PENGARUH VARIASI TEMPERATUR *COOLING BATH* TERHADAP KARAKTERISTIK HIDRAT GAS CAMPURAN PROPANA BUTANA PADA TEKANAN 3 BAR

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh:

REZZA PRATAMA

NIM. 135060201111009

KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

JURUSAN MESIN

MALANG

2017

Repository Universitas Brawijaya

PENGARUH VARIASI TEMPERATUR *COOLING BATH* TERHADAP KARAKTERISTIK HIDRAT GAS CAMPURAN PROPANA BUTANA PADA TEKANAN 3 BAR

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh:

REZZA PRATAMA

NIM. 135060201111009

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.	**Francisca Gayuh Utami Dewi, ST., MT**
NIP. 19750802 199903 2 002	**NIP. 201103820919 2 001**

Ketua Program Studi S1

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

JUDUL SKRIPSI

Pengaruh Variasi Temperatur *Cooling Bath* Terhadap Karakteristik Hidrat Gas Campuran Propana Butana Pada Tekanan 3 Bar

Nama Mahasiswa : Rezza Pratama

NIM : 135060201111009

Program Studi : Teknik Mesin

Minat : Teknik Konversi Energi

KOMISI PEMBIMBING

Dosen Pembimbing 1 : Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.

Dosen Pembimbing 2 : Francisca Gayuh Utami, ST., MT.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Ir. Hastono, MT.

Dosen Penguji 2 : Ir. Erwin Sulistyo, MT.

Dosen Penguji 3 : Purnami, ST., MT.

Tanggal Ujian : 7 Juni 2017

SK Penguji : 645/UN10.6/SK/2017

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas didalam naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan orang lain untuk memperoleh gelar akademik disuatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebarkan sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam naskah skripsi ini dap[at dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70)

Malang, 5 Juli 2017
Mahasiswa,

Rezza Pratama
NIM. 135060201111009

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadapan Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul ”Pengaruh Variasi Temperatur *Cooling Bath* Terhadap Karakteristik Hidrat Gas Campuran Propana Butana pada tekanan 3 bar” sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi di Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya dan sebagai syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu hingga terselesaikannya skripsi ini, terutama kepada :

1. Ibu dan bapak saya tercinta, yang selalu memberikan kasih sayang, cinta, doa, motivasi, kepercayaan, dan dukungan kepada penulis. Jatuh, bangun, susah, senang, menang, kalah, tetap pengabdianku hanya untuk keluarga.
2. Bapak Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST.,M.Eng. selaku Ketua Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang dan yang telah membantu memberikan pengarahan selama proses penyusunan skripsi ini.
3. Ibu Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST.,MT. selaku Dosen Pembimbing dan Ketua Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang yang telah memberikan pengarahan, ilmu dan bimbingan selama proses penyusunan skripsi ini.
4. Ibu Francisca Gayuh Utami Dewi, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing dan Ketua Kelompok Dosen Konsentrasi Konversi Energi, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang yang telah memberikan pengarahan, ilmu dan bimbingan selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku dosen wali yang telah memberikan pengarahan dalam menempuh perkuliahan pada setiap semesternya.
6. Seluruh Dosen Pengajar dan Staf Administrasi Jurusan Mesin dan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan yang sangat mendukung baik dalam perkuliahan maupun selama penyusunan skripsi ini.
7. 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.

8. Adik saya Via Halida Adzani yang telah memberi motivasi, semangat dan doa kepada penulis.
9. Enissita Ninditya Mahesaba yang selalu memberi motivasi, dukungan, semangat, kasih sayang nasehat dan doa kepada penulis
10. Keluarga besar Laboratorium Fenomena Dasar Mesin Mas Gede, Mas Januar, Mas Ragang, Mas Indra, Mba Endang, Ayu, Reza, Bayu, Unggar, Satrio, Bara, TA, Jeki, Putri, Natasha, Moniq, Ilham, Arul, Dono atas doa, semangat dan dukungannya kepada penulis.
11. Saudara seperjuangan "M13" yang telah menjadi keluarga dan memberikan banyak pelajaran dan nasehat kepada saya. Semoga kita selalu diberi kemudahan, kelancaran dan kekuatan.
12. Saudari Ilham Ayu Putri, Reza Naufal Azami yang telah membantu dan memberi semangat dalam penyelesaian skripsi ini.
13. Seluruh Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
14. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu**.**

Penulis menyadari bahwa skipsi ini masih banyak kekurangan, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak agar terciptanya karya tulis yang lebih baik . Semoga skripsi ini memberikan manfaat bagi pembaca dan menjadi bahan acuan untuk penelitian selanjutnya.

