2,7 \text{ gr/cm}^3$)
4. Mudah dipadu dengan unsur yang lain, sehingga mendapatkan sifat yang diinginkan
5. Suhu lebur rendah (600^0C), sehingga peralatan peleburan sederhana.

2.4 Properti Termal Material

Setiap benda yang memiliki material yang berbeda tentu saja memiliki properti termal yang berbeda pula. Beberapa macam properti termal material akan dijelaskan sebagai berikut :

1. *Konduktivitas termal*, adalah sifat material yang mendeskripsikan perpindahan dari energi panas terhadap material tersebut. Jika panas hanya bergerak sepanjang sumbu x . Untuk suhu tertentu, konduktivitas yang tinggi akan menaikkan jumlah fluk panas tiap unit waktu. Sama halnya dengan dua sumbu lainnya (y, z). Untuk material isotropik, konduktivitas material semua sumbu sama. Konduktivitas material untuk beberapa logam bergantung pada waktu.
2. *Panas Spesifik*, adalah energi yang diperlukan untuk merubah suhu sebanyak satu derajat dari suatu satuan massa, maka semakin besar nilai panas spesifik,

maka semakin sulit untuk menaikkan suhunya. Cengel dan Boles (2005) mendefinisikannya sebagai kapasitas material dalam menyimpan energi. Nilai dari panas spesifik tergantung pada suhu.

3. *Entalpi (h)*, menyatakan penjumlahan dari $u+PV$, dimana u adalah energi dalam sistem, dan PV adalah kerja oleh sistem. Untuk perubahan fasa, entalpi bisa juga disebut *panas laten*. Entalpi memainkan peran penting dalam penge-lasan karena melibatkan perubahan fasa padat – cair dan sebaliknya.
4. *Koefisien konveksi*, atau h_{conv} , dideskripsikan sebagai kondisi dari lapisan batas pada persinggungan antara fluida dan padatan. Dua faktor yang mempengaruhi koefisien konveksi adalah geometri permukaan dan sifat aliran fluida.
5. *Emisivitas*, adalah sifat meradiasi dari permukaan material. Semakin besar nilai emisivitas, maka semakin besar energi panas yang dipancarkan via radiasi. Sebuah radiator yang ideal adalah sebuah benda pejal hitam, yang nilai emisivitasnya sama dengan satu

2.5 Teori Moving Heat Source

Dalam meneliti interaksi termomekanikal yang terjadi pada proses FSW tidak bisa dilepaskan dari pemahaman mengenai *heat generation & temperature history*. Pemodelan *moving heat transfer* dimulai digairahkan oleh Gould dan Feng (1999) yang mengembangk-an pemodelan thermal untuk memprediksi suhu proses FSW dengan menggunakan persa-maan Rosenthal sebagai *moving heat sourceny*. Masukan panas (*heat input*) dimodelkan dengan parameter – parameter seperti gaya pahat dan kecepatan pengelasan.

2.5.1 Model Distribusi Rosenthal

Dengan memakai aplikasi Diferensiasi parsial Fourier (PDE) pada konduksi panas, Rosenthal (1946) mengembangkan sistem koordinat bergerak untuk menyelesaikan sumber panas baik titik, maupun sepanjang garis. Analisis yang dikembangkan memungkinkan

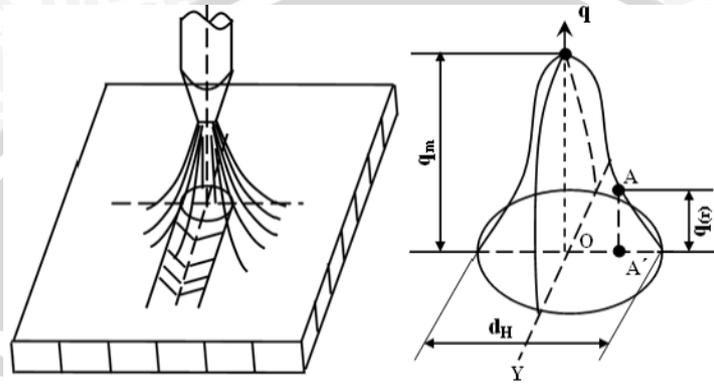
untuk pertama kalinya perhitungan pada parameter las bisa dilakukan setelah sebelumnya hanya memakai asumsi (*consideration*) seperti, arus, voltase, kecepatan las, dan geomtri las. Berdasar ketebalan, bentuk, dan dimensi lasan dan pola perpindahan panas selama proses pengelasan, Rosenthal membagi jenis sumber panas menjadi 3, yaitu : Titik, garis, dan luasan

Solusi analisis dari Rosenthal berdasar pada sumber panas yang terkonsentrasi, tapi tidak memperhitungkan perubahan sifat material sepanjang perubahan suhu, perubahan fa

sa, dan panas laten. Maka, penyimpangan pada HAZ relatif besar. Bagaimanapun, akurasi nya dalam zona suhu rendah dan juga karena penyederhanaan yang baik, Model Rosenthal telah digunakan secara luas dalam aplikasi keteknikan.

