

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

4.1. Biomassa

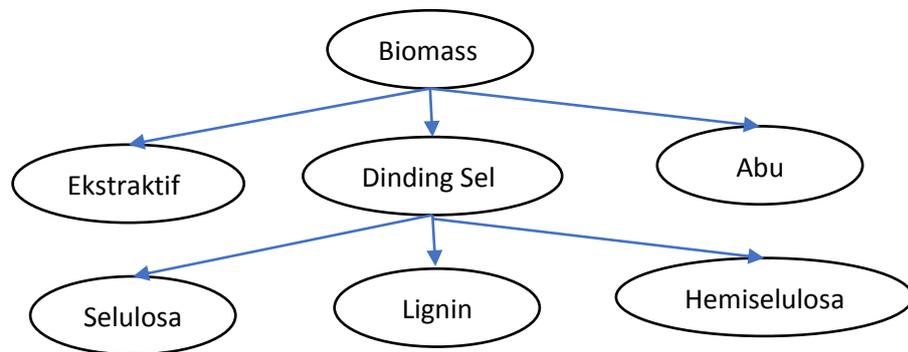
Basu (2010), biomassa merupakan bahan organik non-fosil terurai yang berasal dari tumbuhan, hewan dan mikroorganisme yang digunakan sebagai sumber energi. Sebagian limbah industri dan kota juga termasuk biomassa. Unsur utama dari biomassa adalah bermacam-macam zat kimia (molekul) yang sebagian mengandung atom karbon. Biomass disebut zero emission atau bebas dari emisi dikarenakan CO₂ dari hasil pembakaran akan kembali diserap oleh tanaman.

Biomassa terdiri dari biomassa primer dan sekunder. Sumber biomassa disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Tipe biomassa dan sub-klasifikasinya (Basu, 2010)

Primer	Biomassa darat	Biomassa hutan
		Rerumputan
	Biomassa air	Tanaman obat dan budi daya
		Algae Tanaman Air
Sekunder	Sampah kota	Sampah kota padat
		Gas TPA
	Sampah padat pertanian	Ternak dan Pupuk
		Residu tanaman pertanian
	Residu perhutanan	Kulit kayu, daun dan akar
Limbah industri	Serbuk gergaji	
	Limbah minyak	

Dari Tabel 2.1 dapat dilihat bahwa bahan baku biomassa dapat diperoleh dari limbah perkebunan dan pertanian yang merupakan sektor bisnis yang cukup berkembang di Indonesia. Struktur biomassa dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur utama biomassa (Basu, 2010)

Susunan biomassa tersusun atas tiga komponen utama diantaranya:

- **Ekstraktif** merupakan merupakan zat pada biomassa dapat dipisahkan dipisahkan dengan evaporasi dengan dengan bantuan pelarut (Basu, 2010). Variasi zat ekstraktif biomassa dapat dipengaruhi oleh jenis tanaman, lokasi penanaman, dan iklim.
- **Dinding Sel** terdiri dari senyawa selulosa, hemi-selulosa dan lignin. Tiga senyawa ini berperan untuk memberikan kekuatan pada tumbuhan. Biomassa terdiri dari 38–50% selulosa, 23–32% hemiselulosa, 15–25% lignin dan komponen lainnya (anorganik dan ekstraktif) dengan persentase total 5–13% (Madadi & Abbas, 2017). Selulosa merupakan senyawa homogen yang menghasilkan tar selama proses pirolisis biomassa sedangkan, Hemi-selulosa merupakan senyawa yang cenderung mudah dihidrolisis dalam asam. Hemi-selulosa mengalami degradasi paling awal dibandingkan selulosa dan lignin pada proses pirolisis. Lignin merupakan makromolekul pengikat dalam struktur biomassa yang menjadi komponen utama penyusun dinding sel. Lignin mengalami degradasi pada akhir proses pirolisis (350-500°C). Degradasi lignin dapat menghasilkan senyawa yang berbahaya bagi kesehatan dan komponen tar yang terbawa gas hasil gasifikasi (Susanto, 2018).
- **Abu** merupakan komponen pengotor anorganik dari biomassa.

