

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Novan, 2008 meneliti tentang konduksi panas pada lempeng baja silindris yang berinteraksi dengan laser menggunakan metode studi model numerik. Penelitian dilakukan dengan membentuk suatu model numerik untuk mensimulasikan distribusi temperatur dalam material, kemudian memprediksi bagian material yang dipengaruhi oleh panas, sehingga dapat memprediksi kedalaman lapisan yang mengeras dalam proses LTH. Model numerik ini menghasilkan sebuah profil temperatur yang dapat menggambarkan proses transfer panas di dalam material. Model numerik ini menggunakan *software* FORTRAN berdasarkan metode *finite difference* kemudian dibandingkan dengan solusi analitis dari literatur menggunakan *software* MAPLE. Secara numerik, hasil penelitian yang didapat hampir sesuai dengan analitis dalam hal temperatur maksimum yang dicapai yaitu $645^{\circ}\text{C} - 660^{\circ}\text{C}$. Tetapi terdapat ketidaksesuaian antara hasil numerik dengan analitis yang terjadi pada daerah pendinginan yaitu sekitar $50^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$. Peneliti menggunakan beberapa langkah untuk memeriksa masalah ini yaitu dengan menyesuaikan besarnya ukuran *mesh* dan penambahan waktu. Peneliti menggunakan ukuran *mesh* sebesar 121×121 , ukuran tersebut dua kali lebih besar dari ukuran sebelumnya, tetapi tidak menghasilkan perubahan yang signifikan.

Wijayanti, dkk (2010) melakukan penelitian tentang simulasi numerik pada proses pirolisis biomassa dengan penambahan *trial and error* nilai entalpi yang dihasilkan dengan adanya perubahan panas pada reaksi kimianya. Kepadatan pada $T > 623 \text{ K}$ akan menjadi sekitar 60% dari suhu kamar. Waktu rata – rata suhu pada lapisan biomassa dapat direproduksi oleh simulasi numerik dari konduksi panas melalui pirolisis.

Faris (2014) melakukan penelitian tentang distribusi temperatur dengan membandingkan proses pirolisis tanpa adanya entalpi dan dengan adanya entalpi menggunakan simulasi numerik. Nilai entalpi yang dibandingkan dalam simulasi adalah 0 dan 100. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa distribusi temperatur pada proses pirolisis dipengaruhi oleh perubahan panas reaksi.

2.2 Pirolisis

Pirolisis adalah proses dekomposisi kimia bahan organik melalui proses pemanasan tanpa melibatkan oksigen. Pada umumnya pirolisis menggunakan bahan seperti batu bara, sisa makanan, kertas, plastik, biomassa, dan limbah manusia atau hewan.

2.3 Pirolisis Biomassa

Komponen utama dari biomassa adalah selulosa, hemiselulosa, dan lignin memiliki properties yang berbeda. Hemiselulosa adalah konstituen yang paling reaktif dan lignin sebaliknya (Probstein dan Hicks, 1982). Pirolisis biomassa dapat digambarkan dalam hal perilaku komponen-komponen ini. Laju reaksi, produk, dan perilaku termal lainnya dianggap sebagai perilaku komponen utamanya.

2.4 Proses Pirolisis Pada Silinder

Proses pirolisis pada silinder merupakan proses pirolisis yang menggunakan media tabung (silinder) sebagai tempat untuk melakukan proses pirolisis. Material yang dipakai pada proses pirolisis ini adalah serbuk kayu. Serbuk kayu tersebut dimasukkan ke dalam piroliser sebagai alat pemanas. Serbuk kayu akan dibuat berubah bentuk menjadi *tar*, *char*, atau gas tergantung kebutuhan penelitian. Pada silinder akan diberikan perlakuan panas secara konduksi, konveksi, dan radiasi. Perpindahan panas konduksi terjadi pada serbuk kayu yang terdapat pada silinder dan mengalirkan panas menuju silinder. Sedangkan perpindahan panas konveksi terjadi melalui zat N_2 yang dialirkan di dalam piroliser. Untuk proses perpindahan panas radiasi terjadi karena panas dari *heater* menuju silinder secara tidak langsung. Demikian yang disebut dengan pirolisis pada silinder.