2.5.2 Model Distribusi Gaussian

Sejak model Rosenthal, Friedman (1975) mengembangkan model panas menggunakan Distribusi Gaussian untuk mencari *heat flux* pada titik pemanasan, seperti Gambar 2.7 :



Gambar 2.7 Sumber Panas - Distribusi Gaussian

Sumber : Bai- Qiao Chen (2011)

Heat Flux $q(r)$, dengan jarak r dari pusat sumber panas dapat ditulis sebagai :

$$q(r) = q_{max} \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) = \frac{3Q}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \quad (2-1)$$

dimana q_{max} adalah fluks panas maksimum di pusat sumber panas; Q adalah masukan energi panas (Watt); dan R (meter) adalah radius dari sumber panas

2.5.3 Model Distribusi Goldak

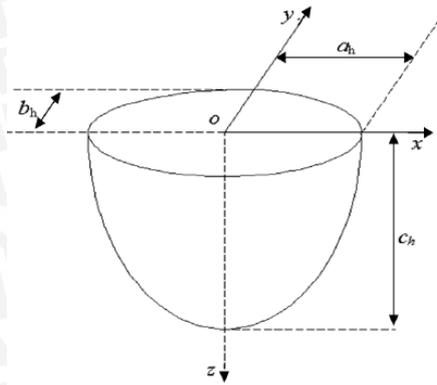
2.5.3.1 Semi Elips

Pada kasus pengelasan dimana momentum dari busur las sangat besar, kelemahan muncul dari model Distribusi Gaussian karena “*arc stiffness*” diabaikan. Untuk mengatasi masalah ini, Goldek *et. al.* (1985) mengembangkan model panas semi elips dimana fluks panas dimodelkan secara Gaussian sepanjang volume dari sumber panas tersebut.

Seperti pada gambar 2.8, sumbu – sumbu dari semi elipsnya adalah a_h , b_h , c_h . Fluk panas mencapai nilai maksimum pada tengah sumber panas, yang distribusinya mengikuti persamaan sebagai berikut :

$$q(x, y, z) = q_{max} \exp(-Ax^2 - By^2 - Cz^2) \quad (2-2)$$

dimana A , B , dan C adalah koefisien distribusi aliran panas

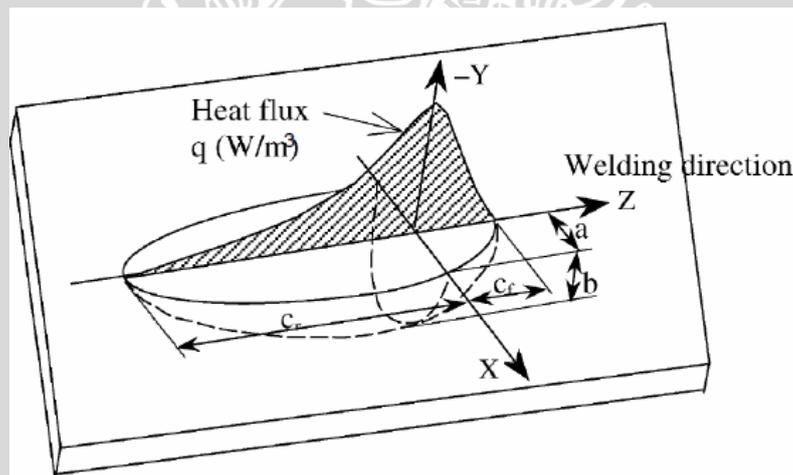


Gambar 2.8 Sumber panas Semi Elips

Sumber : Bai- Qiao Chen (2011)

2.5.3.2 Elips Ganda

Dari berbagai eksperimen untuk kasus sumber panas yang bersangkutan, banyak yang menunjukkan bahwa gradien suhu di depan dan di belakang busur lasan sedikit berbeda dari hasil perkiraan. Untuk mengatasi hal ini, para peneliti menggabungkan 2 model semi elips dan merumuskan model sumber panas baru yang dikenal sebagai model sumber panas elips ganda, seperti pada gambar 2.9