4.2. Biomassa Limbah Kelapa Sebagai Sumber Energi

Data Direktorat Jenderal Perkebunan (2020), merekap data bahwa luas area pekebunan kelapa di Maluku Utara pada tahun 2019 yaitu sebesar 202.796 Ha artinya bahwa hasil perkebunan kelapa di Maluku Utara sangatlah melimpah dan limbah kelapa yang dihasilkan juga sangatlah banyak. Limbah kelapa merupakan limbah pertanian yang termasuk kategori biomassa. Simpala dan Kusuma (2017) menyatakan bahwa limbah kelapa terdiri dari sabut kelapa kurang lebih 27%-30% dan tempurung kelapa kurang lebih 10%-12%. Sehingga rata-rata limbah yang dihasilkan yaitu sebesar 40%. Jika diasumsikan kelapa dapat menghasilkan buah 10.000 butir per hektar dan berat per butir kelapa adalah 1 kg maka total limbah yang dihasilkan kurang lebih 811.184 Ton/ Tahun (Luas area perkebunan kelapa x jumlah butir kelapa per hektar x berat butir kelapa x limbah per butir kelapa).

Limbah kelapa bila tidak disertai dengan pengelolaan yang baik, akan menimbulkan pencemaran lingkungan, pemanasan global, mengganggu kesehatan masyarakat sekitar dan tentunya mengganggu estetika daerah tersebut. Praktek untuk pengelolaan limbah kelapa di Kota Ternate yaitu dengan melakukan teknik pembakaran dan penimbunan. Pembakaran limbah lignoselulosa berdampak pada peningkatan emisi gas CO₂ yang berakibat terjadinya pemanasan global sedangkan teknik penimbunan limbah biomassa di permukaan atau dalam tanah akan mengakibatkan proses dekomposisi anaerob yang menghasilkan gas metana (CH₄) yang juga berdampak pada pemanasan global (Tiilikkala & Tiilikkala, 2010; Prodest, 2012). Pada Gambar 2.2. dapat kita lihat bahwa limbah kelapa di Ternate, Maluku Utara dikelola dengan teknik penimbunan.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Najib dan Darsopuspito (2012) pada tabel 1.1. dapat dilihat bahwa nilai kalor dari tempurung kelapa cukup besar yaitu 20,89 MJ/kg dan limbah kelapa yang dihasilkan juga sangatlah banyak. Dengan demikian bahwa tempurung kelapa dapat dipertimbangkan sebagai alternatif sumber energi terbarukan dengan dilakukan proses lanjutan yaitu pirolisis.



Gambar 2.2 Limbah kelapa di Kota Ternate

4.3. Analisis Karakteristik Biomassa

Menurut Kong (2010), terdapat beberapa aspek yang perlu diperhatikan sebagai bahan pertimbangan dalam penggunaan biomassa yakni aspek ketersediaan biomassa dan karakteristik biomassa yang diperoleh melalui analisis proksimat, ultimat dan nilai kalor. Kadar air atau *moisture content* yang tinggi mengakibatkan biomassa menjadi sulit terbakar sedangkan, kadar abu atau *ash content* yang tinggi berpengaruh terhadap arang yang dihasilkan. Hal ini juga akan mengakibatkan timbulnya emisi partikulat yang tinggi dalam pembakaran sehingga perlu penanganan khusus untuk abu dan partikulat yang dihasilkan. *Volatile matter* yang tinggi menunjukkan bahwa biomassa tersebut lebih mudah menyala dan lebih cepat terbakar. Kandungan zat volatil ini dapat menguntungkan dalam hal penyalaan biomassa karena kandungan zat volatil (campuran dari uap dan gas yang keluar saat proses pirolisis dari biomassa) sedangkan karbon tetap (*fixed carbon*) berpengaruh terhadap tingginya nilai kalor dari suatu biomassa (Hanani, 2010).

Untuk mengetahui komposisi senyawa dalam biomassa, biasanya dilakukan analisis proksimat (*proximate*) dan analisis *ultimate* dan nilai kalort terhadap bahan baku biomassa. Analisis proksimat dilakukan untuk menentukan kadar air, bahan mudah menguap (*volatile*), karbon tetap, dan kadar abu. Biomassa dengan fraksi bahan yang mudah menguap tinggi memiliki konversi tertinggi dibandingkan biomassa dengan karbon tetap tinggi. Secara teoritis, biomassa dengan fraksi *volatile* yang tinggi lebih tepat digunakan untuk produksi *bio-oil*, sedangkan biomassa dengan karbon tetap yang tinggi, lebih sesuai untuk produksi *bio-char* (Vassilev dkk., 2010).

