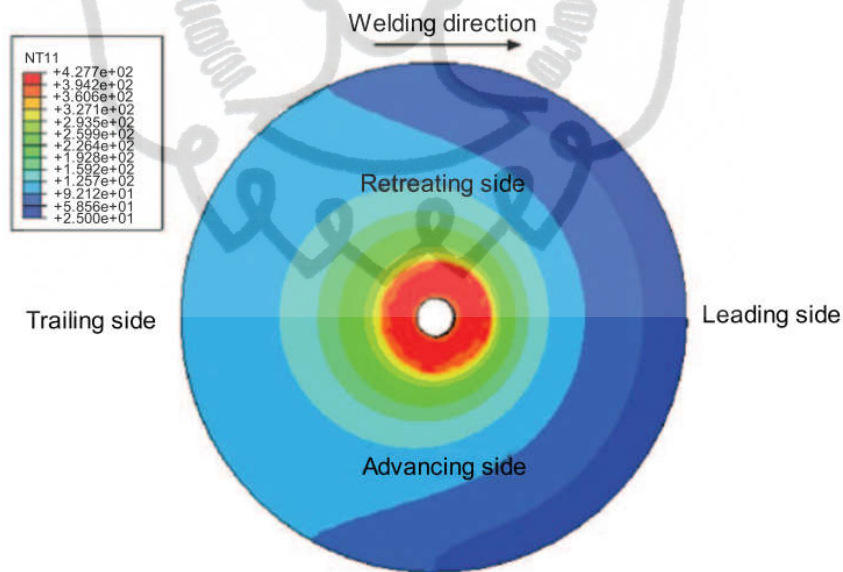


BAB II

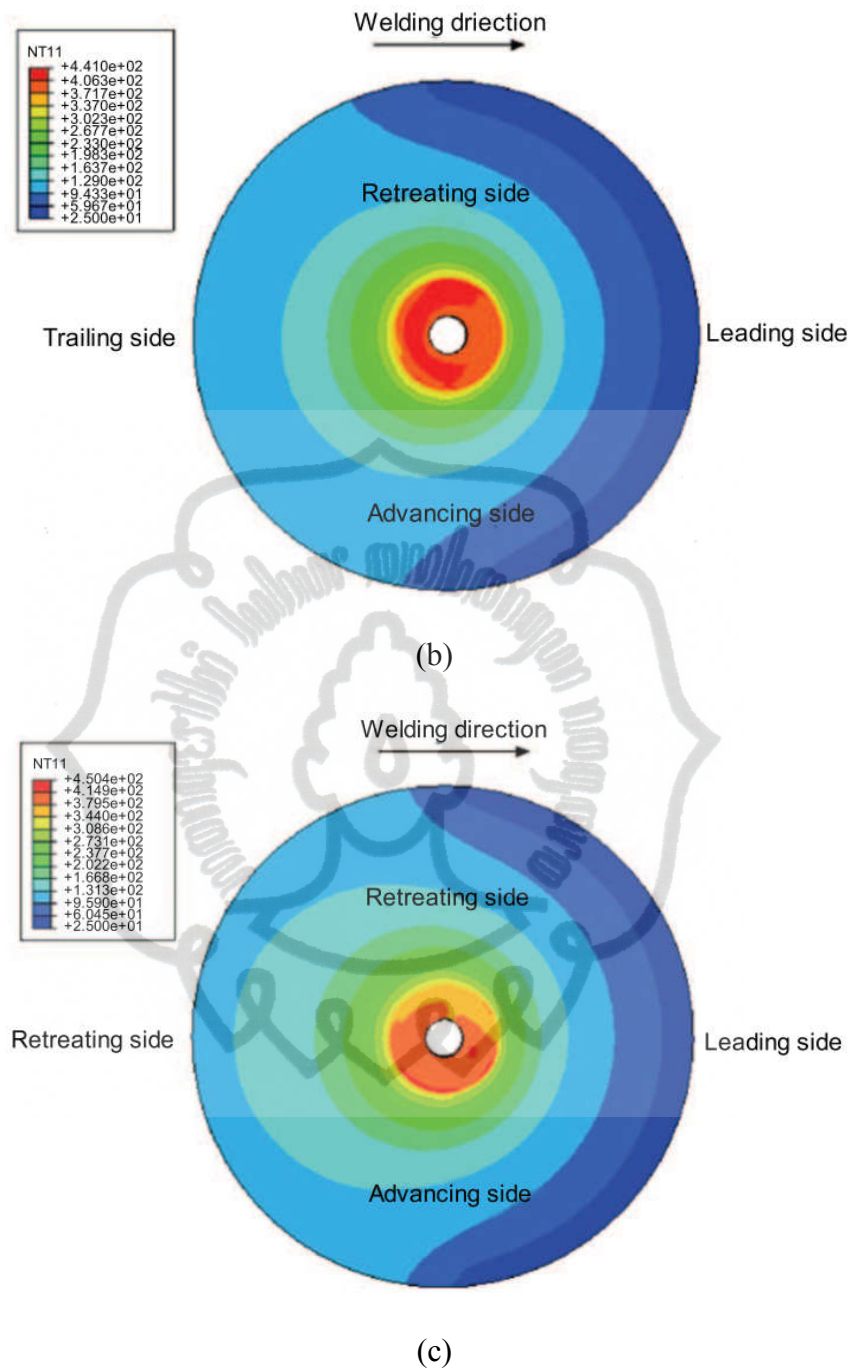
LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