Malang, Juni 2017

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 5
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 9
2.3.1.3 Struktur Kubus Heksagonal 9
2.3.2 Perbedaan Struktur Hidrat Gas Alam Dengan Es 10
2.4 Gas Alam 12
2.4.1 Gas Butana 13
2.4.2 Gas Propana 14
2.4.3 *Liquified Petroleum Gas* 14
2.5 Pembentukan Hidrat 14
2.6 Pertumbuhan Hidrat 17
2.7 Penguraian Hidrat 19
2.8 Gas Ideal dan Teori Kinetika Molekul Gas 21
2.8.1 Gas Ideal 21

2.8.2 Persamaan Gas Ideal 21
2.8.3 Persamaan Gas Nyata 22
2.8.4 Konsep Mol 27
2.9 Perpindahan Panas 27
2.10 Hipotesa 30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 31
3.1 Metode Penelitian 31
3.2 Tempat Dan Waktu Penelitian 31
3.3 Variabel Penelitian 31
3.4 Alat dan Bahan Penelitian 31
3.4.1 Bahan Penelitian 31
3.4.2 Alat Penelitian 33
3.5 Instalasi Alat Penelitian 36
3.6 Prosedur Penelitian 36
3.6.1 Persiapan Penelitian 36
3.6.2 Pengambilan Data 36
3.6.2.1 Laju Pembentukan Hidrat 36
3.6.2.2 Penguraian Hidrat 36
3.6.2.3 Kapasitas Penyimpanan Hidrat 36
3.6.2.4 Nilai Mol Gas di Dalam *Crystallizer* 38
3.6.3 Pengolahan Data 38
3.6.3.1 Laju Pembentukan Hidrat 38
3.6.3.2 Penguraian Hidrat 38
3.6.3.3 Kapasitas Penyimpanan Hidrat 38
3.7 Diagram Alir Penelitian 39
BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN 40
4.1 Pengolahan Data 40
4.2 Data Hasil Pengujian 40
4.2.1 Data Laju Pembentukan Gas Hidrat Propana Butana 40
4.2.2 Data Stabilitas Gas Hidrat Propana Butana 43
4.2.3 Data Kapasitas Penyimpanan Gas Hidrat Propana Butana 45
4.3 Contoh Perhitungan 46
4.3.1 Perhitungan Mol Konsumsi Gas Propana Butana pada Laju Pembentukan Hidrat 46

4.3.2 Perhitungan Volume Kapasitas Penyimpanan Hidrat 51
4.4 Pembahasan 53
4.4.1 Analisa Laju Pembentukan Hidrat Propana Butana dengan Variasi Temperatur *Cooling bath* 53
4.4.1.1 Analisa Grafik Hubungan Antara Tekanan dan Temperatur Gas Pada Saat Laju Pembentukan Hidrat.... 53
4.4.1.2 Analisa Grafik Hubungan Antara Konsumsi Gas dan Waktu Pada Saat Laju Pembentukan Hidrat 55
4.4.2 Analisa Stabilitas Hidrat Propana Butana dengan Variasi Temperatur *Cooling bath* 56
4.4.2.1 Analisa Grafik Hubungan Gas Terurai dan Waktu Pada Saat Stabilitas Hidrat..... 56
4.4.3 Analisa Kapasitas Penyimpanan Hidrat Propana Butana dengan Variasi Temperatur *Cooling bath*
4.4.3.1 Analisa Diagram Kapasitas Penyimpanan Hidrat Teoritis dan Aktual 57
4.4.4 Analisa Validasi Perbandingan antara Konsumsi Gas Teoritis Perhitungan dan Konsumsi Gas Aktual Hidrat Pengukuran dengan Waktu..... 58
4.4.1.1 Analisa Grafik Validasi Perbandingan antara Konsumsi Gas Teoritis Perhitungan dan Konsumsi Gas Aktual Hidrat Pengukuran dengan Waktu 58