Gambar 2.9 Sumber panas Elips Ganda

Sumber : Bai- Qiao Chen (2011)

2.5.4 Kelebihan Model Panas Bergerak Volumetrik

Panas akan berpindah ke dalam suatu material dengan berbagai macam bentuk dan satuan yang akan dijelaskan pada subbab selanjutnya. Sumber panas ada yang diasumsikan hanya terjadi pada satu titik saja (*point heat source*), ada juga yang diaplikasikan pada permukaan (*surface heat source*), dan yang dipakai pada penelitian kali ini adalah sumber

panas volumetrik (*volumetric heat source*) dimana panas akan merambat melalui bidang tiga dimensi (x, y, z).

Pada sumber panas volumetrik pemakaiannya untuk analisa ataupun pemodelan akan memberikan beberapa karakteristik, diantaranya adalah mendekati kondisi yang sebenarnya karena pada praktek pengelasan FSW, terdapat sejumlah volume yang terdeformasi akibat penetrasi pin. Juga, tak lupa pemodelan sumber panas dengan sumber panas volumetrik menjadikan hasil analisis dari pemodelan lebih mudah konvergen daripada model sumber panas yang lainnya.

2.6 Teori Perpindahan Panas (*Heat Transfer*)

Proses pengelasan adalah proses yang melibatkan pemanasan pada titik tertentu dan pendinginan yang dependan terhadap posisi dan waktu, sementara sifat material lasan bergantung pada suhu dan juga perubahan fasa akibat dari panas laten yang ada. Selama proses pengelasan suhu tersebar secara bervariasi dikarenakan pemanasan pada satu titik tertentu, akibatnya pemanasan dan transfer panas terjadi pada sambungan lasan, pada benda kerja (plat) yang dilas, juga pada lingkungan sekitar. Dilambangkan sebagai q'' untuk menyatakan panas yang mengalir via sejumlah luasan area (m^2)

Mekanisme perpindahan panas dapat dikategorikan menjadi 3 jenis, yaitu :

2.6.1 Konduksi

Wilayah orbital dengan energi kinetik molekul yang besar akan berpindah menuju orbital dengan energi kinetik molekul yang lebih rendah. Pada logam, terjadi juga transfer panas melalui sekumpulan elektron yang dikenai konduksi. Secara umum, perpindahan panas konduksi dirumuskan sebagai berikut :

$$q'' = -\lambda \nabla T \quad (2-3)$$

dimana q'' adalah *heat flux*, λ adalah konduktivitas thermal, T adalah suhu, dan ∇ adalah $= \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$

Hukum konservasi energi dalam bentuk lain bisa dituliskan sebagai :

$$c\rho \frac{\nabla T}{\nabla t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (2-4)$$

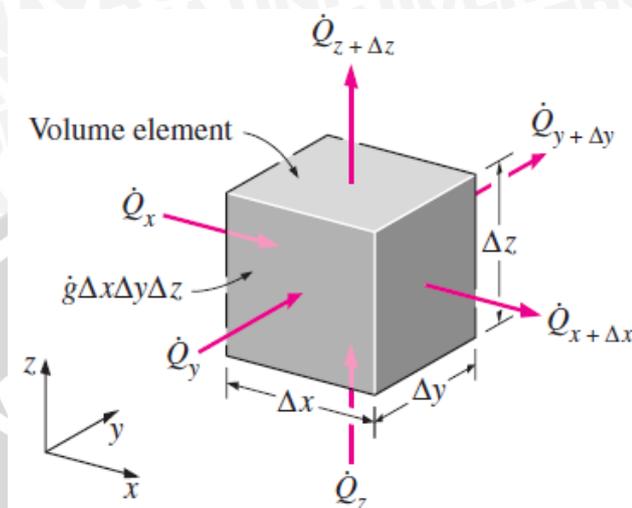
dimana ρ adalah massa jenis material, c adalah *specific heat*, Q adalah *heat generated*, dan t adalah waktu

Jika k konstan, maka pers. (2-2) menjadi :

$$\frac{\nabla T}{\nabla t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \right) \quad (2-5)$$

dimana α adalah difusivitas thermal ($\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}$)

Persamaan (2-19) adalah persamaan diferensial untuk konduksi yang stasioner, homogen, dan isotropis dengan k . Penyelesaian persamaan ini sangat bergantung dari kondisi awal dan batas yang ditetapkan.



