

**PENGARUH KECEPATAN PUTARAN *CRYSTALLIZER* TERHADAP
LAJU PEMBENTUKAN, STABILITAS DAN KAPASITAS PENYIMPANAN
HIDRAT CAMPURAN PROPANA BUTANA**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

**AKHMAD SYAHIRUL ALIM ALMATSANY
NIM. 115060200111027-62**

KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

JURUSAN MESIN

MALANG

2015

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH KECEPATAN PUTARAN *CRYSTALLIZER* TERHADAP
LAJU PEMBENTUKAN, STABILITAS DAN KAPASITAS PENYIMPANAN
HIDRAT CAMPURAN PROPANA BUTANA**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

**AKHMAD SYAHIRUL ALIM ALMATSANY
NIM. 115060200111027-62**

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M. Eng.
NIP. 19740121 199903 1 001

Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.
NIP. 19750802 199903 2 002

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH KECEPATAN PUTARAN *CRYSTALLIZER* TERHADAP
LAJU PEMBENTUKAN, STABILITAS DAN KAPASITAS PENYIMPANAN
HIDRAT CAMPURAN PROPANA BUTANA**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh:
AKHMAD SYAHIRUL ALIM ALMATSANY
NIM. 115060200111027-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 18 Juni 2015

Majelis Penguji

Skripsi I

Skripsi II

Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.
NIP. 19591128 198710 1 001

Ir. Endi Sutikno, MT.
NIP. 19590411 198710 1 001

Skripsi III

Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M. Eng.
NIP. 19750710 199903 1 004

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT
NIP. 19750802 199903 2 002

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala limpahan berkat dan rahmat-Nya. Shalawat dan salam yang tak lupa penulis limpahkan kepada Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi dengan judul “Pengaruh Kecepatan Putaran *Crystallizer* terhadap Laju Pembentukan, Stabilitas dan Kapasitas Penyimpanan Hidrat Campuran Propana Butana” ini dengan baik.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan dan penyelesaian skripsi ini telah dibantu oleh banyak pihak. Oleh sebab itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini:

1. Kedua orang tuaku yang tercinta, ayahku Imron Rosyidi dan ibuku Siti Safiatus Riskijah yang selalu memberikan kasih sayang, cinta, doa, motivasi, kepercayaan, dan dukungan kepada penulis.
2. Mbak Rofiqoh Fitri Atsiri dan adik Abdul Harits Muzakki Alhawary yang telah memberikan semangat kepada penulis.
3. Esha Putri Maharani Ayu Widodo yang selalu memberikan cinta, semangat, motivasi dan doa kepada penulis.
4. Bapak Dr. Eng Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng selaku dosen pembimbing I dan ketua jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan pengarahan, bimbingan, dan memberikan ilmu selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Ibu Dr. Eng. Widya Wijayanti, St., MT. selaku dosen pembimbing II dan ketua program studi S1 jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah memberikan pengarahan, dan bimbingan selama proses penyusunan skripsi ini.
6. Ibu Francisca Gayuh Utami, ST., MT. selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Konversi Energi.
7. Bapak Dr. Eng. Denny Widhiyanuriyawan, ST., MT. selaku dosen wali yang telah memberikan pengarahan dalam menempuh perkuliahan pada setiap semesternya.
8. Bapak Djoko Sumantri, A. Md. selaku pranata Laboratorium Fenomena Dasar Mesin yang telah meminjamkan tempat dan peralatan yang ada di laboratorium guna memperlancar penyusunan skripsi ini.
9. Seluruh Dosen Pengajar Jurusan Mesin yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan yang sangat mendukung baik dalam perkuliahan maupun selama penyusunan skripsi ini.

10. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Mesin dan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
11. Saudara Angga Veriyawan Rahana, ST. yang telah banyak memberikan pengarahan selama penyusunan skripsi ini.
12. Para asisten Laboratorium Fenomena Dasar Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah bersedia menghabiskan waktu bersama-sama serta terimakasih atas doa dan dukungannya selama ini.
13. Saudara Seperjuangan “KAMIKAZE” yang telah menjadi keluarga saya selama perkuliahan dan memberikan banyak nasehat kepada saya untuk menjadikan saya pribadi yang lebih baik. Semoga selalu diberi kemudahan dan kelancaran kepada kita semua.
14. Seluruh Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
15. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah membantu penulis demi kelancaran penyelesaian skripsi ini.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis telah berusaha sebaik mungkin untuk menyelesaikan skripsi dengan sebaik-baiknya dan penulis juga menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh sebab itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyusunan yang lebih baik lagi.

Akhirnya penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis dan bagi para pembaca umumnya sekaligus dapat menjadi bahan acuan untuk penelitian lebih lanjut.

Malang, Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
RINGKASAN	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	4
2.2 Hidrat Gas Alam	4
2.3 Struktur Hidrat Gas Alam	6
2.3.1 Macam-macam Struktur Molekul Hidrat Gas Alam.....	6
2.3.1.1 Struktur Kubus I.....	8
2.3.1.2 Struktur Kubus II	8
2.3.1.3 Struktur Heksagonal.....	9
2.3.2 Ikatan Hidrogen.....	9
2.4 Perbandingan Hidrat dengan Es.....	11
2.4.1 Implikasi Spektroskopik	12
2.4.2 Sifat Termal.....	12
2.5 Pembentukan Hidrat.....	13
2.6 Pertumbuhan Hidrat	15
2.7 Penguraian Hidrat	17
2.8 Gas Alam	18
2.8.1 Propana.....	18
2.8.2 Butana	18
2.9 Hukum Pertama Termodinamika	19



2.10	Perpindahan Panas	20
2.11	Persamaan Keadaan	22
2.11.1	Persamaan Gas Ideal	22
2.11.2	Persamaan Gas Nyata.....	23
2.12	<i>Crystallizer</i>	28
2.13	Hipotesa	32

BAB III METODE PENELITIAN..... 33

3.1	Tempat dan Waktu Penelitian.....	33
3.2	Variabel Penelitian.....	33
3.3	Bahan dan Alat Penelitian.....	34
3.3.1	Bahan Penelitian.....	34
3.3.2	Alat Penelitian.....	36
3.4	Instalasi Penelitian	41
3.5	Prosedur Penelitian	42
3.5.1	Persiapan Penelitian	42
3.5.2	Pengambilan Data	43
3.5.2.1	Pembentukan Hidrat.....	43
3.5.2.2	Penguraian Hidrat	43
3.5.2.3	Kapasitas Penyimpanan Hidrat	43
3.5.3	Pengolahan Data	44
3.5.3.1	Pembentukan Hidrat.....	44
3.5.3.2	Penguraian Hidrat	44
3.5.3.3	Kapasitas Penyimpanan Hidrat	44
3.6	Diagram Alir Penelitian	45

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 46

4.1	Data Hasil Penelitian.....	46
4.2	Contoh Perhitungan Data Hasil Penelitian	48
4.2.1	Pembentukan Hidrat Campuran Propana Butana.....	48
4.2.2	Penguraian Hidrat Campuran Propana Butana	52
4.2.3	Kapasitas Penyimpanan Hidrat Campuran Propana Butana	56
4.3	Pembahasan.....	56
4.3.1	Laju Pembentukan Hidrat Campuran Propana Butana	56
4.3.2	Stabilitas Hidrat Campuran Propana Butana	58
4.3.3	Kapasitas Penyimpanan Hidrat Campuran Propana Butana	59



BAB V PENUTUP	61
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	61
DAFTAR PUSTAKA.....	62
LAMPIRAN	



DAFTAR GAMBAR

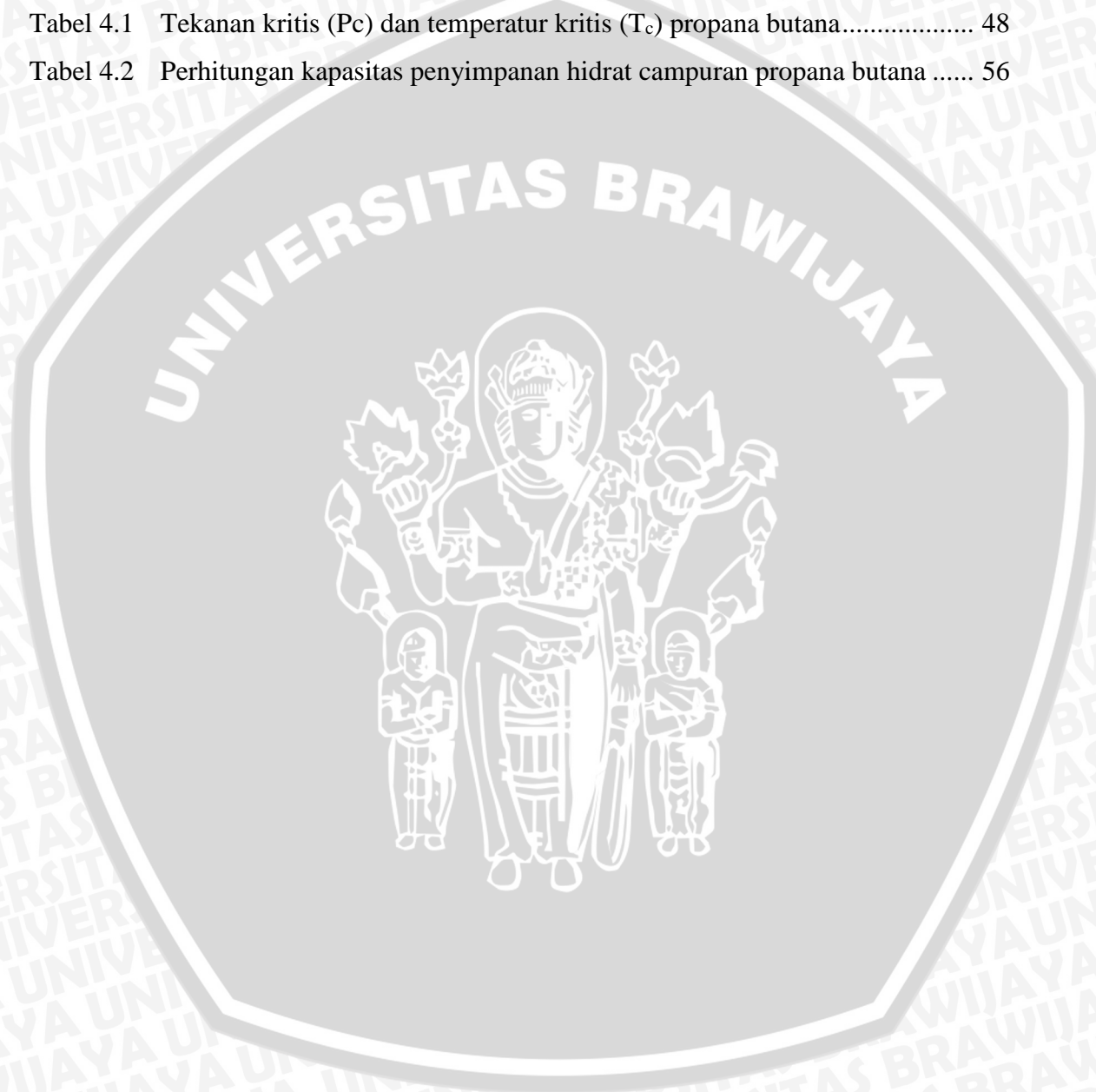
Nomer	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Diagram fase beberapa gas alam hidrokarbon yang membentuk hidrat	5
Gambar 2.2	Struktur kristal hidrat. (a) sI, (b) sII dan (c) sH	7
Gambar 2.3	Struktur kubus I (a) tetrakaidekahedron (b) dodekahedron	8
Gambar 2.4	Struktur kubus I (a) heksakaidekahedron (b) dodekahedron	9
Gambar 2.5	Ikatan hidrogen antara dua molekul	10
Gambar 2.6	Ikatan hidrogen antara empat molekul	10
Gambar 2.7	Konduktivitas termal dari gas, air, es dan hidrat.....	12
Gambar 2.8	Hubungan temperatur terhadap ekspansi termal linier hidrat sI, sII dan sH.....	13
Gambar 2.9	Pengaruh waktu terhadap konsumsi gas pada pembentukan hidrat	14
Gambar 2.10	Garis hubungan tekanan dan temperatur pada hidrat metana sederhana.....	14
Gambar 2.11	Mekanisme pertumbuhan kristal hidrat.....	15
Gambar 2.12	Kristal hidrat tunggal etilen oksida (sI).....	17
Gambar 2.13	Kristal hidrat tunggal tetrahidrofuran (sII).....	17
Gambar 2.14	Disosiasi radial	18
Gambar 2.15	<i>Forced circulation crystallizer</i>	29
Gambar 2.16	<i>Draft tube crystallizer</i>	30
Gambar 2.17	<i>Surface cooled crystallizer</i>	31
Gambar 2.18	<i>Oslo crystallizer</i>	31
Gambar 3.1	Aquades.....	34
Gambar 3.2	LPG	35
Gambar 3.3	Es.....	35
Gambar 3.4	Garam.....	35
Gambar 3.5	<i>Crystallizer</i>	36
Gambar 3.6	Motor listrik	36
Gambar 3.7	<i>Inverter</i>	37
Gambar 3.8	Gelas ukur	38
Gambar 3.9	Regulator gas.....	38
Gambar 3.10	Kompresor.....	39

Gambar 3.11	Katup	39
Gambar 3.12	Pressure gage	39
Gambar 3.13	Thermocouple	40
Gambar 3.14	Pressure sensor	40
Gambar 3.15	Data logger	41
Gambar 3.16	Cooling bath	41
Gambar 3.17	Instalasi alat penelitian	42
Gambar 3.18	Diagram alir penelitian	45
Gambar 4.1	Grafik hubungan antara waktu terhadap tekanan dan temperatur gas di dalam <i>crystallizer</i> ketika pembentukan hidrat	46
Gambar 4.2	Grafik hubungan antara waktu terhadap tekanan dan temperatur gas di dalam <i>crystallizer</i> ketika stabilitas hidrat	46
Gambar 4.3	Diagram tekanan hasil penguraian di dalam <i>crystallizer</i>	47
Gambar 4.4	Grafik hubungan temperatur dan tekanan gas di dalam <i>crystallizer</i> ketika pembentukan hidrat	57
Gambar 4.5	Grafik laju pembentukan hidrat campuran propana butana	57
Gambar 4.6	Grafik laju penguraian hidrat campuran propana dan butana pada temperatur 268 K	59
Gambar 4.7	Diagram kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana dan butana	60



DAFTAR TABEL

Nomer	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Perbandingan antara struktur kubus I dan II serta struktur heksagonal	7
Tabel 2.2	Perbandingan sifat dari es, hidrat sI dan sII.....	11
Tabel 2.3	Karakteristik umum dari gas alam	19
Tabel 4.1	Tekanan kritis (P_c) dan temperatur kritis (T_c) propana butana.....	48
Tabel 4.2	Perhitungan kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana butana	56



DAFTAR LAMPIRAN

Nomer	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Data hasil penelitian	63
Lampiran 2.	Komposisi <i>Liquid Petroleum Gas</i> (LPG)	64



RINGKASAN

Akhmad Syahirul Alim Almatsany, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2015, *Pengaruh Kecepatan Putaran Crystallizer terhadap Laju Pembentukan, Stabilitas dan Kapasitas Penyimpanan Hidrat Campuran Propana Butana*, Dosen Pembimbing: Nurkholis Hamidi dan Widya Wijayanti.

Hidrat gas merupakan sebuah permasalahan pada distribusi gas alam menggunakan saluran pipa. Akan tetapi, hidrat juga sudah dikembangkan menjadi salah satu metode distribusi dan penyimpanan dari gas alam. Hidrat gas merupakan kristal padat berbentuk es terdiri dari air dan gas pada tekanan dan temperatur tertentu. Molekul air yang memiliki ikatan hidrogen membentuk sebuah kerangka yang memiliki rongga. Di dalam rongga antar molekul terdapat molekul gas yang terjebak pada berbagai macam bentuk dan ukuran.

Proses pembentukan hidrat menggunakan alat yang dinamakan crystallizer. Pada pengujian pembentukan hidrat, *crystallizer* dibersihkan dan 50 cm³ air demin dimasukkan ke dalamnya. Campuran propana butana dimasukkan ke dalam *crystallizer* dengan tekanan 3 bar pada temperatur 300 K. *Crystallizer* dimasukkan ke dalam *cooling bath*, kemudian temperatur *cooling bath* diatur sesuai dengan temperatur pembentukan hidrat (274 K) dan kecepatan putaran 300 rpm. Pengujian stabilitas hidrat dilakukan setelah pembentukan hidrat selama 10 jam. Temperatur *cooling bath* diturunkan menjadi 268 K. Sistem dibiarkan selama 5 jam. Kemudian katup dibuka untuk membuang gas yang tidak menjadi hidrat. Sistem dibiarkan selama 5 jam untuk mengetahui dekomposisi yang terjadi pada temperatur 268 K. *Crystallizer* dibiarkan pada temperatur ruang sehingga hidrat akan terdekomposisi seluruhnya. Campuran propana butana yang terperangkap dihitung dalam volume ketika di dalam *crystallizer* dibandingkan dengan volume pada keadaan standar.

Pengaruh kecepatan putaran 300 rpm, 200 rpm dan 100 rpm pada pembentukan, stabilitas di bawah titik beku air dan kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana dan butana telah diteliti dan kesimpulan yang didapat adalah hidrat dengan pembentukan pada kecepatan putaran 300 rpm memiliki laju pembentukan, stabilitas dan kapasitas penyimpanan hidrat paling tinggi. Kapasitas penyimpanan hidrat dengan kecepatan putaran 300 rpm selama pembentukan 10 jam sebesar 2.809 V/V. Kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana butana yang digunakan merupakan perbandingan antara volume gas dari hidrat yang terurai di dalam *crystallizer* dengan volume gas tersebut pada keadaan standar.

Kata kunci: *kecepatan putaran, hidrat gas, laju pembentukan*

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan bahan bakar minyak (BBM) pada kehidupan masyarakat sehari-hari sangat tinggi terutama untuk memenuhi kebutuhan industri maupun kebutuhan rumah tangga. Akan tetapi, persediaan BBM sudah semakin sedikit. BBM merupakan bahan bakar fosil yang dapat diperbarui tetapi memerlukan waktu yang sangat lama sehingga BBM tidak dapat digolongkan sebagai sumber energi terbarukan. Penggunaan BBM yang meningkat sedangkan persediaan bahan bakar fosil semakin sedikit menyebabkan krisis energi. Pemerintah Indonesia menanggulangi permasalahan krisis energi dengan mencari energi alternatif pengganti BBM yaitu bahan bakar gas (BBG).