2.5 Perpindahan Panas

Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah ilmu yang meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur diantara material. Dari hukum termodinamika, telah diketahui bahwa energi yang dipindahkan disebut energi panas. Istilah-istilah yang digunakan untuk menyatakan tiga modulus perpindahan panas antara lain yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Masalah yang melibatkan konduksi panas dalam zat padat dapat disederhanakan menggunakan persamaan diferensial tunggal, persamaan konduksi panas. Persamaan dapat diturunkan dengan membuat keseimbangan

energi panas pada elemen volume diferensial. Konduksi akan terjadi apabila terdapat gradient suhu di dalam media padat (stasioner cairan).

2.5.1 Konduksi

Konduksi adalah transfer energi dari partikel-partikel zat yang lebih energik untuk mendekati partikel yang kurang energi sebagai akibat dari interaksi antara partikel. Konduksi dapat berlangsung di padatan, cairan atau gas. Pada gas dan cairan, konduksi terjadi karena difusi molekul selama gerakan secara acak. Pada padatan, konduksi terjadi karena adanya kombinasi dari getaran molekul-molekul dalam kisi-kisi dan transportasi energi oleh elektron bebas. Salah satu contoh yaitu pada kaleng minuman dingin yang berada di ruangan hangat, akhirnya akan menghangat sampai mencapai suhu kamar karena transfer panas dari kaleng melalui aluminium secara konduksi.

Tingkat konduksi panas melalui media tergantung pada geometrinya, material medium, ketebalan media, serta perbedaan suhu di media. Konduksi dapat ditunjukkan dengan rumus :

$$\text{Rata - rata konduksi panas} = \frac{(\text{area})(\text{Perbedaan temperatur})}{\text{ketebalan}} \quad (\text{Cengel,2002 ; 18}) \quad (2-1)$$

atau,

$$Q_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{Cengel,2002 ; 18}) \quad (2-2)$$

Dimana konstan proporsionalitas k adalah konduktivitas termal bahan, merupakan ukuran kemampuan bahan untuk melakukan panas. Dalam kasus membatasi $\Delta x = 0$, persamaan diatas dapat disederhanakan ke dalam bentuk diferensial

$$Q_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{Cengel,2002 ; 18}) \quad (2-3)$$

Keterangan :

- Q = Laju perpindahan panas konduksi (Watt)
- k = Konduktivitas termal bahan (Watt/m°C)
- A = Luas penampang pada posisi normal arah perpindahan panas (m²)
- ΔT = Beda temperatur pada penampang (°C)
- Δx = Tebal material (m)

2.5.2 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas dari satu tempat ke tempat lainnya karena adanya perpindahan fluida, proses perpindahan panasnya melalui perpindahan massa. Konveksi juga dapat diartikan sebagai transfer energi antara permukaan padat atau cair pada satu suhu dan cairan yang bergerak, melibatkan gabungan efek dari gerakan konduksi dan cairan. Semakin cepat gerakan fluida, maka semakin besar perpindahan panas konveksi.

Proses perpindahan panas yang melibatkan perubahan fase cairan dapat dianggap sebagai konveksi karena adanya pergerakan fluida yang terjadi selama proses, contohnya adalah ketika muncul gelembung uap pada saat kita merebus air. Laju perpindahan panas konveksi diamati untuk menjadi pembanding perbedaan suhu, dan dinyatakan dalam hukum pendinginan Newton sebagai

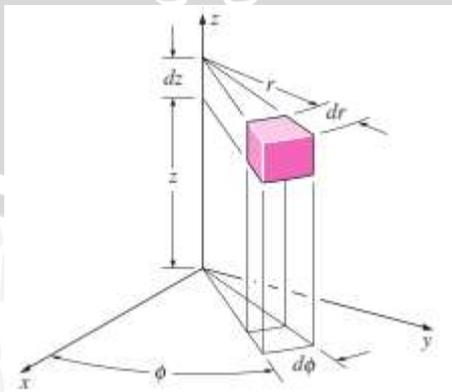
$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (\text{Cengel, 2002 ; 26}) \quad (2-3)$$

Keterangan :

Q	=	Kalor yang dipindahkan (Joule)
h	=	Koefisien konveksi (W/m ² K)
A	=	Luas penampang melintang (m ²)
T _s	=	Suhu sekitar (°C)
T _∞	=	Suhu <i>Ambient</i> (°C)

2.6 Perpindahan Panas Pada Koordinat Silinder

Persamaan umum perpindahan panas konduksi dalam koordinat silinder dapat diperoleh dari keseimbangan energi pada elemen volume di koordinat silinder, hal ini ditunjukkan pada gambar berikut