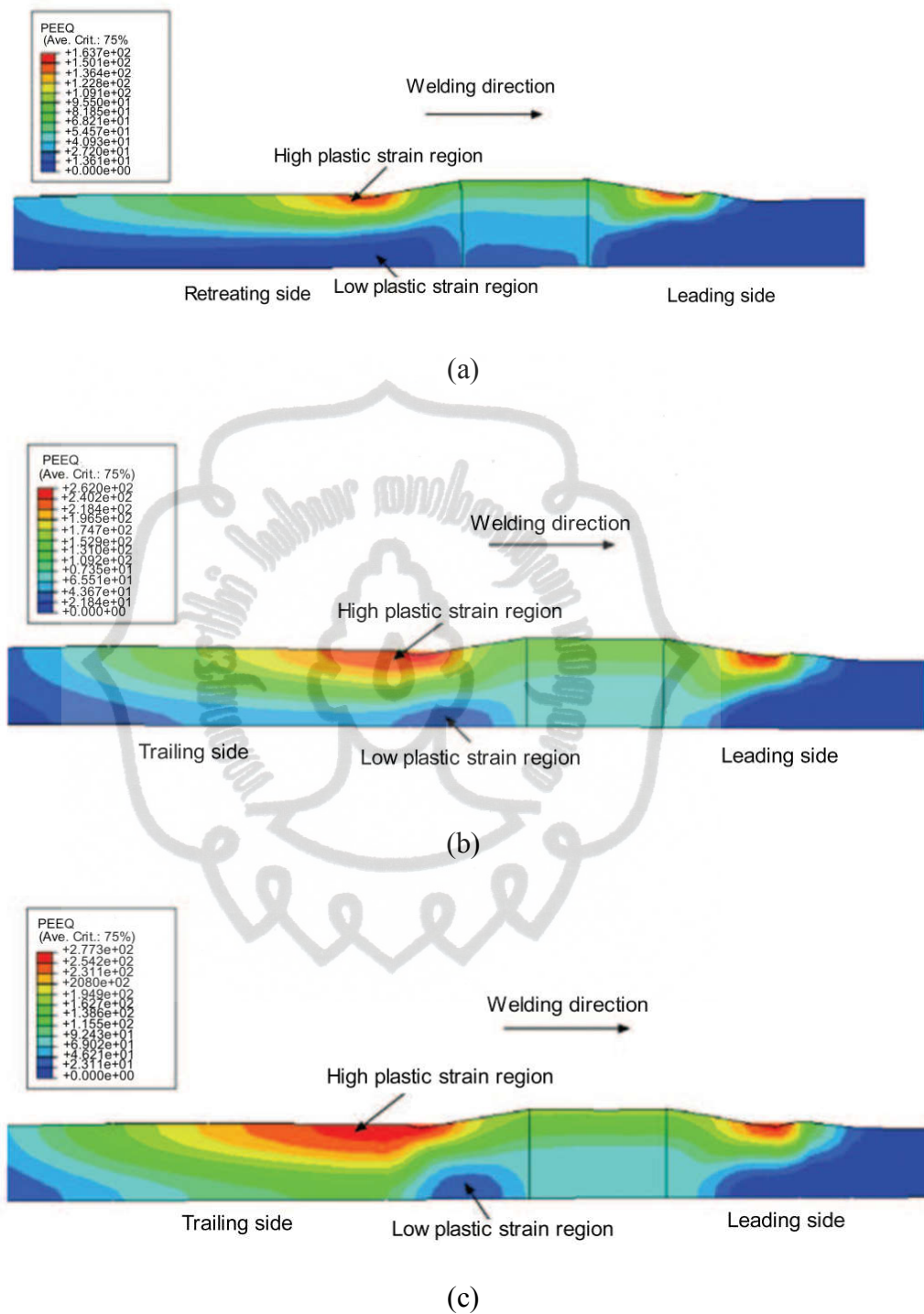
Zhang dkk (2008) melakukan pemodelan FSW dengan variasi kecepatan rotasi dan kecepatan pengelasan. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa temperatur maksimal yang dihasilkan akan lebih rendah dari titik lebur material yang akan di las. Gambar 2.1 dan 2.3 menunjukkan gradien temperatur tertinggi muncul pada *leading side* benda kerja. Gambar 2.2 dan 2.4 menunjukkan bahwa daerah tegangan plastis rendah terdapat di dekat permukaan belakang bawah pin, tegangan plastis ini dibentuk dari pola aliran material pada FSW. Temperatur maksimal dan regangan plastik maksimal dapat ditingkatkan dengan meningkatkan kecepatan rotasi. Pengaruh deformasi material di sekitar *shoulder* dapat ditingkatkan dengan meningkatkan kecepatan rotasi dan mengurangi kecepatan pengelasan.



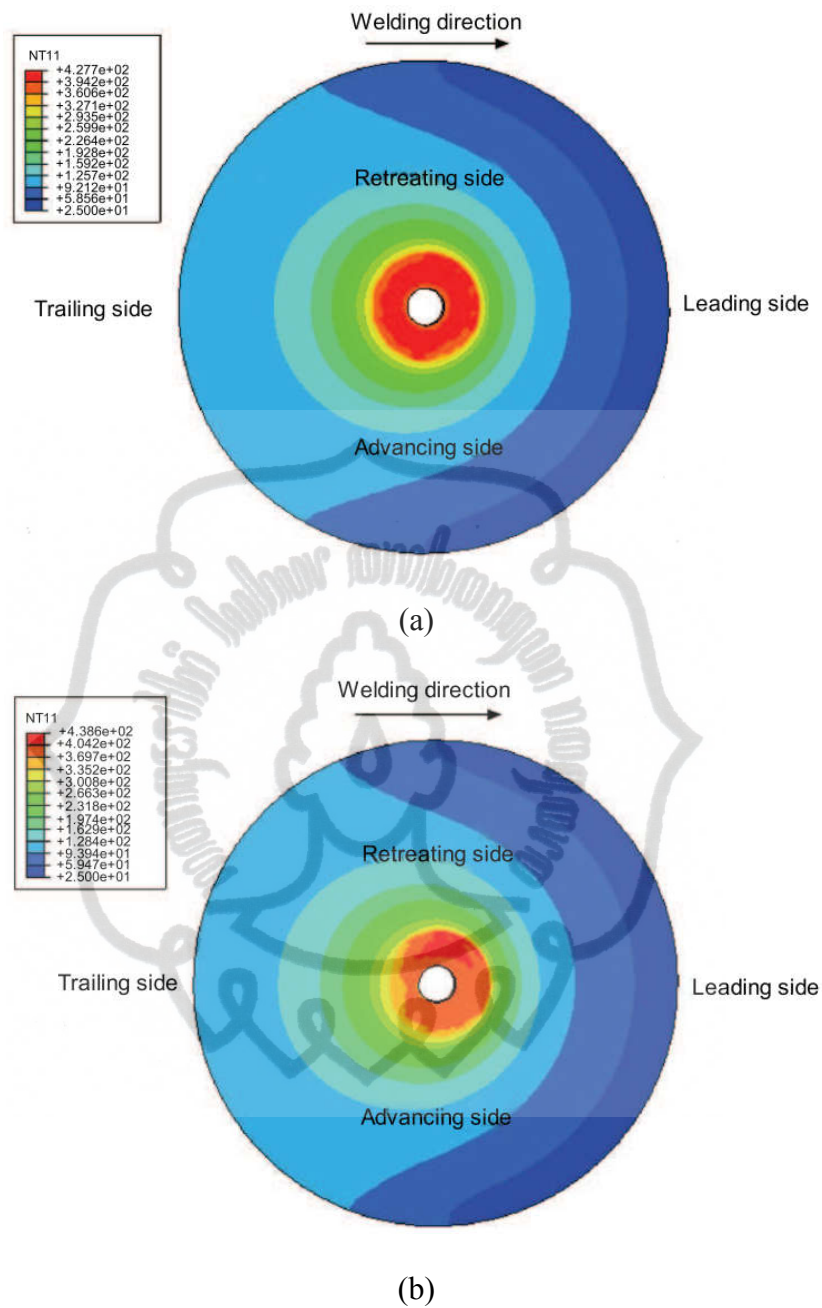
(a)