Gambar 2.10 : Konduksi panas tiga dimensi pada elemen volumetrik

Sumber : Boles & Cengel (2005)

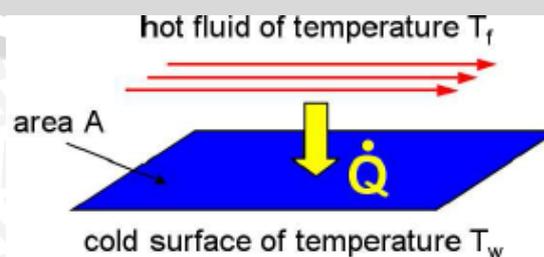
2.6.2 Konveksi

Saat terjadi kontak konduksi antara panas menuju fluida statis, akan menyebabkan ekspansi volumetrik. Sebagai akibat dari tekanan gravitasi, fluida yang terekspansi mengembang dan berpindah tempat yang menjadikan panas juga berpindah via gerakan fluida. Proses ini disebut *Konveksi*. Jika fluida bergerak pembawa panas itu awalnya fluida statis, maka prosesnya disebut konveksi bebas (*free convection*).

Kondisi batas untuk konveksi adalah sebagai berikut :

$$q''_{con} = h_f(T - T_{\infty}) \quad (2-6)$$

dimana h_f adalah koefisien konveksi, T adalah suhu benda, dan T_{∞} adalah suhu lingkungan sekitar benda



Gambar 2.11 : Pendinginan fluida akibat konveksi

Sumber : P. Bastian (2005)

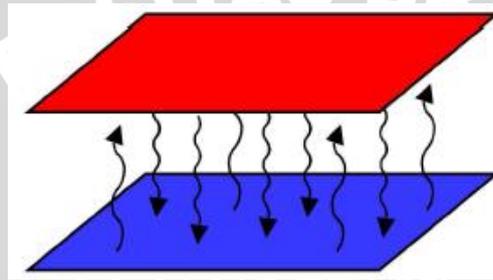
2.6.3 Radiasi

Semua material meradiasi energi panas dalam jumlah yang kecil tergantung suhunya, dimana energi tersebut dibawa oleh foton dalam infra merah atau cahaya tampak dari spektrum elektromagnet. Saat suhu seragam, flux radioaktif dalam kondisi setimbang dan tidak ada perpindahan energi panas, saat suhu berubah panas ditransfer untuk mencapai kesetimbangan kembali, dari konsentrasi panas tinggi menuju menuju konsentrasi panas rendah

Rumus dari radiasi adalah sebagai berikut :

$$q''_{rad} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_{\infty}^4) \quad (2-7)$$

dimana σ adalah emisitas, ε adalah konstanta Stefan – Boltzmann, T adalah suhu benda, dan T_{∞} adalah suhu lingkungan sekitar benda.



Gambar 2.12 : Radiasi pada ruang hampa

Sumber : P. Bastian (2005)

2.6.4 Overall Radiation Heat Transfer Coefficient

Di dalam pengelasan, baik radiasi dan konveksi sama – sama terjadi selama prosesnya. Maka dari itu, demi kemudahan analisa, radiasi dinyatakan dalam bentuk linear seperti halnya konveksi.

$$q'''_{rad} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_{\infty}^4)$$

$$q''_{rad} = \sigma \varepsilon \{(T - T_{\infty}^4)(T^2 + T_{\infty}^2)\}(T + T_{\infty})$$

$$q''_{rad} = h_r(T - T_{\infty}^4) \quad (2-8)$$

h_r disebut *overall radiation heat transfer coefficient*. Harus diperhatikan bahwa h_r bergantung pada sifat termal dari suatu material dan juga hubungannya dengan suhu. Di dalam pengelesan, perpindahan panas konduksi secara transien berhubungan dengan kondisi batas dari konveksi pada permukaan *base metal*. Jika radiasi juga dimasukkan ke dalam hitungan konveksi, maka h_r bisa digunakan, dikarenakan HFR (*Heat Transfer Rate*) bisa dinyatakan dalam fungsi linear (yang sebelumnya pangkat empat) dari perbedaan suhu antara permukaan material dengan suhu lingkungan sekitar.