Gambar 2.1 Koordinat Silinder

Sumber : Cengel, 2002 ; 75

$$x = r \cos \Phi, y = r \sin \Phi, z = z$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \Phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kr \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$$

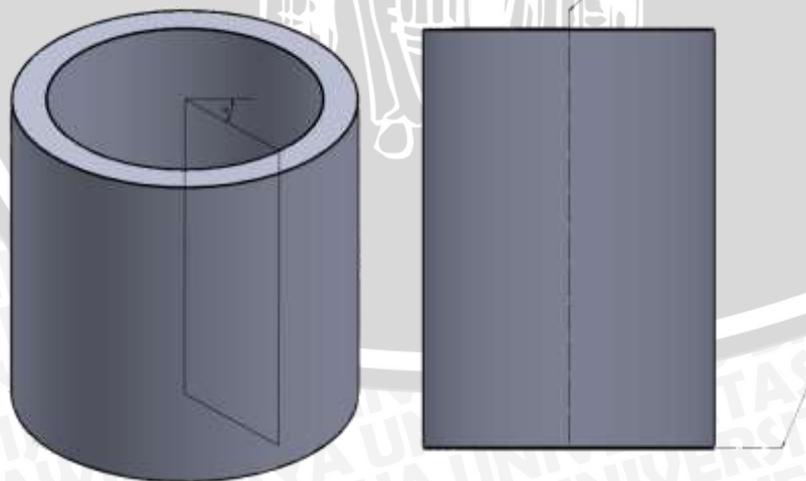
(Cengel, 2002 ; 26) (2-4)

Keterangan :

- ρ = massa jenis (kg/m^3)
 k = konduktivitas termal ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)
 C_p = kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan ($\text{J/Kg}^\circ\text{C}$)
 T = temperatur ($^\circ\text{C}$)
 t = waktu (s)

2.7 Perpindahan Panas Konduksi *Transient*

Konduksi *transient* akan terjadi ketika temperatur di dalam suatu obyek berubah sebagai fungsi waktu. Proses pirolisis serbuk kayu pada penelitian yang menggunakan piroliser, di dalamnya terdapat wadah yang berbentuk silinder dan terjadi perpindahan konduksi transien. Oleh karena itu untuk proses pemecahan masalah dengan menggunakan teori yang berkaitan dengan perpindahan panas konduksi transien pada silinder berlubang.



Gambar 2.2 Konduksi transien pada silinder berlubang

Sumber : Data Pribadi

Dari gambar 2.2 dapat diketahui bahwa perpindahan panas konduksi akan terjadi pada silinder berlubang 3 dimensi. Terdapat 2 sumbu pada gambar, yaitu sumbu r dan sumbu z , selain itu pada silinder berlubang terdapat sudut θ . Untuk mempermudah proses perhitungan dan pemecahan masalah, sudut θ dapat diabaikan dan bernilai 0 sehingga perpindahan konduksi transien pada silinder berlubang dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kr \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

(Cengel, 2002 ; 76) (2-5)

Keterangan :

C_p	=	kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan (J/Kg °C)
k	=	konduktivitas termal (W/m °C)
ρ	=	massa jenis (kg/m ³)
T	=	temperatur (°C)
t	=	waktu (s)

2.8 Kondisi Batas (*Boundary Conditions*)

Kondisi batas (*boundary conditions*) adalah suatu kondisi yang diperlukan untuk menyelesaikan bagian-bagian dari batas wilayah suatu persamaan diferensial. Persamaan konduksi panas di atas dikembangkan dengan menggunakan keseimbangan energi pada elemen diferensial dalam medium, dan mereka tetap sama terlepas dari kondisi termal pada permukaan medium. Artinya, persamaan diferensial tidak menggabungkan informasi yang berhubungan dengan kondisi di permukaan seperti suhu permukaan atau fluks panas tertentu.

