

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Ganji, *et al* (2007) telah melakukan eksperimen mengenai pengaruh antara surfaktan anion, kation dan non-ion dalam hidrat metana pada laju pembentukan, stabilitas dan kapasitas penyimpanan. Setiap surfaktan diuji dengan konsentrasi 300, 500 dan 1000 ppm. Pada penelitian laju pembentukan hidrat metana, 75 cm³ air murni dicampurkan dengan surfaktan yang kemudian direaksikan dengan gas metana pada tekanan 8.3 MPa dan temperatur 298.2 K dengan kecepatan putar pengaduk 200 rpm. Pada penelitian stabilitas hidrat metana, hidrat yang sudah terbentuk didiamkan selama 10 jam pada temperatur 268.2 K. Setelah didiamkan sampai pada titik kesetimbangan 3 fase katup gas dibuka dengan tujuan mengeluarkan gas sisa metana yang tidak menjadi hidrat, kemudian katup ditutup kembali. Sedangkan pada penelitian kapasitas penyimpanan hidrat metana, hidrat yang tersisa setelah penelitian stabilitas hidrat, system dibiarkan hingga mencapai temperatur ruang sehingga hidrat melepas gas metana yang terjebak di dalamnya. Dari hasil penelitiannya menunjukkan bahwa surfaktan anion merupakan yang terbaik dalam memanfaatkan metana untuk penyimpanan dan transportasi gas. Surfaktan anion memiliki laju pembentukan yang cukup tinggi, dan stabilitas hidratnya terbentuk sangat memuaskan pada temperatur 268.2 K, serta kapasitas penyimpanan hidrat merupakan yang paling tinggi yaitu 155 V/V.

Samimi, *et al* (2012) dalam jurnalnya mengenai masalah dari pembentukan hidrat gas pada saluran pipa gas, gas alam yang berada di bawah tanah mengalami kontak dengan air dapat mengakibatkan fenomena pembentukan gas hidrat dimana adanya penetrasi molekul gas ke dalam rongga di molekul air sehingga terbentuk kristal hidrat gas, selain menjadi masalah pada pendistribusian gas ternyata dari banyak penelitian hidrat bias diaplikasikan sebagai sarana penyimpanan gas alam, menyerap karbondioksida dari udara, sebagai proses pemisahan gas dan sebagai *Cold reservoir*.

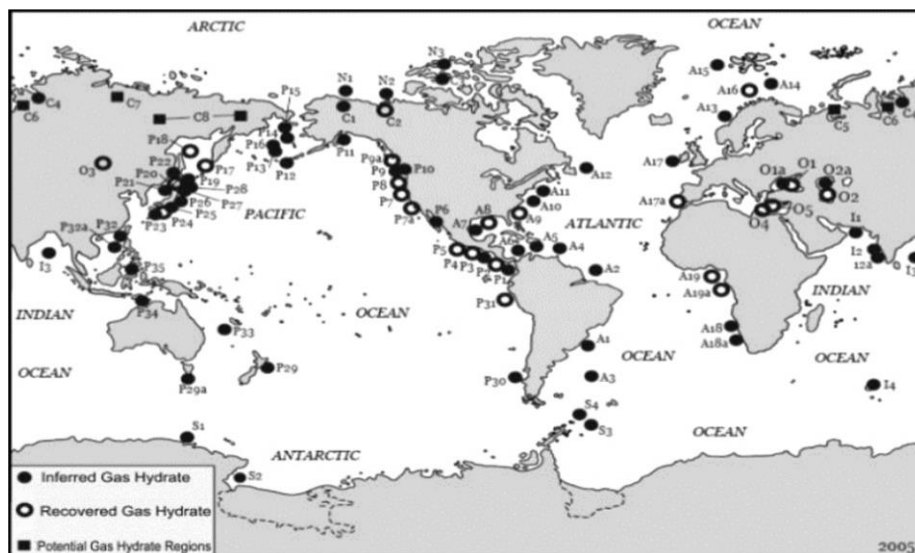
Mimachi, *et al* (2014) dalam penelitiannya mengenai pengaruh ukuran partikel terhadap fenomenan ketahanan gas hidrat sebagai penyimpanan dan pendistribusian gas alam, setiap hidrat dengan berbagai ukuran partikel diuji dengan cara disimpan di dalam box polyester dengan temperatur 253 K dan tekanan 1 atm hasilnya hidrat dengan ukuran partikel lebih dari 0.50 mm bisa bertahan dalam 2 minggu.

Almatsany, *et al* (2015) dalam penelitiannya tentang pengaruh kecepatan putaran *crystallizer* terhadap laju pembentukan, stabilitas dan kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana butana. Disimpulkan bahwa semakin tinggi kecepatan motor memutar tabung *crystallizer*, semakin tinggi laju pembentukan hidrat pada proses pembentukan selama 10 jam. Semakin tinggi laju pembentukan hidrat ditunjukkan dengan semakin tingginya tingkat konsumsi gas untuk membentuk hidrat. Stabilitas hidrat dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu hidrat memiliki lapisan es disekitar kristalnya dan tekanan yang terjadi akibat penguraian hidrat akan menghambat laju penguraian setelahnya.

2.2 Hidrat Gas Alam

Hidrat gas alam merupakan kristal padat berbentuk es yang terdiri dari campuran air dan molekul gas yang terbentuk pada tekanan dan temperatur tertentu. Molekul air yang terdapat pada kristal es tersebut memiliki ikatan hidrogen yang mempunyai cangkang berongga yang selanjutnya akan terisi oleh molekul gas dengan bentuk dan ukuran yang sesuai (Ganji, 2007).

Pada hidrat gas tidak terjadi ikatan kimia antara molekul gas yang terjebak di dalam kristal es dengan molekul air yang berbentuk es tersebut. Molekul gas bebas untuk berotasi di dalam rongga dari kristal es tersebut. Hidrat gas merupakan campuran yang dapat dideskripsikan menjadi larutan padat (Carroll, 2009).

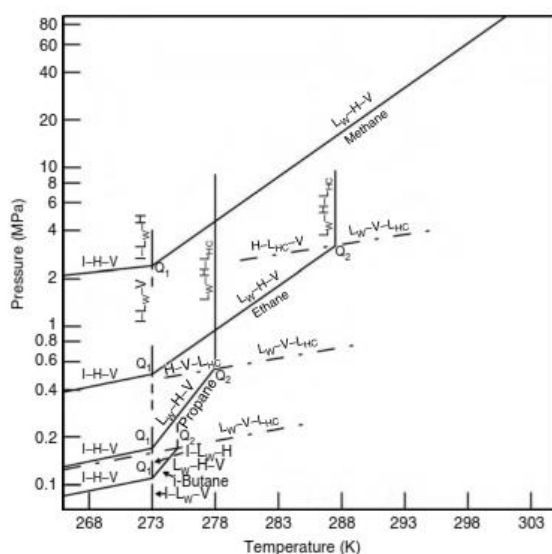


Gambar 2.1 Peta Dunia yang menunjukkan persebaran hidrat
Sumber : Sloan (2008, p.32)

Molekul gas yang mengisi hidrat disebut dengan klatrat. Klatrat adalah senyawa kimia inklusi dimana molekul kimia terjebak di dalam rongga molekul kristal es (Webster, 1994). Molekul gas alam yang sering ditemukan terdapat pada hidrat adalah metana, etana, propana, butana dan karbondioksida, pada gambar 2.1 menunjukkan persebaran hidrat di masing masing negara.