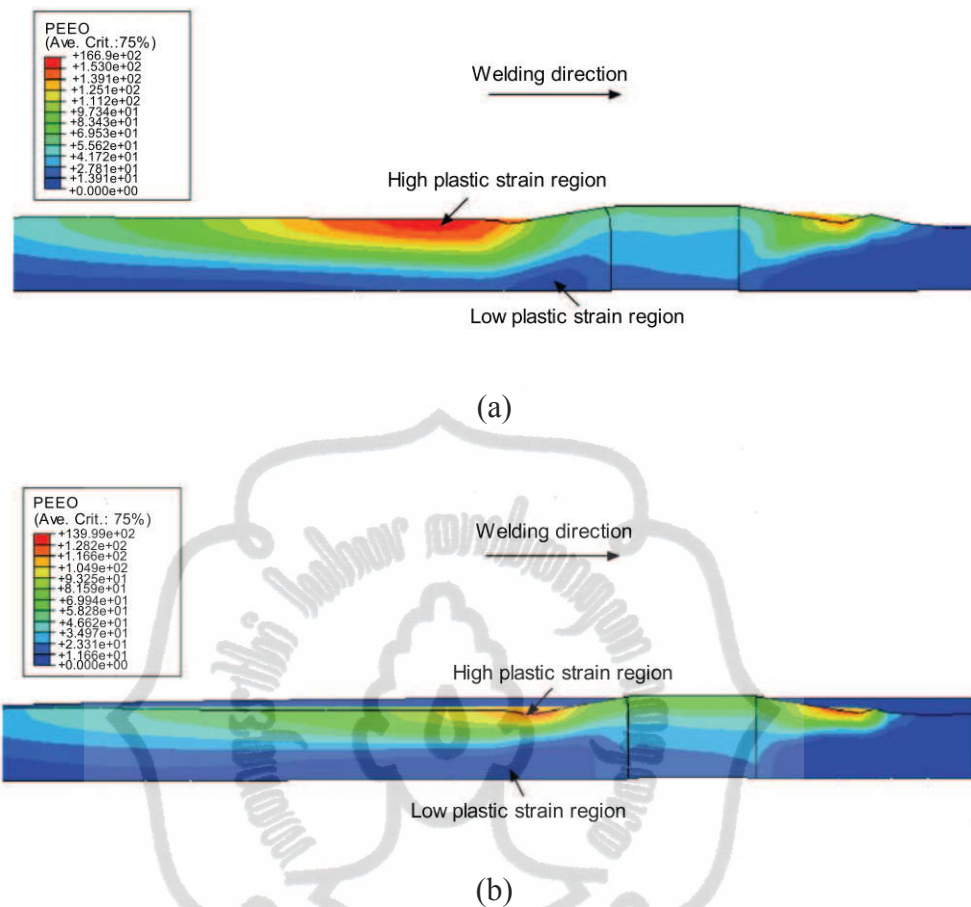
Gambar 2.1 Profil temperatur dengan variasi kecepatan rotasi (a) 400rpm, (b) 460 rpm, (c) 590 rpm dengan kecepatan pengelasan 2mm/s (Zhang, dkk. 2008).



Gambar 2.2 Profil tegangan plastis dengan variasi kecepatan rotasi (a) 400rpm, (b) 460rpm, (c) 590rpm dengan kecepatan pengelasan 2mm/s (Zhang, dkk. 2008).



Gambar 2.3 Profil temperatur dengan variasi kecepatan pengelasan (a) 2mm/s, (b) 3mm/s dengan kecepatan rotasi 400rpm (Zhang, dkk. 2008).



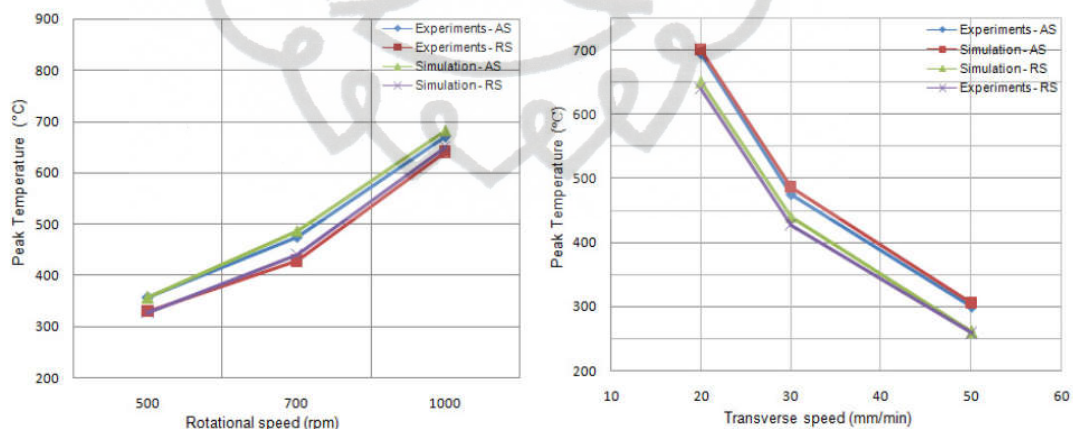
Gambar 2.4. Profil tegangan plastis dengan variasi kecepatan pengelasan (a) 2mm/s, (b) 3mm/s dengan kecepatan rotasi 400rpm (Zhang, dkk. 2008).

Balasubramanian dkk (2008) melakukan penelitian FSW secara eksperimen dengan menggunakan material AA2024 sebagai salah satu benda kerjanya. Dari penelitian tersebut ditemukan bahwa pada kecepatan rotasi 1200rpm dan kecepatan pengelasan 75 mm/min tidak ditemukan cacat pada sambungan las. Pada saat proses FSW, material yang berada disekitar *tool* akan teraduk oleh *tool* yang berputar. Proses FSW sulit menghasilkan samnungan las bebas cacat di semua kondisi pengelasan. Untuk mendapatkan hasil sambungan las bebas cacat, maka kondisi dan paramater pengelasan disesuaikan terhadap sifat mekanis material. Sambungan las bebas cacat dipengaruhi oleh kecepatan rotasi *tool* dan kecepatan pengelasan *tool*.