BBG merupakan bahan bakar yang menggunakan gas alam sebagai zat utama penghasil energi. BBG yang sering digunakan di Indonesia adalah *Liquefied Petroleum Gas* (LPG). LPG yang diproduksi oleh PT. Pertamina memiliki komposisi 50% propana dan 50% butana. Akan tetapi, terdapat permasalahan baru ketika mendistribusikan gas alam menggunakan saluran pipa pada tekanan tinggi yaitu terbentuknya es pada pipa dan peralatan pengolahan pada temperatur di atas titik beku air (Carroll, 2009). Es tersebut merupakan campuran antara air dan gas alam yang disebut hidrat. Terbentuknya hidrat akan mengurangi produktivitas gas alam yang seharusnya dapat diproduksi secara maksimal karena ada sebagian gas alam yang menjadi hidrat pada peralatan pengolahan. Distribusi gas alam juga akan terganggu ketika terdapat hidrat pada pipa penyaluran gas alam sehingga menghambat laju distribusi. Semakin banyak hidrat yang terbentuk pada pipa penyaluran, gas alam yang dihasilkan pada daerah tujuan distribusi semakin sedikit karena gas yang disalurkan semakin sedikit.

Hidrat gas merupakan molekul kristal es yang di dalamnya terdapat rongga yang diisi oleh gas sebagai zat penyusun hidrat. Gas yang mengisi hidrat tersebut disebut klatrat. Hidrat gas merupakan kombinasi antara gas alam dengan air. Pembentukan hidrat terjadi ketika sistem pada temperatur rendah dan tekanan yang tinggi, terdapat klatrat sebagai pengisi hidrat, terdapat air yang cukup (tidak terlalu banyak dan tidak terlalu sedikit) serta gaya yang menyebabkan gas alam terlarut dalam air. Struktur kristal hidrat memiliki bentuk kristal yang karakteristiknya mengikuti klatrat yang mengisi hidrat tersebut. Hidrat gas memiliki struktur dengan ikatan hidrogen antar molekul es serta tidak ada ikatan antara molekul es dan gas pengisinya.

Jeffrey, *et al* (1967) yang meneliti tentang klatrat hidrat menjelaskan bahwa terdapat banyak jenis klatrat yang dapat membentuk hidrat gas. Penelitian tersebut menjadi salah satu dasar dikembangkannya hidrat gas di bidang industri *petroleum* sebagai metode distribusi gas alam karena hidrat gas mampu menyimpan gas alam didalamnya.

Hidrat gas memang masih menjadi sebuah permasalahan pada distribusi menggunakan saluran pipa. Akan tetapi, hidrat juga sudah dikembangkan menjadi salah satu metode distribusi dan penyimpanan dari gas alam. Penelitian tentang hidrat gas telah banyak dilakukan dan dipublikasikan, salah satunya penelitian yang dilakukan oleh Ganji, *et al* (2007) mengenai karakteristik-karakteristik hidrat pada pembentukan, stabilitas dan kapasitas penyimpanan hidrat metana. Akan tetapi, penelitian tentang gas hidrat yang dijelaskan sebelumnya masih menggunakan metana sebagai klatrat yang tidak menjadi komposisi utama dari LPG yang merupakan BBG yang banyak digunakan di Indonesia. Oleh karena itu, perlunya pengembangan penelitian dengan mengganti klatrat metana dengan campuran propana butana yang merupakan bahan baku dari LPG.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dibahas sebelumnya, pada penelitian ini dapat dirumuskan sebuah permasalahan yaitu bagaimana pengaruh kecepatan putaran *crystallizer* terhadap laju pembentukan, stabilitas dan kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana butana. Kecepatan putaran *crystallizer* merupakan salah satu gaya yang menyebabkan gas terlarut dalam air.

1.3 Batasan Masalah

Untuk lebih memfokuskan penelitian ini agar mencapai tujuan yang lebih terarah, maka penulis memberikan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Gas yang digunakan menggunakan prinsip gas nyata.
2. Kapasitas penyimpanan hidrat bukan merupakan kapasitas penyimpanan maksimum hidrat.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

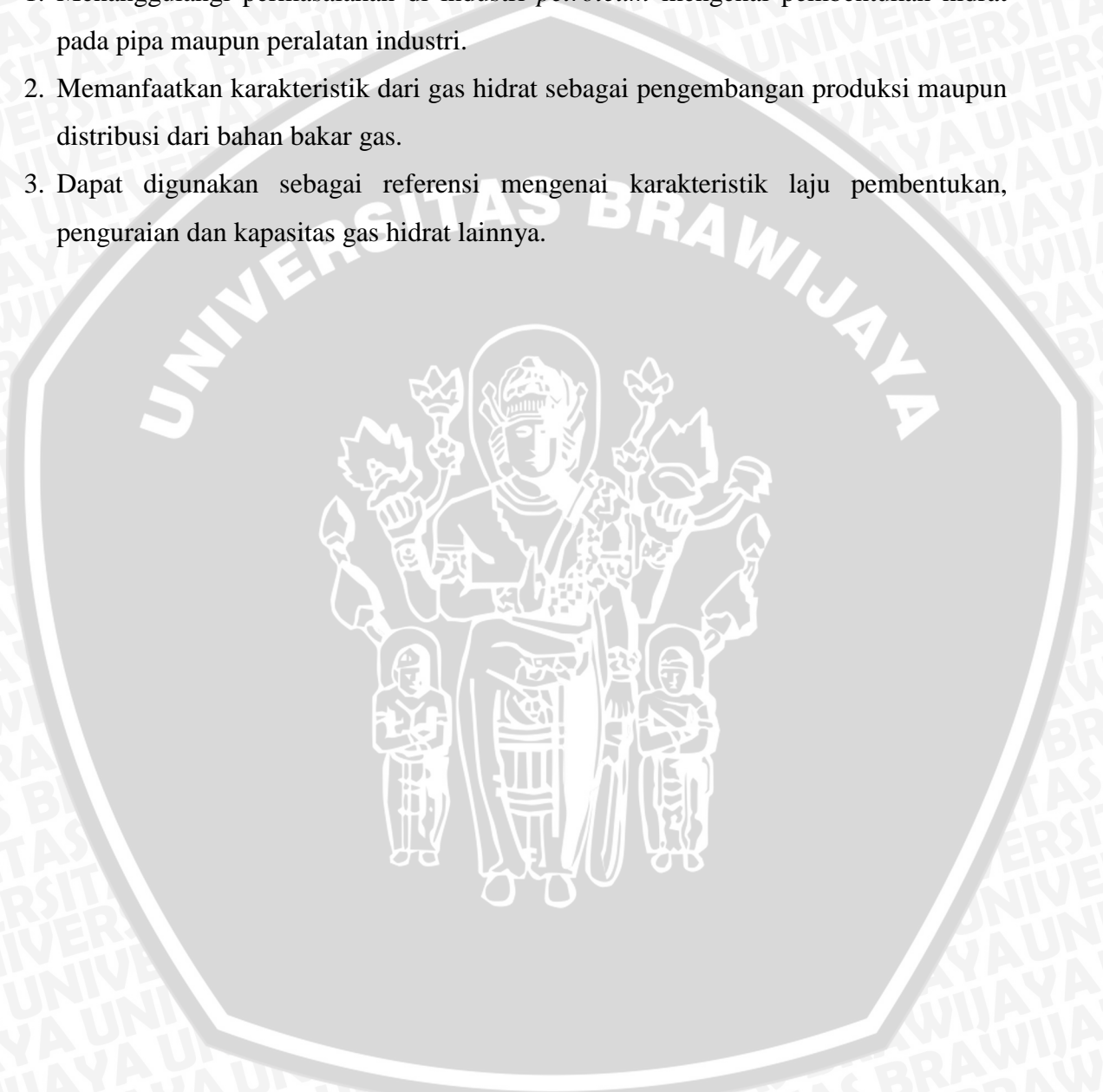
1. Dapat menanggulangi permasalahan di industri *petroleum* mengenai pembentukan hidrat pada peralatan industri maupun pada distribusi gas menggunakan saluran pipa.

2. Dapat digunakan sebagai pengembangan metode distribusi dan penyimpanan hidrat gas.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menanggulangi permasalahan di industri *petroleum* mengenai pembentukan hidrat pada pipa maupun peralatan industri.
2. Memanfaatkan karakteristik dari gas hidrat sebagai pengembangan produksi maupun distribusi dari bahan bakar gas.
3. Dapat digunakan sebagai referensi mengenai karakteristik laju pembentukan, penguraian dan kapasitas gas hidrat lainnya.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Khokhar, *et al* (1998) dalam penelitiannya tentang penyimpanan pada hidrat gas menunjukkan bahwa penyimpanan gas metana dalam hidrat dengan struktur heksagonal lebih baik daripada penyimpanan hidrat dengan struktur kubus I maupun struktur kubus II ketika gas metana menempati rongga kecil. Kemampuan penyimpanan hidrat diuji menggunakan air murni.

Ganji, *et al* (2007) dalam penelitiannya tentang pengaruh dari surfaktan anion, kation dan non-ion pada laju pembentukan, stabilitas dan kapasitas penyimpanan dari hidrat metana. Setiap surfaktan diuji dengan konsentrasi 300, 500 dan 1000 ppm. Pada penelitian laju pembentukan hidrat metana, 75 cm³ larutan surfaktan direaksikan dengan gas metana pada tekanan 8.3 MPa dan temperatur 298.2 K dengan kecepatan putaran pengaduk 200 rpm. Untuk meneliti stabilitas hidrat metana, hidrat yang sudah terbentuk didiamkan selama 10 jam pada temperatur di bawah 268.2 K dengan katup terbuka sehingga gas metana sisa dapat keluar. Sedangkan pada penelitian kapasitas penyimpanan hidrat metana, hidrat yang tersisa setelah pengujian stabilitas hidrat pada temperatur 268.2 K didiamkan pada temperatur ruangan sehingga hidrat melepas gas metana yang terjebak di dalamnya.

Linga, *et al* (2010) dalam penelitiannya tentang alat baru untuk meningkatkan pembentukan gas hidrat yang diaplikasikan untuk menangkap karbon dioksida. Alat tersebut terdiri dari *crystallizer* sebagai wadah pembentukan hidrat, *external refrigerator* sebagai pengatur temperatur sistem, katup sebagai pengatur distribusi air dan gas, *thermocouple* untuk sensor temperatur pada *crystallizer* serta *pressure transmitter* sebagai sensor tekanan pada *crystallizer*. Di dalam *crystallizer* terdapat pengaduk yang berfungsi untuk melarutkan gas dalam air sehingga terjadi hidrat.

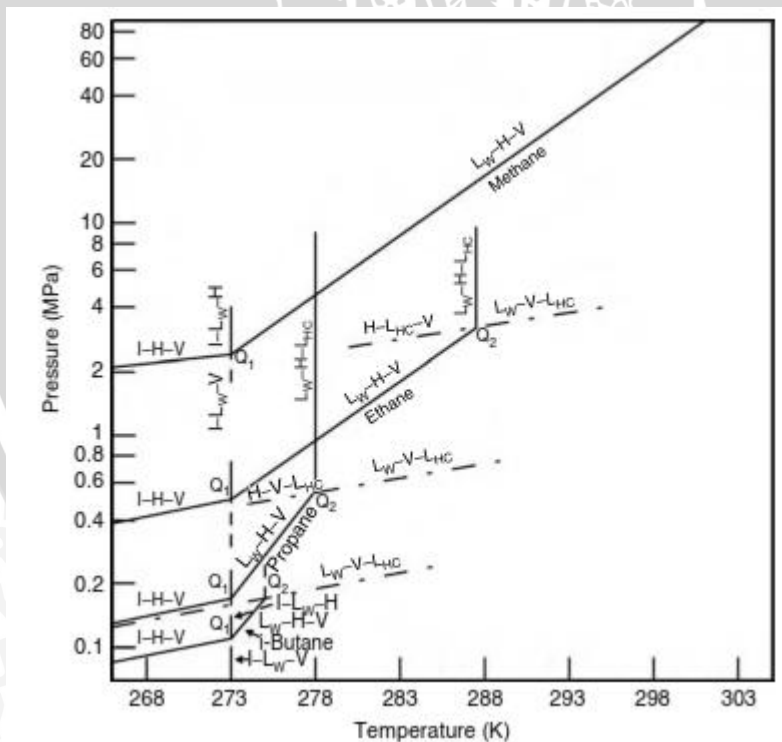
2.2 Hidrat Gas Alam

Hidrat gas alam merupakan kristal padat berbentuk es yang terdiri dari air dan gas pada tekanan tinggi dan temperatur rendah. Molekul air memiliki ikatan hidrogen membentuk sebuah kerangka yang memiliki rongga. Di dalam rongga antar molekul air terdapat molekul gas yang terjebak pada berbagai macam bentuk dan ukuran (Ganji, 2007). Pada hidrat gas tidak terdapat ikatan antara molekul air yang berbentuk kristal es

dengan molekul gas yang terjebak didalamnya. Molekul gas bebas untuk berotasi di dalam rongga dari kristal es. Hidrat gas merupakan campuran yang dapat dideskripsikan menjadi larutan padat (Carroll, 2009).

Molekul gas pengisi hidrat dapat digolongkan menjadi salah satu jenis klatrat. Klatrat merupakan senyawa kimia inklusi yang molekul kimia tersebut terjebak dalam rongga molekul kristal es. Molekul gas alam yang sering terdapat pada hidrat adalah metana, etana, propana, dan karbon dioksida.

Setiap gas alam memiliki temperatur dan tekanan yang berbeda untuk membentuk hidrat yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Pada Gambar 2.1, H menunjukkan hidrat, I menunjukkan es, V menunjukkan uap, L_w menunjukkan fase cair air, L_{HC} menunjukkan fase cair hidrokarbon, Q_1 menunjukkan titik *quadruple* bawah dan Q_2 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_{HC}) serta sebelah kanan dari fase air dalam kondisi cair atau es dan gas dalam kondisi uap atau cair.



Gambar 2.1 Diagram fase beberapa gas alam hidrokarbon yang membentuk hidrat.
Sumber : Sloan (2008, 7)

Pada Gambar 2.1 perpotongan garis tiga fase menunjukkan Q_1 (I- L_w -H-V) dan Q_2 (L_w -H-V- L_{HC}). Q_1 dan Q_2 pada setiap pembentukan hidrat menghasilkan klasifikasi kuantitatif untuk komponen hidrat gas alam. Setiap Q menunjukkan perpotongan dari

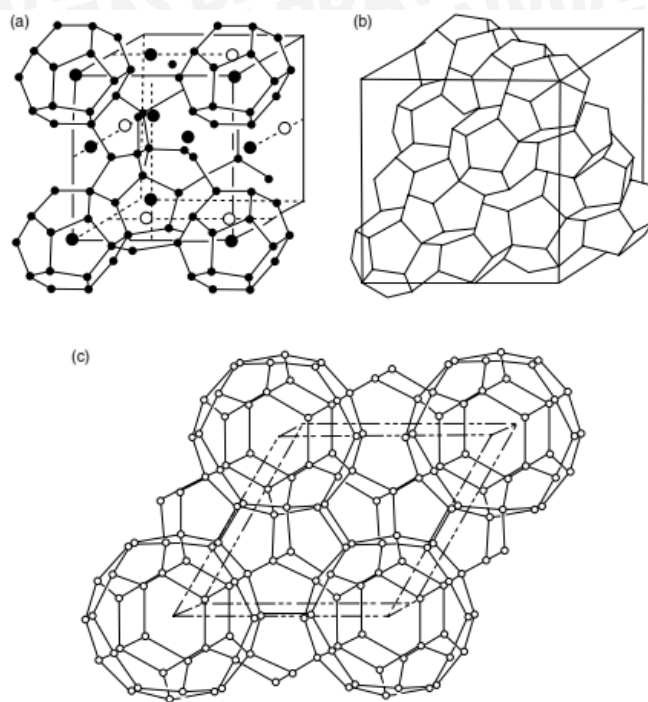
empat dari garis tiga fase. Q_1 merupakan transisi dari L_w menjadi I sehingga terjadi penurunan temperatur. Q_1 menunjukkan dimana pembentukan hidrat berhenti dari uap dan air dan dimana pembentukan hidrat terjadi dari uap dan es. Q_2 menunjukkan batas temperatur tertinggi untuk pembentukan hidrat. Tekanan uap pada temperatur kritis dapat direndahkan untuk memenuhi perpotongan pada Gambar 2.1 sehingga gas metana dan nitrogen tidak memiliki Q_2 . Oleh karena itu, gas metana dan nitrogen tidak memiliki batas temperatur tertinggi untuk membentuk hidrat.

Garis tiga fase pada Gambar 2.1 merupakan batas tekanan minimum yang dibutuhkan untuk membentuk hidrat gas pada temperatur tertentu. Daerah di atas garis tiga fase, merupakan daerah terjadinya pembentukan hidrat. Sedangkan pada daerah lainnya, tidak terbentuk hidrat gas (Sloan, 2008).

2.3 Struktur Hidrat Gas Alam

2.3.1 Macam-macam Struktur Molekul Hidrat Gas Alam

Hidrat diklasifikasikan berdasarkan molekul air yang membentuk kristal es (Carroll, 2009). Pada umumnya semua hidrat gas alam termasuk pada tiga jenis struktur kristal yaitu struktur kubus I (sI), struktur kubus II (sII) dan struktur heksagonal (sH) yang ditunjukkan Gambar 2.2. Semua struktur hidrat memiliki unit kristal yang saling membentuk suatu kesatuan yang terdiri dari unit asimetris dan berbentuk seperti rongga dari molekul air yang berikatan hidrogen. Pada gambar 2.2 titik yang dihubungkan oleh garis merupakan atom-atom oksigen (O_2) dari molekul air. Sedangkan garis yang menghubungkan antar titik merupakan ikatan hidrogen yang terbentuk pada molekul air. Ketiga struktur hidrat tersebut mengandung sekitar 85% air sehingga banyak sifat mekanik dari hidrat mirip dengan es. Perbandingan antara struktur I, II dan H ditunjukkan pada Tabel 2.1.