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 62
5.1 Kesimpulan 62
5.2 Saran 62
DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Nomer	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Diagram fase beberapa gas alam hidrokarbon yang membentuk hidrat	6
Gambar 2.2	Struktur kristal hidrat (a) struktur kubus I, (b) struktur kubus II, (c) struktur heksagonal	7
Gambar 2.3	Struktur kubus I, (a) Dodekahedron, (b) tetrakaidekahedron	9
Gambar 2.4	Struktur kubus II, (a) dodekahedron (b) heksakaikahedron	9
Gambar 2.5	Penyusun struktur heksagonal (a) dodekahedron, (b) dodekahedron tidak beraturan, (c) ikosahedron tidak beraturan.	10
Gambar 2.6	Perbedaan struktur es dan hidrat	10
Gambar 2.7	Konduktivitas termal dari gas, air, es dan hidrat.	12
Gambar 2.8	Pengaruh waktu terhadap konsumsi gas pada pembentukan hidrat	15
Gambar 2.9	Garis hubungan tekanan dan temperatur pada hidrat metana sederhana	16
Gambar 2.10	Mekanisme pertumbuhan kristal hidrat	17
Gambar 2.11	Kristal hidrat tunggal etilen oksida (sI)	19
Gambar 2.12	Kristal hidrat tunggal tetrahidrofuran (sII)	19
Gambar 2.13	Disosiasi radial	20
Gambar 2.14	Disosiasi aksial	20
Gambar 3.1	Instalasi alat penelitian	34
Gambar 3.2	Langkah persiapan penelitian	35
Gambar 3.3	Diagram alir penelitian	38
Gambar 4.1	Grafik hubungan antara tekanan gas di dalam *crystallizer* terhadap waktu ketika pembentukan hidrat	41
Gambar 4.2	Kinetika Pembentukan Hidrat	42
Gambar 4.3	Grafik hubungan antara temperatur gas dalam *crystallizer* terhadap waktu pada saat pembentukan hidrat	43
Gambar 4.4	Grafik hubungan antara tekanan gas dalam *crystallizer* terhadap waktu pada saat stabilitas hidrat	44
Gambar 4.5	Grafik hubungan antara temperatur gas dalam *crystallizer* terhadap waktu pada saat stabilitas hidrat	44
Gambar 4.6	Diagram Tekanan yang terdekomposisi pada saat Kapasitas Penyimpanan Hidrat	45

Gambar 4.7 Grafik Hubungan Antara Tekanan dan Temperatur Gas Pada Saat Laju Pembentukan Hidrat 53
Gambar 4.8 Grafik Hubungan Antara Konsumsi Gas dan Waktu Pada Saat Laju Pembentukan Hidrat 55
Gambar 4.9 Grafik Hubungan Gas Terurai dan Waktu Pada Saat Stabilitas Hidrat 56
Gambar 4.10 Diagram Kapasitas Penyimpanan Hidrat Teoritis dan Aktual 57
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan antara Konsumsi Gas Teoritis dan Konsumsi Gas Aktual Hidrat dengan Waktu 58
Gambar 4.12 Grafik nilai k pada fase pertama 59
Gambar 4.13 Grafik nilai k pada fase kedua 59

DAFTAR TABEL

Nomer **Judul** **Halaman**

Tabel 2.1 Perbandingan struktur kubus I, struktur kubus II dan struktur heksagonal 8
Tabel 2.2 Perbandingan proferti s es dengan struktur kubus I dan II 12
Tabel 2.3 Karakteristik umum dari gas alam.....13
Tabel 2.4 Konstanta pada masing-masing persamaan keadaan gas nyata 27
Tabel 4.1 Laju pembentukan Gas hidrat propane butana 43
Tabel 4.2 Stabilitas Gas Hidrat Propana Butana.....44
Tabel 4.3 Kapasitas Penyimpanan Gas Hidrat Propana Butana 45
Tabel 4.4 Tekanan kritis (Pc) dan temperatur kritis (T_c) propana butana 46