Apapun bentuk perpindahan panasnya (konduksi, konveksi, radiasi, atau kombinasi) harus selalu mengikuti hukum kekekalan energi. Untuk sistem, hukum kekekalan energi dinyatakan sebagai berikut :

$$q_{in} + q_{gen} - q_{out} - q_{str} = 0$$

yang dalam bentuk lain menjadi :

$$q_{in} - q_{out} + q_{gen} = q_{str} \quad (2-9)$$

dimana : q_{in} : Panas masuk sistem (Joule)

q_{out} : Panas keluar sistem (Joule)

q_{gen} : Panas yang dihasilkan sistem (Joule)

q_{str} : Panas yang diserap sistem (Joule)

Persamaan (2-22) disebut *persamaan kekekalan energi*. Panas yang diserap sistem bisa dituliskan dalam bentuk sebagai berikut :

$$q_{str} = \rho c_p dT dV \quad (2-10)$$

dimana: ρ : densitas (kg/m^3)

c_p : panas spesifik pada tekanan konstan (J/kgK)

dV : volume inkremental (m^3)

dengan memasukkan kekekalan energi ke dalam volume dengandx, dy, dz mendapat :

$$\{q_x + q_y + q_z\} - \{q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz}\} + q''' dx dy dz = \rho c_p dT dx dy dz$$

dimana q''' adalah panas yang dihasilkan dari sebuah benda yang bervolume tertentu.

Dengan menggantikan $q_{x+dx} = \frac{\partial q_x}{\partial x} dx$ di dalam arah x dan sumbu yang lain juga sama, maka perpindahan panas konduksi dengan konduktivitas termal yang konstan bisa diekspansikan sebagai berikut :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q''' = \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} \quad (2-11)$$

dimana $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$, atau dikenal sebagai difusivitas termal (m^2/s)

2.7 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu prosedur numerik dengan konsep dasar adalah pembagian menjadi bagian-bagian kecil (diskretisasi) yang berhingga dan memiliki bentuk geometri yang lebih sederhana dari kontinumnya. Analisa metode elemen hingga dilakukan untuk mendapatkan suatu nilai pendekatan (bukan eksak) berdasarkan asumsi temperatur sebagai DOF (*degree of freedom*) atau asumsi panas sebagai “force” dari penurunan DOF temperatur atau dapat juga berdasarkan kombinasi ke duanya.

1. Diskretisasi dan pemilihan elemen

Diskretisasi adalah proses membagi suatu struktur menjadi elemen-elemen lebih kecil yang berhingga dan memiliki geometri yang lebih sederhana. Elemen-elemen ini berhubungan pada titik-titik simpul (*node*) dan membentuk rangkaian mendekati bentuk struktur sebenarnya. Sehingga geometri struktur yang kompleks dapat disederhanakan dengan diskretisasi untuk mempermudah proses analisa.

Pemilihan jenis elemen tergantung pada karakteristik rangkaian kesatuan dan idealisasi. Idealisasi struktur satu dimensi menggunakan elemen garis, pada dua dimensi dapat menggunakan elemen segitiga, segiempat maupun kuadrilateral, sedangkan struktur tiga dimensi dapat menggunakan elemen heksahedron.

2. Memilih fungsi pendekatan

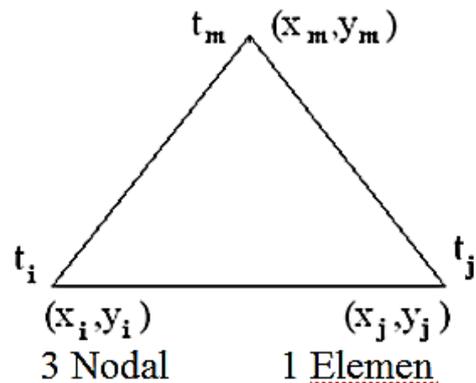
Fungsi yang umum digunakan adalah polinomial. Pendekatan dengan fungsi interpolasi ini disebabkan sulitnya mencari jawaban, sehingga dipilih suatu bentuk jawaban yaitu distribusi suhu yang merupakan besaran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi yang memenuhi syarat batas yang sudah ditentukan.

Asumsikan sebuah fungsi suhu yang linear untuk tiap elemen sebagai:

$$t(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y$$

$$\{\Psi\} = \{a_1 + a_2x + a_3y\} = [1 \ x \ y] \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix}$$

Dimana u dan v adalah gradien suhu pada (x_i, y_i)



2 DOF: x, y

$$T = N_i t_i + N_j t_j + N_m t_m$$

Dimana T = fungsi suhu

$$[T] = [N_i + N_j + N_m] \begin{Bmatrix} t_i \\ t_j \\ t_m \end{Bmatrix}$$

N = Shape function

t = suhu @ node

3. Menentukan Hubungan Gradien Suhu

$$\{g\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_m}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & \frac{\partial N_m}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t_i \\ t_j \\ t_m \end{Bmatrix}$$