Pembentukan dari hidrat membutuhkan tiga kondisi yaitu pertama kombinasi yang tepat antara temperatur dan tekanan, pembentukan hidrat biasanya pada temperatur rendah dan tekanan tinggi, kedua molekul tamu pembentuk hidrat harus ada contohnya metana , etana, dll, ketiga jumlah dari H₂O harus tepat tidak terlalu banyak dan tidak terlalu sedikit. Jika ingin mencegah pembentukan hidrat tersebut maka harus menghilangkan salah satu kondisi tersebut.

Dalam membentuk hidrat, setiap gas alam memiliki temperatur dan tekanan yang berbeda. Hal ini disebabkan oleh perbedaan fase yang dimiliki oleh setiap gas alam. Diagram fase pembentukan beberapa gas alam ditunjukkan pada Gambar 2.2. Pada gambar tersebut, H menunjukkan hidrat, I menunjukkan es, V menunjukkan uap, L_w menunjukkan fase cair air, L_{H_C} menunjukkan fase cair hidrokarbon, Q₁ menunjukkan titik *quadruple* bawah dan Q₂ menunjukkan titik *quadruple* atas. Pada setiap gas alam, daerah terbentuknya hidrat adalah sebelah kiri dari garis tiga fase (I-H-V), (L_w-H-V), (L_w-H-L_{H_C}) serta sebelah kanan dari fase air dalam kondisi cair atau es dan gas dalam kondisi uap atau cair.

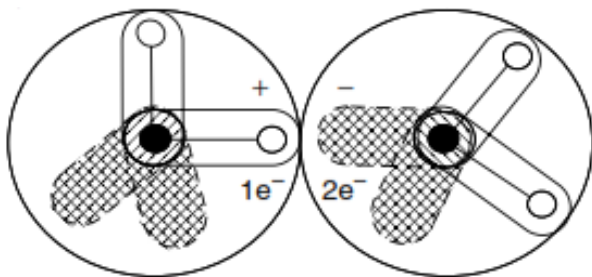


Gambar 2.2 Diagram Fase Beberapa Gas Alam Hidrokarbon yang Membentuk Hidrat
Sumber : Sloan (2008, p.7)

Pada gambar 2.1 Q_1 (I-L_w-H-V) dan Q_2 (L_w-H-V-L_{HC}) ditunjukkan oleh garis perpotongan tiga fase. Q_1 dan Q_2 pada setiap pembentukan hidrat menghasilkan klasifikasi kuantitatif untuk komponen hidrat gas alam. Setiap titik *quadruple* menunjukkan perpotongan dari empat garis tiga fase. Q_1 merupakan transisi dari L_w menjadi I sehingga terjadi penurunan temperatur. Q_1 menunjukkan dimana pembentukan hidrat berhenti dari uap dan air, serta dimana pembentukan hidrat terjadi dari uap dan es. Q_2 menunjukkan batas temperatur tertinggi untuk pembentukan hidrat. Untuk memenuhi perpotongan pada Gambar 2.2 maka tekanan uap pada temperatur kritis dapat direndahkan. Pada gas metana tidak memiliki batas temperatur tertinggi untuk membentuk hidrat.

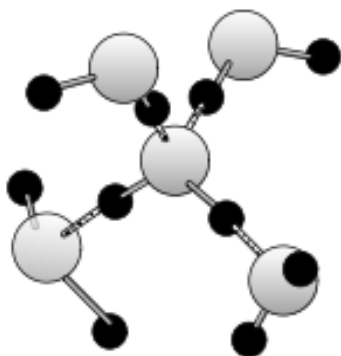
2.3 Ikatan Hidrogen

Molekul air pada gambar 2.3 digambarkan memiliki dua kutub positif dan dua kutub negatif hal ini disebabkan oleh gaya tarik-menarik antara kutub positif satu molekul dan kutub negatif molekul lainnya. Pada es dan hidrat, hanya satu ikatan hidrogen antara dua atom oksigen dengan jarak antar inti oksigen 2.76 Å. Sudut ikatan O-O-O rata-rata pada es dan hidrat sebesar 109.5° (Davidson, 1983).



Gambar 2.3 Ikatan Hidrogen Antara Dua Molekul
Sumber: Sloan (2008, p.50)

Melalui ikatan hidrogen, setiap molekul air yang melekat pada empat molekul lain memberikan dua dan menerima dua ikatan hidrogen yang ditunjukkan pada gambar 2.3. Setiap proton dari molekul tertarik ke kutub negatif dari molekul lainnya. Dua kutub negatif pada molekul awal menarik kutub positif dari dua molekul air lainnya. Empat molekul sekitarnya disusun tetrahedral sekitar molekul yang menjadi pusatnya.



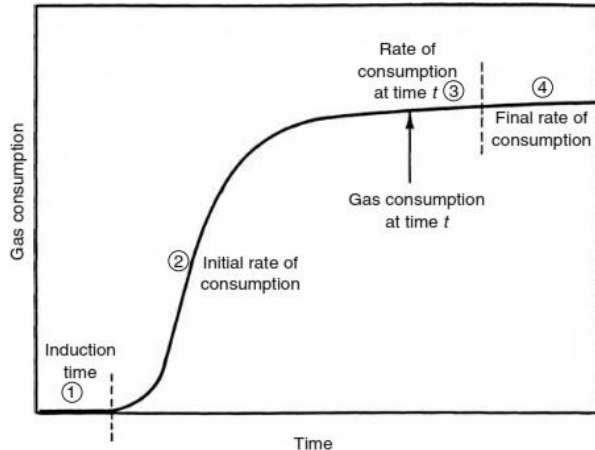
Gambar 2.4 Ikatan Hidrogen Antara Empat Molekul
 Sumber: Sloan (2008, p.50)

Energi yang dibutuhkan untuk memutus satu ikatan hidrogen sebesar 5 kcal/mol lebih besar daripada memutus ikatan van der Waals yang sebesar 0.3 kcal/mol seperti molekul nonpolar pada suatu fluida. Energi ikatan hidrogen berbeda dari ikatan kovalen kimia yang sebesar 102 kcal/mol seperti ikatan hidrogen dengan oksigen pada molekul air.