Gambar 2.2 Struktur kristal hidrat. (a) sI, (b) sII dan (c) sH.
 Sumber: Sloan (2008, 13)

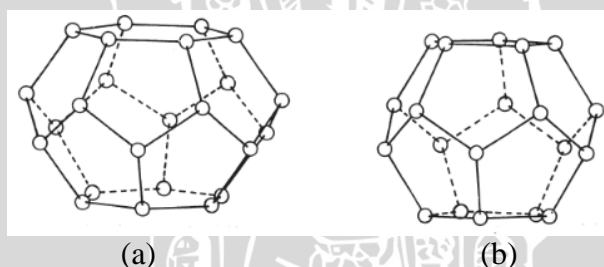
Tabel 2.1 Perbandingan antara struktur kubus I dan II serta struktur heksagonal

Structure	I	II	H			
Crystal system	Cubic	Cubic	Hexagonal			
Space group	Pm3n (No. 223) ^c	Fd3m (No. 227) ^c	P6/mmm (No. 191) ^c			
Lattice description	Primitive	Face centered	Hexagonal			
Lattice parameters ^a	$a = 12 \text{ \AA}$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a = 17.3 \text{ \AA}$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a = 12.2 \text{ \AA}$ $c = 10.1 \text{ \AA}$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$			
Ideal unit cell formula	$6(5^{12}6^2) \cdot 2(5^{12}) \cdot 46\text{H}_2\text{O}$	$8(5^{12}6^4) \cdot 16(5^{12}) \cdot 136\text{H}_2\text{O}$	$1(5^{12}6^8) \cdot 3(5^{12}) \cdot 2(4^35^66^3) \cdot 34\text{H}_2\text{O}$			
Number of faces ^b : hexagonal (H), pentagonal (P), square (S)	H = 6 P = 48	H = 16 P = 144	H = 7 P = 30 S = 3			
Atomic positions: number and symmetry	$5^{12}6^2$ (d) 5^{12} (a) O(c) O(i) O(k) (1/2 H) (i) 3(1/2 H) (k) 2(1/2 H) (l)	$6, \bar{4} 2 m$ 2, m3 6, $\bar{4} 2 m$ 16, 3 m 24, m 16, 3 24, m 48, 1	$5^{12}6^4$ (b) 5^{12} (c) O(a) O(e) O(g) 2(1/2 H) (e) 3(1/2 H) (g) (1/2 H) (i)	$8, \bar{4} 3 m$ 16, $\bar{3} m$ 8, $\bar{4} 3 m$ 32, 3 m 96, m 32, 3 m 96, m 192, m	$5^{12}6^8$ 5^{12} (g) $4^35^66^3$ O(o), O(h) O(n) O(m) X(1/2 H) X(1/2 H) X(1/2 H)	1, 6/mmm 3, mmm 2, $\bar{6} m2$ 12, m 4, 3 m 12, m 6, mm2

Sumber: Sloan (2008, 60)

2.3.1.1 Struktur Kubus I

Struktur kubus I merupakan struktur hidrat yang paling sederhana. Struktur kubus I terdiri dari kisi kubus primitif dengan parameter sesuai pada Tabel 2.1. Pada Gambar 2.2(a) menunjukkan kisi kristal kubus dengan bidang sebesar 12 \AA . Pada struktur kubus I hanya memiliki 46 molekul air dari setiap unit sel. Molekul air akan membentuk dua struktur, yaitu dodekahedron atau tetrakaidekahedron yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Dodekahedron merupakan polihedron yang memiliki 12 sisi yang tiap sisinya berbentuk segilima beraturan. Sedangkan tetrakaidekahedron merupakan polihedron yang memiliki 14 sisi dengan 12 sisi pentagonal dan 2 sisi heksagonal. Ukuran dari dodekahedron lebih kecil dari tetrakaidekahedron. Struktur kubus I juga dibentuk oleh molekul gas yang memiliki diameter antara $4.2 - 6 \text{ \AA}$ seperti gas metana (CH_4), etana (C_2H_6), karbon dioksida (CO_2) dan hidrogen sulfida (H_2S). Molekul gas CH_4 , CO_2 dan H_2S dapat menempati kedua struktur. Sedangkan molekul gas C_2H_6 hanya mampu menempati struktur polihedron 14 sisi.

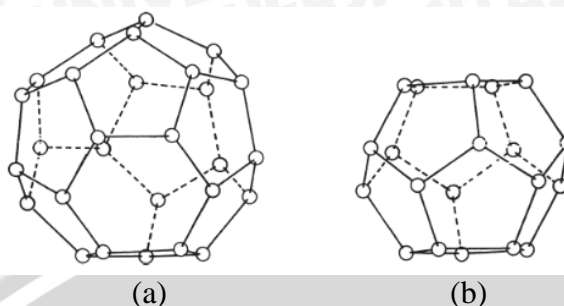


Gambar 2.3 Struktur kubus I (a) tetrakaidekahedron (b) dodekahedron.
Sumber : Carrolll (2009, 19)

2.3.1.2 Struktur Kubus II

Struktur kubus II merupakan struktur hidrat yang lebih kompleks dari struktur kubus I. Struktur kubus II terdiri dari kisi kristal FCC (*Face Centered Cubic*) dengan parameter sesuai pada Tabel 2.1. Pada Gambar 2.2(b) menunjukkan kisi kubus dengan bidang sebesar 17.3 \AA . Pada struktur kubus II memiliki 136 molekul air dari setiap unit sel. Molekul air akan membentuk dua struktur, yaitu dodekahedron atau heksakaidekahedron yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Heksakaidekahedron merupakan polihedron yang memiliki 16 sisi dengan 12 sisi pentagonal dan 4 sisi heksagonal. Ukuran dari dodekahedron lebih kecil dari heksakaidekahedron. Struktur kubus II juga dibentuk oleh molekul gas yang memiliki diameter kecil ($d < 4.2 \text{ \AA}$) seperti gas nitrogen (N_2) sebagai gas tunggal. Diameter molekul yang lebih besar antara $6 - 7 \text{ \AA}$ seperti propana (C_3H_8), pentana (C_5H_{12}) dan iso-butana juga akan membentuk struktur

kubus II. Molekul gas N_2 dapat menempati kedua struktur, sedangkan molekul gas C_3H_8 , C_5H_{12} dan iso-butana hanya menempati struktur heksaikaidekahedron.



Gambar 2.4 Struktur kubus I (a) heksakaidekahedron (b) dodekahedron.
Sumber: Carroll (2009, 19)

2.3.1.3 Struktur Heksagonal

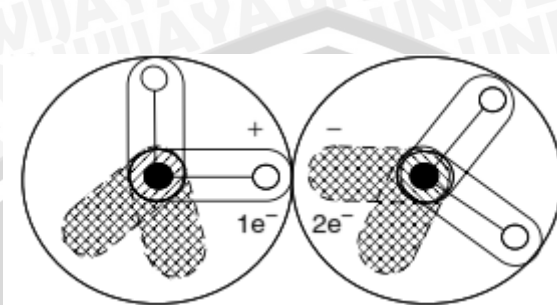
Struktur heksagonal merupakan struktur hidrat yang jarang ditemui daripada struktur kubus I dan II. Struktur heksagonal terdiri dari kisi kristal heksagonal dengan parameter sesuai pada Tabel 2.1. Pada struktur heksagonal hanya memiliki 34 molekul air dari setiap unit sel seperti yang ditunjukkan apada Gambar 2.2(c). Molekul air akan membentuk tiga struktur, yaitu dodekahedron, dodekahedron tidak beraturan atau ikosahedron tidak beraturan. Dodekahedron tidak beraturan merupakan polihedron yang memiliki 12 sisi dengan 3 sisi persegi, 6 sisi pentagonal dan 3 sisi heksagonal. Sedangkan ikosahedron tidak beraturan merupakan polihedron yang memiliki 20 sisi dengan 12 sisi pentagonal dan 8 sisi heksagonal. Satuan kristal hidrat dibentuk dari 34 molekul air dengan tiga struktur dodekahedron (kecil), dua struktur dodekahedron tidak beraturan (sedang) atau satu struktur ikosahedron tidak beraturan (besar).

Struktur heksagonal juga dibentuk oleh 2 molekul gas yaitu melekul besar (termasuk beberapa jenis hidrokarbon) dan molekul kecil yang membentuk struktur H. Molekul besar memiliki diameter antara 7 – 9 Å seperti gas 2-metilbutana (iso-butana), 2,2-dimetilbutana (neo-heksana), 2,3 dimetilbutana, 2,2,3-trimetilbutana, 2,2-dimetilpentana, 3,3-dimetilpentana, metilsiklopentana, etilsiklopentana, metilsikloheksana, sikloheptana dan siklooktana. Selain itu struktur H juga dapat dibentuk oleh molekul yang lebih kecil seperti metana, hidrogen sulfida atau nitrogen.

2.3.2 Ikatan Hidrogen

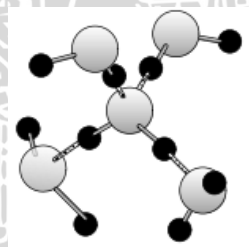
Latimer (1920) dalam penelitiannya tentang ikatan hidrogen menggunakan muatan titik elektrostatik sederhana sebagai model untuk molekul air. Molekul air

dideskripsikan memiliki dua kutub positif dan dua kutub negatif. Ikatan hidrogen pada air ditunjukkan pada Gambar 2.5 yang 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 \AA . Sudut ikatan O-O-O rata-rata pada es dan hidrat sebesar 109.5° (Davidson, 1983).



Gambar 2.5 Ikatan hidrogen antara dua molekul
Sumber: Sloan (2008, 50)

Setiap molekul air yang melekat pada empat molekul air lainnya akan menyumbangkan dua dan menerima dua ikatan hidrogen yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Setiap proton dari molekul air tertarik ke kutub negatif dari molekul air lainnya. Dua kutub negatif pada molekul awal menarik kutub positif dari dua molekul air lainnya. Empat molekul sekitarnya disusun tetrahedral di sekitar molekul yang menjadi pusatnya.



Gambar 2.6 Ikatan hidrogen antara empat molekul
Sumber: Sloan (2008, 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 pada hidrogen dan oksigen pada molekul air (Cottrell, 1958).

2.4 Perbandingan Hidrat dengan Es

Semua rongga pada struktur kubus I dan II terisi sebagai hidrat sederhana. Sebagai contoh dengan xenon atau argon, molekul air minimum menunjukkan molekul tiap gas. Kedua struktur tersebut menghasilkan struktur dengan 85% mol berupa air. Jika semua jenis rongga terisi membentuk struktur H dengan dua gas pengisi, fraksi mol juga sebesar 85%. Pada hidrat non-stoikiometri, fraksi mol air selalu lebih tinggi dari 85%. Dengan tingginya kandungan air, dapat bermanfaat untuk pendekatan sifat-sifat hidrat sebagai variasi dari es. 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 kubus memiliki sudut O-O-O sebesar 3.7° dan struktur kubus II sebesar 3.0° .

Tabel 2.2 Perbandingan sifat dari es, hidrat sI dan sII

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, 94)

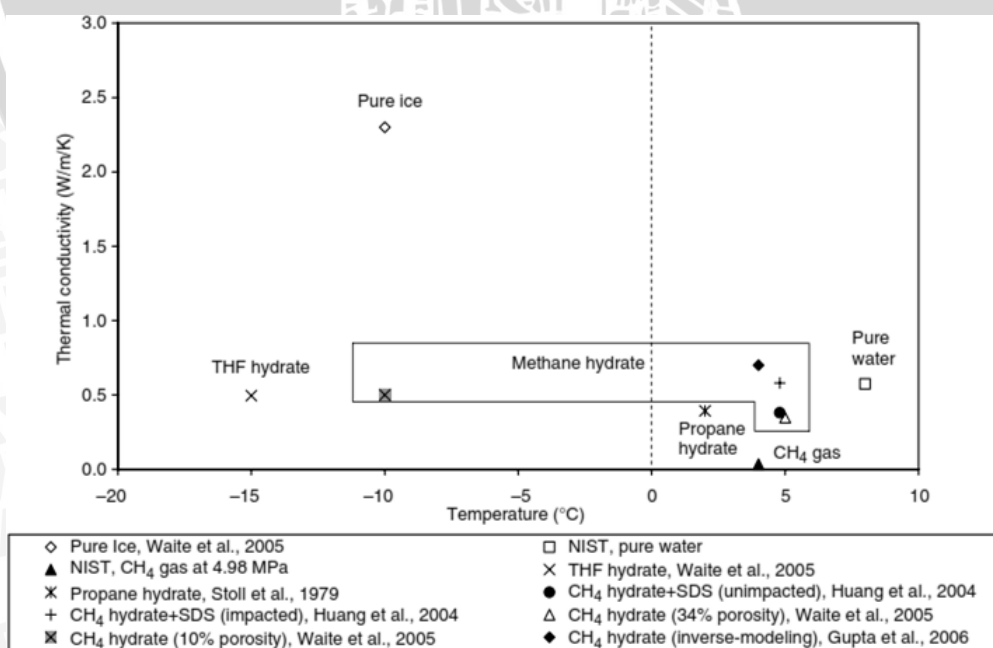
2.4.1 Implikasi Spektroskopik

Spektroskopi NMR proton dan pengukuran konstanta dielektrik memberikan bukti tentang gerakan molekul air dalam struktur kristal. Pada suhu yang sangat rendah (<50 K), kisi hidrat menjadi kaku. Analisis hidrat proton NMR menunjukkan reorientasi molekul air dalam struktur dan terjadi selama difusi translasi pada temperatur rendah.

Molekul air berdifusi dua kali lebih lambat ketika dalam bentuk hidrat daripada bentuk es. Seperti pada Tabel 2.2, difusi molekul air es menyebar lebih cepat daripada reorientasi tentang posisi tetap pada struktur kristal. Molekul air hidrat mengalami reorientasi 20 kali lebih cepat daripada molekul air es. Nilai konstanta dielektrik pada Tabel 2.2 menunjukkan molekul air hidrat bereorientasi lebih cepat dibanding molekul lain dalam bentuk padat. Laju reorientasi menjadi satu setengah dari bentuk es.

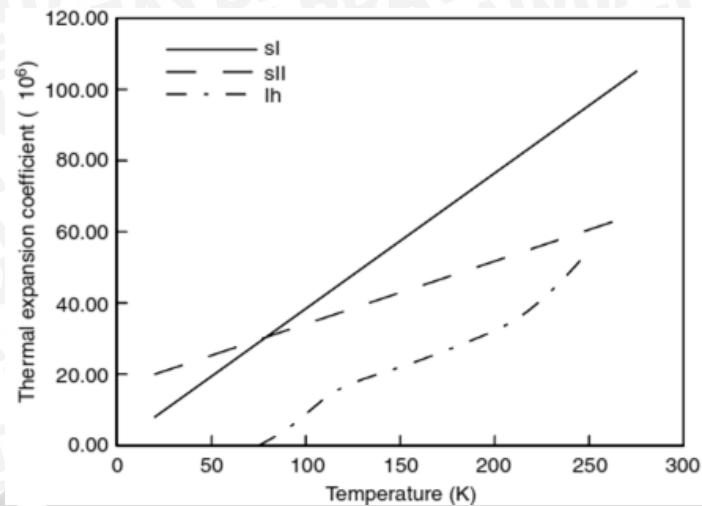
2.4.2 Sifat Termal

Stoll, *et al* (1979) mengukur konduktivitas termal dari hidrat propana sebesar 0.393 W/mK pada temperatur 215.15 K lebih kecil dari es (2.23 W/mK). Konduktivitas termal hidrat yang kecil sesuai dengan nilai konduktivitas termal tiap struktur yang ditunjukkan pada Tabel 2.2. Konduktivitas termal dari hidrat padat sebesar 0.5-0.58 W/mK mendekati besarnya konduktivitas termal air pada fase cair (0.605 W/mK). Perbandingan konduktivitas termal dari struktur air ketika menjadi air, es dan hidrat ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Konduktivitas termal dari gas, air, es dan hidrat.

Sumber: Sloan (2008, 98)



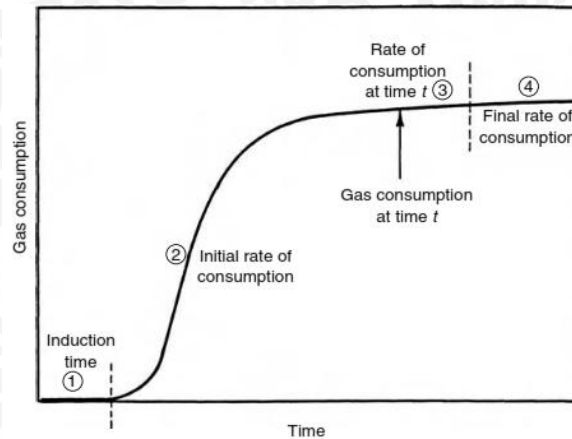
Gambar 2.8 Hubungan temperatur terhadap ekspansi termal linier hidrat sI, sII dan es Ih
Sumber: Sloan (2008, 101)

Koefisien ekspansi termal linier dari struktur hidrat I, II dan H dapat ditentukan melalui dilatometri, difraksi bubuk neutron dan x-ray. Koefisien ekspansi termal hidrat dengan struktur H pada temperatur 200 K diukur menggunakan heksametiletana dan 2,2-metilbutana pada 150-200 K sama dengan koefisien ekspansi termal pada struktur kubus I dan II. Akan tetapi terdapat perbedaan pada ekspansi linier pada struktur H. Pada temperatur 200 K, ekspansi termal linier untuk sI adalah $77 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, sII adalah $52 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, sH adalah $a = 67 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $c = 59 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ dan es adalah $a = 56 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $c = 57 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Gambar 2.8 menunjukkan hubungan temperatur terhadap ekspansi termal linier pada hidrat sI, sII dan sH.

2.5 Pembentukan Hidrat

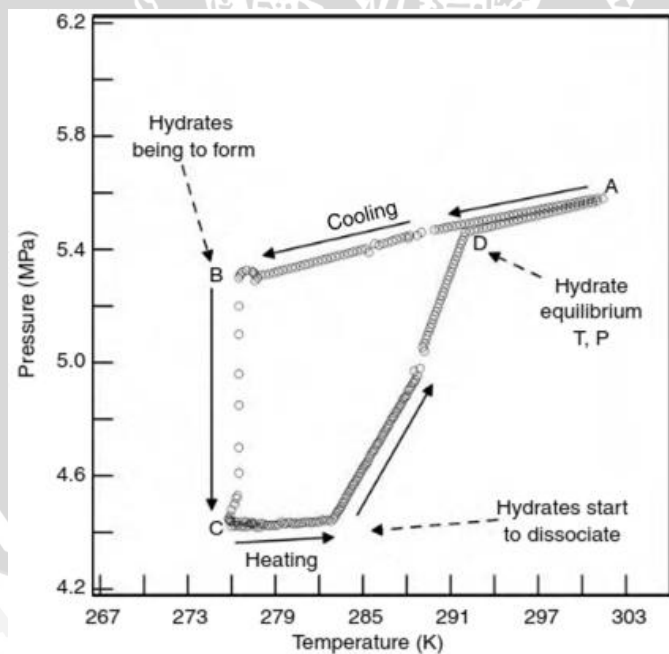
Hidrat gas merupakan kombinasi antara gas alam dengan air. Pembentukan hidrat terjadi ketika sistem pada temperatur rendah dan tekanan yang tinggi, terdapat klatrat sebagai pengisi hidrat, terdapat air yang cukup (tidak terlalu banyak dan tidak terlalu sedikit) serta gaya yang menyebabkan gas alam terlarut dalam air.