1.3.1. Analisis Ultimat

Hasil analisis ultimat terdiri dari beberapa parameter antara lain kadar karbon kadar hidrogen, kadar nitrogen, kadar oksigen dan total sulfur. Standar yang digunakan untuk analisis ini yaitu ASTM D5373-16 *Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke*. Untuk penentuan karbon dan hidrogen dalam biomassa digunakan cara Liebig. Namun, penetapan kadar karbon dan hidrogen sesuai metode ASTM D5373-16 adalah dengan menggunakan Teknik Infra Red (IR).

1.3.2. Analisis Proksimat

Analisis proksimat merupakan pengujian yang meliputi kadar air, kadar abu, zat terbang/*volatile matter*, dan karbon tetap/*fixed carbon* (Speight, 2005).

- **Kadar Air**

Kadar air (*moisture content*) merupakan kandungan air yang terkandung pada pada suatu bahan. Kadar air yang tinggi pada suatu bahan memiliki nilai kalor yang rendah dikarenakan sebagian energi digunakan untuk menguapkan air yang terkandung pada biomassa tersebut dan juga biomassa mudah hancur dan ditumbuhi jamur (Sukarta & Ayuni, 2016).

Perhitungan persentase *moisture content* (MC) yang terkandung di dalam biomassa tersebut menggunakan standar ASTM D-3173-03 dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Moisture content, \%} = \frac{a-b}{a} \times 100\% \quad (2.1)$$

Dimana,

a = massa awal biomassa (gram)

b = massa biomassa setelah pemanasan 107°C

- **Kadar Abu**

Kadar abu (*ash content*) merupakan residu sisa proses pembakaran yang tidak terbakar berupa mineral, pasir atau *clay*. Jumlah kadar abu dikelompokkan menjadi tiga yaitu *major elements* (konsentrasi >0,5%), *minor elements* (konsentrasi 0,02 sampai dengan 0,5%), dan *trace elements* (konsentrasi <0,02%). Kandungan abu merupakan senyawa oksida seperti SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, MnO, CaO, Fe₂O₃, MgO, K₂O, Na₂O, P₂O serta unsur oksida lainnya (Speight, 2005).

Silika (Si) dapat mempengaruhi nilai kalor pada biomassa. Biomassa yang memiliki kandungan oksida alkali yang tinggi dapat membentuk kerak berupa *slagging* dan *fouling* pada saat dilakukan pembakaran (Faizal dkk., 2015).

Perhitungan persentase *ash content* (AC) yang terkandung di dalam biomassa tersebut menggunakan standar ASTM D-3174-04 dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Ash content, \%} = \frac{d}{a} \times 100\% \quad (2.2)$$

Dimana,

d = massa biomassa setelah pemanasan 750°C

- **Zat Terbang**

Zat terbang/mudah menguap (*volatile matter*) adalah salah satu zat yang keluar dari suatu bahan bakar padat yang dibakar menjadi uap. Semakin kecil kandungan zat terbang pada biomassa maka gas serta asap pembakaran yang dihasilkan akan semakin sedikit dan sebaliknya

jika kandungan zat terbang tinggi maka asap pembakaran tinggi karena adanya reaksi antara karbon monoksida (CO) dengan turunan alkohol (Pane dkk., 2015).

Perhitungan persentase kadar *volatile matter* (VM) yang terkandung di dalam biomassa tersebut menggunakan standar ASTM D-3175-02 dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Volatile matter, \%} = \frac{b-c}{a} \times 100\% \quad (2.3)$$

Dimana,

c = massa biomassa setelah pemanasan 950°C

- **Karbon Tetap**

Karbon tetap (*Fixed Carbon*) merupakan material/karbon yang tersisa dari pengukuran kadar air, zat terbang dan kandungan abu saat pembakaran berlangsung, karbon tetap mengindikasikan arang yang dihasilkan dari bahan bakar (Speight, 2005). *fixed carbon* ditentukan berdasarkan bahan bakar yang telah dibakar pada suhu 900°C (Battle dkk., 2014). *Fixed carbon* secara umum mengandung karbon namun mengandung juga sedikit hidrogen, oksigen, nitrogen dan sulfur yang tidak terkonversi menjadi gas saat pembakaran terjadi (Sarkar, 2015). Kandungan *fixed carbon* yang lebih tinggi lebih diperlukan dan dibutuhkan dalam bahan bakar karena merupakan komponen utama yang berkontribusi kepada nilai kalor bersamaan dengan *volatile matter* (Sarkar, 2015). Semakin tinggi kandungan *fixed carbon* biomassa maka nilai kalor pun akan semakin tinggi. Perhitungan *fixed carbon* dihitung berdasarkan selisih 100% dengan kadar air, kadar abu dan kadar zat terbang sehingga fluktuasi yang terjadi pada *fixed carbon* dipengaruhi oleh kandungan-kandungan tersebut (Pane dkk., 2015).