DAFTAR LAMPIRAN

Nomer **Judul**

Lampiran 1. Data Hasil Pengujian

Lampiran 2. Komposisi Liquified Petroleum Gas (LPG)

Repository Universitas Brawijaya

RINGKASAN

Rezza Pratama, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Mei, 2017, *Pengaruh Temperatur Cooling Bath Terhadap Karakteristik Hidrat Gas Campuran Propana Butana Pada Tekanan 3 Bar*, Dosen Pembimbing: Widya Wijayanti dan Francisca Gayuh Utami

Salah satu energi terbarukan yang ada ialah *Natural Gas Hydrate* (NGH). *Natural Gas Hydrate* (NGH) adalah campuran dari gas alam dengan air yang terjadi pada tekanan tinggi dan temperatur diatas titik beku air. Hidrat akan berbentuk es yang didalamnya terdapat rongga yang diisi oleh gas yang menyusun hidrat itu sendiri. Gas penyusun hidrat ini sendiri kita sebut sebagai klatrat. Hidrat dapat terbentuk karena adanya gas dan air dengan tekanan yang tinggi dan mempunyai temperatur diatas titik beku air, kemudian terkena gaya yang dapat melarutkan gas alam didalam air. Semakin rendah temperatur yang membentuk hidrat akan meningkatkan laju pembentukan, dan stabilitas hidrat. Namun akan mengurangi nilai kapasitas penyimpanan hidrat yang semakin sedikit.

Variabel bebas pada penelitian ini adalah temperature *cooling bath* sebesar 271 K, 273 K, 275 K. Dalam setiap variasi akan dilakukan dalam kurun waktu selama 10 jam. Dengan pengambilan data tekanan dan temperature setiap 15 menit.

Hasil penelitian menunjukan bahwa variasi temperatur *cooling bath* 271 K menunjukan hasil yang paling baik pada laju pembentukan dan stabilitas hidrat. Sedangkan temperatur *cooling bath* 275 K memiliki nilai paling besar untuk kapasitas penyimpanan hidrat dengan nilai 0.4655 V/V.

Kata Kunci : *Hydrate*, Gas hidrat, Propana butana, Temperatur, Laju pembentukan.

SUMMARY

Rezza Pratama, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, May, 2017, Effect of Cooling Bath Temperature on Hydrate Gas Proprietary Characteristic of Butane Propane At 3 Bar Pressure, Supervisor: Widya Wijayanti and Francisca Gayuh Utami

One of the existing renewable energy is Natural Gas Hydrate (NGH). Natural Gas Hydrate (NGH) is a mixture of natural gas with water that occurs at high pressures and temperatures above the freezing point of water. Hydrates will be ice-shaped in which there is a cavity filled by the gas that makes up the hydrate itself. This hydrate constituent gas itself we refer to as clathrate. Hydrates can form due to the presence of gas and water with high pressure and have temperatures above the freezing point of water, then exposed forces that can dissolve natural gas in water. The lower the temperature that makes up the hydrate will increase the rate of formation, and hydrate stability. But it will reduce the value of hydrate storage capacity is getting less.

The independent variables in this study are temperature cooling bath of 271 K, 273 K, 275 K. In each variation will be done in the period for 10 hours. With taking pressure and temperature data every 15 minutes.

The results showed that the temperature variation of cooling bath 271 K showed the best result at the rate of formation and hydrate stability. While the temperature of 275 K cooling bath has the greatest value for hydrat storage capacity with a value of 0.4655 V / V.

Keywords: hydrate, gas hydrate, butane propane, temperature, rate of formation.