Pada Gambar 2.9 menunjukkan hubungan antara waktu terhadap konsumsi gas dalam pembentukan dan pertumbuhan hidrat untuk sistem agitasi yang dioperasikan pada tekanan dan temperatur yang konstan. Sel autoklaf yang mengandung air ditekan dengan gas dan ditujukan pada kondisi (P dan T yang tepat) pembentukan hidrat. Gas ditambahkan dari suatu bejana untuk menjaga tekanan tetap konstan agar tetap menjadi hidrat dari waktu ke waktu. Tingkat konsumsi gas juga merupakan tingkat pembentukan hidrat yang dapat dikendalikan dengan kinetik atau perpindahan panas.



Gambar 2.9 Pengaruh waktu terhadap konsumsi gas pada pembentukan hidrat.
 Sumber: Sloan (2008, 115)

Pada Gambar 2.9, waktu induksi menunjukkan waktu yang berlalu sampai terbentuknya fase hidrat gas. Waktu induksi sering disebut dengan nukleasi hidrat. Hidrat tidak terbentuk pada periode ini karena masih dalam kondisi metastabil. Eksperimen lain dari pembentukan dan penguraian hidrat ditunjukkan garis hubungan tekanan dan temperatur pada Gambar 2.10. Pada eksperimen ini besarnya volume konstan dan temperatur akan berubah selama eksperimen.



Gambar 2.10 Garis hubungan tekanan dan temperatur pada hidrat metana sederhana.
 Sumber: Sloan (2008, 115)

Kondisi metastabil pada sistem mencegah pembentukan cepat hidrat pada titik D (tekanan dan temperatur setimbang hidrat) yang ditunjukkan Gambar 2.10. Sebaliknya

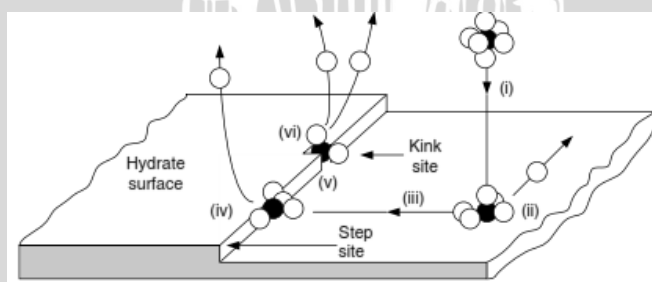
tekanan sistem akan terus menurun secara linier selama beberapa jam tanpa terjadi pembentukan hidrat. Titik A menuju titik B merupakan periode induksi. Pada titik B hidrat sudah mulai terbentuk. Kemudian tekanan menurun ke titik C dengan cepat sampai 1.01 Mpa atau 10 atm dalam waktu setengah jam. Selanjutnya titik B ke titik C termasuk pada periode pertumbuhan.

Periode induksi dipengaruhi oleh tingkat agitasi (kavitasi atau turbulensi), luas permukaan dari sistem, dan tingkat panas atau perpindahan massa. Periode induksi juga merupakan fungsi dari variabel dependen-waktu seperti air, komposisi gas, dan adanya partikel asing.

2.6 Pertumbuhan Hidrat

Selama proses pertumbuhan hidrat, perpindahan panas dan massa merupakan hal yang sangat penting. Pada Gambar 2.10, pertumbuhan hidrat ditunjukkan pada periode antara titik B dan C yang secara signifikan gas dimasukkan ke dalam fase hidrat. Pada Gambar 2.9, periode pertumbuhan hidrat ditunjukkan oleh nomer 2. 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.

Pada tingkat molekuler, pertumbuhan hidrat dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu kecepatan pertumbuhan kristal pada permukaan hidrat, perpindahan massa dari komponen dari permukaan kristal yang tumbuh dan perpindahan panas dari panas eksotermis dari pembentukan hidrat yang jauh dari permukaan kristal hidrat yang tumbuh.



Gambar 2.11 Mekanisme pertumbuhan kristal hidrat

Sumber: Sloan (2008, 151)

Pada gambar 2.11 menunjukkan proses pertumbuhan kristal hidrat dengan tahapan sebagai berikut:

- i. Molekul gas pada gugus air temporer dipindahkan menuju permukaan kristal yang mengalami pertumbuhan. Gugus ini menuju permukaan dengan energi bebas Gibbs yang dihasilkan permukaan kristal.

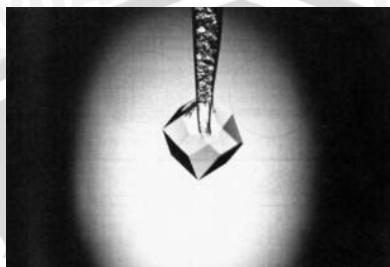
- ii. Gugus tersebut teradsorpsi pada permukaan kristal. Kristal padat menghasilkan medan gaya ke dalam fluida sehingga menyebabkan gugus tersebut mengikuti permukaan. Setelah adsorpsi (penyerapan), beberapa molekul air terlepas dari gugus dan berdifusi menjauh.
- iii. Difusi gugus pada permukaan memasuki tahap di dalam kristal. Spesimen yang teradsorpsi menyebar hanya dalam dua dimensi sepanjang permukaan karena terdapat medan gaya yang tegak lurus dengan permukaan kristal.
- iv. Gugus menempel pada *step* kristal dengan melepas molekul pelarut. Dua permukaan padat dari *step* memberikan sebuah gaya (dengan dua interaksi permukaan reaktan) pada spesimen yang bergerak.
- v. Gugus hanya dapat bergerak pada satu dimensi sepanjang *step*. Gugus berdifusi dari daerah *step* menuju ke daerah *kink* (titik cacat pada daerah *step*).
- vi. Gugus telah diadsorpsi pada daerah *kink*. Pada daerah ini terdapat tiga atau lebih permukaan padat sehingga memberikan gaya yang lebih besar pada spesimen. Setelah fase ini gugus akan bergerak pada tiga dimensi.

Pada gambar 2.11 nomer (ii), (iv) dan (vi) gugus diintegrasikan ke permukaan kristal. Gugus tersebut akan masuk ke dalam rongga yang tepat dan molekul pelarut berlebih akan dilepaskan. Jika molekul gas terlalu besar dan tidak dapat masuk ke dalam rongga, maka rongga akan mengalami penataan ulang selama beberapa waktu. Ikatan rongga selesai dengan integrasi akhir dari gugus ke daerah *kink*. Molekul gugus berlebih akan dilepaskan dan spesimen kehilangan energi residu pergerakan sepanjang permukaan kristal.

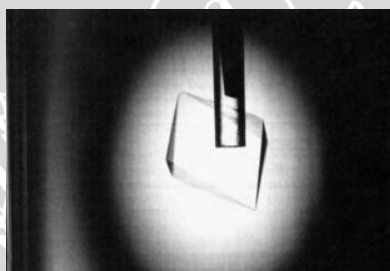
Hidrat dapat tumbuh sebagai kristal tunggal pada larutan air dan hidrokarbon. Pertumbuhan hidrat kristal tunggal merupakan metode yang digunakan untuk menguji efek aditif dari pertumbuhan kristal dan morfologinya. Kristal tunggal tetrahidrofur dan etilen oksida mudah untuk dibentuk karena kedua unsur pembentuk larut dalam air. Sedangkan kristal tunggal hidrat gas sulit diperoleh.

Kristal hidrat tunggal dari struktur kubus I dan II yang dibentuk dari persamaan stoikiometri dari etilen oksida (Gambar 2.12) dan tetrahidrofur (Gambar 2.13) masing-masing dalam kondisi diam (Larson *et al.*, 1996). Kristal tunggal etilen oksida memiliki 110 bidang kristal struktur I. Sedangkan kristal tunggal tetrahidrofur memiliki 111 bidang kristal struktur II. Pada pertumbuhan kristal tunggal, bidang yang paling lambat untuk tumbuh telah diamati.

Pertumbuhan kristal tunggal dengan 111 bidang pada struktur II tumbuh paling lambat karena mengandung dominasi bidang heksagonal daripada bidang kristal lainnya. Hal ini dikarenakan bidang heksagonal jauh lebih tegang (sudut antara O-O-O adalah 120°) daripada bidang pentagonal (108°) relatif terhadap tetrahedral (109°) dan air (sudut antara H-O-H adalah 104.5°).



Gambar 2.12 Kristal hidrat tunggal etilen oksida (sI)
Sumber: Sloan (2008, 156)



Gambar 2.13 Kristal hidrat tunggal tetrahidrofuran (sII)
Sumber: Sloan (2008, 156)

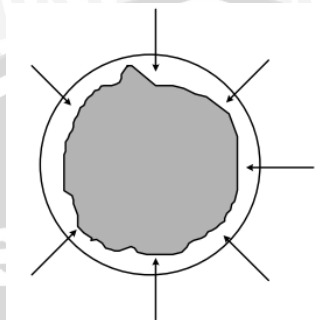
2.7 Penguraian Hidrat

Penguraian hidrat merupakan proses yang penting pada produksi gas dari hidrat alam dan masalah pemipaan. Penguraian hidrat merupakan proses endotermik dengan panas yang bersumber dari luar sistem untuk memecah ikatan hidrogen antara molekul air untuk menguraikan hidrat menjadi air dan gas.

Pada Gambar 2.10, proses penguraian hidrat dimulai ketika hidrat dipanaskan dari titik C sehingga tekanan sistem meningkat. Ketika awal pemanasan tekanan sistem meningkat perlahan dan menjadi tajam sepanjang garis disosiasi hidrat (antara titik C dan titik D). Pada titik D, hidrat telah menjadi air dan gas. Titik D merupakan kondisi setimbang hidrat (tekanan dan temperatur penguraian hidrat).

Gambaran konseptual modern dari penguraian hidrat melibatkan penguraian hidrat radial yang ditunjukkan pada Gambar 2.14. Gambaran paling akurat berdasarkan perpindahan panas dari penguraian hidrat, dimana hidrat berada di tengah dikelilingi fasa

air stasioner. Fasa air stasioner dapat menghasilkan panas untuk penguraian hidrat. Disosiasi radial merupakan fenomena fisik yang tidak disengaja karena penguraian hidrat lebih cepat secara signifikan dibandingkan dengan disosiasi aksial. Hal ini disebabkan oleh dimensi radial lebih kecil dibandingkan dibandingkan dimensi longitudinal dan daerah perpindahan panas permukaan radial lebih besar daripada permukaan aksial.



Gambar 2.14 Disosiasi radial
Sumber: Sloan (2008, 177)

2.8 Gas Alam

2.8.1 Propana

Gas alam merupakan campuran dari gas hidrokarbon yang mudah untuk terbakar (Mokhatab *et al*, 2006). Salah satu komponen dari gas alam adalah gas propana (C_3H_8). Gas propana merupakan komponen gas alam yang memiliki empat atom karbon yang berwujud gas pada keadaan normal, tetapi dapat dikompresi menjadi cairan sehingga mudah untuk dipindahkan. Propana umumnya digunakan sebagai komposisi utama LPG.

Gas propana memiliki berat molekul sebesar 44 g/mol. Berat molekul gas propana lebih besar dari gas metana (CH_4) dan etana (C_2H_6) yang masing-masing memiliki berat molekul 16 dan 30 gram/mol. 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 . Titik didih gas propana adalah -42°C . Karakteristik umum dari gas butana ditunjukkan pada Tabel 2.3.

2.8.2 Butana

Komponen lain dari gas alam adalah gas butana (C_4H_{10}). Gas butana merupakan komponen gas alam dengan empat atom karbon yang tidak memiliki warna. Gas butana merupakan salah satu komponen tambahan pada LPG.

Gas butana memiliki berat molekul sebesar 58 g/mol. Berat molekul gas butana lebih besar dari propana (C_3H_8) yang memiliki berat 44 gram/mol. 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 . Titik didih gas butana adalah -1°C . Karakteristik umum dari gas butana ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 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, 81)

2.9 Hukum Pertama Termodinamika

Hukum pertama termodinamika menyatakan tentang kekekalan energi. Energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, tetapi dapat dirubah bentuknya menjadi energi yang lain. Contoh-contoh dari bentuk energi yaitu energi kinetik, energi potensial, energi kimia atau energi panas.

Untuk sistem homogen pada tekanan dan temperatur tertentu, sistem hanya terjadi gaya tekanan dan perpindahan panas. Perubahan diferensial energi sistem berdasarkan hukum pertama termodinamika sesuai dengan Persamaan 2-1.

$$dU = T dS - p dV \quad (2-1)$$

dengan:

U = Energi dalam dari suatu sistem (J)

T = Temperatur sistem ($^\circ\text{C}$)

S = Entropi yang terjadi pada sistem (J/K)

p = Tekanan sistem (Pa)

V = Volume sistem (m^3)

Persamaan 1 mengabaikan energi kimia, listrik, maupun gravitasi yang terjadi sehingga untuk sistem yang heterogen kurang sesuai. Persamaan 2-2 merupakan persamaan perubahan energi dalam pada sistem tertutup dimana sistem homogen maupun heterogen.

$$dU = \delta Q + \delta W \quad (2-2)$$

dengan:

U = Energi dalam dari suatu sistem (J)

Q = Kalor yang diderikan pada sistem (J)

W = Kerja yang dihasilkan oleh sistem (J)

2.10 Perpindahan Panas

Perpindahan panas merupakan perpindahan energi dari suatu sistem yang memiliki temperatur lebih tinggi menuju sistem lain yang memiliki temperatur lebih rendah. Perpindahan panas akan mencapai kesetimbangan ketika sistem yang memiliki temperatur lebih tinggi dan sistem yang memiliki temperatur lebih rendah mencapai temperatur yang sama. Perpindahan energi kinetik partikel akan melalui batas antara dua sistem yang memiliki perbedaan temperatur dari kedua sistem tersebut maupun ke lingkungan. Perpindahan panas merubah energi dalam dari sistem sesuai dengan hukum pertama termodinamika.

Perpindahan panas dapat melalui tiga cara, yaitu:

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. Besarnya perpindahan panas konduksi ditunjukkan oleh Persamaan 2-3.

$$\dot{Q} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2-3)$$

dengan:

\dot{Q} = Laju perpindahan panas konduksi (J)

k = Konduktivitas termal material (J/m.K)

A = Luas permukaan bidang kontak perpindahan panas konduksi (m²)

ΔT = Perbedaan temperatur antara kedua permukaan (K)

Δx = Tebal permukaan (m)

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. Besarnya perpindahan panas konveksi ditunjukkan oleh Persamaan 2-4.

$$\dot{Q} = h A (T_s - T_\infty) \quad (2-4)$$

dengan:

\dot{Q} = Laju perpindahan panas konveksi (J)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi (J/m².K)

A = Luas permukaan bidang kontak perpindahan panas konveksi (m²)

T_s = Temperatur permukaan zat padat (K)

T_∞ = Temperatur fluida pada jarak tertentu dari permukaan zat padat (K)

3. Radiasi

Radiasi adalah 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 disebabkan perpindahan acak atom dan molekul suatu zat yang memiliki muatan (proton dan elektron) sehingga melepaskan gelombang elektromagnetik yang membawa energi. Besarnya perpindahan panas konveksi ditunjukkan oleh Persamaan 2-5.

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (2-5)$$

dengan:

\dot{Q} = Laju perpindahan panas radiasi (J)

ε = Emisivitas suatu zat

σ = Konstanta Stefan-Boltzman ($5.67 \times 10^8 \text{ J/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

A = Luas permukaan perpindahan panas radiasi (m^2)

T = Temperatur absolut zat (K)

2.11 Persamaan Keadaan

Persamaan keadaan adalah persamaan yang menyatakan hubungan antara variabel yang menggambarkan keadaan dari suatu sistem pada kondisi tertentu. Persamaan keadaan dapat dibagi menjadi dua, yaitu persamaan gas ideal dan persamaan gas nyata.

2.11.1 Persamaan Gas Ideal

Boyle, Charles dan Gay-Lussac telah mengembangkan hukum tentang gas yang didasarkan pada pengamatan empiris untuk menggambarkan karakteristik suatu gas secara makroskopik yang sifatnya dapat langsung dialami dan diamati oleh seseorang. Teori atom gas menyatakan bahwa setiap zat yang terdiri dari sebagian besar partikel yang sangat kecil. Pada dasarnya, semua sifat-sifat gas termasuk tekanan, volume dan temperatur merupakan akibat dari perilaku molekul yang membentuk gas (Cengel, 2004).

Terdapat lima kondisi yang menggambarkan perilaku molekul sesuai dengan teori kinetik molekular gas ideal yaitu:

1. Gas terdiri dari kumpulan partikel kecil (molekul) yang bergerak secara garis lurus.

Pergerakan molekul ini sesuai dengan Hukum Newton.

2. Molekul-molekul pada suatu gas tidak memiliki volume. Molekul-molekul tersebut merupakan sebuah titik.
3. Satu molekul dengan molekul lainnya saling bertumbukan secara elastis sempurna sehingga tidak ada energi yang diperoleh maupun yang hilang selama tumbukan.
4. Tidak ada gaya tarik atau gaya tolak antara setiap molekul.
5. Energi kinetik rata-rata molekul ditunjukkan pada Persamaan 2-6, yaitu:

$$EK = \frac{3}{2}kT \quad (2-6)$$

dengan:

EK = Energi kinetik (J)

T = Temperatur absolut (K)

k = Konstanta Steven Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$)

Persamaan gas ideal ditunjukkan pada Persamaan 2-7, yaitu:

$$pV = nRT \quad (2-7)$$

dengan:

p = Tekanan gas (Pa)

V = Volume sistem suatu gas (m^3)

n = Jumlah mol gas (mol)

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

T = Temperatur absolut (K)

2.11.2 Persamaan Gas Nyata

Gas nyata merupakan kebalikan dari gas ideal. Pada gas ideal, volume molekul gas diabaikan (tidak memiliki volume) dan dianggap sebagai titik. Pada kenyataannya, molekul gas memiliki volume 0.1% dari total volume gas dan volume molekul gas tetap sama dibandingkan penurunan volume total gas. Penurunan volume gas terjadi dengan adanya penurunan temperatur dan peningkatan tekanan. Akan tetapi, volume molekul tidak dapat diabaikan.

Pada gas ideal, kekuatan tarik antar molekul diabaikan. Kekuatan tarik antar molekul dapat diabaikan ketika berlaku pada tekanan rendah dengan temperatur tinggi karena kondisi molekul gas saling berjauhan. Tetapi pada tekanan tinggi dan temperatur rendah, volume gas menjadi kecil sehingga kekuatan tarik antar molekul ada meskipun sangat kecil.