Tool yang sering digunakan pada FSW terdiri dari *flat shoulder*, pin silinder, pin tirus, pin tanpa *thread*, dan pin dengan *thread*. Hasil penyelidikan secara eksperimen menunjukkan bahwa bentuk, ukuran dan profil pada tool memiliki pengaruh signifikan pada makrostruktur, mikrostruktur, *welding force*, dan *mechanical properties* dari sambungan las. (Su, dkk. 2015).

Peningkatan area kontak antara pin dengan benda kerja akan meningkatkan temperatur pada FSW. Sedangkan penambahan *conical angle* dapat berguna untuk meningkatkan *flowability* material disekitar *welding tool* (Zhang, dkk. 2014).

Pembangkitan panas selama FSW sangat dipengaruhi oleh kecepatan rotasi dan kecepatan pengelasan, dimana temperatur puncak sangat dipengaruhi oleh kecepatan rotasi, sedangkan tingkat pemanasan dipengaruhi oleh kecepatan pengelasan. Cartigueyen dkk (2014) melakukan penelitian FSW dengan material tembaga secara eksperimen dan numerik. Dari penelitian ini didapatkan nilai temperatur pada pada sisi *advance* sedikit lebih tinggi dibandingkan pada sisi *retreat* pada semua variasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



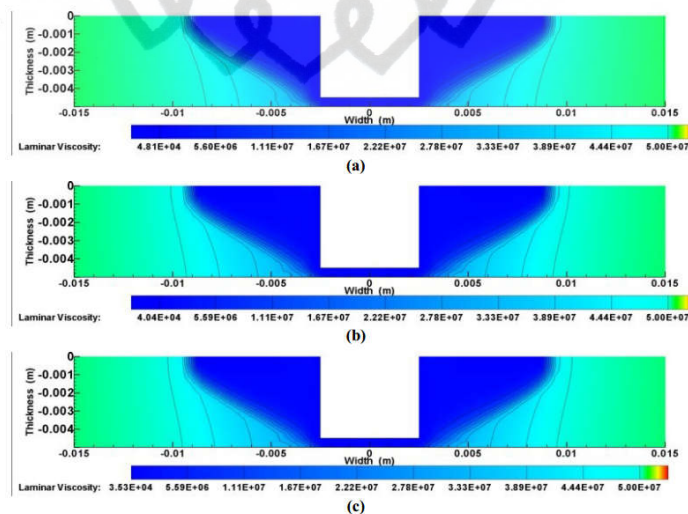
Gambar 2.5 Distribusi temperatur pada sisi *Advance* dan *Retreat* (Cartigueyen, dkk. 2014).

Hasil proses FSW dengan benda kerja menggunakan plat AA7020-T53 menunjukkan bahwa temperatur pada proses FSW terdistribusi secara simetris searah jalur las. Peningkatan kecepatan pengelasan dapat menurunkan distribusi temperatur

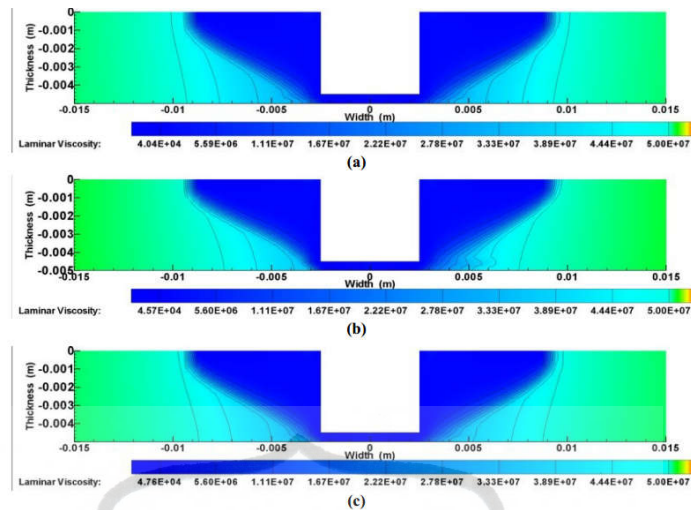
dan peningkatan kecepatan rotasi dapat meningkatkan distribusi temperatur. (Muhsin, dkk. 2013).

Peningkatan putaran pada *tool* dengan kecepatan pengelasan konstan akan meningkatkan jumlah panas di zona las. Sebaliknya, peningkatan kecepatan pengelasan dengan putaran *tool* konstan akan mengurangi jumlah panas di zona las. Temperatur puncak FSW muncul di daerah belakang sisi *advance*. Pada awalnya temperatur meningkat dengan tajam, kemudian mengalami periode fluktuasi dan akhirnya temperatur menunjukkan kecenderungan menurun secara *steady* (Armansyah, dkk. 2014).

Distribusi temperatur pada FSW dipengaruhi oleh kecepatan rotasi dan kecepatan pengelasan. Meningkatnya kecepatan rotasi pada *tool* akan menyebabkan meningkatnya temperatur puncak selama FSW. Meningkatnya temperatur akan menyebabkan viskositas di daerah *nugget* menurun. Viskositas yang rendah di sekitar *tool* akan menyebabkan aliran material meningkat. Profil viskositas dapat dilihat pada Gambar 2.6 dan 2.7. Sedangkan temperatur puncak akan menurun dengan meningkatnya kecepatan pengelasan pada *tool*. Nilai temperatur yang menurun akan menyebabkan viskositas di daerah *stir zone* meningkat. (Padmanaban, dkk. 2014).