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi adalah hal yang penting dan tidak dapat dilepaskan perannya dalam kehidupan masyarakat Indonesia. Belakangan ini hampir semua aktivitas manusia sangat bergantung pada energi. Bermacam-macam mesin pendukung telah dibuat untuk memudahkan kerja manusia seperti alat penerangan, motor penggerak, peralatan rumah tangga. Namun mesin-mesin pembantu kerja manusia pun dapat digunakan jika ada energi. Energi dapat kita bagi menjadi dua kelompok besar, yaitu energi terbarukan dan energi yang tersedia pada alam. Energi terbarukan meliputi energi air, listrik, dan juga enerhi matahari. Sedangkan energi yang tersedia pada alam yaitu yang berasal dari fosil dan batubara. Dikarenakan adanya program energi terbarukan ini sendiri, masyarakat mulai berlomba-lomba untuk menciptakan energi terbarukan dengan mengutamakan 3P yaitu *Profit, People,* dan *Pollution*. Salah satu energi terbarukan yang ada ialah *Natural Gas Hydrate* (NGH). *Natural Gas Hydrate* (NGH) adalah campuran dari gas alam dengan air yang terjadi pada tekanan tinggi dan temperatur diatas titik beku air. Hidrat akan berbentuk es yang didalamnya terdapat rongga yang diisi oleh gas yang menyusun hidrat itu sendiri. Gas penyusun hidrat ini sendiri kita sebut sebagai klatrat. Hidrat dapat terbentuk karena adanya gas dan air dengan tekanan yang tinggi dan mempunyai temperatur diatas titik beku air, kemudian terkena gaya yang dapat melarutkan gas alam didalam air.

Hidrat sendiri dapat ditemukan sebagai masalah pada produksi, pengolahan, dan transportasi gas alam dan cairan yang asalnya dari gas alam adalah formasi hidrat (Caroll, 2009). Didalam saluran pipa gas yeng mempunyai tekanan tinggi sangat memungkinkan terbetuknya gas hidrat. Terbentuknya gas hidrat ini disebabkan adanya air bebas didalam saluran pipa. Air bebas tersebut akan membeku seiring dengan menurunnya temperatur dan akan menjadi butir-butir kristal es.

Selain penyebab permasalahan yang terjadi gas hidrat juga bisa dikembangkan sebagai penyimpanan gas. Banyak penelitian tentang gas hidrat yang sudah dilakukan, salah satunya seperti yang diteliti Genji, *et al* (2007) mengenai karakteristik hidrat pada tahap pembentukan, stabilitas dan kapasitas sebagai penyimpanan hidrat metana. Tapi untuk di Indonesia sendiri gas metana tidak begitu banyak digunakan oleh masyarakat, kebanyakan gas yang dikonsumsi oleh masyarakat Indonesia adalah LPG. Seperti yang kita ketahui LPG

terdiri atas gas propana dan gas butana sebagai penyusun utamanya. Sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut tentang gas hidrat yang mengguankaan LPG sebagai gas penyusun hidrat atau yang disebut klarat.

Temperatur dan tekanan memiliki peran yang besar dalam pembentukan hidrat. Maka dari itu diperlukan adanya penelitian lebih lanjut tentang pengaruh temperatur dan tekanan terhadap karakteristik hidrat. Dimana karakteristik hidrat meliputi laju pembentukan, stabilitas, dan kapasitas penyimpanan. Pada penelitian sebelumnya yang sudah diteliti Rediasa, (2016) telah menemukan hasil karakterisitik hidrat maksimal pada temperatur 0 derajat dan tekanan pada 2 bar.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dibahas sebelumnya, dapat dirumuskan sebuah permasalahan yaitu bagaimana pengaruh temperatur pembentukan hidrat terhadap, stabilitas dan kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana butana pada tekanan 3 bar.