$$\text{Fixed Carbon, \%} = 100\% - MC\% - AC\% - VM\% \quad (2.4)$$

1.3.3. Analisis Nilai Kalor

Nilai kalor (*heating value*) suatu bahan bakar diperoleh dengan menggunakan *bomb calorimeter*. Nilai kalor yang diperoleh melalui *bomb calorimeter* adalah nilai kalor atas atau *highest heating value* (HHV) dan nilai kalor bawah atau *lowest heating value* (LHV). Perhitungan nilai kalor kotor berdasarkan standar ASTM D240. Dengan menggunakan *bomb calorimeter* dapat dihitung panas yang diserap air dalam *bomb calorimeter* dan energi setara *bomb calorimeter* setara HHV dan LHV. Panas yang diserap air dalam *bomb calorimeter* dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

Dimana,

Q = panas yang diserap (kJ)

m = massa air di dalam bomb calorimeter (gram)

C_p = Specific heat 4,186 kJ/kg °C

ΔT = perbedaan temperatur (°C)

LHV dan HHV dihitung dengan persamaan berikut:

$$LHV = \frac{(m \times C_p \times \Delta T)}{m_{bio}} \quad (2.6)$$

$$HHV = LHV + 3240 \text{ kJ/kg} \quad (2.7)$$

Dimana,

m_{bio} = massa biomassa (gram)

HHV = highest heating value (kJ/kg)

LHV = lowest heating value (kJ/kg)

4.4. Konversi Energi

Konversi energi merupakan perubahan suatu bentuk energi ke bentuk energi lainnya. Sumber energi merupakan bahan bakar utama yang menentukan hasil proses konversi energi. Konversi energi listrik konvensional pada PLTU yaitu menggunakan batubara sebagai sumber energinya. Biomassa dapat digunakan sebagai sumber energi namun diketahui biomassa memiliki nilai kalor yang lebih kecil dibandingkan batubara. Agar dapat menjadi sumber energi yang efisien maka diperlukan teknologi untuk mengkonversi biomassa ini salah satunya

adalah teknologi pirolisis. Secara umum teknologi konversi biomassa menjadi bahan bakar dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu (Parinduri, 2020):

1. Pembakaran langsung, Pembakaran langsung merupakan teknologi yang paling sederhana karena pada umumnya biomassa dapat langsung dibakar. Beberapa biomassa perlu dikeringkan terlebih dahulu dan didensifikasi untuk kepraktisan dalam penggunaan.
2. Konversi termokimiawi, Konversi termokimiawi merupakan teknologi yang memerlukan perlakuan termal untuk memicu terjadinya reaksi kimia dalam menghasilkan bahan bakar.
3. Konversi biokimiawi, merupakan teknologi konversi yang menggunakan bantuan mikroba dalam menghasilkan bahan bakar.

4.5. Proses Pirolisis

Pirolisis adalah proses dekomposisi suatu bahan pada suhu tinggi tanpa adanya udara atau dengan udara terbatas. Produk yang dihasilkan berupa arang, cairan dan gas (Silva dkk., 2012). Proses pirolisis biomassa terdiri dari empat tahapan yaitu pelepasan uap air, dekomposisi hemiselulosa, dekomposisi selulosa dan dekomposisi lignin. Dekomposisi hemiselulosa biasanya terjadi pada suhu 220°C - 315°C. Selulosa terdekomposisi pada suhu 315°C - 400°C dan lignin biasanya terdekomposisi pada suhu 150°C sampai 900°C, (Yang dkk., 2006).

Pirolisis biomassa umumnya berlangsung pada rentang temperatur 300°C sampai dengan 600°C. Produk pirolisis mengandung sulfur dan gas NO_x yang rendah sehingga ramah lingkungan (Basu, 2010). Pirolisis biomassa telah terbukti menjadi jalur konversi biokimia yang layak karena kemampuannya untuk meningkatkan nilai kalor dari bahan baku biomassa (Zhao dkk., 2017).