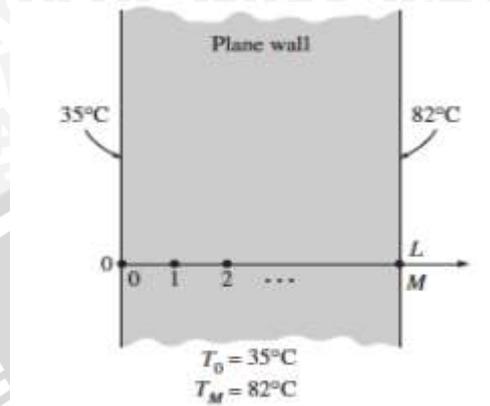
Kondisi panas yang paling sering digunakan dalam praktek adalah yang ditentukan oleh suhu, fluks panas, konveksi, dan radiasi. Disini kita mengembangkan formulasi beda hingga untuk kasus steady satu dimensi konduksi panas, contohnya pada dinding pesawat ketebalan L . Jumlah simpul pada permukaan kiri $x = 0$ adalah 0, pada permukaan kanan $x = L$ adalah M . Sedangkan lebar dari elemen volume untuk kedua simpul batas adalah $\Delta x/2$.

$$T(0) = T_0 = \text{Nilai spesifik}$$

$$T(L) = T_M = \text{Nilai spesifik}$$

(Cengel, 2002 ; 274) (2-6)

Perpindahan panas satu dimensi melalui dinding pesawat dengan ketebalan L , dengan kondisi batas yang ditentukan suhu pada sisi kiri dan kanan permukaan dapat dinyatakan sebagai gambar berikut



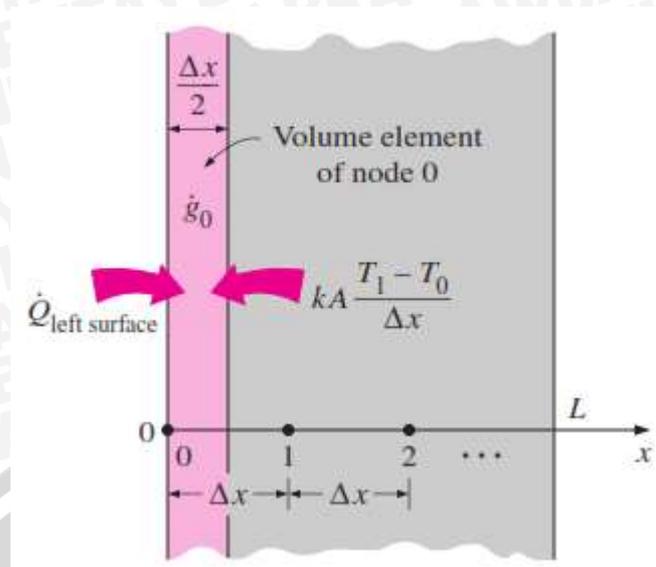
Gambar 2.3 Kondisi batas pada dinding pesawat
Sumber : Cengel, 2002 ; 275

T_0 dan T_M adalah suhu tertentu pada permukaan $x = 0$ dan $x = L$. Kondisi batas suhu yang telah ditentukan kemudian digabungkan dengan menetapkan suhu permukaan kepada node batas. Dalam hal ini kita tidak perlu menuliskan keseimbangan energi, kecuali apabila kita ingin menentukan laju perpindahan panas kedalam atau keluar medium setelah suhu di dalam node telah ditentukan. Ketika kondisi batas yang lain seperti pada fluks panas, kondisi konveksi, kondisi radiasi, atau kombinasi konveksi dengan radiasi telah ditetapkan pada batas, maka persamaan beda hingga untuk node pada batas dapat diperoleh dengan menulis keseimbangan energi pada elemen volume. Keseimbangan energi untuk transfer panas dalam kondisi stabil dinyatakan sebagai :

$$\Sigma_{\text{semua sisi}} Q + G_{\text{elemen}} = 0 \quad (\text{Cengel, 2002 ; 275}) \quad (2-7)$$

Untuk fluks panas yang arahnya sudah ditentukan, dianggap positif jika ke dalam medium dan negative jika keluar dari medium. Kemudian perumusan beda hingga pada node $m = 0$ (pada batas kiri dimana $x = 0$) dari dinding pesawat yang mempunyai tebal L dalam kondisi tetap satu dimensi konduksi panas dapat dinyatakan sebagai

$$Q_{\text{permukaan kiri}} + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + g_o \left(\frac{A\Delta x}{2} \right) = 0 \quad (\text{Cengel, 2002 ; 275}) \quad (2-8)$$



Gambar 2.4 Skema perumusan *finite difference* pada noda batas kiri pada pesawat
Sumber : Cengel, 2002 ; 275

Dimana \dot{q}_0 adalah tingkat panas yang dihasilkan per satuan volume (dalam W/m^3) pada $x = 0$, A adalah daerah perpindahan panas yang konstan untuk dinding pesawat, dan $A\Delta x/2$ adalah volume pada elemen volume.