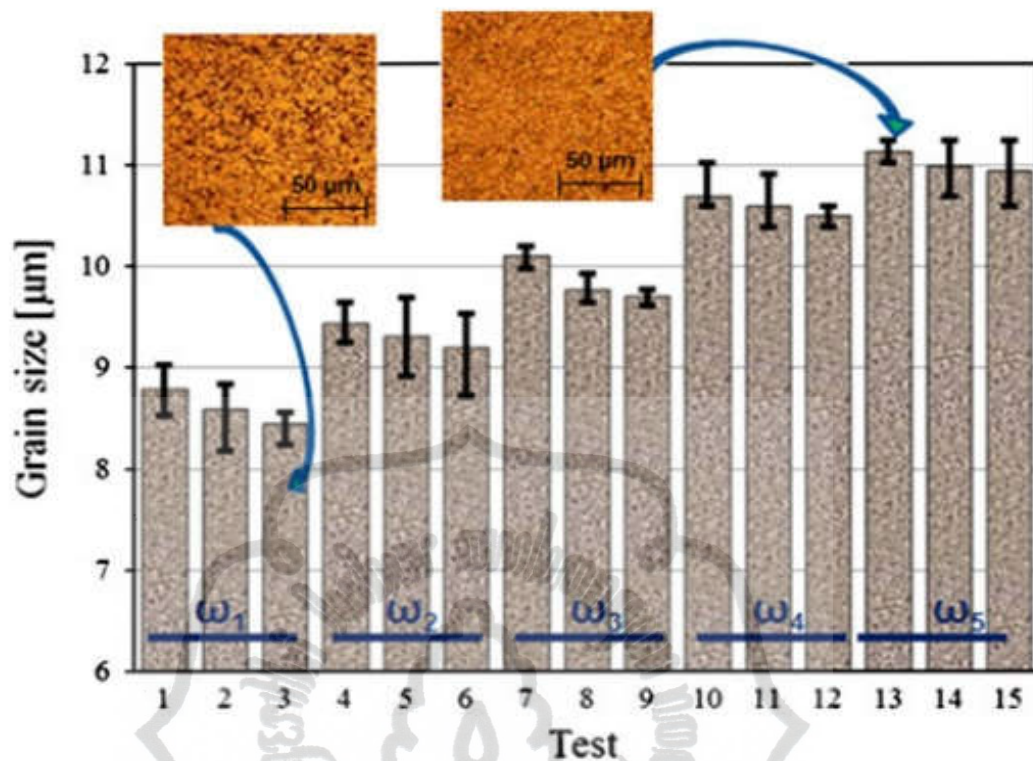


Gambar 2.6 Profil viskositas dengan kecepatan rotasi tool a) 900 rpm, b) 1050 rpm, c) 1200 rpm, kecepatan transverse tool 20 mm/min (Padmanaban, dkk. 2014).



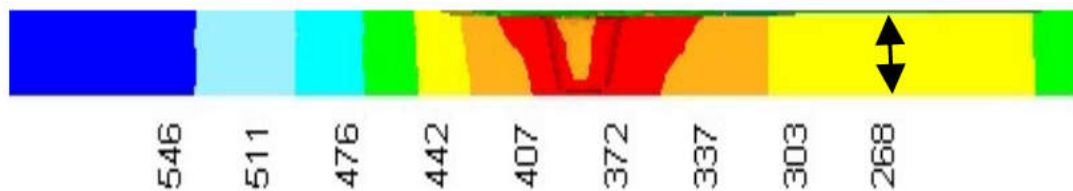
Gambar 2.7 Profil viskositas dengan kecepatan pengelasan a) 20 mm/min, b) 40 mm/min, 60 mm/min, kecepatan rotasi tool 1050 rpm (Padmanaban, dkk. 2014).

Pierpaolo dan Pallazo (2013) melakukan penelitian FSW dengan variasi kecepatan rotasi dan kecepatan pengelasan menggunakan material AA2024. Penelitian tersebut menunjukkan cacat akan muncul pada variasi kecepatan rotasi dibawah 1200 rpm. Hasil las bebas cacat muncul pada variasi 1400 rpm dan 1600 rpm. Peningkatan kecepatan rotasi pada kecepatan pengelasan yang rendah akan menghasilkan awal retakan. Peningkatan kecepatan rotasi akan menghasilkan mikrostruktur yang lebih kasar. Hal ini berlaku juga sebaliknya ketika kecepatan pengelasan meningkat. Ukuran butir pada area rekritisasi dipengaruhi oleh kedua variasi. Ukuran butir akan meningkat dengan meningkatkan kecepatan rotasi dan ukuran butir akan menurun dengan menurunkan kecepatan rotasi. Sedangkan ukuran butir akan menurun dengan meningkatkan kecepatan pengelasan dan ukuran butir akan meningkat dengan menurunkan kecepatan pengelasan. Ukuran butir setiap variasi pengelasan penelitian dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Grafik ukuran *grain size* pada *nugget zone* (Pierpaolo dan Pallazo. 2013).

Temperatur tertinggi akan muncul pada daerah *nugget zone* yang menyerupai huruf V seperti pada Gambar 2.9. Kontur temperatur yang menyerupai huruf V muncul dikarenakan perpindahan panas pada sisi bawah *workpiece* lebih tinggi nilainya dibanding sisi atas *workpiece* (Jain, dkk. 2014).

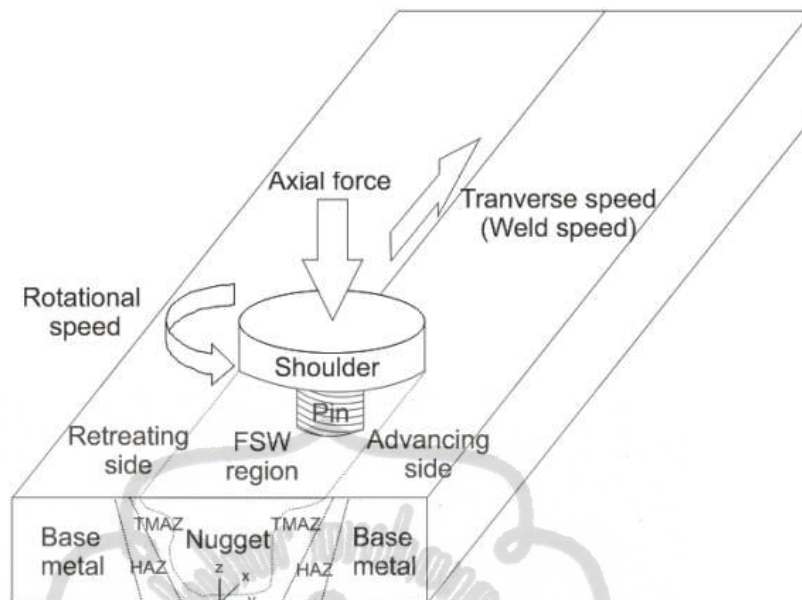


Gambar 2.9 kontur temperatur pada *workpiece* saat proses FSW (Jain, dkk. 2014).