Dimana $\{g\} = [B] \{t\}$ bisa disamakan dengan matriks regangan pada analisa

$$[B] = \frac{\partial}{\partial x} [N] = \frac{1}{|x|} \begin{bmatrix} \beta_i & \beta_j & \beta_m \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_m \end{bmatrix} \quad \text{struktur. [B] turunan dari [N]}$$

+ Matriks Fluk Panas :

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{bmatrix} \{g\} = -[D]\{g\}$$

4. Mencari nilai matrik kekakuan

Matrik kekakuan adalah nama umum dari matrik yang koefisiennya diketahui dan dikali dengan DOF yang tidak diketahui, dalam kasus ini suhu. Maka, matrik konduktivitas elemen sering disebut juga matrik kekakuan elemen (untuk MEH dari perpindahan panas)

Konduksi	+	Konveksi
$[k] = \iiint [B^T][D][B] dV$	+	$\iint hN^T [N] dS$
$= tA[B]^T[D][B]$	+	$hP \int_0^L \left\{ \begin{matrix} 1 - \frac{x}{L} \\ \frac{x}{L} \end{matrix} \right\} \left[1 - \frac{x}{L} \right] dx$
$= \frac{AK_{xx}}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$	+	$\frac{hPL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$
$\{f_Q\} = \iiint [V]^T dV = \frac{QV}{3} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$ (untuk suhu konstan)		
$\{f\} = [k] \{t\}$		

5. Merangkai Persamaan Elemen, Memberi Kondisi Batas

Perakitan persamaan elemen dibawa ke bentuk persamaan global. Prosesnya harus memenuhi sifat konvergen dan sifat sinambung, yaitu titik-titik yang semula bersebelahan harus tetap bersebelahan setelah elemen dikenai beban. Bentuk persamaan global elemen:

$$\{F\} = [K] \{t\} \quad (2-12)$$

Dengan:

$[K]$ = matrik sifat/kekakuan elemen, konduktivitas thermal

$\{t\}$ = vektor perpindahan *node*, fungsi suhu

$\{F\}$ = vektor beban total, fungsi masukan panas

Dari sini, prinsipnya sama untuk perpindahan panas tiga dimensi, hanya menambahkan satu sumbu bidang lagi. Pendekatan ini juga bisa disamakan dengan pendekatan MEH struktural. Kondisi batas fluk panas sudah termasuk dalam hitungan penurunan, cukup disubstitusikan ke dalam penyelesaian suhu node dan gradien suhu

2.8 Software Berbasis Metode Elemen Hingga

Software yang berbasis metode elemen hingga ini mempunyai kelebihan yaitu kemampuan untuk mendiskritisasi model dengan sangat halus, mampu bekerja dengan elemen lebih banyak dan menghasilkan output dengan ketelitian tinggi. *Software* berbasis metode elemen hingga dapat digunakan untuk menganalisis antara lain: struktural, termal, magnetis, dan fluida.

Secara umum langkah-langkah analisis dengan menggunakan *software* berbasis metode elemen dibagi menjadi tiga, yaitu :

1. *Preprocessing* (proses awal)

Tahap-tahap penting dalam *preprocessing* :

- Pemodelan geometri: dilakukan proses modeling geometri (1D,2D,3D).
- Pemilihan tipe elemen: digunakan untuk mendiskritisasikan model
- *Material properties*: input data material yang digunakan.
- *Meshing*: pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil/elemen diskrit.

2. *Solution* (proses solusi)

Tahap-tahap penting dalam *solution*:

- Mendefinisikan analisis solusi yang dipakai (*analysis type*).
- Memasukkan kondisi batas (*constrain*).
- Menerapkan pembebanan.
- Penyelesaian (*solving*).

3. *General postprocessing* (proses pembacaan hasil)

- *Plot result*

Dengan menggunakan *contour plot* akan tampak distribusi suhu atau variabel lain pada model sehingga mudah dalam menginterpretasikan informasi yang disajikan. Di sini model digambarkan dengan sebaran warna yang menunjukkan besarnya suhu yang diamati

- *List result*

Hasil analisis dalam bentuk *list result* berupa tabel yang memberikan informasi secara detil mengenai persebaran suhu dan waktu yang terjadi pada tiap node maupun elemennya.