Berdasarkan tingkat pemanasannya, pirolisis dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

Pirolisis Lambat

Pirolisis Lambat (*Slow Pirolisis*) menggunakan suhu yang kurang dari 400°C, dengan waktu yang lama untuk menghasilkan jumlah bio arang yang banyak. Proses ini digunakan terutama untuk produksi bio arang .

Produk hasil dari *slow pirolisis* adalah bio arang 35%, bio-oil 30% dan gas 35%. Pirolisis lambat secara umum dikenal sebagai cara produksi minyak nabati yang tidak tepat karena menghasilkan cairan yang rendah $\pm 30\%$ wt (Qureshi dkk., 2019).

Arang yang dihasilkan dari proses slow pirolisis menggunakan tingkat laju pemanasan yang rendah (0.1–0.8 °C/s) (Hornung, 2014) dan waktu tinggal yang lebih panjang (5-30 menit) pada suhu 300–550°C. Suhu pirolisis, laju pemanasan dan komposisi senyawa penyusun biomassa berperan sangat penting dalam menentukan jumlah arang dan bio-oil yang dihasilkan (Howe dkk., 2015).

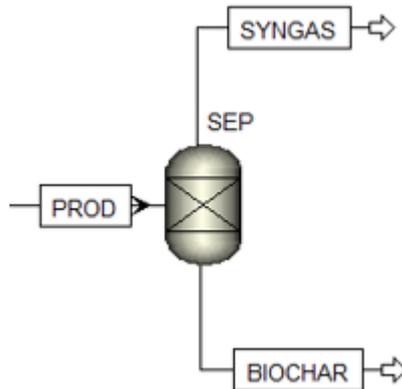
Pirolisis Cepat

Pirolisis cepat adalah metode termokimia yang memproduksi bahan bakar yang bisa diperbaharui . Jenis pirolisis ini digunakan terutama untuk produksi bio-oil dan gas. Pirolisis Cepat (*fast pirolysis*) yang dilakukan pada sekam padi menggunakan suhu 400-600°C, dengan menggunakan pirolisis kontinyu dengan reaktor berbentuk kerucut dengan rendemen bio-oil yang paling tinggi adalah pada suhu 450°C yaitu 70% karena kapasitas bahan dan perpindahan panas yang terjadi (Alvarez dkk., 2014).

4.6. Perangkat Lunak Aspen Plus

Aspen Plus merupakan perangkat lunak simulasi proses yang digunakan untuk memprediksi kinerja dari suatu proses. Aspen Plus dapat menangani proses yang sangat kompleks, termasuk kolom sistem pemisahan yang banyak, reaktor kimia, dan destilasi senyawa kimia reaktif (Panda, 2012).

Langkah pertama dalam mengembangkan simulasi adalah untuk mengembangkan diagram alir proses (PFD), yang terdiri dari unit operasi (blok) dan aliran umpan dan menghubungkan blok.



Gambar 2.3 Contoh diagram alir proses

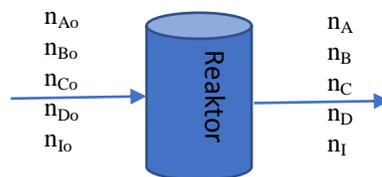
Dalam Aspen Plus terdapat beberapa jenis reaktor yang dapat digunakan, disesuaikan dengan kebutuhan dan parameter proses. Model Reaktor dari Aspen Plus yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

Reaktor RYIELD

Model reaktor dengan menentukan hasil reaksi masing-masing komponen. Model ini berguna saat stoikiometri reaksi dan kinetika tidak diketahui, hanya data distribusi hasil atau korelasi yang tersedia.

Dasar perhitungan yang digunakan dalam “RYIELD” adalah sebagai berikut:

Reaksi umum



Gambar 2.4 Analogi reaktor

Salah satu cara pendekatan untuk memecahkan masalah neraca bahan ini adalah dengan menggunakan konversi pecahan dari salah satu bahan. Fraksi konversi didefinisikan sebagai:

$$X_i = \frac{n_{io} - n_i}{n_{io}} \quad (2.9)$$

Nilai X_i dari 0 sampai 1. Kemudian, outlet dari komponen dapat ditentukan dengan menyusun ulang Persamaan diatas (2.9) hingga diperoleh:

$$n_i = n_{io}(1 - X_i) \quad (2.10)$$

Dengan menggunakan stoikiometri, outlet untuk komponen lain dapat dihitung. Pada contoh di Gambar 2.7, jika konversi A dikenal (X_A), maka laju aliran keluar reaktor dapat ditulis sebagai berikut:

$$n_A = n_{Ao}(1 - X_A) \quad (2.11)$$

$$n_{Bo} = \left(1 - \frac{\beta}{\alpha} X_A n_{Ao}\right) \quad (2.12)$$

$$n_A = n_{Co} \left(1 + \frac{\gamma}{\alpha} X_A n_{Ao}\right) \quad (2.13)$$

$$n_A = n_{Do} \left(1 + \frac{\delta}{\alpha} X_A n_{Ao}\right) \quad (2.14)$$

Tingkat reaksi dapat dilihat sebagai produk hipotetis yang satu molekul (atau mol) diproduksi setiap kali reaksi terjadi. Tingkat reaksi digunakan untuk menentukan output dari reaksi menggunakan persamaan berikut:

$$n_i = n_{io} + \sum v_{ij} \xi_j \quad (2.15)$$

Penjumlahan yang digunakan untuk menjelaskan adanya beberapa reaksi (dilambangkan dengan subscript), dan menunjukkan koefisien stoikiometri dari komponen dalam reaksi. Dengan demikian, untuk sistem di atas, laju aliran keluar reaktor dapat ditulis sebagai:

$$n_A = n_{Ao} - \alpha \xi \quad (2.16)$$

$$n_B = n_{Bo} - \beta \xi \quad (2.17)$$

$$n_C = n_{Co} - \gamma \xi \quad (2.18)$$

$$n_D = n_{Do} - \delta \xi \quad (2.19)$$

Kedua konversi dan tingkat reaksi didasarkan pada stoikiometri dan dibutuhkan pengetahuan tentang reaksi yang tepat. Hasil reaksi didefinisikan sebagai:

$$Yield = \frac{\text{amount of product produced}}{\text{amount of feed}} \quad (2.20)$$

Bila stoikiometri tidak diketahui, Yield harus disediakan untuk setiap produk. Namun, jika Yield digunakan dengan reaksi yang stoikiometri ditentukan, maka Yield bisa berhubungan melalui koefisien stoikiometri.

Reaktor RGIBBS

Model fase-tunggal kesetimbangan kimia, atau fase simultan dan kesetimbangan kimia dengan meminimalkan energi bebas Gibbs, berdasarkan keseimbangan atom. Model ini berguna saat temperatur dan tekanan yang diketahui dan reaksi stoikiometri tidak diketahui. Jika informasi tersebut tidak tersedia pendekatan yang berbeda dapat diikuti. Salah satunya dengan konstanta kesetimbangan. konstanta kesetimbangan didefinisikan dari termodinamika Doherty (2013) sebagai berikut:

$$K = \prod_i \left(\frac{f_i}{f_i^o} \right)^{v_i} \quad (2.21)$$

Dimana f_i mengacu kepada fugacity dari komponen i, dan K adalah:

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G^o}{RT}\right) \quad (2.22)$$

$$\Delta G^o = \sum_i v_i G_i^o \quad (2.23)$$

Jika stoikiometri reaksi diketahui maka dapat diperoleh kesetimbangan konstan dan konversi kesetimbangan (yaitu, material balance) dari masing-masing komponen.

Dalam kasus di mana informasi tentang stoikiometri tidak diketahui dan diikuti perubahan fase saat reaksi terjadi, pendekatan berdasarkan meminimalkan energi bebas Gibbs dari keseluruhan campuran dapat digunakan. Dalam pendekatan ini, total energi Gibbs dari semua komponen (reaktan, produk, dan

inert) diminimalkan, Panda (2012). Misalnya, energi Gibbs untuk campuran yang ideal:

$$G_{mix} = \sum_i x_i G_i + RT \sum_i x_i \ln x_i \quad (2.24)$$

Untuk sistem dua komponen, diminimalkan sebagai berikut

$$\frac{\partial G_{mix}}{\partial x_1} = G_1 - G_2 + RT \ln \left(\frac{x_1}{1-x_1} \right) \quad (2.25)$$

Turunan persamaan ini diatur ke nol untuk menemukan nilai G_{mix} minimum. Pendekatan serupa dapat diterapkan untuk sistem yang lebih kompleks dengan beberapa tahapan.