Terdapat empat model persamaan keadaan gas nyata, yaitu:

1. Persamaan keadaan van der Waals

Persamaan keadaan van der Waals yang ditunjukkan Persamaan 2-9 merupakan model pertama yang menggambarkan keadaan gas nyata. Molekul dipandang sebagai partikel yang memiliki volume, sehingga besaran V tidak boleh kurang dari suatu konstanta. Selain itu, molekul juga saling berinteraksi pada jarak tertentu sehingga mempengaruhi tekanan yang terjadi. Oleh karena itu, adanya penyesuaian dari gas ideal menjadi gas nyata dengan mengganti besaran V (volume) diganti dengan $(V-b)$ dan besaran p (tekanan) diganti dengan $(p+\frac{a}{V^2})$.

$$(p + \frac{a}{V^2})(V - b) = nRT \quad (2-9)$$

dengan:

p = Tekanan gas (Pa)

V = Volume sistem suatu gas (m^3)

a, b = Konstanta persamaan keadaan van der Waals

n = Jumlah mol gas (mol)

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

T = Temperatur absolut (K)

2. Persamaan keadaan Redlich-Kwong

Persamaan keadaan Redlich-Kwong yang ditunjukkan pada Persamaan 2-11 merupakan perbaikan dari persamaan keadaan van der Waals. Konstanta a dan b pada persamaan keadaan Redlich-Kwong dipengaruhi oleh titik kritis (tekanan kritis dan temperatur kritis) gas. Persamaan keadaan Redlich-Kwong cukup akurat untuk memprediksi sifat-sifat pada kondisi sesuai Persamaan 2-10.

$$\frac{p}{p_c} < \frac{T}{2T_c} \quad (2-10)$$

$$p = \frac{nRT}{V-b} - \frac{a}{T^{0.5}V(V+b)} \quad (2-11)$$

dengan:

p = Tekanan gas (Pa)

p_c = Tekanan kritis gas (Pa)

V = Volume sistem suatu gas (m^3)

n = Jumlah mol gas (mol)

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

T = Temperatur absolut (K)

T_c = Temperatur kritis absolut (K)

a = Konstanta persamaan keadaan Redlich-Kwong $\left(a = 0.42748 \frac{R^2 T_c^{2.5}}{p_c} \right)$

b = Konstanta persamaan keadaan Redlich-Kwong $\left(b = 0.08662 \frac{RT_c}{p_c} \right)$

3. Persamaan keadaan Soave-Redlich-Kwong

Persamaan keadaan Soave-Redlich-Kwong yang ditunjukkan pada Persamaan 2-12 merupakan perbaikan dari persamaan keadaan Redlich-Kwong. Pada persamaan keadaan Soave-Redlich-Kwong terdapat konstanta α yang dipengaruhi faktor asentrik (ω), tekanan tereduksi (P_r) dan temperatur tereduksi (T_r) yang ditunjukkan pada Persamaan 2-13. Faktor asentrik adalah ukuran ketidakbulatan suatu molekul yang ditunjukkan pada Persamaan 2-14. Persamaan 2-15 dan 2-16 masing-masing merupakan tekanan dan temperatur tereduksi yang mempengaruhi konstanta α .

$$p = \frac{nRT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V(V+b)} \quad (2-12)$$

$$\alpha = \left\{ 1 + (0.48508 + 1.55171\omega - 0.15613\omega^2)(1 - T_r^{0.5}) \right\}^2 \quad (2-13)$$

$$\omega = -1 - \log P_r \quad (2-14)$$

$$P_r = \frac{p}{p_c} \quad (2-15)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (2-16)$$

dengan:

p = Tekanan gas (Pa)

p_c = Tekanan kritis gas (Pa)

p_r = Tekanan tereduksi gas (Pa)

V = Volume sistem suatu gas (m^3)

n = Jumlah mol gas (mol)

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

T = Temperatur absolut (K)

T_c = Temperatur kritis absolut (K)

T_r = Temperatur tereduksi gas (K)

a = Konstanta persamaan keadaan Soave-Redlich-Kwong $\left(a = 0.42748 \frac{R^2 T_c^{2.5}}{p_c} \right)$

b = Konstanta persamaan keadaan Soave-Redlich-Kwong $\left(b = 0.08662 \frac{RT_c}{p_c} \right)$

α = Konstanta yang dipengaruhi P_r dan T_r

ω = Faktor asentrik

4. Persamaan keadaan Peng-Robinson

Persamaan keadaan Peng-Robinson yang ditunjukkan pada Persamaan 2-17 merupakan perbaikan dari persamaan keadaan Soave-Redlich-Kwong. Konstanta α dan faktor asentrik yang digunakan pada persamaan keadaan Peng-Robinson ditunjukkan masing-masing pada Persamaan 2-18 dan 2-14. Kelebihan persamaan keadaan Peng-Robinson daripada persamaan keadaan lainnya adalah sebagai berikut:

- Parameter yang ada dapat dinyatakan dalam sifat kritis dan faktor asentrik (ω). Faktor asentrik adalah ukuran ketidakbulatan suatu molekul.
- Model harus dapat memprediksi berbagai karakteristik di sekitar titik kritis, terutama perhitungan faktor kompresibilitas dan densitas cairan.
- *Mixing rule* tidak tergantung pada temperatur, tekanan maupun komposisi.
- Persamaan berlaku pada semua perhitungan karakteristik pada gas alam.

$$p = \frac{nRT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V^2 + 2bV - b^2} \quad (2-17)$$

$$\alpha = \{1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.2699\omega^2)(1 - T_r^{0.5})\}^2 \quad (2-18)$$

dengan:

p = Tekanan gas (Pa)

V = Volume sistem suatu gas (m^3)

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

Untuk membandingkan antara gas ideal dengan gas nyata maka diperlukan faktor koreksi. Persamaan 2-19 merupakan persamaan gas ideal dengan penambahan faktor kompresibilitas. Faktor koreksi tersebut disebut faktor kompresibilitas yang didapatkan dari persamaan kubik pada model persamaan keadaan gas nyata.

$$pV = nZRT \quad (2-19)$$

dengan:

p = Tekanan gas (Pa)

V = Volume sistem suatu gas (m^3)

n = Jumlah mol gas (mol)

Z = Faktor kompresibilitas.

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

T = Temperatur absolut (K)

Faktor kompresibilitas dari masing-masing persamaan keadaan gas nyata sesuai dengan bentuk umum pada Persamaan 2-20. Perbandingan masing-masing konstanta pada masing-masing persamaan keadaan ditunjukkan pada Tabel 2.4. Faktor kompresibilitas didapatkan dari akar persamaan kubik dengan nilai tertinggi. Nilai A dan B masing-masing dari Persamaan 2-21 dan 2-22 merupakan penjabaran dari konstanta pada Persamaan 2-20.

$$Z^3 - c_2 Z^2 + c_1 Z - c_0 = 0 \quad (2-20)$$

$$A = \frac{\Omega_a \alpha p_r}{T_r^2} \quad (2-21)$$

$$B = \frac{\Omega_b p_r}{T_r} \quad (2-22)$$

dengan:

Z = Faktor kompresibilitas.

Ω_a, Ω_b = Konstanta persamaan kubik

α = Konstanta yang dipengaruhi P_r dan T_r

p_r = Tekanan tereduksi gas (Pa)

T_r = Temperatur tereduksi gas (K)

Tabel 2.4 Konstanta pada masing-masing persamaan keadaan gas nyata

Persamaan Keadaan	Konstanta				
	c_2	c_1	c_0	Ω_a	Ω_b
van der Waals	$-B - 1$	A	$-AB$	0.42188	0.125
Redlich-Kwong	-1	$A - B - B^2$	$-AB$	0.42748	0.08664
Soave-Redlich-Kwong	-1	$A - B - B^2$	$-AB$	0.42748	0.08664
Peng-Robinson	$B - 1$	$A - 2B - 3B^2$	$AB - B^2 - B^3$	0.45724	0.07779

Sumber: Rao (2003)

2.12 Crystallizer

Kristalisasi merupakan proses pembentukan kristal padat dari dari suatu larutan yang homogen. Proses ini juga merupakan salah satu teknik pemisahan padat-cair yang sangat penting dalam bidang industri. Kristalisasi terjadi pada zona metastabil dan

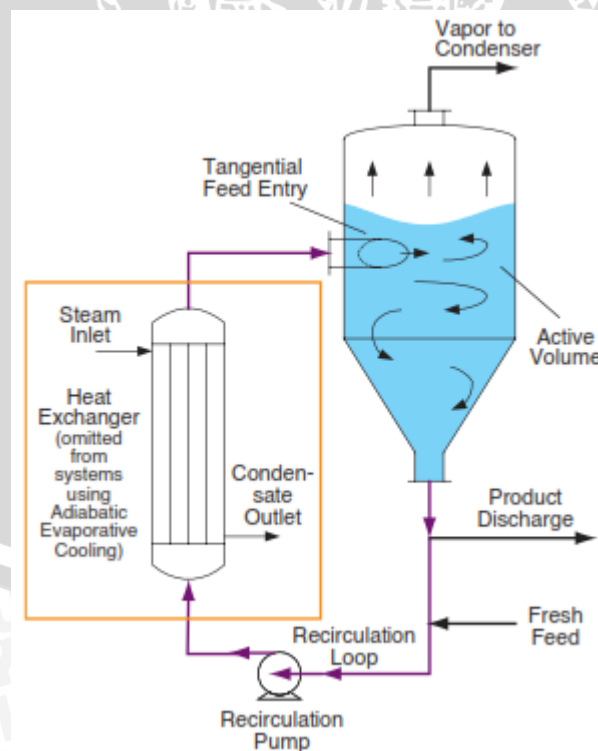
memerlukan kondisi sistem jenuh lanjut. Terdapat tiga mekanisme untuk menghasilkan sistem jenuh lanjut, yaitu dengan cara pendinginan (pendinginan permukaan maupun pendinginan kontak langsung), penguapan yang menghasilkan penurunan komposisi pelarut dan pendinginan evaporatif adiabatik. Untuk melakukan proses kristalisasi membutuhkan alat yang disebut *crystallizer*.

Terdapat beberapa jenis *crystallizer* di dalam bidang industri, yaitu:

1. *Forced Circulation Crystallizer*

Forced circulation crystallizer seperti pada Gambar 2.15 memenuhi konfigurasi *crystallizer* sebagai berikut:

- Menggunakan penguapan atau pendinginan evaporatif adiabatik untuk menghasilkan sistem jenuh lanjut.
- Memberikan suspensi campuran sebagai volume aktif untuk mengurangi tingkat kejenuhan sistem.
- Menggunakan resirkulasi magma untuk mengatur pembentukan sistem jenuh lanjut.
- Tidak terdapat mekanisme penguraian larutan.

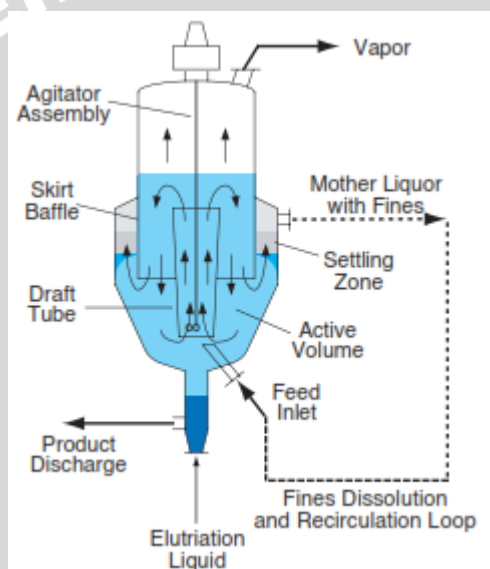


Gambar 2.15 *Forced circulation crystallizer*
Sumber: Samant (2006, 33)

2. Draft Tube Crystallizer

Draft tube crystallizer seperti pada Gambar 2.16 memenuhi konfigurasi *crystallizer* sebagai berikut:

- Menggunakan pendinginan kontak langsung, penguapan atau pendinginan evaporatif adiabatik untuk menghasilkan sistem jenuh lanjut.
- Memberikan suspensi campuran sebagai volume aktif untuk mengurangi tingkat kejenuhan sistem.
- Menggunakan resirkulasi magma untuk mengatur pembentukan sistem jenuh lanjut.
- Terdapat mekanisme penguraian larutan.

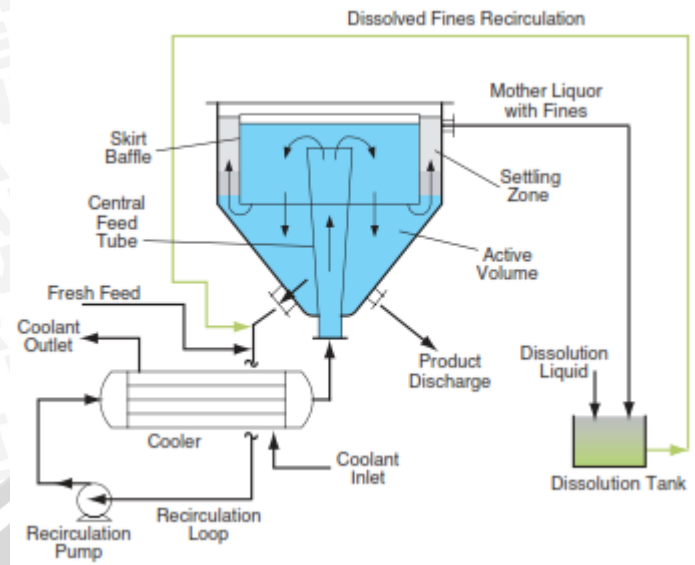


Gambar 2.16 *Draft tube crystallizer*
Sumber: Samant (2006, 34)

3. Surface Cooled Crystallizer

Surface cooled crystallizer seperti pada Gambar 2.17 memenuhi konfigurasi *crystallizer* sebagai berikut:

- Hanya menggunakan pendinginan permukaan untuk menghasilkan sistem jenuh lanjut.
- Memberikan suspensi campuran sebagai volume aktif untuk mengurangi tingkat kejenuhan sistem.
- Menggunakan resirkulasi magma untuk mengatur pembentukan sistem jenuh lanjut.
- Terdapat mekanisme penguraian larutan.

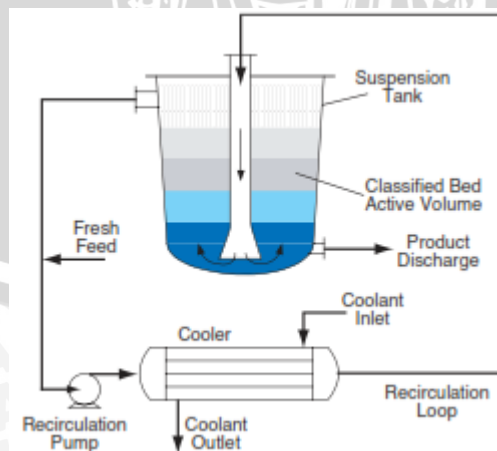


Gambar 2.17 *Surface cooled crystallizer*
Sumber: Samant (2006, 35)

4. Oslo Crystallizer

Oslo crystallizer seperti pada Gambar 2.18 memenuhi konfigurasi *crystallizer* sebagai berikut:

- Menggunakan pendinginan permukaan, penguapan atau pendinginan evaporatif adiabatik untuk menghasilkan sistem jenuh lanjut.
- Memberikan suspensi campuran sebagai volume aktif untuk mengurangi tingkat kejenuhan sistem.
- Menggunakan resirkulasi *liquor* untuk mengatur pembentukan sistem jenuh lanjut.
- Terdapat mekanisme penguraian larutan.



Gambar 2.18 *Oslo crystallizer*
Sumber: Samant (2006, 36)

2.13 Hipotesa

Semakin tinggi kecepatan putar *crystallizer* akan meningkatkan perbedaan temperatur antara sistem (*crystallizer*) dengan lingkungan (*cooling bath*) semakin tinggi sehingga laju perpindahan panas yang terjadi juga semakin tinggi. Kecepatan putar *crystallizer* yang semakin tinggi juga menyebabkan gaya sentrifugal di dalam *crystallizer* juga semakin besar sehingga menyebabkan laju perpindahan massa gas menuju ke rongga molekul air semakin cepat. Semakin tinggi perpindahan panas dan perpindahan massa yang terjadi akan menyebabkan tingkat konsumsi gas semakin banyak. Semakin banyak konsumsi gas menunjukkan laju pembentukan hidrat gas yang semakin tinggi.

Semakin tinggi laju perpindahan panas menyebabkan laju pendinginan hidrat gas semakin tinggi. Semakin tinggi laju pendinginan akan menyebabkan lapisan es yang mengelilingi hidrat semakin kuat sehingga lapisan es semakin tidak mudah mengurai dan hidrat dalam keadaan yang semakin stabil. Kapasitas penyimpanan yang semakin tinggi disebabkan oleh tingkat konsumsi gas yang semakin tinggi pada saat pembentukan hidrat terjadi.



BAB III METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian eksperimental (*true experimental research*). Metode ini digunakan untuk mengamati pengaruh dari suatu perlakuan pada suatu proses eksperimen sehingga dapat mengetahui pengaruh kecepatan putaran motor terhadap laju pembentukan, stabilitas dan kapasitas penyimpanan hidrat butana. Kajian literatur dari berbagai sumber, baik berupa buku maupun jurnal yang terkait dengan penelitian ini digunakan untuk menambahkan informasi yang diperlukan.

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian mengenai pengaruh variasi kecepatan putaran motor terhadap laju pembentukan, stabilitas dan kapasitas penyimpanan hidrat butana dilakukan di Laboratorium Fenomena Dasar Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Waktu penelitiannya dilaksanakan pada bulan April-Juli 2015.

3.2 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat tiga variabel yang digunakan yaitu:

1. Variabel bebas

Variabel bebas adalah variabel yang nilainya ditentukan oleh peneliti sebelum melakukan penelitian dan tidak dipengaruhi oleh variabel lainnya. Besarnya variabel bebas berubah-ubah sehingga didapatkan hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat. Dalam penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah kecepatan putaran sebesar 100, 200 dan 300 rpm.

2. Variabel terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besar nilainya tidak dapat ditentukan oleh peneliti dan tergantung pada nilai dari variabel bebasnya. Variabel terikat yang diamati dalam penelitian ini adalah laju pembentukan yang ditunjukkan oleh banyaknya konsumsi gas saat pembentukan hidrat (mol), stabilitas yang ditunjukkan oleh banyaknya gas yang terurai di bawah titik beku air (mol) dan kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana butana (V/V).

3. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang ditentukan dan nilainya dikondisikan konstan. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah:

- Volume air demin yang dimasukkan pada *crystallizer* adalah 50 cm³.
- Persentase campuran sebesar 50% propana dan 50% butana.

3.3 Bahan dan Alat Penelitian

3.4.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Aquades

Aquades merupakan air yang sudah dimineralisasi (kandungan mineral dalam air sudah dihilangkan). Aquades seperti pada Gambar 3.1 digunakan sebagai bahan untuk membuat hidrat gas yang dicampurkan bersama gas butana di dalam *crystallizer*.