- *Animation*

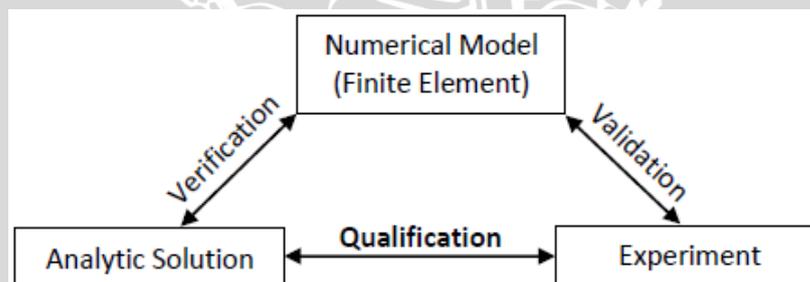
Hasil analisa yang diperoleh juga ditampilkan dalam bentuk simulasi (animasi)

2.8.1 Simulasi *Moving Heat Source*

FEM (*Finite Element Method*) mengasumsikan bahwa sebuah struktur terdiri dari elemen terkecil yang terhubung pada masing – masing nodalnya yang memenuhi suatu jenis dari sebuah persamaan dan kondisi batas yang sesuai. Berdasarkan hal ini, langkah awal dari analisa FEM adalah membagi struktur yang akan diteliti ke dalam sejumlah elemen.

Karena sebuah struktur terdiri atas sejumlah elemen yang sangat banyak, banyak persamaan dan kondisi yang harus diselesaikan, dan pada akhirnya kebutuhan akan kemampuan komputer tidak terelakkan lagi. Pada 1965, NASA (lembaga antariksa Amerika) dengan NASTRANnya menjadi yang pertamayang menggunakan prinsip FEM pada sebuah *software* komputer. Saat ini, banyak dari *user* menggunakan *software* FEM yang bervariasi, salah satunya adalah ANSYS yang akan dipakai pada penelitian kali ini.

Salah satu pionir dalam pemakaian FEM dalam menganalisa permasalahan pengelasan adalah *paper* dari Tall (1970). Di dalamnya, analisa thermal dimodelkan sebagai analisa dua dimensi dan analisa mekanikalnya sebagai satu dimensi saja. Salah satu aspek penting dalam pemodelan adalah akurasi atau ketepatan yang membutuhkan gabungan dari pendekatan FEM, analisis dan eksperimental. Bagaimana hubungannya ditunjukkan pada gambar 2.10 di bawah ini :



Gambar 2.13 Skema pendekatan FEM, analisis, dan eksperimental

Sumber : B. Darmadi, Djarot (2014)

Dari gambar di atas, dapat dilihat bahwa FEM diverifikasi dari hasil analisis dan divalidasi dengan pengukuran eksperimental. Sebagian besar jurnal ilmiah mengenai pemodelan FEM melibatkan validasi untuk menegaskan kebenaran dari model yang bersangkutan, dan verifikasi sangat sedikit dipakai dalam pembuktian model FEM dari pengelasan.

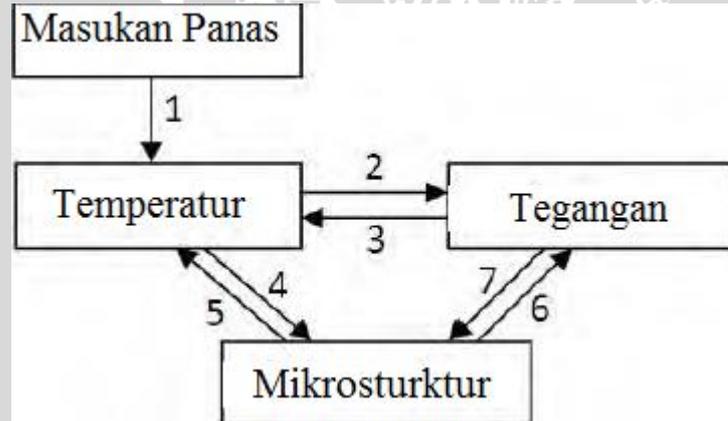
Solusi analitik sering membantu dalam memecahkan masalah dengan kondisi sederhana dan solusi eksaknya hampir mendekati kebenaran, Sementara FEM, hasilnya

tidak sebaik verifikasi analitik, namun memberikan kemudahan dalam mengerjakan kondisi – kondisi yang kompleks (terutama geometri). Keduanya bisa terdapat kemungkinan salah di dalam asumsi yang dipakai.