2.4 Pembentukan Hidrat

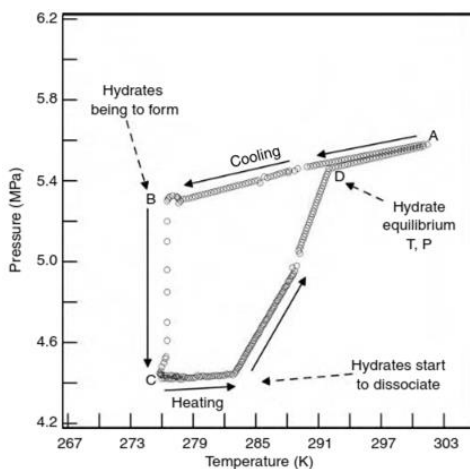
Hidrat gas merupakan merupakan kristal padat berbentuk es yang terdiri dari air dan gas. Pembentukan hidrat gas alam terjadi pada tekanan dan suhu yang tepat. Pada hidrat gas alam terdapat klatrat sebagai pengisi hidrat, terdapat air yang cukup (tidak terlalu banyak dan tidak terlalu sedikit) serta gaya yang menyebabkan molekul gas alam masuk ke dalam dalam molekul air.

Pada gambar 2.5 menunjukkan hubungan antara konsumsi gas terhadap waktu dalam pembentukan dan pertumbuhan hidrat untuk sistem agitasi (kavitasi atau turbulensi) yang dioperasikan pada tekanan dan temperatur konstan. Sel autoklaf (bejana) yang mengandung air ditekan dengan gas dikondisikan pada P dan T yang tepat sehingga dapat membentuk hidrat. Untuk menjaga agar gas tetap menjadi hidrat maka gas ditambahkan dari suatu bejana dengan tekanan konstan. Tingkat konsumsi gas yang diperlukan selama proses pembentukan hidrat adalah tingkat pembentukan hidrat yang dapat dibentuk oleh gaya kinetik dan perpindahan panas yang terjadi pada sistem tersebut.



Gambar 2.5 Pengaruh Waktu Terhadap Konsumsi Gas Pada Pembentukan Hidrat
 Sumber : Sloan (2008, p.115)

Pada gambar 2.5 menunjukkan terdapat empat proses dalam pembentukan hidrat. Angka 1 menunjukkan waktu induksi, yaitu waktu yang dibutuhkan untuk membentuk inti kristal, yang tidak memungkinkan untuk diperiksa secara makroskopik. Waktu induksi sering disebut dengan nukleasi hidrat dan sebagai waktu yang diperlukan untuk mendeteksi volume dari fase hidrat. Hidrat tidak terbentuk pada periode ini karena masih dalam kondisi metastabil (kemampuan suatu sistem *non-equilibrium* untuk bertahan dalam jangka waktu yang lama). Proses kedua merupakan proses dimana masa pertumbuhan hidrat terbentuk dan konsumsi gas sangat besar dalam waktu singkat. Kemudian pada proses ketiga konsumsi gas mulai menurun dan hanya sedikit saja hingga akhirnya pada proses keempat merupakan akhir dari proses pembentukan hidrat.



Gambar 2.6 Garis Hubungan Tekanan dan Temperatur Pada Hidrat Metana Sederhana
 Sumber : Sloan (2008, p.115)

Gambar 2.6 merupakan eksperimen lain dari pembentukan hidrat dan penguraian hidrat, ditunjukkan dengan garis hubungna antara tekanan dan temperatur. Pada eksperimen ini besarnya volume adalah konstan, dan temperatur akan berubah selama eksperimen berlangsung. Kondisi metastabil pada sistem berfungsi untuk mencegah pembentukan hidrat secara cepat pada titik D. Titik D merupakan titik kesetimbangan tekanan dan temperatur dari hidrat gas. Akan tetapi tekanan sistem akan terus menurun secara linear selama beberapa jam tanpa terjadi pembentukan hidrat. Titik A menuju titik B adalah periode induksi. Pada titik B hidrat sudah mulai terbentuk. Kemudian tekanan menurun ke titik C dengan cepat sampai 1.01 Mpa atau 10 atm dalam waktu setengah jam.

2.5 Pertumbuhan Hidrat

Pertumbuhan hidrat mengacu pada fase dimana inti tumbuh sebagai kristal hidrat padat. Selama proses pertumbuhan hidrat, perpindahan panas dan massa merupakan hal yang sangat penting. Pada gambar 2.6, periode antara titik B dan C menunjukkan pertumbuhan hidrat dimana secara signifikan gas dimasukkan ke dalam fase hidrat. Pada gambar 2.8, periode pertumbuhan hidrat ditunjukkan oleh nomer 2 di mana konsumsi mol gas sangat tinggi dan gas akan terkonsentrasi pada kerangka hidrat. Proses yang paling mendominasi pada saat pertumbuhan hidrat adalah ketika perpindahan massa gas menuju ke permukaan hidrat. Hal ini dikarenakan hidrat mengandung sekitar 15% mol gas.

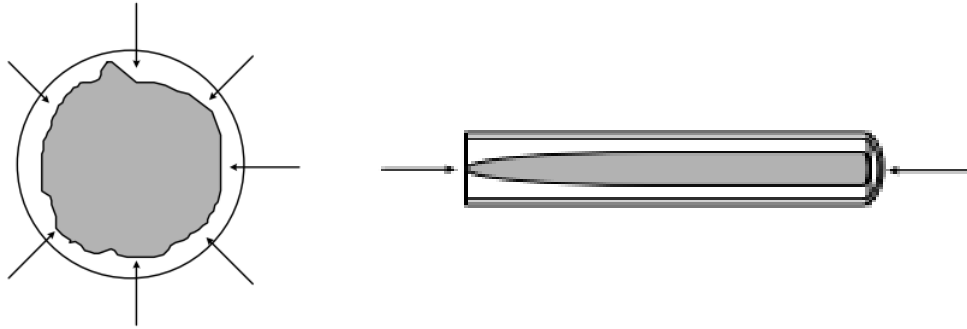
2.6 Penguraian Hidrat

Penguraian (disosiasi) hidrat merupakan proses endotermik (panas yang bersumber dari luar sistem) yang berfungsi untuk memecah ikatan hidrogen antara molekul air untuk menguraikan hidrat menjadi air dan gas. Penguraian hidrat ini sangat penting untuk diketahui dalam proses produksi gas dari hidrat gas alam dan masalah pemipaan.

Penguraian hidrat pada gambar 2.9 ditunjukkan antara titik C dan D dimana ketika pada titik C hidrat dipanaskan sehingga meningkatkan tekanan system secara perlahan, kemudian meningkat tajam sepanjang garis disosiasi hidrat dan akhirnya hidrat mengalami penguraian secara sempurna pada titik D.

Penguraian hidrat secara umum dapat terjadi secara radial dan aksial yang ditunjukkan pada gambar 2.7, penguraian hidrat secara umum terjadi pada pipa dimulai ketika bagian inti hidrat yang mendekati permukaan pipa mulai berubah fase menjadi cair dan mengelilingi

fase hidrat yang masih berbentuk solid yang berada di tengahnya. Fase air ini akan mengalirkan panas untuk mendisosiasi fase hidrat yang dikelilinginya. Disosiasi radial merupakan fenomena fisik yang terjadi secara tidak sengaja karena penguraian hidrat lebih cepat secara signifikan dibandingkan dengan disosiasi aksial. Hal ini disebabkan oleh dimensi radial lebih kecil dibandingkan dimensi longitudinal dan daerah perpindahan panas permukaan radial lebih besar daripada permukaan aksial.