Gambar 3.1 Aquades

Spesifikasi:

- Merk : HYDROBATT
- Kemurnian : 99%
- Resistansi : $100 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$

2. LPG

LPG seperti pada Gambar 3.2 merupakan bahan bakar gas yang memiliki komposisi seperti pada Lampiran 2. sebagai bahan membuat hidrat gas yang dicampurkan bersama aquades di dalam *crystallizer*.



Gambar 3.2 LPG

3. Es

Pada Gambar 3.3 menunjukkan es yang digunakan sebagai bahan untuk membuat *cooling bath*. Sebelum dimasukkan ke dalam *cooling bath*, es dipotong sehingga memiliki ukuran yang lebih kecil.



Gambar 3.3 Es batu

4. Garam

Pada Gambar 3.4 menunjukkan garam yang digunakan sebagai bahan untuk membuat *cooling bath*.



Gambar 3.4 Garam

3.3.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. *Crystallizer*

Crystallizer digunakan sebagai tempat untuk membuat hidrat gas.

Crystallizer berbentuk tabung berongga seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 *Crystallizer*

Spesifikasi:

- Bahan : *Stainless steel*
- Volume : $150 \text{ cm}^3 / 0.00015 \text{ m}^3$

2. Motor listrik

Motor listrik pada Gambar 3.6 digunakan sebagai alat untuk memutar *crystallizer* sehingga gas dan air di dalam *crystallizer* tercampur.



Gambar 3.6 Motor listrik

Spesifikasi:

- Merk : Vema
- Tipe : Y2-712-4
- Fase : 3 fase

- Rangkaian : Δ , Y
- Putaran max : 1370 rpm
- Tegangan : 220/380 V
- Daya : 0.5 Hp
- Frekuensi : 50 Hz

3. *Inverter*

Pada Gambar 3.7 menunjukkan *inverter* yang digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor.



Gambar 3.7 *Inverter*

Spesifikasi:

- Merk : Telemecanique Altivar 31
- Tipe : ATV 31H018 M2A
- Fase : 1 fase ke 3 fase
- Tegangan : 200/240 V
- Daya : 0.25 Hp/0.18 kW

4. Gelas ukur

Gelas ukur seperti pada Gambar 3.8 digunakan untuk mengukur volume air demin yang akan dimasukkan ke dalam *crystallizer*.



Gambar 3.8 Gelas ukur

Spesifikasi:

- Merk : PYREX
- Volume : 25 ml

5. Regulator gas

Regulator gas seperti pada Gambar 3.9 digunakan untuk mengatur tekanan gas yang keluar dari tabung gas.



Gambar 3.9 Regulator gas

Spesifikasi:

- Merk : FESTO
- Tekanan maks : 1.6 MPa

6. Kompresor

Kompresor seperti pada Gambar 3.10 digunakan untuk meningkatkan tekanan gas campuran propana butana.



Gambar 3.10 Kompresor

7. Katup

Katup seperti pada Gambar 3.11 digunakan untuk mengatur keluar masuknya gas ke dalam *crystallizer*.



Gambar 3.11 Katup

8. *Pressure gage*

Pressure gage seperti pada Gambar 3.12 digunakan untuk mengukur besarnya tekanan di dalam *crystallizer*.



Gambar 3.12 *Pressure gage*

Spesifikasi:

- Merk : Tekiro
- Tekanan max: 10 bar/140 psi

9. *Thermocouple*

Thermocouple seperti pada Gambar 3.13 digunakan sebagai sensor untuk mengambil data temperatur di dalam *crystallizer*.



Gambar 3.13 *Thermocouple*

Spesifikasi:

- Tipe : Pt
- Suhu : $-100^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$

10. *Pressure sensor*

Pressure sensor seperti pada Gambar 3.14 digunakan sebagai alat untuk mengambil data tekanan di dalam *crystallizer*.



Gambar 3.14 *Pressure sensor*

Spesifikasi:

- Merk : Autonics
- Model : PSAN-L1CPV-R1/8
- Power : 12/24 V
- Tipe : Tekanan positif
- Tekanan : Max 1 MPa

11. Data logger

Data logger seperti pada Gambar 3.15 digunakan untuk menyimpan data dari *thermocouple* dan *pressure transducer*.



Gambar 3.15 *Data logger*

Spesifikasi:

- Merk : OMEGA
- Tipe : OM-DAQPRO-5300

12. Styrofoam

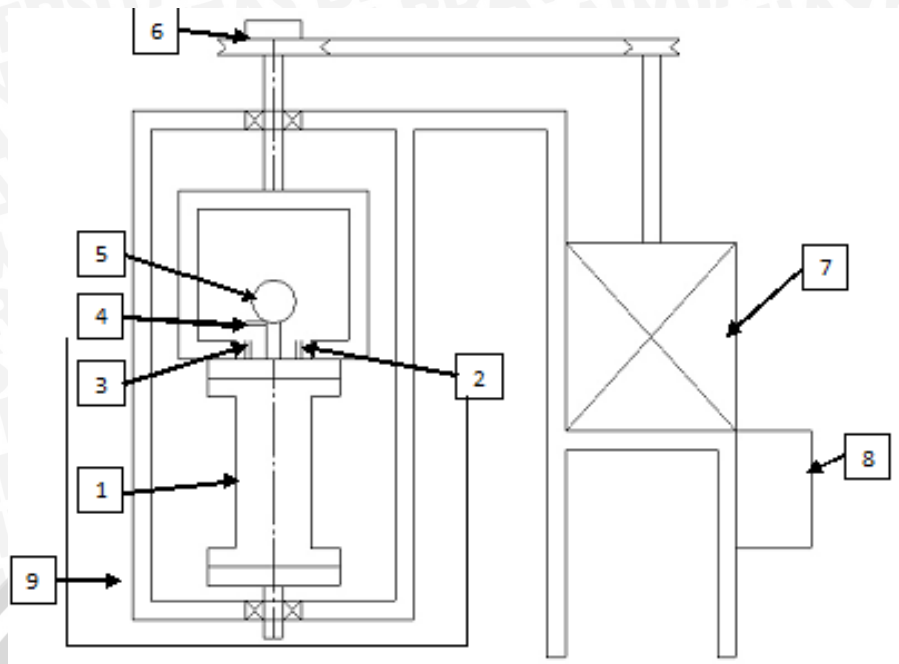
Styrofoam seperti pada Gambar 3.16 digunakan sebagai tempat untuk *cooling bath*.



Gambar 3.16 *Cooling bath*

3.4 Instalasi Alat Penelitian

Instalasi alat yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.17.



Gambar 3.17 Instalasi alat penelitian

Keterangan:

1. *Crystallizer*
2. *Thermocouple*
3. *Pressure transducer*
4. Katup gas
5. *Pressure gage*
6. *Data logger*
7. Motor listrik
8. *Inverter*
9. *Cooling bath*

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Persiapan Penelitian

1. Membuat *cooling bath* dengan mencampur air dan es di *styrofoam* sehingga suhu *cooling bath* mencapai 274 K (1 °C).
2. Menyiapkan aquades dan campuran propana butana yang akan dimasukkan ke dalam *crystallizer*.
3. Mengecek instalasi penelitian untuk memastikan tidak ada kesalahan saat pengambilan data.
4. Mengkalibrasi semua alat ukur yang digunakan.

3.5.2 Pengambilan Data

3.5.2.1 Pembentukan Hidrat

1. Membersihkan *crystallizer* menggunakan air sehingga tidak terdapat kotoran yang ada di dalamnya.
2. Menyiapkan 50 cm³ air demin dengan menggunakan gelas ukur. Kemudian air demin tersebut dimasukkan ke dalam *crystallizer*.
3. Membuat *crystallizer* dalam keadaan vakum.
4. Masukkan gas butana ke dalam *crystallizer* sehingga tekanan gas butana dalam tabung sebesar 0.3 MPa pada temperatur 300 K (27 °C).
5. Meletakkan *crystallizer* pada *cooling bath* setelah sistem mencapai kesetimbangan pada tekanan dan temperatur awal. Temperatur *cooling bath* diatur sehingga sesuai dengan temperatur pembentukan hidrat yaitu sebesar 274 K (1 °C) yang merupakan titik kesetimbangan 3 fase.
6. Mengatur kecepatan putaran *crystallizer* sebesar 100 rpm.
7. Mengambil data temperatur, tekanan dan waktu selama pembentukan hidrat butana untuk mendapatkan data laju pembentukan hidrat butana.

3.5.2.2 Penguraian Hidrat

1. Menurunkan temperatur *cooling bath* menjadi 268 K (-5 °C). Setelah itu, sistem ditingkatkan selama 5 jam untuk mencapai kesetimbangan.
2. Membuka katup gas setelah sistem mencapai kesetimbangan. Pembukaan katup ini bertujuan untuk membuang gas sisa yang tidak menjadi hidrat.
3. Menutup katup gas sehingga sistem kembali terisolasi. Setelah itu, sistem ditingkatkan kembali selama 5 jam untuk proses dekomposisi hidrat.
4. Mengambil data tekanan dan waktu selama proses sistem mencapai kesetimbangan.

3.5.2.3 Kapasitas Penyimpanan Hidrat

1. Menghangatkan *crystallizer* pada temperatur ruang sehingga hidrat mengalami dekomposisi dan melepas butana yang terjebak pada hidrat.
2. Mengambil data gas hidrat yang terdekomposisi dengan menentukan tekanan maksimum di dalam *crystallizer*.

Mengulangi langkah pengambilan data pembentukan hidrat, penguraian hidrat dan kapasitas penyimpanan hidrat dengan merubah variasi kecepatan putaran 200 rpm dan 300 rpm.

3.5.3 Pengolahan Data

3.5.3.1 Pembentukan Hidrat

1. Melakukan perhitungan mol dari pembentukan hidrat dengan menggunakan persamaan gas nyata yang ditunjukkan pada persamaan 5.
2. Membuat grafik laju pembentukan hidrat dengan membandingkan pengaruh waktu terhadap mol yang terbentuk.

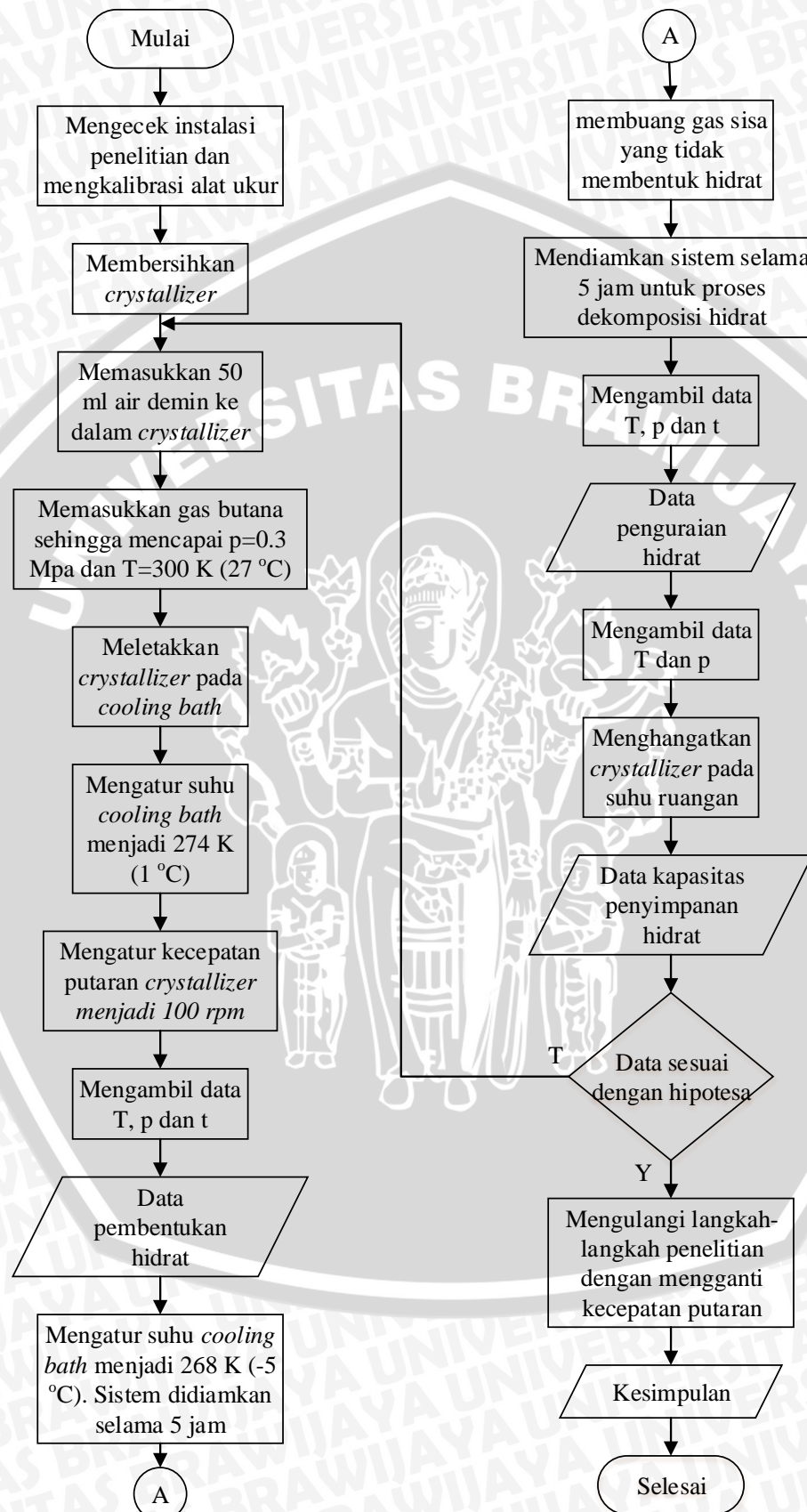
3.5.3.2 Penguraian Hidrat

1. Membuat grafik laju penguraian hidrat dengan membandingkan pengaruh waktu terhadap tekanan gas yang terjadi.

3.5.3.3 Kapasitas Penyimpanan Hidrat

1. Membandingkan banyaknya gas butana yang terlepas dari hidrat secara aktual dan teoritis untuk mendapatkan kapasitas penyimpanan hidrat berdasarkan tekanan maksimum dalam *crystallizer*.
2. Melakukan perhitungan volume dengan menggunakan persamaan gas nyata yang ditunjukkan pada persamaan 5.
3. Membuat diagram kapasitas penyimpanan hidrat.

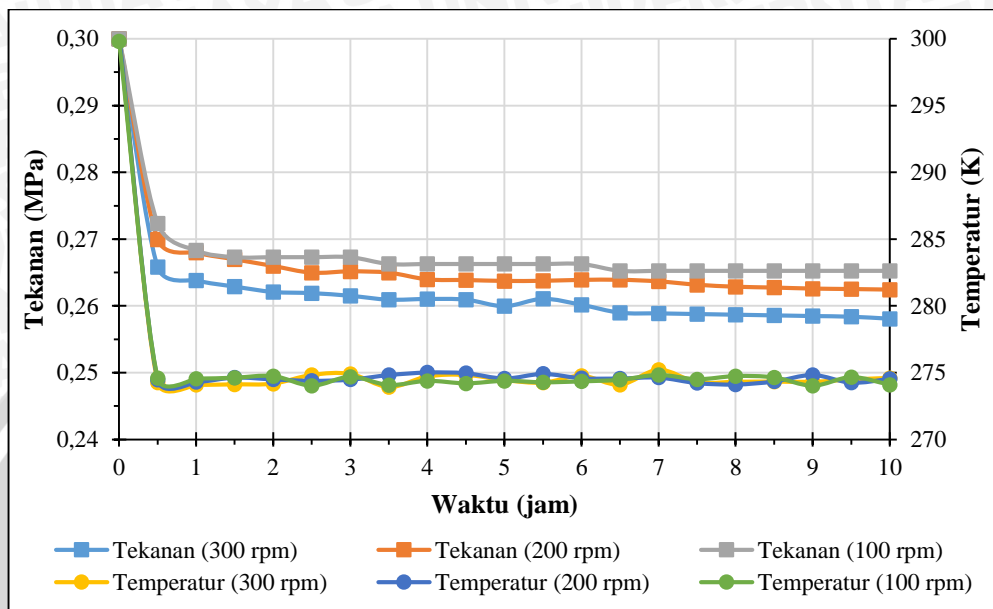
3.6 Diagram Alir Penelitian



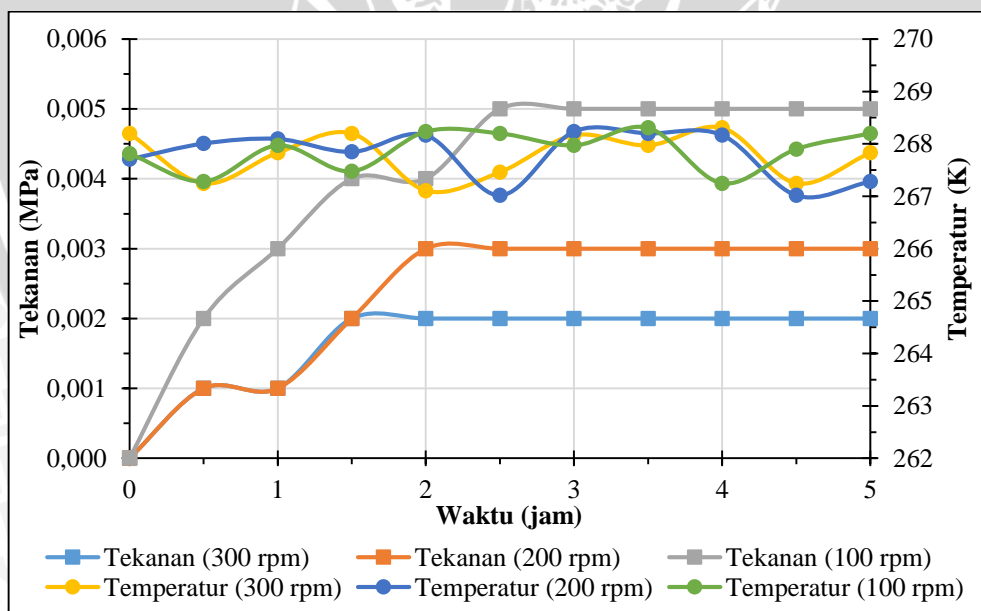
Gambar 3.18 Diagram alir penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian



Gambar 4.1 Grafik hubungan antara waktu terhadap tekanan dan temperatur gas di dalam *crystallizer* ketika pembentukan hidrat

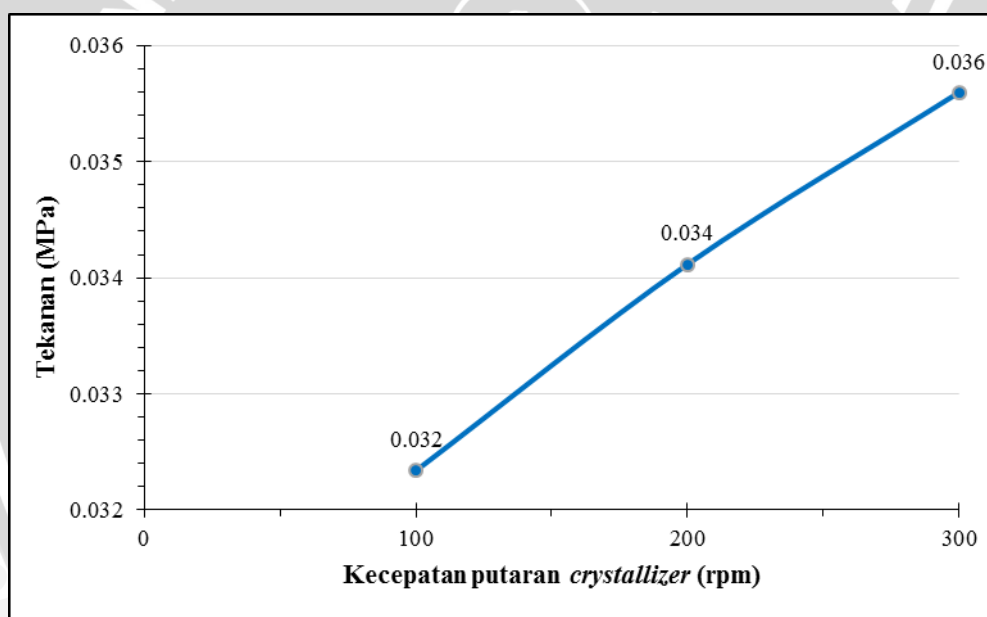


Gambar 4.2 Grafik hubungan antara waktu terhadap tekanan dan temperatur gas di dalam *crystallizer* ketika stabilitas hidrat

Data hasil penelitian ditunjukkan dalam Lampiran 1. Pada Gambar 4.1 temperatur gas di dalam *crystallizer* pada kecepatan putaran 300 rpm paling cepat mencapai temperatur 274 K (1 °C) dibandingkan dengan kecepatan putaran 200 rpm dan 100 rpm.