1.3 Batasan Masalah

Agar rumusan permasalahan yang dibahas lebih terfokuskan dan penelitian yang dilaksanakan mencapai tujuan yang lebih terarah, maka penulis memberikan beberapa batasan-batasan masalah sebagai berikut ini:

1. Perilaku gas nyata diaplikasikan pada gas hidrat propana dan butana.
2. Tidak terjadi kebocoran pada *crystallizer* saat pengujian dilaksanakan.
3. Selama pengujian dilaksanakan tekanan didalam *crystallizer* dianggap tidak berubah atau konstan.
4. Toleransi pada temperatur *cooling bath* $\pm 0.3^{o}$ C
5. Kapasitas penyimpanan hidrat bukan berarti kapasitas penyimpanan maksimum hidrat.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari diadakannya penelitian ini adalah

Mengetahui pengaruh temperatur pembentukan hidrat terhadap, stabilitas dan kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana butana pada tekanan 3 bar.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

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

BAB II
KAJIAN PUSTAKA

2.1 Penelitian sebelumnya

Ganji, *et al* (2007) dalam penelitiannya tentang pengaruh dari surfaktan anion, kation dan non-ion pada laju pembentukan, stabilitas dan kapasitas penyimpanan hidrat metana. Setiap surfaktan diuji dengan konsentrasi 300, 500 dan 1000 ppm. Dalam penelitiannya tentang cepat laju pembentukan hidrat metana, 75 cm^3 air murni dicampurkan dengan surfaktan kemudian direaksikan dengan gas metana pada tekanan 8.3 Mpa dan temperatur sebesar 298.2 K dengan kecepatan putar pengaduk 200 rpm. Pada penelitian kapasitas penyimpanan hidrat metana, hidrat yang tersisa setelah penelitian stabilitas hidrat, sistem didiamkan sampai mencapai temperatur ruangan sehingga hidrat melepas gas metana yang terperangkap di dalamnya. Sedangkan pada penelitian stabilitas hidrat metana, hidrat yang sudah terbentuk dibiarkan selama 10 jam pada temperatur sebesar 268.2 K. Setelah dibiarkan sampai titik kesetimbangan 3 fase, katup gas dibuka yang mempunyai tujuan untuk mengeluarkan gas sisa metana yang tidak menjadi hidrat, kemudian katup ditutup kembali.

Khokhar, *et al* (1998) dalam penelitiannya mengenai penyimpanan gas hidrat pada struktur hidrat heksagonal menunjukkan bahwa penyimpanan gas metana pada hidrat terlihat sangat menguntungkan pada struktur hidrat heksagonal daripada struktur hidrat I maupun II ketika gas metana menempati rongga kecil.

Ony, (2015) dalam penelitianya tentang pengaruh tekanan terhadap laju pembentukan, stabilitas dan penyimpanan hidrat. Data yang diambil pada temperatur pembentukan hidrat yaitu sebesar 273 K. Dengan tekanan pembentukan sebesar 0.2 Mpa, 0.3 Mpa, dan 0.4 Mpa. Diperoleh bahwa tekanan 0.4 Mpa menjadikan laju pembentukan hidrat semakin cepat daripada yang lainya.

Syahirul, (2015) dalam penelitianya tentang pengaruh putaran *cristallyzer* terhadap karakteristik pembentukan hidrat. Dalam penelitianya putaran *cristallyzer* yang digunakan adalah sebesar 100 rpm, 200 rpm dan 300 rpm pada temperatur pembentukan 274 K. Dan didapatkan semakin besar putaran *cristallyzer*nya maka karakteristik laju pembentukan hidrat akan semakin cepat.

Gede, (2016) dalam penelitiannya tentang pengaruh temperatur terhadap karakteristik pembentukan hidrat. Dalam penenelitiannya temperatur pembentukan yang digunakan adalah sebesar 277 K, 275 K, 273 K, 271 K, 269 K pada tekanan sebesar 0.2 Mpa dan putaran

cristallyzer sebesar 200 rpm. Dan didapatkan karakteristik laju pembentukan hidrat paling baik pada temperatur 269 K.