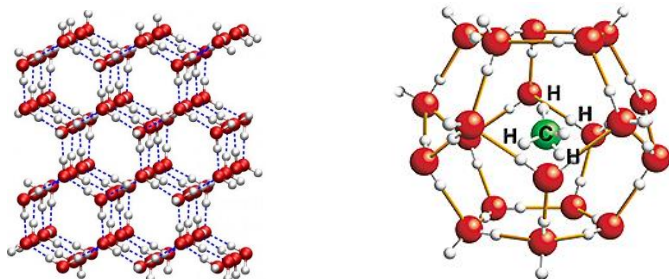
Gambar 2.7 (a) Disosiasi Radial (b) Disosiasi Aksial
Sumber: Sloan (2008, p.177)

2.7 Perbedaan Struktur Hidrat Gas dengan Es

Semua rongga pada hidrat gas struktur kubus I dan II terisi oleh molekul gas pengisi sebagai hidrat sederhana. Sebagai contoh adalah xenon dan argon, molekul air minimum menunjukkan molekul masing-masing gas. Kedua struktur tersebut menghasilkan struktur dengan 85% mol berupa air.

Secara bentuk fisik es dengan hidrat gas alam bentuknya sama. Hidrat yang dibentuk oleh struktur kubus I dan struktur kubus II didalam rongganya akan ditempati oleh gas pengisi hidrat yang disebut dengan klatrat. Es memiliki tiga belas buah fase kristal yang berbeda, sesuai dengan temperatur dan tekanan.

Perbandingan ikatan hidrogen pada hidrat rata-rata lebih panjang 1% daripada es dan besar sudut O-O-O berbeda dari es yang memiliki struktur tetrahedral. Struktur tetrahedral memiliki sudut O-O-O sebesar 3.7° sedangkan struktur kubus I dan II sebesar 3.0° (Davidson,1973). Berikut ini adalah perbedaan propertis es dengan hidrat.



(a)

(b)

Gambar 2.8 Perbedaan Struktur Es dan Hidrat, (a) Struktur Kristal Es, (b) Struktur Kristal Hidrat

Sumber: Thakur (2011, p.53)

Tabel 2.2 Perbandingan Properti Es dengan Struktur Kubus I dan II

Property	Ice	Structure I	Structure II
Structure and dynamics			
Crystallographic unit cell space group	P6 ₃ /mmc	Pm3n	Fd3m
No. of H ₂ O molecules	4	46	136
Lattice parameters at 273 K (Å)	$a = 4.52, c = 7.36$	12.0	17.3
Dielectric constant at 273 K	94	~58	~58
Far infrared spectrum	Peak at 229.3 cm ⁻¹	Peak at 229.3 cm ⁻¹ with others	
H ₂ O reorientation time at 273 K (μs)	21	~10	~10
H ₂ O diffusion jump time (μs)	2.7	>200	>200
Mechanical properties			
Isothermal Young's modulus at 268 K (10 ⁹ Pa)	9.5	8.4 ^{est}	8.2 ^{est}
Poisson's ratio	0.3301 ^a	0.31403 ^a	0.31119 ^c
Bulk modulus (GPa)	8.8; 9.097 ^a	5.6; 8.762 ^a	8.482 ^a
Shear modulus (GPa)	3.9; 3.488 ^a	2.4; 3.574 ^a	3.6663 ^a
Compressional velocity, V _p (m/s)	3870.1 ^a	3778 ^{a,b}	3821.8 ^a
Shear velocity, V _s (m/s)	1949 ^a	1963.6	2001.14 ^b
Velocity ratio (comp/shear)	1.99	1.92	1.91
Thermal properties			
Linear thermal expansion at 200 K (K ⁻¹)	56×10^{-6}	77×10^{-6}	52×10^{-6}
Thermal conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹) at 263 K	2.23	0.49 ± 0.02;	0.51 ± 0.02
	2.18 ± 0.01 ^c	0.51 ± 0.01 ^c	0.50 ± 0.01 ^c
		0.587 ^d	
Adiabatic bulk compression at 273 K (GPa)	12	14 ^{est}	14 ^{est}
Heat capacity (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	1700 ± 200 ^c	2080	2130 ± 40 ^c
Refractive index (632.8 nm, -3°C)	1.3082 ^e	1.346 ^e	1.350 ^e
Density (g/cm ³)	0.91 ^f	0.94 also see Example 5.2	1.291 ^g

Sumber: Sloan (2008, p.94)

2.8 Sifat Mekanik

Jika dilihat dari sifat mekaniknya, gas hidrat metana memiliki kekuatan (ketahanan mulur) dua puluh kali lebih kuat daripada kekuatan es. Hal tersebut diuji dengan pengukuran deformasi kompresi pada temperatur 260 – 273 K dan tegangan konstan.

Pada penerapan tegangan yang sama es mengalami deformasi lebih cepat daripada hidrat metana murni. Tingginya kekuatan mekanik dari hidrat metana dibandingkan dengan es berhubungan dengan laju difusi dari air dalam hidrat metana dua kali lebih lambat daripada es (Durham, 2003).

2.9 Sifat Termal

Selain dari sifat mekanik, hidrat dan es juga bisa dibandingkan dari sifat termalnya. Dalam penelitiannya, Stroll dan Bryan (1979) mengukur konduktivitas termal dari hidrat propana sebesar 0.393 W/mK pada temperatur 215.15 K lebih kecil dari es yaitu sebesar 2.23 W/mK. Konduktivitas termal hidrat padat sebesar 0.5-0.58 W/mK mendekati besarnya konduktivitas termal air pada fase cair (0.605 W/mK).

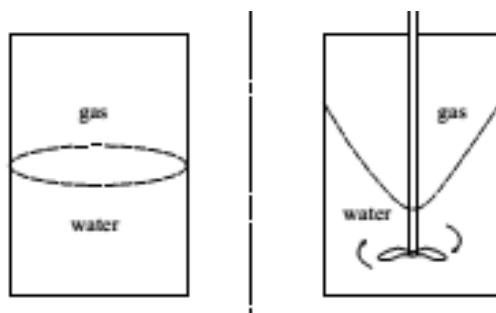
2.10 Agitasi

Agitasi dari fluida biasanya dilakukan dalam sebuah tangki yang dilengkapi dengan sebuah *impeller* seperti : baling – baling , dayung, atau turbin. *Impeller* dimasukkan kedalam larutan dan diputar dalam kecepatan tertentu sehingga menimbulkan baik itu gerakan dalam jumlah besar maupun pusaran halus pada fluida. Energi mekanik dibutuhkan untuk memutar *impeller* yang kemudian mengirimkan energi ini dalam fluida. Mekanisme dari transmisi ini hampir sama dengan permasalahan plat paralel, dimana plat atas yang bergerak mengirimkan kecepatan kepada fluida terdekat melalui efek dari kekentalan. Dalam agitasi, *impeller* berputar sedangkan bagian sisi samping dan bawah tangki tidak berputar atau diam dan hasil dari gradient kecepatan menyebabkan pencampuran dan persebaran.