2.2 Dasar Teori

Friction Stir Welding adalah proses penyambungan dua material dengan kondisi solid. FSW menggunakan desain *non-consumable rotating tool* untuk mengelas plat menjadi satu. *Tool* pada FSW yang memiliki diameter besar disebut *shoulder* dan diameter yang kecil disebut pin. Pembangkitan panas pada proses FSW dimulai dari gesekan antara *tool* dan benda kerja. Panas yang telah dibangkitkan kemudian dikonduksikan ke benda kerja. Panas akibat gesekan membuat material melunak dan teraduk. Adukan tersebut menyebabkan deformasi plastis antara *interface tool* dengan benda kerja. Tingkat perpindahan panas tergantung pada konduksi dan konveksi material ke lingkungan. Distribusi temperatur sepanjang benda kerja dipengaruhi oleh jumlah panas yang dikonduksikan ke benda kerja. Distribusi temperatur akan mempengaruhi aliran material, mikrostruktur, dan *mechanical properties* pada zona las (Lakhshminarayan, dkk. 2009).

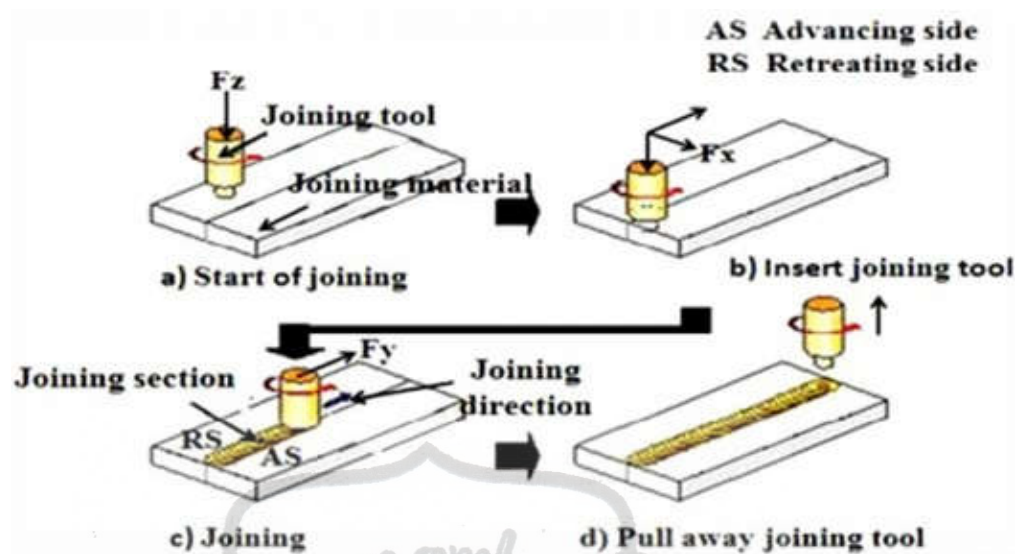
Temperatur pada sisi *advance* lebih tinggi dari pada sisi *retreat*, hal ini dikarenakan aliran material dan deformasi plastis disekitar *tool* bergerak dari sisi *advance* ke sisi *retreat*. Panas hasil dari gesekan *shoulder* akan memberikan temperatur yang lebih tinggi. Hasil komputasi menunjukan bahwa aliran material pada sisi *retreat* dan sisi *front* lebih tinggi. Tingkat selip pada sisi *retreat* dan sisi *front* lebih rendah dibanding sisi *trail* dan sisi *advance*. Hal inilah yang mengakibatkan *heat flux* pada sisi *trail* dan *advance* lebih tinggi. *Heat flux* yang tinggi menyebabkan temperatur meningkat pada sisi *trail* dan *advance* untuk plat tipis maupun tebal. Temperatur puncak pada sisi *advance* sedikit lebih tinggi dibandingkan sisi *retreat*, hal ini disebabkan arah vektor kecepatan tangensial disekitar *tool* berlawanan arah dengan vektor kecepatan pada sisi *advance* (Muhsin, dkk. 2012). Selama proses FSW, temperatur maksimum yang dapat dicapai bernilai 80% dari temperatur lebur material (Su, dkk. 2015). Skema FSW dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Skema diagram dan terminology proses FSW (Muhsin, dkk. 2012).

Gerakan gesekan antara *tool* dan material pada FSW akan menghasilkan panas. Panas tersebut menyebabkan material menjadi lembek. Gerakan *tool* juga berfungsi menempa material disekitar *tool*. Gerakan *tool* akan mengasilkan sambungan las dengan kondisi solid. Hasil las yang bagus bergantung pada beberapa faktor seperti tipe *alloy*, kecepatan rotasi, kecepatan pengelasan, kedalaman penetrasi, dan tipe sambungan. Kecepatan putaran yang tinggi akan menghasilkan temperatur yang tinggi. Gerakan gesekan dan temperatur yang tinggi akan menghasilkan adukan dan campuran yang lebih intensif pada material. Material yang lunak akan berpindah dari sisi *lead* ke sisi *trailing*, pergerakan material ini dikarenakan gerakan rotasi dan translasi oleh *tool*. Material lunak tersebut kemudian menjadi *solid* di sisi *trailing* (Mishra, dkk. 2005).

Empat prinsip utama proses FSW dapat dijelaskan pada Gambar 2.11, yakni *Start of joining*, *Insert joining tool*, *Joining*, *Pull away joining tool* (Thube & Pal, 2014):



Gambar 2.11 Prinsip utama proses FSW (Thube dan Pal. 2014).

1. Start of joining

Pada FSW, *nonconsumable tool* yang terdiri dari *pin* dan *shoulder* berputar dengan kecepatan konstan.

2. Insert joining tool

Selama *tool plunge*, *tool* hanya mengalami gerakan berputar di satu tempat sampai *shoulder* menyentuh permukaan benda kerja, kondisi ini disebut periode *dwelling-time*. Panas yang dihasilkan dari gesekan membuat kondisi benda kerja disekitar *tool* menjadi plastis.

3. Joining

Tool kemudian mengaduk material yang telah menjadi plastis sepanjang arah sambungan benda kerja. Gerakan ini menghasilkan kombinasi proses tekan dan tempa oleh *shoulder*.