Sedangkan temperatur gas di dalam *crystallizer* yang paling lambat mencapai 274 K (1 °C) pada kecepatan putaran *crystallizer* 100 rpm. Penurunan tekanan paling rendah pada Gambar 4.1 ditunjukkan pada kecepatan putaran *crystallizer* 100 rpm. Sedangkan penurunan tekanan paling tinggi pada kecepatan putaran *crystallizer* 300 rpm.

Pada Gambar 4.2 temperatur ketika meneliti stabilitas hidrat campuran propana dan butana sekitar 268 K (-5 °C) untuk setiap kecepatan putaran *crystallizer*. Peningkatan tekanan paling tinggi mencapai 0.005 MPa pada kecepatan putaran *crystallizer* 100 rpm. Sedangkan pada kecepatan putaran *crystallizer* 200 rpm dan 300 rpm peningkatan tekanan hingga waktu 1.5 jam memiliki nilai yang sama yaitu 0.002 MPa. Setelah waktu 1.5 jam, pada kecepatan putaran *crystallizer* 300 rpm tidak terjadi peningkatan tekanan. Akan tetapi, pada kecepatan putaran *crystallizer* 200 rpm mengalami peningkatan tekanan hingga mencapai 0.003 MPa.



Gambar 4.3 Diagram tekanan hasil penguraian di dalam *crystallizer*.

Pada Gambar 4.3 tekanan tertinggi sebesar 0.036 MPa ketika penguraian pada temperatur 300 K (27 °C) terjadi pada kecepatan putaran 300 rpm. Sedangkan tekanan paling rendah sebesar 0.032 MPa ketika penguraian pada temperatur 300 K (27 °C) terjadi pada kecepatan putaran 100 rpm. Pada kecepatan putaran *crystallizer* 200 rpm memiliki tekanan penguraian sebesar 0.034 MPa.

4.2 Contoh Perhitungan Data Hasil Penelitian

4.2.1 Pembentukan Hidrat Campuran Propana Butana

Contoh perhitungan konsumsi gas pembentukan hidrat pada waktu 10 jam dengan kecepatan putaran 300 rpm adalah sebagai berikut:

1. Faktor kompresibilitas Peng Robinson

- Titik kritis propana dan butana

Tabel 4.1 Tekanan kritis (P_c) dan temperatur kritis (T_c) propana butana

No	Gas	P_c	T_c
		(MPa)	(K)
1	Propana	4.25	370
2	n-Butana	3.8	425

Tekanan kritis dan temperatur kritis propana dan butana ditunjukkan pada Tabel 4.1. Komposisi campuran adalah 50% propana dan 50% butana sehingga tekanan dan temperatur kritis yang digunakan, yaitu:

$$\begin{aligned}
 p_c &= \frac{P_{c,\text{propana}} + P_{c,\text{n-butana}}}{2} \\
 &= \frac{4.25 + 3.8}{2} \\
 &= 4.025 \text{ bar}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_c &= \frac{T_{c,\text{propana}} + T_{c,\text{n-butana}}}{2} \\
 &= \frac{370 + 425}{2} \\
 &= 397.5 \text{ K}
 \end{aligned}$$

- Tekanan tereduksi (p_r) dan temperatur tereduksi (T_r) campuran propana dan butana

$$\begin{aligned}
 p_r &= \frac{p_{t=10}}{P_c} \\
 &= \frac{0.258}{4.025} \\
 &= 0.064119
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{T_{t=10}}{T_c} \\ &= \frac{274.604}{397.5} \\ &= 0.690653 \end{aligned}$$

- Faktor asentrik (ω)

$$\begin{aligned} \omega &= -1 - \log p_r \\ &= -1 - \log 0.064119 \\ &= 0.193013 \end{aligned}$$

- Koefisien yang dipengaruhi P_r dan T_r (α)

$$\begin{aligned} \alpha &= \{1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.2699\omega^2)(1 - T_r^{0.5})\}^2 \\ &= \{1 + (0.37464 + 1.54226 \times 0.19301 - 0.2699 \times 0.19301^2)(1 - 0.69065^{0.5})\}^2 \\ &= 1.236289 \end{aligned}$$

- Persamaan keadaan Peng Robinson

$$\begin{aligned} A &= \frac{\Omega_a \alpha p_r}{T_r^2}; \Omega_a = 0.45724 \\ &= \frac{0.45724 \times 1.349172 \times 0.064119}{0.69065^2} \\ &= 0.075986 \\ B &= \frac{\Omega_b p_r}{T_r}; \Omega_b = 0.07779 \\ &= \frac{0.07779 \times 0.064119}{0.69065} \\ &= 0.007222 \end{aligned}$$

Bentuk persamaan keadaan Peng Robinson ditunjukkan pada Persamaan 4-1.

$$Z^3 + c_2 Z^2 + c_1 Z + c_0 = 0 \quad (4-1)$$

dengan:

Z = Faktor kompresibilitas

$C_{2,1,0}$ = Konstanta pada persamaan keadaan Peng Robinson

$$c_2 = B - 1$$

$$= 0.007222 - 1$$

$$= -0.99278$$

$$c_1 = A - 2B - 3B^2$$

$$= 0.075986 - 2 \times 0.007222 - 3 \times 0.007222^2$$

$$= 0.061385$$

$$c_0 = AB - B^2 - B^3$$

$$= 0.075986 \times 0.007222 - 0.007222^2 - 0.007222^3$$

$$= 0.000496$$

- Determinan persamaan keadaan Peng Robinson

$$K = \frac{3c_2 - c_1^2}{3}$$

$$= \frac{3 \times (-0.99278) - 0.061385^2}{3}$$

$$= -0.99403$$

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

$$= \frac{2(-0.99278)^3 - 9(-0.99278)(0.061385) + 27(0.000496)}{27}$$

$$= 0.093818$$

$$D = \frac{K^3}{27} + \frac{L^2}{4}$$

$$= \frac{-0.99403^3}{27} + \frac{0.093818^2}{4}$$

$$= -0.03418$$

- Faktor kompresibilitas (Z)

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

$$= 1.322302$$

$$Z_1 = 2 \sqrt{\frac{-K}{3}} \cos \Phi - \frac{C_2}{3}$$

$$= 2 \sqrt{\frac{-(-0.99403)}{3}} \cos (1.322302) - \frac{(-0.99278)}{3}$$

$$= 0.61407$$

$$Z_2 = 2 \sqrt{\frac{-K}{3}} \cos (\Phi + 120) - \frac{C_2}{3}$$

$$= 2 \sqrt{\frac{-(-0.99403)}{3}} \cos (1.322302 + 120) - \frac{(-0.99278)}{3}$$

$$= -0.08644$$

$$Z_3 = 2 \sqrt{\frac{-K}{3}} \cos (\Phi + 240) - \frac{C_2}{3}$$

$$= 2 \sqrt{\frac{-(-0.99403)}{3}} \cos (1.322302 + 240) - \frac{(-0.99278)}{3}$$

$$= -0.63184$$

Faktor kompresibilitas yang digunakan untuk pembentukan hidrat campuran propana dan butana pada fasa gas dengan waktu ke 10 jam dan kecepatan putar 300 rpm sebesar 0.61407.

2. Volume gas

Volume gas pada *crystallizer* mengalami perubahan ketika mencapai temperatur kesetimbangan hidrat. Gas mencapai temperatur kesetimbangan pada waktu 0.5 jam. Ketika air sudah menjadi es seluruhnya, maka volumenya akan bertambah sebanyak 9% dari volume air. Volume gas ketika hidrat telah membentuk es seluruhnya adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V &= 0.0001 - (-0.000058164p + 0.00015461) \\
 &= 0.0001 - [-0.000058164 (0.258) + 0.00015461] \\
 &= 0.0000955 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

3. Konsumsi gas sesuai Persamaan 2-19

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{pV}{ZRT} \\
 &= \frac{(0.3 - 0.258) \times 10^6 \text{ Pa} \times 0.0000955 \text{ m}^3}{0.61407 \times 8.31447 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}} \times 274.604 \text{ K}} \\
 &= 0.002855 \text{ mol}
 \end{aligned}$$

4.2.2 Penguraian Hidrat Campuran Propana Butana

Contoh perhitungan penguraian gas pada waktu 5 jam adalah sebagai berikut:

1. Faktor kompresibilitas Peng Robinson

- Titik kritis propana dan butana

Tekanan kritis dan temperatur kritis propana dan butana ditunjukkan pada Tabel 4.1. Komposisi campuran adalah 50% propana dan 50% butana sehingga tekanan dan temperatur kritis yang digunakan, yaitu:

$$\begin{aligned}
 p_c &= \frac{P_{c,\text{propana}} + P_{c,\text{n-butana}}}{2} \\
 &= \frac{4.25 + 3.8}{2} \\
 &= 4.025 \text{ bar} \\
 T_c &= \frac{T_{c,\text{propana}} + T_{c,\text{n-butana}}}{2} \\
 &= \frac{370 + 425}{2} \\
 &= 397.5 \text{ K}
 \end{aligned}$$

- Tekanan tereduksi (p_r) dan temperatur tereduksi (T_r) campuran propana dan butana

$$\begin{aligned}
 p_r &= \frac{p_{t=5}}{p_c} \\
 &= \frac{0.002}{4.025}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{T_{t=300}}{T_c} \\ &= \frac{267.829}{397.5} \\ &= 0.673614 \end{aligned}$$

- Faktor asentrik (ω)

$$\begin{aligned} \omega &= -1 - \log p_r \\ &= -1 - \log 0.000497 \\ &= 2.303736 \end{aligned}$$

- Koefisien yang dipengaruhi p_r dan T_r (α)

$$\begin{aligned} \alpha &= \{1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.2699\omega^2)(1 - T_r^{0.5})\}^2 \\ &= \{1 + (0.37464 + 1.54226 \times 2.30374 - 0.2699 \times 2.30374^2)(1 - 0.67361^{0.5})\}^2 \\ &= 2.09464 \end{aligned}$$

- Persamaan keadaan Peng Robinson

$$\begin{aligned} A &= \frac{\Omega_a \alpha p_r}{T_r^2}; \Omega_a = 0.45724 \\ &= \frac{0.45724 \times 2.076152 \times 0.000497}{0.673614^2} \\ &= 0.001049 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{\Omega_b p_r}{T_r}; \Omega_b = 0.07779 \\ &= \frac{0.07779 \times 0.000497}{0.673614} \\ &= 0.000057 \end{aligned}$$

Bentuk persamaan keadaan Peng Robinson ditunjukkan pada persamaan 4-1.

$$\begin{aligned} c_2 &= B - 1 \\ &= 0.000057 - 1 \\ &= -0.99994 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_1 &= A - 2B - 3B^2 \\
 &= 0.001049 - 2 \times 0.000057 - 3 \times 0.000057^2 \\
 &= 0.000934
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_0 &= AB - B^2 - B^3 \\
 &= 0.001049 \times 0.004682 - 0.000057^2 - 0.000057^3 \\
 &= 0.0000001
 \end{aligned}$$

- Determinan persamaan keadaan Peng Robinson

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{3c_2 - c_1^2}{3} \\
 &= \frac{3 \times (-0.99994) - 0.000934^2}{3} \\
 &= -0.99994
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{2c_2^3 - 9c_2c_1 + 27c_0}{27} \\
 &= \frac{2(-0.99994)^3 - 9(-0.99994)(0.000934) + 27(0.0000001)}{27} \\
 &= 0.074377
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{K^3}{27} + \frac{L^2}{4} \\
 &= \frac{-0.99994^3}{27} + \frac{0.074377^2}{4} \\
 &= -0.03565
 \end{aligned}$$

- Faktor kompresibilitas (Z)

$$\begin{aligned}
 \Phi &= \cos^{-1} \left(-\sqrt{\frac{L^2/4}{K^3/27}} \right) \\
 &= 1.376319
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= 2 \sqrt{\frac{-K}{3}} \cos \Phi - \frac{C_2}{3} \\
 &= 2 \sqrt{\frac{-(-0.99994)}{3}} \cos(1.376319) - \frac{(-0.99994)}{3} \\
 &= 0.556458
 \end{aligned}$$

$$= 0.556458$$

$$Z_2 = 2 \sqrt{\frac{-K}{3}} \cos(\Phi + 120) - \frac{C_2}{3}$$

$$= 2 \sqrt{\frac{-(-0.99994)}{3}} \cos(1.376319 + 120) - \frac{(-0.99994)}{3}$$

$$= -0.14278$$

$$Z_3 = 2 \sqrt{\frac{-K}{3}} \cos(\Phi + 240) - \frac{C_2}{3}$$

$$= 2 \sqrt{\frac{-(-0.99994)}{3}} \cos(1.376319 + 240) - \frac{(-0.99994)}{3}$$

$$= -0.66509$$

Faktor kompresibilitas yang digunakan untuk stabilitas hidrat campuran propana dan butana pada fasa gas dengan waktu ke 5 jam dan kecepatan putar 300 rpm sebesar 0.556458.

2. Volume gas

Volume gas pada *crystallizer* mengalami perubahan ketika mencapai temperatur kesetimbangan hidrat. Gas mencapai temperatur kesetimbangan pada waktu 0.5 jam. Ketika air sudah menjadi es seluruhnya, maka volumenya akan bertambah sebanyak 9% dari volume air. Volume gas ketika hidrat telah membentuk es seluruhnya adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V &= 0.0001 - (-0.000058164p + 0.00015461) \\ &= 0.0001 - [-0.000058164 (0.258) + 0.00015461] \\ &= 0.0000955 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

3. Gas yang terurai sesuai Persamaan 2-19

$$\begin{aligned} n &= \frac{PV}{ZRT} \\ &= \frac{0.002 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0.0000955 \text{ m}^3}{0.556458 \times 8.31447 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}} \times 267.829 \text{ K}} \\ &= 0.0001541 \text{ mol} \end{aligned}$$

4.2.3 Kapasitas Penyimpanan Hidrat Campuran Propana Butana

Tabel 4.2 Perhitungan kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana butana

Parameter	Kecepatan putaran <i>crystallizer</i>		
	100 rpm	200 rpm	300 rpm
P_1 (MPa)	0.032	0.034	0.036
P_2 (MPa)	0.1	0.1	0.1
$\frac{V_1}{V_2}$ (V/V)	3.092	2.931	2.809

Kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana dan butana pada masing-masing kecepatan putaran *crystallizer* ditunjukkan pada Tabel 4.2. Perhitungan kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana dan butana menggunakan persamaan 4-2.