Bentuk beda hingga dari berbagai macam kondisi batas dapat diperoleh dari persamaan diatas dengan merubah $Q_{permukaan\ kiri}$ menjadi ekspresi yang sesuai. Kemudian hal ini dilanjutkan untuk berbagai kondisi batas pada batas kiri.

1. Kondisi batas fluks panas *steady*.

$$q_0 A + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + g_o \left(\frac{A\Delta x}{2} \right) = 0$$

(Cengel, 2002 ; 275) (2-9)

Ketika pada kondisi isolasi ($q_0 = 0$)

$$kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + g_o \left(\frac{A\Delta x}{2} \right) = 0$$

(Cengel, 2002 ; 275) (2-10)

2. Kondisi batas konveksi

$$hA(T_\infty - T_0) + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + g_o \left(\frac{A\Delta x}{2} \right) = 0$$

(Cengel, 2002 ; 275) (2-11)

3. Kondisi batas radiasi

$$\varepsilon\sigma A(T_{surr}^4 - T_0^4) + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + g_o \left(\frac{A\Delta x}{2} \right) = 0$$

(Cengel,2002 ; 276) (2-12)

4. Kondisi batas kombinasi konveksi dan radiasi

$$hA(T_\infty - T_0) + \varepsilon\sigma A(T_{surr}^4 - T_0^4) + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + g_o \left(\frac{A\Delta x}{2} \right) = 0$$

(2-13a)

$$h_{combined}A(T_\infty - T_0) + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + g_o \left(\frac{A\Delta x}{2} \right) = 0$$

(Cengel,2002 ; 276) (2-13b)

5. Kondisi batas kombinasi konveksi, radiasi, dan fluks panas

$$q_0A + hA(T_\infty - T_0) + \varepsilon\sigma A(T_{surr}^4 - T_0^4) + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + g_o \left(\frac{A\Delta x}{2} \right) = 0$$

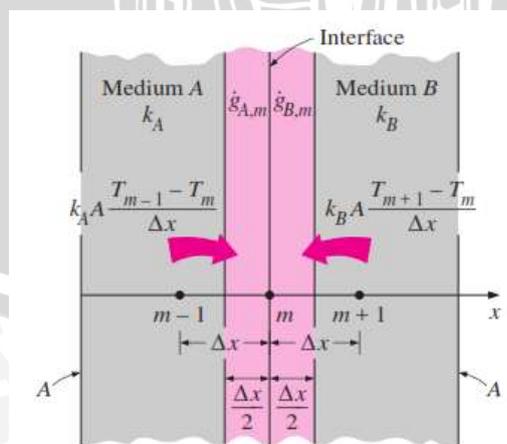
(Cengel,2002 ; 276) (2-14)

6. Kondisi batas antarmuka

Dua media solid yang berbeda A dan B diasumsikan dalam kontak sempurna, dengan demikian pada suhu yang sama pada antarmuka node m (gambar 2.5). subskrip A dan B menunjukkan sifat mediana masing-masing.

$$k_A A \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_g A \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} + g_{A,m} \frac{A\Delta x}{2} + g_{B,m} \frac{A\Delta x}{2} = 0$$

(Cengel,2002 ; 276) (2-15)



Gambar 2.5 Skema perumusan *finite difference* kondisi batas antarmuka medium A dan B

Sumber : Cengel, 2002 ; 276

2.8.1 Penentuan Temperatur Kondisi Batas

Temperatur pada permukaan yang terbuka pada umumnya dapat diukur secara langsung. Oleh karena itu, menentukan temperatur adalah salah satu cara termudah untuk menentukan kondisi termal pada permukaan.

$$T_{(0,t)} = T_1$$

$$T_{(L,t)} = T_2$$

(Cengel,2002 ; 78) (2-16)

Di mana T_1 dan T_2 adalah temperatur tertentu pada permukaan pada $x = 0$ dan $x = L$. Temperatur yang ditentukan dapat bernilai konstan, yang merupakan kasus untuk konduksi panas stabil.