Agitasi dalam proses umumnya menyelesaikan perubahan fisik, perubahan kimia, dan atau peningkatan laju perpindahan. Hal ini dapat terjadi secara bersamaan atau satu per satu. Contoh perubahan fisik adalah peningkatan permukaan area zat padat. Contoh perubahan kimia adalah terjadinya reaksi kimia, agitasi membantu membawa reaktan (atau reaktan dan katalis) agar reaksi dapat terjadi. Agitasi menaikkan laju perpindahan panas.

Agitasi juga dapat meningkatkan laju perpindahan massa ketika mencampur zat yang dapat larut (atau material lain) dalam cairan pelarut. Apabila zat terlarut mengandung kristal padat, maka agitasi secara tipikal bertanggung jawab dalam menghasilkan dan memelihara konsentrasi maksimum daya penggerak yang memungkinkan antara pemisah padat dan larutan. Zat terlarut dapat berupa larutan ataupun gas. Agitasi seringkali menyebarkan bahan yang tidak larut melalui larutan, contoh umumnya dapat dilihat pada kasus pigmentasi seperti TiO_2 tersebar dalam cat. Agitasi dapat menyebarkan gas dalam bentuk gelembung kecil melalui larutan sebagai tujuan untuk absorpsi atau reaksi larutan-gas. Dalam sejumlah reaktor kimia, agitasi seringkali berperan ganda dalam hal mempertahankan gradient konsentrasi tinggi dan memindahkan larutan diatas permukaan perpindahan panas untuk mengontrol suhu reaktor. Dalam kasus reaksi eksotermik tinggi atau pembentukan material yang peka terhadap panas, kontrol suhu dan perpindahan panas yang tepat sangat penting (Robert S, 2003).

2.11 Efek Pengadukan Selama Proses Pembentukan Hidrat



Gambar 2.9 Permukaan kontak gas dengan air
Sumber : Liu ni, *et al* (2011)

Dalam suatu sistem pengadukan kontak permukaan gas dengan air berubah dari bentuk lingkaran ke bentuk kerucut seperti terlihat pada gambar 2.10, oleh karena itu kontak permukaan air dan gas meningkat dan secara terus menerus diperbarui. Efek adanya *impeller* pada tanki tersebut juga menyebabkan fenomena agitasi.

2.12 Gas Alam

Gas alam merupakan sumber energi atau bahan bakar yang terbentuk dari fosil dan berbentuk gas. Gas alam sering dijumpai bersama dengan minyak bumi, gas alam juga sering pula disebut dengan gas bumi. Komponen utama dari gas alam adalah metana (CH_4)

yang merupakan molekul hidrokarbon dengan rantai terpendek dan teringan. Selain itu, gas alam juga mengandung molekul-molekul hidrokarbon yang lebih berat lainnya seperti etana (C_2H_6), propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}) serta gas-gas yang mengandung sulfur (belerang). Tabel 2.3 menunjukkan komposisi dari gas alam

Tabel 2.3 Komposisi dari Gas Alam

Gas	Composition	Range
Methane	CH_4	70-90%
Ethane	C_2H_6	
Propane	C_3H_8	0-20%
Butane	C_4H_{10}	
Pentane and higher hydrocarbons	C_5H_{12}	0-10%
Carbon dioxide	CO_2	0-8%
Oxygen	O_2	0-0.2%
Nitrogen	N_2	0-5%
Hydrogen sulfide, carbonyl sulfide	H_2S, COS	0-5%
Rare gases: Argon, Helium, Neon, Xenon	A, He, Ne, Xe	trace

Sumber: Speight (2007, p.62)

Gas alam tersusun dari senyawa kimia hidrokarbon yang mudah terbakar, dimana pada kondisi temperatur dan tekanan atmosfer akan berbentuk fase gas. Senyawa yang terdapat pada gas alam bervariasi. Beberapa dari senyawa ini terdiri dari senyawa lemah, seperti hidrogen sulfida dan karbon dioksida. Dan yang lainnya terdiri dari gas inert seperti nitrogen, argon dan helium. Terdapatnya hidrogen sulfida dan karbon dioksida dalam gas alam akan memberikan dampak buruk ketika gas alam dipergunakan oleh masyarakat. Karena hidrogen sulfida bisa menghasilkan gas racun yang berbahaya dan karbon dioksida bisa mengurangi nilai panas gas. Sehingga sebelum gas alam digunakan maka harus diproses terlebih dahulu untuk menghilangkan zat pengotor.

Pemanfaatan gas alam pada saat ini dapat dikatakan cukup banyak, khususnya dalam bentuk bahan bakar. Keunggulan yang dimiliki oleh gas alam apabila diolah menjadi bahan bakar adalah lebih efisien dan hasil pembakarannya lebih bersih. Pada keadaan murni, bentuk fisik dari gas alam tidak berbau, tidak berbentuk dan tidak berwarna. Ketika gas alam digunakan sebagai bahan bakar kendaraan, rumah tangga atau industri akan menghasilkan pembakaran yang sempurna karena tidak menimbulkan jelaga, sehingga

emisi karbon yang dihasilkan sangat kecil dan tentunya tidak akan berdampak buruk terhadap lingkungan.

2.12.1 Gas Propana

Gas propana merupakan gas hidrokarbon yang terdiri dari tiga atom karbon dan delapan atom hidrogen (C_3H_8) yang berwujud gas dalam keadaan normal, namun dapat dikompresi dengan tekanan tertentu sehingga menjadi cairan. Gas propana umumnya digunakan sebagai bahan bakar. Komposisi dai gas propana pada gas alam sebelum dimurnikan ditunjukkan pada Tabel 2.3. Massa jenis gas propana sebesar 1.50 kg/m^3 pada temperatur ruangan. Kelarutan gas propana dalam air sebesar 40 mg/L pada temperatur 20°C . Karakteristik umum gas propana ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Karakteristik umum dari gas alam

	Molecular Weight	Specific Gravity	Vapor Density air = 1	Boiling Point $^\circ\text{C}$	Ignition Temperature $^\circ\text{C}$	Flash Point $^\circ\text{C}$
Methane	16	0.553	0.56	-160	537	-221
Ethane	30	0.572	1.04	-89	515	-135
Propane	44	0.504	1.50	-42	468	-104
Butane	58	0.601	2.11	-1	405	-60
Pentane	72	0.626	2.48	36	260	-40
Hexane	86	0.659	3.00	69	225	-23
Benzene	78	0.879	2.80	80	560	-11
Heptane	100	0.668	3.50	98	215	-4
Octane	114	0.707	3.90	126	220	13
Toluene	92	0.867	3.20	161	533	4
Ethyl benzene	106	0.867	3.70	136	432	15
Xylene	106	0.861	3.70	138	464	17

Sumber: Speight (2007, p. 81)

2.12.2 Gas Butana

Gas butana merupakan alkana rantai lurus dengan empat atom karbon dan 10 atom hidrogen (C_4H_{10}), gas ini juga disebut dengan n-butana. Gas butana sangat mudah terbakar, tidak berwarna, dan merupakan gas yang mudah dicairkan. Komposisi dari gas butana ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Massa jenis gas butana sebesar 2.11 kg/m^3 pada temperatur ruangan. Kelarutan gas butana dalam air sebesar 61 mg/L pada temperatur 20°C . Gas butana memiliki berat molekul sebesar 58 g/mol . Berat molekul gas butana lebih besar dari gas metana (CH_4),

etana (C_2H_6) dan propana (C_3H_8) yang masing-masing memiliki berat molekul 18, 30 dan 42 gram/mol. Karakteristik umum dari gas butana ditunjukkan pada Tabel 2.4.