Validasi membandingkan hasil dari pemodelan FEM dengan pengujian eksperimental. Di dalam pemodelan FEM, asumsi digunakan untuk menyederhanakan kondisi nyata yang sebenarnya jauh lebih kompleks. Sebuah pemodelan FEM yang baik dapat memberi hasil yang mendekati hasil analisis dan hasil eksperimental.

Proses pengelasan telah dimodelkan sebagai sumber panas yang bergerak sepanjang suatu padatan (*moving heat source over a solid*). Beberapa jurnal seperti Colegrove (2004) dan M. Song & Kovacevic (2003) telah memakai model sumber panas volumetrik yang bergerak (q''' (J/m^3s)). Ada juga yang memakai *surface heat load* (q'' (J/m^2s)). Ada pula yang memakai *point heat source* (sumber panas titik) sebagai model masukan beban panasnya.

Masukan panas yang menuju *base metal*, adalah akibat sumber panas dari proses pengelasan. Seperti pada gambar 2.11 di bawah ini, analisa termal melibatkan panas yang berpindah menuju daerah yang bersuhu rendah dari *base metal* sementara di saat yang sama panas juga berpindah menuju lingkungan sekitar via konveksi dan radiasi.



Gambar 2.14 : Hubungan masukan panas dengan parameter lain dalam pengelasan

Sumber : B. Darmadi, Djarot (2014)

Proses pertama dalam pengelasan adalah pemasukan panas dari sumber panas lasan. Panas yang keluar ini terkonsentrasi pada sejumlah kecil volume dari *base metal* yang mengakibatkan timbulnya *Heat Affected Zone* atau HAZ. Pada tahap awal, panas terkonsentrasi ini akan terlepas utamanya karena proses konduksi, meskipun pelepasan panas menuju lingkungan sekitar juga terjadi secara konveksi dan radiasi.

Panas juga terserap oleh *base metal* ketika terjadi perubahan fasa dikarenakan akibat adanya panas laten. Sifat termal dari material mempengaruhi nilai dari rataan per pindahan panas (panah nomor 1 pada gambar 2.14). Dengan menimbang hukum kekekalan energi, dan kondisi batas, dapat diperoleh nilai suhu pada titik tertentu.

Jika distribusi temperatur sepanjang daerah pengelasan menjadi tujuan dari penelitian, maka penelitian tersebut disebut sebagai *thermal analysis of welding process*. Berdasar hasil dari analisa termal pengelasan dan koefisien dari ekspansi termal, deformasi akibat panas dapat dikalkulasi. Karena suhu tidak terdistribusi secara merata dan hasilnya adalah terbentuk tegangan termal (panah 2 gambar 2.14). Defomasi yang terjadi juga bisa merubah kondisi batas termal . Juga, regangan plastis dan elastis menghasilkan panas yang mempengaruhi suhu dari daerah lasan (panah 3 gambar 2.14). Sampai tahap ini, analisa yang dipakai adalah analisa termomekanikal (TM)

Untuk *base metal* mengalami perubahan fasa, proses pengelasan perlu mencapai titik dimana suhu yang dihasilkan cukup untuk mulai merubah fasa dari material tersebut. Sebagai contoh, ketika *base metal* dalam keadaan baja ferit, ferit berubah menjadi austenit jika dipanaskan dan ketika *cooling rate* dari proses pengelasan sudah mulai bekerja, struktur martensit mulai terbentuk. Pada tahap akhir di sini sampai Analisa Termometalurgikal (TTM)

Mikrostruktur yang terbentuk bergantung pada *temperature history* (panah 4 gambar 2.14). Mikrostruktur yang berbeda akan memiliki sifat termal yang khas yang nanti nya akan mempengaruhi perpindahan panas menuju daerah *cooling region* atau mempengaruhi suhu dari posisi tertentu (panah 5 gambar 2.14)

Mikrostruktur yang berbeda akan memiliki koefisien ekspansi termal yang khas yang akan menentukan seberapa besar deformasi yang bisa terjadi. Bisa juga ekspansi atau penyusutan terjadi dikarenakan perubahan fasa padat, yang dapat menimbulkan tegangan sisa (panah 6 gambar 2.14). Juga, beberapa penilitian menyatakan tegangan yang terbentuk bahkan bisa mempengaruhi mikrostruktur kembali (panah 7 gambar 2.14)

2.9 Hipotesis

Berdasarkan teori perpindahan panas, suhu pengelasan FSW akan meningkat saat waktu pengelasannya bertambah sampai suatu titik puncak, kemudian akan menurun sampai sama dengan suhu lingkungannya ketika sumber panas Bergeraknya hilang.