2.8.2 Isolasi

Beberapa permukaan pada umumnya terisolasi agar dapat meminimalkan kerugian panas yang terjadi melalui bahan. Isolasi dapat mengurangi perpindahan panas tetapi tidak dapat menghilangkan perpindahan panas, kecuali memiliki ketebalan yang tak terhingga.

$$k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0 \text{ atau } \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0$$

(Cengel,2002 ; 79) (2-17)

2.8.3 Kondisi Batas Konveksi

Konveksi adalah kondisi batas yang paling umum dapat kita temui karena sebagian besar permukaan perpindahan panas yang terkena suatu lingkungan pada suhu tertentu. Kondisi batas konveksi didasarkan pada keseimbangan energi permukaan dinyatakan sebagai berikut :

(konduksi panas pada permukaan arah tertentu) = (konveksi panas pada permukaan dengan arah yang sama).

(Cengel,2002 ; 81) (2-18)

Untuk perpindahan panas satu dimensi arah x dengan ketebalan L , kondisi batas konveksi pada kedua permukaan tersebut dapat dinyatakan sebagai :

$$-k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = h_1 [T_{\infty 1} - T(0, t)]$$

(Cengel, 2002 ; 81) (2-19a)

dan

$$-k \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = h_2 [T(L, t) - T_{\infty 2}]$$

(Cengel, 2002 ; 81) (2-19b)

dimana h_1 dan h_2 adalah koefisien perpindahan panas konveksi dan T_1 dan T_2 adalah suhu medium sekitarnya pada dua sisi plat.

2.8.4 Kondisi Batas Radiasi

Pada beberapa kasus, seperti yang ditemui pada aplikasi *cryogenic*, permukaan perpindahan panas dikelilingi oleh ruang yang dievakuasi sehingga tidak ada perpindahan panas konveksi yang terjadi diantara permukaan dan medium sekitarnya. Dalam kasus tersebut, radiasi menjadi satu-satunya mekanisme perpindahan panas. Menggunakan kesetimbangan energi, kondisi batas radiasi pada permukaan dapat dirumuskan sebagai berikut :

(konduksi panas pada permukaan arah tertentu) = (radiasi panas pada permukaan dengan arah yang sama). (Cengel, 2002 ; 82) (2-20)

Untuk perpindahan panas satu dimensi arah x dengan ketebalan L , kondisi batas radiasi pada kedua permukaan tersebut dapat dinyatakan sebagai :

$$-k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \varepsilon_1 \sigma (T_{surr,1}^4 - T(0, t)^4)$$

(Cengel, 2002 ; 83) (2-21a)

dan

$$-k \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = \varepsilon_2 \sigma (T(L, t)^4 - T_{surr,2}^4)$$

(Cengel, 2002 ; 83) (2-21b)

2.8.5 Kondisi Batas Antar Permukaan

Beberapa badan yang terdiri dari lapisan material yang berbeda, dan solusi dari masalah perpindahan panas di dalam medium membutuhkan solusi setiap lapisannya. Dalam hal ini, memerlukan spesifikasi dari kondisi batas pada setiap antarmuka.

$$T_A(x_0, t) = T_B(x_0, t)$$

(Cengel, 2002 ; 83) (2-22a)

dan

$$-k_A \frac{\partial T_A(x_0, t)}{\partial x} = -k_B \frac{\partial T_B(x_0, t)}{\partial x}$$

(Cengel, 2002 ; 83) (2-22b)

2.8.6 Kondisi Batas Umum

Sejauh ini kita telah mempertimbangkan permukaan akan mengalami perpindahan panas modus tunggal, seperti penentuan fluks panas, konveksi, atau radiasi. Secara umum, permukaan mungkin akan melibatkan radiasi, konveksi, dan fluks panas tertentu secara bersamaan

(perpindahan panas menuju permukaan semua mode) = (perpindahan panas dari permukaan semua mode).

(Cengel, 2002 ; 84) (2-23)

2.9 Diskritisasi

Diskritisasi adalah memecah domain menjadi daerah beberapa daerah – daerah kecil yang disebut dengan *grid*, *mesh*, atau *cell*. Proses diskritisasi terlebih dulu dilakukan dengan menetapkan nilai pada kondisi batas, kemudian dapat dihitung pada tiap – tiap *mesh* yang sudah ditetapkan berdasarkan persamaan aturnya.

2.10 Hipotesis

Dengan menggunakan simulasi numerik untuk penentuan model pirolisis, yang telah ditentukan kondisi-kondisi batasnya, maka distribusi temperatur pada *furnace* pirolisis dapat diprediksi dengan menghitung perubahan temperatur secara konduksi.