2.12.3 *Liquified Petroleum Gas (LPG)*

Liquified Petroleum Gas adalah *propane* komersial dan *butane* komersial. Propana komersial terdiri dari 90% propana dan propylene sedangkan sisanya adalah etana, ethena, butana dan butena. Tekanan uapnya sebesar 11.5 hingga 19.3 bar gauge. Sedangkan temperatur penguapannya adalah lebih kecil atau sama dengan $15^{\circ}C$. Bentuk lain dari *Liquified Petroleum Gas* adalah butana komersial. Komposisi gas ini sebagian besar didominasi oleh butana dan butena. Dan mengandung propylen dan propana kurang dari 19%. Pada temperatur $50^{\circ}C$ tekanan uapnya kurang dari atau sama dengan 6.9 bar gauge. Temperatur penguapan LPG jenis ini kurang dari atau sama dengan $1^{\circ}C$

LPG yang diproduksi oleh PT.Pertamina terbagi menjadi 3 yaitu:

1. LPG Propana

95% propana dan mempunyai bau yang menyengat dan digunakan untuk kebutuhan khusus.

2. LPG Butana

Bahan bakar untuk kebutuhan industri adalah bahan bakar jenis ini. Terdiri dari 97,5% butana dan mempunyai bau yang menyengat.

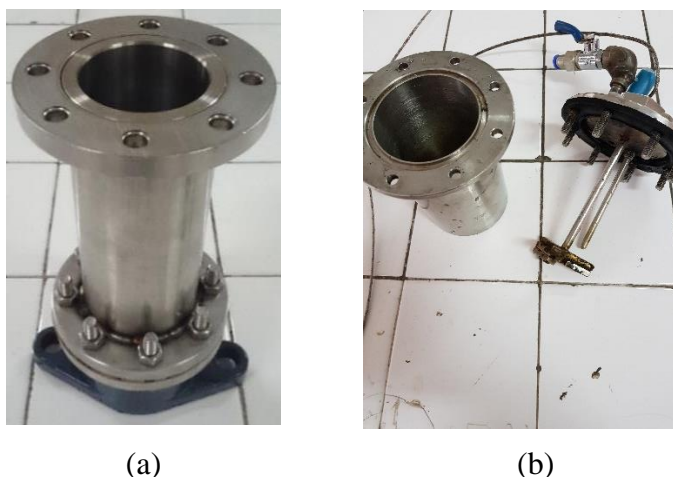
3. LPG Campuran

Bahan bakar LPG digunakan untuk kebutuhan rumah, industri dan komersial. Terdiri dari campuran propana dan butana. Terdiri dari 50% volume butana dan 50% propana dan mempunyai bau yang menyengat.

LPG memiliki berat yang lebih tinggi daripada udara dengan berat jenis sekitar 2.01 lebih besar dari berat jenis udara. Dalam kondisi atmosfer, LPG akan berbentuk gas. Akan tetapi pemasar LPG ke masyarakat dalam bentuk cair, hal ini disebabkan volume LPG dalam bentuk cair lebih ringan bila dibandingkan dengan bentuk gasnya meskipun dalam jumlah berat yang sama. Selain itu, ketika dibuat dalam bentuk cair penyimpanan LPG akan lebih mudah dibandingkan dalam bentuk gas.

2.13 Perbedaan *Stirrer Tank* dan *Vessel Tank*

Perbedaannya terletak pada rangkaiannya pada *stirrer tank* terdapat pengaduk sehingga pengaduknya yang berputar sedangkan pada *vessel tank* tabungnya yang berputar tanpa pengaduk, pada *stirrer tank* terjadinya fenomena agitasi lebih tinggi sehingga mempercepat perpindahan panas dan perpindahan massa dan pencampuran yang lebih efektif.



Gambar 2.10 (a) *Vessel tank* (b) *Stirrer tank*

2.14 Persamaan Keadaan

Persamaan keadaan merupakan persamaan yang menyatakan hubungan antara *state variable* yang menggambarkan keadaan dari suatu sistem pada kondisi fisik tertentu. *State variable* adalah properti dari sistem yang hanya bergantung pada keadaan sistem saat ini, bukan pada jalannya proses. Misalnya temperatur, tekanan, densitas, entalpi, entropi, dan lain sebagainya. Persamaan keadaan dibagi menjadi dua, yaitu persamaan gas ideal dan persamaan gas nyata.

2.14.1 Persamaan Gas Nyata

Pada gas ideal, volume molekul gas diabaikan dan hanya dianggap sebagai titik. Sedangkan kenyataannya, molekul gas memiliki volume 0.1% dari total volume gas dan volume molekul gas tetap sama dibandingkan dengan penurunan volume total gas. Penurunan volume gas terjadi dengan adanya penurunan temperatur dan peningkatan tekanan. Sehingga, volume molekul gas tidak dapat diabaikan.

Pada gas ideal, kekuatan tarik-menarik atau kekuatan tolak-menolak antar molekul diabaikan. Kekuatan tarik-menarik antar molekul dapat diabaikan apabila terdapat pada tekanan rendah dan temperatur tinggi karena kondisi molekul gas saling berjauhan. Namun pada tekanan tinggi dan temperatur rendah, volume gas menjadi kecil sehingga menyebabkan kekuatan tarik antar molekul ada meskipun sangat kecil.