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (4-2)$$

dengan:

P_1 = Tekanan gas di dalam *crystallizer* yang telah terurai (MPa)

V_1 = Volume gas di dalam *crystallizer* (m^3)

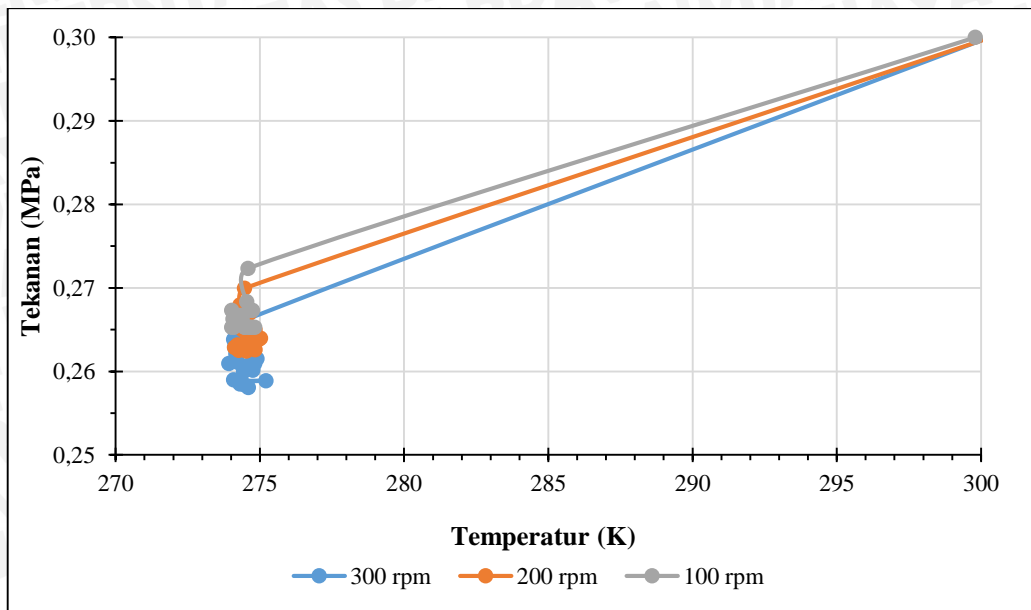
P_2 = Tekanan gas dalam keadaan standar (MPa)

V_2 = Volume gas dalam keadaan standar (m^3)

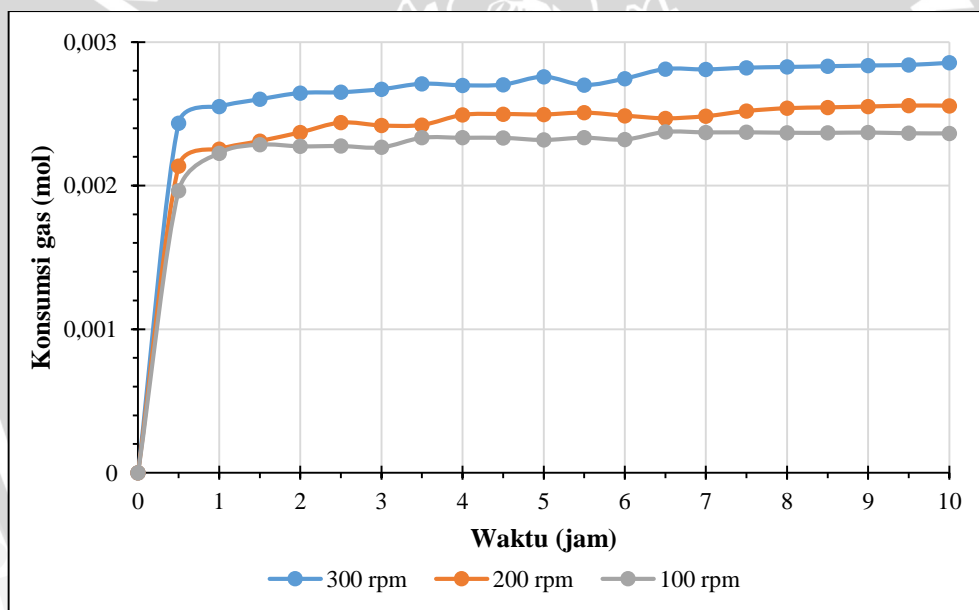
4.3 Pembahasan

4.3.1 Laju Pembentukan Hidrat Campuran Propana Butana

Pada Gambar 4.4 pembentukan hidrat mulai terjadi ketika temperatur sistem (molekul air dan molekul gas dalam *crystallizer*) telah mencapai temperatur kesetimbangan hidrat pada temperatur 274 K (1 °C). Pembentukan hidrat ditandai dengan adanya penurunan tekanan tanpa ada perubahan temperatur yang signifikan. Pada penurunan temperatur 300 K (27 °C) sampai 274 K (1 °C) hidrat belum terbentuk karena sistem masih dalam keadaan metastabil. Pada Gambar 4.1, sistem mulai membentuk hidrat pada waktu 0.5 jam karena sistem telah mencapai temperatur kesetimbangan hidrat. Gambar 4.4 yang merupakan profil tekanan pembentukan hidrat campuran propana butana memiliki karakteristik yang sama dengan profil tekanan pembentukan hidrat metana pada Gambar 2.10.



Gambar 4.4 Grafik hubungan temperatur dan tekanan gas di dalam *crystallizer* ketika pembentukan hidrat



Gambar 4.5 Grafik laju pembentukan hidrat campuran propana butana

Gambar 4.5 merupakan grafik hubungan waktu terhadap konsumsi gas propana dan butana pada saat pembentukan hidrat dengan variasi kecepatan putaran *crystallizer* sebesar 300, 200 dan 100 rpm. Laju pembentukan hidrat paling tinggi pada kecepatan putaran 300 rpm yang ditunjukkan oleh tingkat konsumsi gas campuran propana dan butana yang paling tinggi. Sedangkan laju pembentukan paling rendah pada kecepatan putaran 100 rpm yang ditunjukkan oleh konsumsi gas campuran propana dan butana yang lebih kecil dari kecepatan putaran 200 dan 300 rpm.

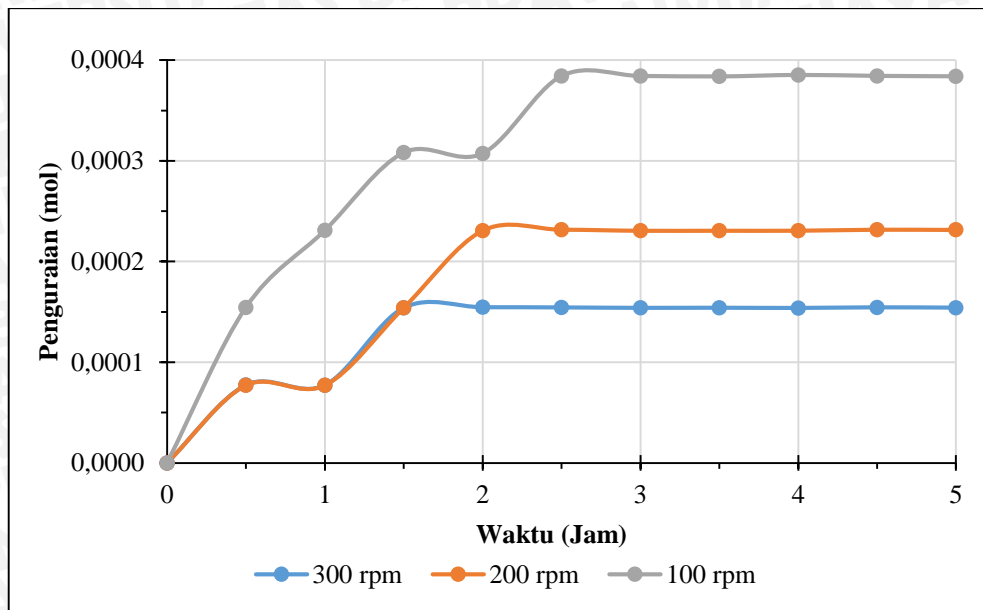
Laju pembentukan hidrat pada kecepatan putaran 300 rpm lebih tinggi disebabkan semakin besar kecepatan putaran *crystallizer* menyebabkan bidang kontak antara sistem dengan dinding *crystallizer* semakin besar. Laju perpindahan panas dari sistem menuju lingkungan (*cooling bath*) juga akan semakin besar karena perbedaan temperatur antara sistem dan lingkungan semakin tinggi. Sedangkan semakin kecil kecepatan putaran *crystallizer* menyebabkan bidang kontak antara sistem dengan dinding *crystallizer* semakin kecil. Laju perpindahan panas dari sistem menuju lingkungan (*cooling bath*) juga akan semakin kecil karena perbedaan temperatur antara sistem dan lingkungan semakin rendah.

Semakin tinggi kecepatan putaran *crystallizer* juga menyebabkan gaya sentrifugal sistem di dalam *crystallizer* semakin besar. Gaya sentrifugal pada *crystallizer* yang semakin besar menyebabkan perpindahan massa gas menuju rongga molekul air juga semakin tinggi sehingga gas semakin mudah larut dalam air. Sedangkan semakin rendah kecepatan putaran *crystallizer* menyebabkan gaya sentrifugal sistem di dalam *crystallizer* semakin kecil. Gaya sentrifugal pada *crystallizer* yang semakin kecil menyebabkan perpindahan massa gas menuju rongga molekul air juga semakin rendah sehingga gas semakin lama larut dalam air.

4.3.2 Stabilitas Hidrat Campuran Propana Butana

Gambar 4.6 menunjukkan hubungan waktu terhadap penguraian hidrat campuran propana dan butana dengan variasi kecepatan putaran *crystallizer* sebesar 300 rpm, 200 rpm dan 100 rpm. Hidrat campuran propana dan butana dengan kecepatan putaran sebesar 100 rpm lebih mudah terurai daripada kecepatan putaran sebesar 200 rpm dan 300 rpm. Sedangkan hidrat campuran propana dan butana dengan kecepatan putaran sebesar 100 rpm paling sedikit terurai pada temperatur 268 K.

Jika hidrat semakin mudah mengurai, maka hidrat tersebut memiliki stabilitas yang rendah. Sebaliknya, jika hidrat semakin sulit mengurai, maka stabilitas hidrat semakin tinggi. Stabilitas tertinggi ditunjukkan hidrat campuran propana dan butana dengan kecepatan putaran sebesar 300 rpm. Sedangkan stabilitas terendah ditunjukkan hidrat campuran propana dan butana dengan kecepatan putaran sebesar 100 rpm.



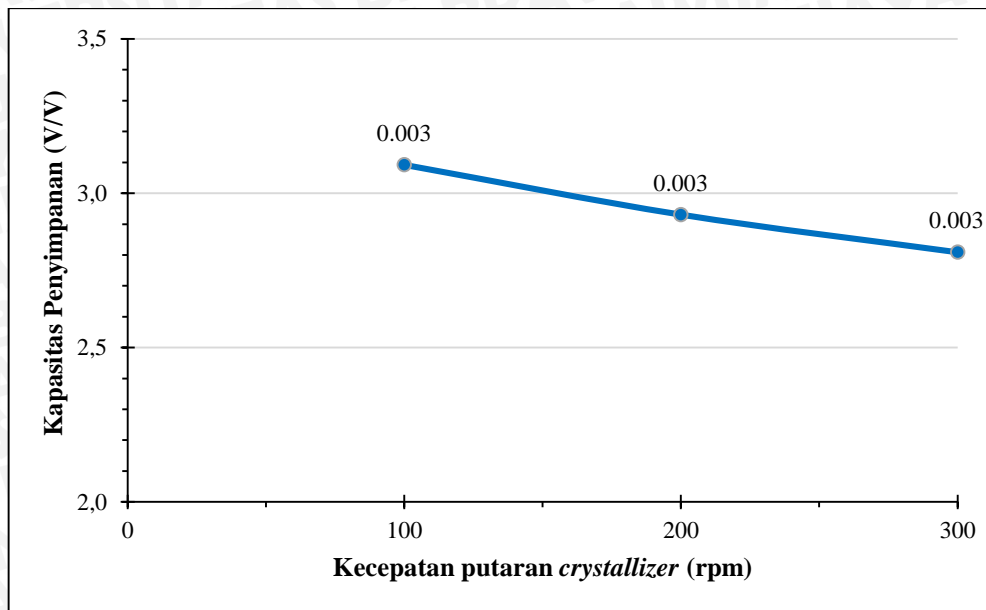
Gambar 4.6 Grafik laju penguraian hidrat campuran propana dan butana pada temperatur 268 K

Stabilitas hidrat dipengaruhi oleh dua faktor. Pertama, hidrat memiliki lapisan es di sekitar kristal hidrat yang menahan terjadinya penguraian lebih lanjut. Kedua, penguraian pada *crystallizer* terjadi pada sistem tertutup. Gas propana dan butana yang terurai membuat tekanan pada *crystallizer* meningkat. Peningkatan tekanan tersebut yang menghambat laju penguraian hidrat.

Hidrat pada kecepatan putaran *crystallizer* 300 rpm memiliki stabilitas yang lebih tinggi karena semakin tinggi laju perpindahan panas menyebabkan laju pendinginan hidrat gas semakin tinggi. Semakin tinggi laju pendinginan akan menyebabkan lapisan es yang mengelilingi hidrat semakin kuat sehingga lapisan es semakin tidak mudah mengurai dan hidrat dalam keadaan yang semakin stabil.

4.3.3 Kapasitas Penyimpanan Hidrat Campuran Propana Butana

Gambar 4.7 merupakan diagram kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana dan butana dengan variasi kecepatan putaran *crystallizer* sebesar 300, 200 dan 100 rpm. Kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana dan butana yang digunakan merupakan perbandingan antara volume gas dari hidrat yang terurai di dalam *crystallizer* dengan volume gas tersebut pada keadaan standar (tekanan 1 atm dan temperatur 27 °C). Kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana butana tertinggi sebesar 2.809 V/V pada variasi kecepatan putar *crystallizer* 300 rpm. Sedangkan kapasitas penyimpanan paling rendah sebesar 3.092 bar pada kecepatan putar 100 rpm.



Gambar 4.7 Diagram kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana dan butana.

Hidrat pada kecepatan putaran 300 rpm memiliki kapasitas penyimpanan yang paling tinggi karena semakin tinggi kecepatan putar *crystallizer*, semakin tinggi laju pembentukan hidrat campuran propana dan butana yang. Laju pembentukan hidrat yang tinggi ditunjukkan dengan konsumsi gas semakin tinggi. Sedangkan pada kecepatan putaran 100 rpm, memiliki kapasitas penyimpanan yang paling rendah meskipun memiliki rongga antar molekul air yang lebih luas daripada hidrat dengan kecepatan putaran 300 rpm. Tingkat konsumsi gas yang rendah pada hidrat dengan kecepatan putaran 100 rpm yang menyebabkan kapasitas penyimpanannya paling rendah.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilaksanakan sebelumnya, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pembentukan hidrat terjadi pada tekanan tinggi dan temperatur rendah. Untuk menanggulangi pembentukan hidrat pada peralatan industri maupun pada distribusi gas menggunakan saluran pipa dapat dilakukan pada tekanan tinggi dan temperatur tinggi atau tekanan rendah dan temperatur rendah sehingga hidrat gas tidak terbentuk.
2. Laju pembentukan, stabilitas dan kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana butana tertinggi pada pembentukan hidrat selama 10 jam adalah variasi kecepatan putaran *crystallizer* sebesar 300 rpm. hal ini dapat digunakan sebagai salah satu acuan pengembangan metode distribusi dan penyimpanan hidrat gas.

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilaksanakan sebelumnya, maka penulis menyampaikan beberapa hal yang perlu dikembangkan untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pembentukan hidrat dengan kapasitas maksimum dari penyimpanan hidrat dalam rongga molekul air.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh komposisi campuran propana butana dalam pembentukan hidrat, stabilitas dan kapasitas penyimpanan hidrat.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh larutan pengganti air pada hidrat campuran propana butana.

DAFTAR PUSTAKA

- Carroll, J. 2009. *Natural Gas Hydrates: A Guide for Engineers Second Edition*. Oxford: Elsevier.
- Cengel, Y. A. dan Boles, M. A. 2004. *Thermodynamics: An Engineering Approach 5th edition*. New York: Mc Graw-Hill Book.
- Cottrell, T. L. 1958. *The Strength of Chemical Bonds*. London: Butterworths Publication Ltd.
- Davidson, D. W. 1983. *Natural Gas Hydrates: Properties, Occurrence and Recovery*. Boston: Butterworths.
- Ganji, H., Manteghian, M., Zadeh, K. S., Omidkhah, M. R. dan Mofrad, H. R. 2007. Effect of Different Surfactants on Methane Hydrate Formation Rate, Stability and Storage Capacity. *Fuel*. 86:434-441.
- Jeffrey, G. A. dan McMullan, R. K. 1967. The Clathrate Hydrates. *Prog. Inorg. Chem.* 8: 43-108.
- Khokhar, A. A., Gudmundsson, J. S. dan Sloan E. D. 1998. Gas Storage in Structure H Hydrates. *Fluid Phase Equilibria*. 150-151:383-392.
- Larson, R., Makogan, T, Knight, C. dan Sloan, E. D. 1996. Growth and Imubition Phenomena of Single Hydrate Crystals. *Proc. Second International Conference on Gas Hydrates*. 1: 558-562.
- Latimer, W. M. dan Rodebush, W. H. 1920. Polarity and Ionization from The Standpoint Of The Lewis Theory of Valence. *J. Am. Chem. Soc.* 42: 14-19.
- Linga, P., Kumar, R., Lee, J. D., Ripmeester, J. dan Englezos, P. 2010. A New Apparatus to Enhance the Rate of Gas Hydrate Formation: Application to Capture of Carbon Dioxide. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 4:630-637.
- Mokhatab, S., Poe, W. A., and Speight, J. G. 2006. *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing*. Amsterdam: Elsevier.
- Rao, Y. V. C. 2003. *An Introduction to Thermodynamics – Revised Edition*. Kenpur: Universities Press
- Samant, K. D. dan O’Young, L. 2006. Understanding Crystallization and Crystallizers. *Solid/Liquid Separation*. 28-37.
- Sloan, E. D. dan Koh, C. A. 2008. *Clathrate Hydrates of Natural Gas: Third Edition*. New York: CRC Press.
- Speight, J. G. 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Texas: Gulf Publishing Company
- Stoll, R. D. dan Bryan, G. M. 1979. Physical Properties of The Sediments Containing Gas Hydrates. *J. Geophys. Res.* 84: 1629

Lampiran 1. Data hasil penelitian

t (jam)	300 rpm		200 rpm		100 rpm	
	T (K)	P (MPa)	T (K)	P (MPa)	T (K)	P (MPa)
FORMING						
0	300.280	0.300	300.332	0.300	299.798	0.300
0.5	274.092	0.266	274.316	0.270	274.552	0.272
1	274.121	0.264	274.644	0.268	274.620	0.268
1.5	274.172	0.263	274.506	0.267	274.741	0.267
2	274.827	0.262	274.403	0.266	274.023	0.267
2.5	274.901	0.262	274.489	0.265	274.690	0.267
3	273.920	0.262	274.833	0.265	274.075	0.267
3.5	274.712	0.261	275.022	0.265	274.385	0.266
4	274.827	0.261	274.971	0.264	274.196	0.266
4.5	274.437	0.261	274.574	0.264	274.385	0.266
5	274.247	0.260	274.919	0.264	274.276	0.266
5.5	274.758	0.261	274.592	0.264	274.345	0.266
6	274.092	0.260	274.574	0.264	274.465	0.266
6.5	275.212	0.259	274.644	0.264	274.827	0.265
7	274.276	0.259	274.230	0.264	274.506	0.265
7.5	274.311	0.259	274.126	0.263	274.741	0.265
8	274.327	0.259	274.351	0.263	274.638	0.265
8.5	274.311	0.259	274.833	0.263	274.023	0.265
9	274.483	0.258	274.264	0.263	274.660	0.265
9.5	274.604	0.258	274.540	0.263	274.092	0.265
10	300.280	0.258	300.332	0.262	299.798	0.265
STABILITY						
0	268.200	0.000	267.706	0.000	267.812	0.000
0.5	267.247	0.001	268.006	0.001	267.282	0.002
1	267.829	0.001	268.094	0.001	267.971	0.003
1.5	268.200	0.002	267.847	0.002	267.476	0.004
2	267.106	0.002	268.165	0.003	268.235	0.004
2.5	267.459	0.002	267.018	0.003	268.200	0.005
3	268.165	0.002	268.235	0.003	267.971	0.005
3.5	267.971	0.002	268.200	0.003	268.306	0.005
4	268.306	0.002	268.165	0.003	267.247	0.005
4.5	267.247	0.002	267.018	0.003	267.900	0.005
5	267.829	0.002	267.282	0.003	268.200	0.005
STORAGE CAPACITY						
-	298.707	0.036	298.707	0.034	298.673	0.032

Lampiran 2. Komposisi *Liquid Petroleum Gas* (LPG)