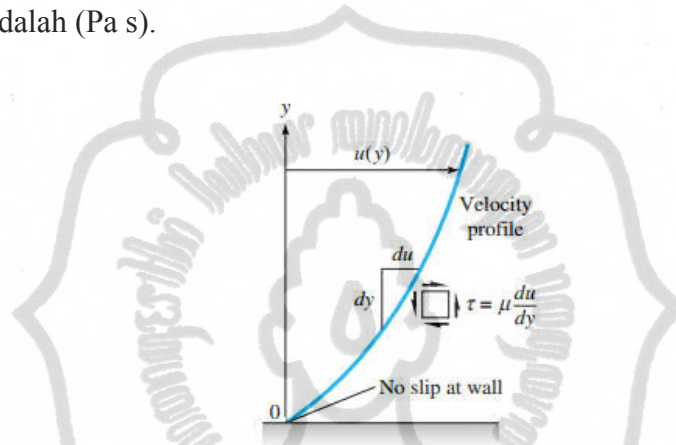
4. Pull away joining tool

Ketika pengelasan sepanjang benda kerja telah selesai, *tool* yang berputar diangkat dari material. Pengangkatan *tool* ini menghasilkan bekas lubang pengelasan pada benda kerja.

Keakuratan prediksi dan simulasi dari distribusi temperatur pada FSW sangat diperlukan, maka input dan data yang benar juga dibutuhkan. Data referensi dari

literatur yang telah dipublikasi diperlukan untuk menentukan *properties* dari material. Kondisi batas yang digunakan meliputi kondisi *interface* antara *tool* dengan benda kerja dan *thermal boundary condition* (Siddiqui, dkk. 2015).

Saat fluida bergerak atau bergeser, bagian yang bergerak tersebut akan berpindah sesuai dengan nilai *strain rate* yang berbanding lurus dengan koefisien viskositas. Viskositas adalah rasio tegangan geser τ_{yx} dengan gradient kecepatan pada fluida $\frac{du}{dy}$. Pergerakan fluida satu dimensi dapat dilihat pada Gambar 2.12. Satuan SI untuk viskositas adalah (Pa s).



Gambar 2.12 Distribusi pergeseran pada fluida *newtonian* (White. 2003)

Hampir semua fluida masuk ke kategori fluida *newtonian*. Fluida *newtonian* adalah fluida yang memiliki nilai *shear stress* berbanding lurus dengan *shear strain rate*. Hal inilah yang menyebabkan fluida *newtonian* memiliki viskositas yang konstan. Rumus fluida *newtonian* dapat dilihat pada rumus 2.1.

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.1)$$

Sedangkan fluida yang memiliki nilai *shear stress* tidak berbanding lurus dengan *shear strain rate* disebut fluida *non newtonian*. Pada fluida *non newtonian*, fluida akan mengalami perubahan viskositas jika fluida tersebut diberikan sebuah gaya. Hal inilah yang menyebabkan fluida *non newtonian* tidak memiliki viskositas yang konstan.

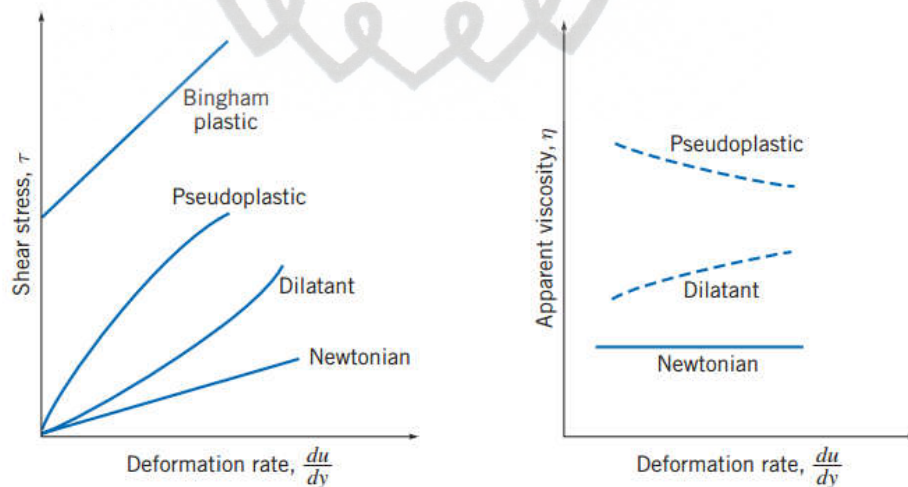
Pendekatan fluida *non newtonian* dibagi menjadi 2, yaitu *pseudoplastic* dan *dilatant*. *Pseudoplastic* adalah suatu model pendekatan fluida *non newtonian* yang viskositasnya akan cenderung menurun dengan meningkatnya nilai deformasi ($n < 1$). *Dilatant* adalah suatu model pendekatan fluida *non newtonian* yang viskositasnya akan meningkat dengan meningkatnya nilai deformasi ($n < 1$). Rumus fluida *non newtonian* dapat dilihat pada rumus 2.2.

$$\tau_{yx} = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (2.2)$$

Dimana n adalah indek kelakuan aliran, k adalah indek konsistensi. Pada fluida *non newtonian*, rumus dapat ditulis seperti berikut:

$$\tau_{yx} = k \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \frac{du}{dy} = \eta \frac{du}{dy} \quad (2.3)$$

$\eta = k \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1}$ adalah *apparent viscosity*. Pada fluida *newtonian* k diganti dengan μ , dimana μ bernilai konstan. Sedangkan pada fluida *non newtonian*, k diganti dengan η , dimana nilai η bergantung pada *shear rate*. Perbedaan setiap jenis fluida dapat dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 (a) *shear stress*, (b) *apparent viscosity* sebagai fungsi dari tingkat deformasi untuk aliran 1 dimensi (Fox, dkk. 2011).

Pada penelitian ini, *tool* diasumsikan sebagai *solid* sedangkan *workpiece* akan diasumsikan sebagai *fluid* dengan pendekatan fluida *non newtonian pseudo plastic*. (Fox, dkk. 2011; White. 2015).