Persamaan gas nyata, yaitu :

1. Persamaan keadaan Peng-Robinson

Persamaan keadaan Peng-Robinson merupakan perbaikan dari persamaan keadaan Soave-Redlich-Kwong. Kelebihan dari persamaan keadaan Peng-Robinson daripada persamaan keadaan lainnya adalah sebagai berikut:

- Parameter yang ada dapat dinyatakan dalam sifat kritis tekanan dan temperatur dan faktor asentrik (ω). Faktor asentrik adalah ukuran ketidak bulatan suatu molekul gas.
- Persamaan berlaku pada semua perhitungan karakteristik pada gas alam.

$$P = \frac{nRT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V^2 + 2bV - b^2} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\alpha = \left\{ 1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.2699\omega^2)(1 - T_r^{0.5}) \right\}^2 \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan :

P = Tekanan gas (Pa)

V = Volume sistem suatu gas (m³)

n = Jumlah mol gas (mol)

R = Konstanta gas (8.314 J/mol.K)

T = Temperatur absolut (K)

T_r = Temperatur tereduksi gas (K)

a = Konstanta persamaan keadaan Peng-Robinson $\left(a = 0.42748 \frac{R^2 T_c^{2.5}}{P_c} \right)$

b = Konstanta persamaan keadaan Peng-Robinson $\left(b = 0.08662 \frac{RT_c}{P_c} \right)$

α = Konstanta yang dipengaruhi P_r dan T_r

ω = Faktor asentrik

Titik kritis merupakan kondisi dimana zat akan memiliki kecenderungan mempunyai

Fase yang sama baik cair, gas maupun padat. Dengan adanya sedikit penambahan atau pengurangan tekanan dan temperatur pada titik kritis maka zat akan mengalami perubahan fase tertentu.

Gas yang digunakan dalam penelitian ini adalah propana butana dengan komposisi campuran yang masing masing adalah 50%. Sehingga berdasarkan diagram tekanan dan temperatur kritis, titik kritis propana dan butana merupakan nilai tengah dari campuran kedua gas tersebut.

$$p_c = \frac{p_{c,Propana} + p_{c,n-Butana}}{2} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$p_r = \frac{p_t}{p_c} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$T_c = \frac{T_{c,propana} + T_{c,n-butana}}{2} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$T_r = \frac{T_t}{T_c} \dots\dots\dots (2.6)$$

dengan :

p_c = Tekanan kritis (Pa)

p_r = Tekanan tereduksi

T_c = Temperatur kritis (K)

T_r = Temperatur tereduksi

Faktor asentrik merupakan faktor yang ditunjukkan untuk mengoreksi ukuran bulat dari setiap molekul karena pada aktualnya tidak setiap molekul gas memiliki bentuk molekul yang bulat sempurna. Faktor asentrik memiliki persamaan sebagai berikut:

$$\omega = -1 - \log p_r \dots\dots\dots (2.7)$$

dengan :

ω = Faktor asentrik

p_r = Tekanan tereduksi

Untuk membandingkan hasil antara gas ideal dengan gas nyata maka diperlukan faktor koreksi. Persamaan (2.3) adalah persamaan gas ideal dengan penambahan faktor kompresibilitas.

$$PV = ZnRT \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan :

- P = Tekanan gas (Pa)
- V = Volume sistem suatu gas (m³)
- n = Jumlah mol gas (mol)
- Z = Faktor kompresibilitas.
- R = Konstanta gas (8.314 J/mol.K)
- T = Temperatur absolut (K)

Faktor kompresibilitas (Z) merupakan rasio molar volume gas terhadap volume gas ideal pada tekanan dan temperatur sama. Nilai faktor kompresibilitas untuk gas ideal sebesar 1, untuk gas yang memiliki nilai faktor kompresibilitas jauh dari angka 1 maka dapat dikatakan bahwa terjadi penyimpangan dari perilaku gas ideal. Gas berperilaku berbeda pada suhu dan tekanan tertentu, akan tetapi gas akan berperilaku seperti gas ideal ketika suhu dan tekanan normal sama dengan suhu dan tekanan kritisnya.

Faktor kompresibilitas didapatkan dari akar persamaan kubik dan diambil nilai Z dengan nilai tertinggi. Nilai A dan B masing-masing dari Persamaan (2.9) dan (2.10)

$$Z^3 - c_2 Z^2 + c_1 Z - c_0 = 0 \dots\dots\dots (2.9)$$

$$A = \frac{\Omega_a \alpha p_r}{T_r^2} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$B = \frac{\Omega_b p_r}{T_r} \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan :

- Z = Faktor kompresibilitas.
- Ω_a , = Konstanta persamaan kubik (0.45724)
- Ω_b = Konstanta persamaan kubik (0.07779)
- α = Konstanta yang dipengaruhi P_r dan T_r
- p_r = Tekanan tereduksi gas (Pa)

T_r = Temperatur tereduksi gas (K)

Koefisien C :

$$C_2 = B - 1 \dots\dots\dots(2.12)$$

$$C_1 = A - 2B - 3B^2 \dots\dots\dots(2.13)$$

$$C_0 = AB - B^2 - B^2 \dots\dots\dots(2.14)$$

Persamaan determinan keadaan peng robingson :

$$K = \frac{3c_2 - c_1^2}{3} \dots\dots\dots (2.15)$$

$$L = \frac{2c_2^3 - 9c_2c_1 + 27c_0}{27} \dots\dots\dots (2.16)$$

$$D = \frac{K^3}{27} + \frac{L^2}{4} \dots\dots\dots (2.17)$$

Akar persamaan kubik dan diambil nilai Z yang paling tertinggi :

$$\Phi = \cos^{-1} \left(- \sqrt{\frac{L^2/4}{K^3/27}} \right) \dots\dots\dots (2.18)$$

$$Z_1 = 2 \sqrt{\frac{-K}{3}} \cos \Phi - \frac{c_2}{3} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$Z_2 = 2 \sqrt{\frac{-K}{3}} \cos (\Phi + 120) - \frac{c_2}{3} \dots\dots\dots(2.20)$$

$$Z_3 = 2 \sqrt{\frac{-K}{3}} \cos (\Phi + 240) - \frac{c_2}{3} \dots\dots\dots (2.21)$$

2.15 Perpindahan Panas

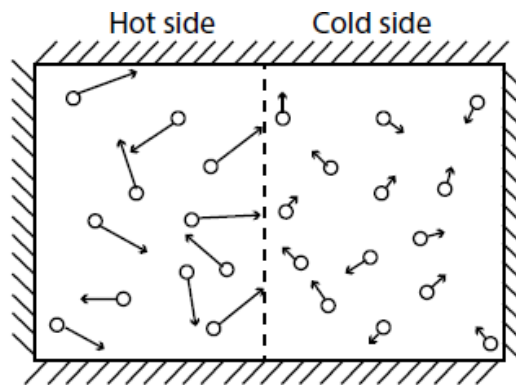
Energi panas dapat ditransfer dari satu sistem ke sistem yang lain, sebagai hasil dari perbedaan temperatur. Adapun transfer energi panas selalu terjadi dari medium suhu yang lebih tinggi ke suhu yang lebih rendah, dan perpindahan panas berhenti ketika dua medium mencapai suhu yang sama. Perpindahan panas memiliki pengertian yaitu perpindahan

energi dari suatu sistem yang memiliki temperatur lebih tinggi menuju sistem lain yang memiliki temperatur lebih rendah.

Terdapat tiga macam mekanisme perpindahan panas, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Semua cara dari perpindahan panas memerlukan adanya perbedaan suhu.

1. Konduksi

Konduksi merupakan perpindahan panas yang terjadi akibat perpindahan energi tanpa disertai perpindahan massa. Konduksi dapat terjadi pada zat padat, cair maupun gas. Pada zat padat konduksi disebabkan molekul pembentuk zat padat bergetar dan menumbuk molekul-molekul disekitarnya sehingga mampu memindahkan energi melalui elektron bebas. Sedangkan pada zat cair dan gas, konduksi disebabkan adanya tumbukan dan difusi antar molekul akibat adanya perbedaan temperatur.



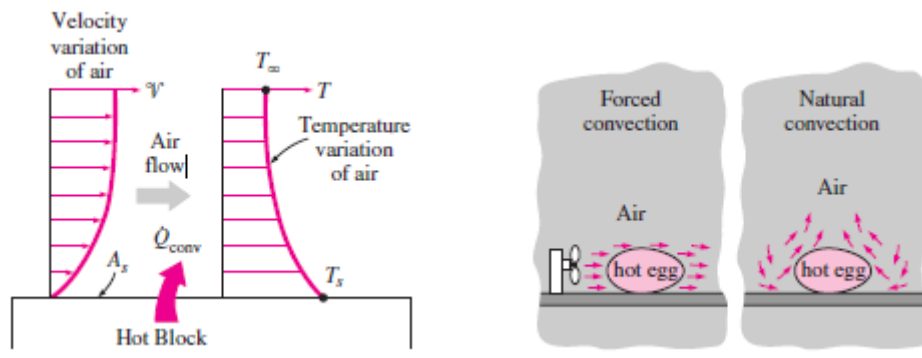
Gambar 2.11 skema dari konduksi di dalam gas
Sumber : Storey (2011, p10)

Dua wilayah tersebut mulanya dipisahkan, molekul yang bergerak cepat di wilayah panas akan menyebrang dan bertabrakan ke molekul yang lebih lambat di wilayah dingin, molekul panas akan pelan pelan tenang dan molekul dingin kecepataannya akan naik. setelah sekian lama molekul akan memiliki kecepatan translasional yang sama dan mempunyai suhu yang seragam.

2. Konveksi

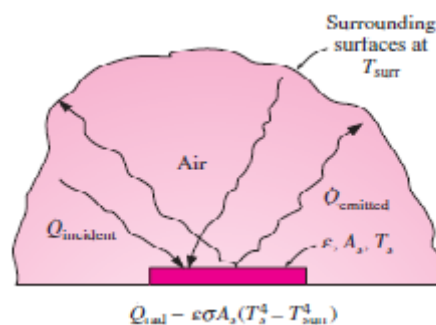
Konveksi merupakan perpindahan panas yang terjadi akibat perpindahan energi yang disertai perpindahan massa. Konveksi umumnya terjadi pada zat cair dan gas, akan tetapi konveksi juga merupakan mekanisme perpindahan energi antara permukaan

zat padat dengan zat cair atau gas. Konveksi dapat dibedakan menjadi dua, yaitu konveksi bebas dan konveksi paksa. Konveksi bebas disebabkan adanya perbedaan massa jenis fluida akibat adanya perbedaan temperatur. Sedangkan konveksi paksa disebabkan adanya pengaruh gaya diluar sistem.



Gambar 2.12 Perpindahan panas dari permukaan panas ke udara dengan konveksi dan mendinginkan telur rebus dengan konveksi paksa dan konveksi natural
Sumber : Cengel (2012, p32)

3. Radiasi



Gambar 2.13 Perpindahan panas secara radiasi
Sumber : Cengel (2012, p36)

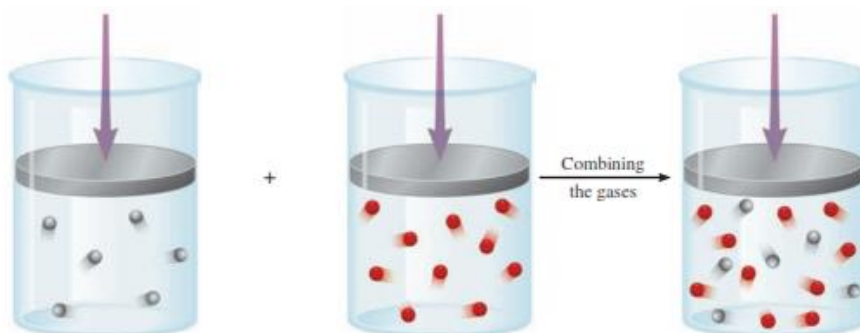
Radiasi merupakan perpindahan energi yang dilepaskan oleh suatu zat sebagai gelombang elektromagnetik karena adanya tumpukan energi panas pada semua zat dengan temperatur di atas nol mutlak. Radiasi yang dipancarkan oleh semua permukaan nyata lebih kecil dari radiasi yang dipancarkan oleh benda hitam pada suhu yang sama, dan dinyatakan sebagai :

2.16 Campuran Zat

Campuran zat merupakan gabungan dari dua atau lebih zat dengan perbandingan konsentrasi yang tidak tetap tanpa melalui reaksi kimia. Ketika beberapa zat atau komponen dicampurkan maka sifat campuran tersebut akan sesuai dengan sifat masing-masing penyusunnya. Terdapat dua macam bentuk campuran yaitu campuran homogen dan campuran heterogen

1. Campuran homogen

Campuran homogen merupakan campuran antara dua zat atau lebih yang partikel-partikel penyusun tidak dapat dibedakan lagi, atau sering juga disebut dengan larutan. Jenis campuran homogen, antara lain: campuran gas dalam gas, campuran gas dalam zat cair, campuran gula dalam air dan campuran garam dalam air.



Gambar 2.14 Campuran gas dengan gas
Sumber : Chang (200, p.149)

2. Campuran heterogen

Campuran heterogen merupakan campuran antara dua atau lebih zat yang partikel-partikel penyusunnya masih dapat dibedakan satu dengan yang lainnya. Pada campuran heterogen dinding pembatas antar zat masih dapat dilihat, misal campuran air dengan minyak, campuran serbuk besi dan air, dan sebagainya.

2.17 Validasi

Validasi merupakan pembuktian seberapa akurat data tersebut, untuk mencari konsumsi gas (mol) aktual terhadap waktu menggunakan persamaan :

$$\frac{dn}{dt} = k \frac{(n - n_0)}{(n_{max} - n_0)} \dots\dots\dots (2.22)$$

dimana :

$\frac{dn}{dt}$: Perubahan jumlah mol gas dalam satuan waktu

k : Kecepatan laju pembentukan hidrat (mol/jam)

n : Jumlah gas pada waktu tertentu (menit)

n_0 : Jumlah gas awal (mol)

n_{max} : Jumlah gas pada akhir proses (mol)

2.18 Hipotesa

Berdasarkan pada tinjauan pustaka yang telah dibahas sebelumnya menunjukkan bahwa pada alat *stireer tank* konsumsi gas (mol) akan lebih besar daripada *vessel tank* dan validasi antara konsumsi gas (mol) aktual dan teoritis akan memiliki nilai yang hampir sama. Hal ini disebabkan karena pada instalasi alat *stirred tank* adanya pengaduk yang menyebabkan fenomena agitasi yang mendorong pertumbuhan hidrat.