Nilai viskositas (η) benda kerja bergantung pada parameter *flow stress*, *strain rate* dan temperatur. Berikut persamaan untuk viskositas:

$$\eta = \frac{\sigma}{3\varepsilon} \quad (2.4)$$

Dimana σ adalah *flow stress* dari material dan ε adalah *strain rate*. Untuk *strain rate* dan *flow stress* dapat dicari dengan menggunakan rumus 2.5 dan 2.6

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]} \quad (2.5)$$

$$\sigma(T, \varepsilon) = \left(1 - \sqrt{\frac{T-273}{T_m-273}} \right) \cdot \sigma_1(T, \varepsilon) + \sigma_0 \quad (2.6)$$

Dimana σ_0 merupakan nilai *flow stress* diatas titik leleh dari material, T_m adalah titik leleh material, dan σ_1 didapatkan dari rumus:

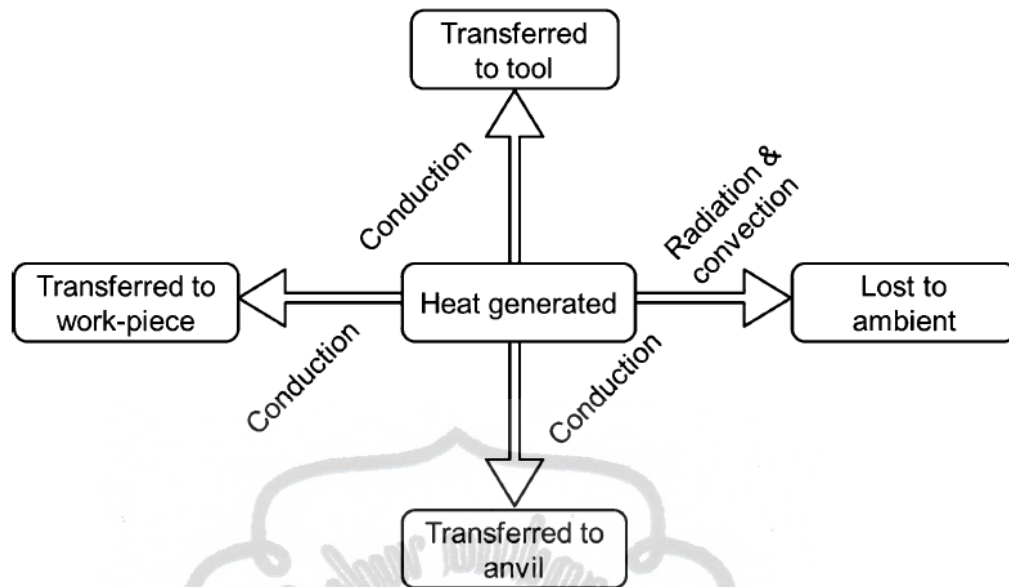
$$\sigma_1 = \frac{1}{1.6 \times 10^{-8} \text{Pa}^{-1}} \left\{ \left(\frac{Z(T, \varepsilon)}{A} \right)^{1/4.273} + \left[1 + \left(\frac{Z(T, \varepsilon)}{A} \right)^{2/4.273} \right]^{1/2} \right\} \quad (2.7)$$

Dimana A konstanta. Sedangkan Z dapat dicari dengan menggunakan rumus parameter Zener-Hollomon:

$$Z(T, \varepsilon) = \varepsilon \cdot \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \quad (2.8)$$

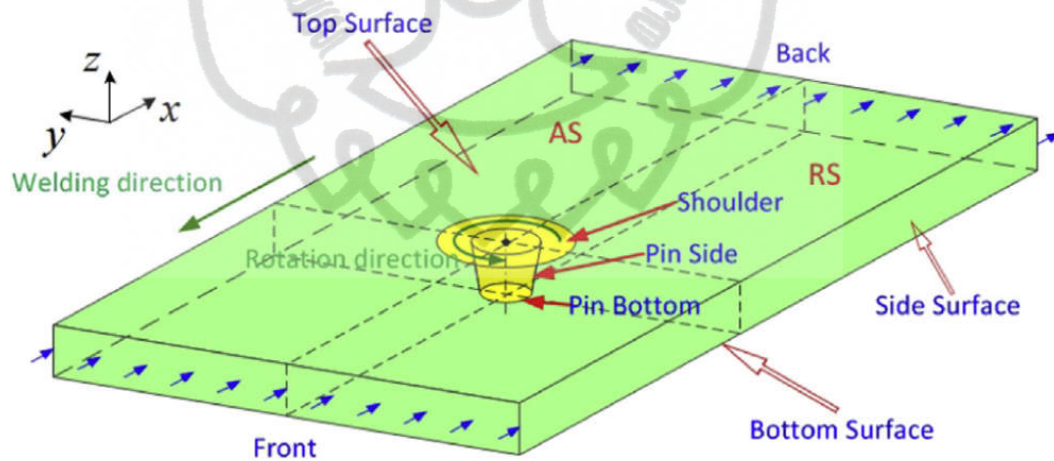
Dimana Q adalah energi aktivasi, R adalah konstanta gas (Su, dkk. 2015).

Skema distribusi temperatur yang terjadi selama proses proses FSW dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Skema distribusi temperatur pada proses FSW (Mishra, dkk. 2014).

Skema *boundary condition* perpindahan panas selama proses FSW dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Skema perpindahan panas (Su, dkk. 2014).

Panas yang diterima *workpiece* dari *tool* dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q = m_{\text{workpiece}} \cdot C_{p\text{workpiece}} \cdot (T_{\text{akhir-workpiece}} - T_{\text{awal-workpiece}}) \quad (2.9)$$

Dimana:

Q : panas yang diterima *workpiece* dari *tool* (J/s)

$m_{workpiece}$: laju aliran massa *workpiece* (kg/s)

$C_{p_{workpiece}}$: kapasitas panas *workpiece* (J/kg K)

$T_{awal-workpiece}$: temperatur awal *workpiece* (K)

$T_{akhir-workpiece}$: temperatur akhir *workpiece* disekitar *tool* (K)

Boundary condition perpindahan panas konveksi antara permukaan atas *workpiece* dapat dihitung menggunakan rumus:

$$q_{top} = h_t A (T - T_a) \quad (2.10)$$

dimana h_t adalah koefisien konveksi permukaan atas ($W/m^2 K$), T adalah temperatur rata-rata *workpiece* (K), T_a adalah temperatur sekitar (K) dan A adalah luas permukaan (m^2).

Boundary condition Perpindahan panas pada permukaan bawah *workpiece* (q_{bottom}) (W) dapat dihitung dengan persamaan:

$$q_{bottom} = h_b A (T - T_a) \quad (2.11)$$

dimana h_b merupakan koefisien konveksi permukaan bawah ($W/m^2 K$).

Boundary condition perpindahan panas sisi *advance* dan *retreat* pada *workpiece* dapat dihitung menggunakan rumus:

Sisi *advance*:

$$q_{advance} = h_s A (T - T_a) \quad (2.12)$$

Sisi *retreat*:

$$q_{retreat} = h_s A (T - T_a) \quad (2.13)$$

dimana h_s merupakan koefisien konveksi sisi samping ($W/m^2 K$) (Holman. 2010).