2.2 Hidrat Gas Alam

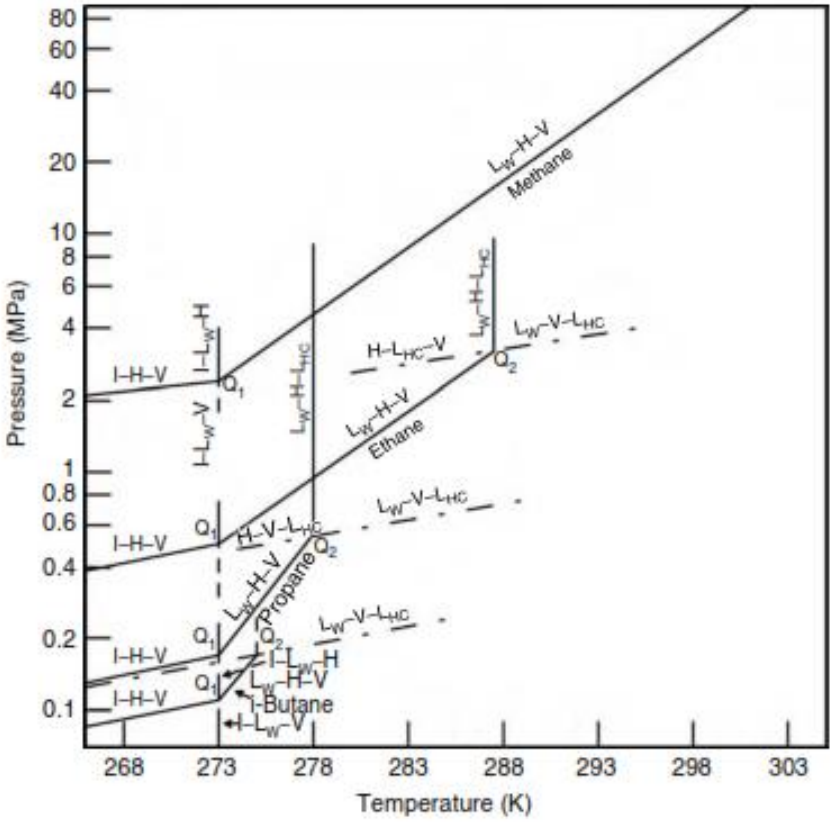
Hidrat gas alam ialah campuran dari gas dan air yang berbentuk kristal es padat yang disebabkan adanya tekanan tinggi dan temperatur yang rendah. Molekul air yang ada di kristal es akan memiliki ikatan hidrogen sehingga akan membentuk kerangka yang mempunyai rongga. Didalam rongga antara molekul air terdapat molekul gas yang terperangkap pada berbgai macam bentuk dan ukuran. (Ganji, 2007).

Gas yang terperangkap dalam rongga molekul air tersebut disebut dengan klarat. Klarat merupakan senyawa kimia inklusi dimana molekul kimia terperangkap didalam rongga molekul kristal es (Webster, 1994). Meolekul gas alam yang paling sering ditemukan pada hidrat adalah propana, etana, butana, metana dan karbon dioksida.

Pada industry gas alam, khususnya pada pendistribusian gas yang menggunakan operasi pipa dengan tekanan tinggi sangat memungkinkan terbentuknya gas hidrat. Temperatur yang rendah akan menyebabkan didalam saluran pipa akan terbentuk air. Jika dibiarkan maka air tersebut akan membeku dan menyumbat saluran pipa. Kecuali pada kondisi dimana temperatur tidak mencapai temperatur titik beku air.

Hidrat gas alam mempunyai tiga macam struktur utama, yaitu; Struktur I, struktur II dan struktur H. Dari ketiga struktur yang ada memiliki susunan yang berbeda dari ikatan molekul air sehingga menghasilkan bentuk, ukuran, dan rongga yang berbeda pula. Formasi struktur yang terbentuk sangat bergantung pada berbagai aspek gas tamu yang terjebak didalam molekul air.

Agar hidrat gas alam dapat terbentuk pada setiap gas memiliki temperatur dan tekanan yang berbeda-beda. Dapat kita lihat pada gambar 2.1 menunjukan diagram fasa pembentukan gas hidrat pada beberapa hidrokarbon. Pada gambar 2.1, H adalah hidrat, I adalah es, V adalah uap, L_w adalah fase cair air, L_{HC} adalah fase cair hidrokarbon, Q_1 adalah titik *quadruple* bawah dan Q_2 adalah titik *quadruple* atas. Setiap gas alam, daerah terbentuknya hidrat berada disebelah 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 fase gas dalam kondisi uap atau cair.



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

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

2.3 Struktur Hidrat Gas Alam

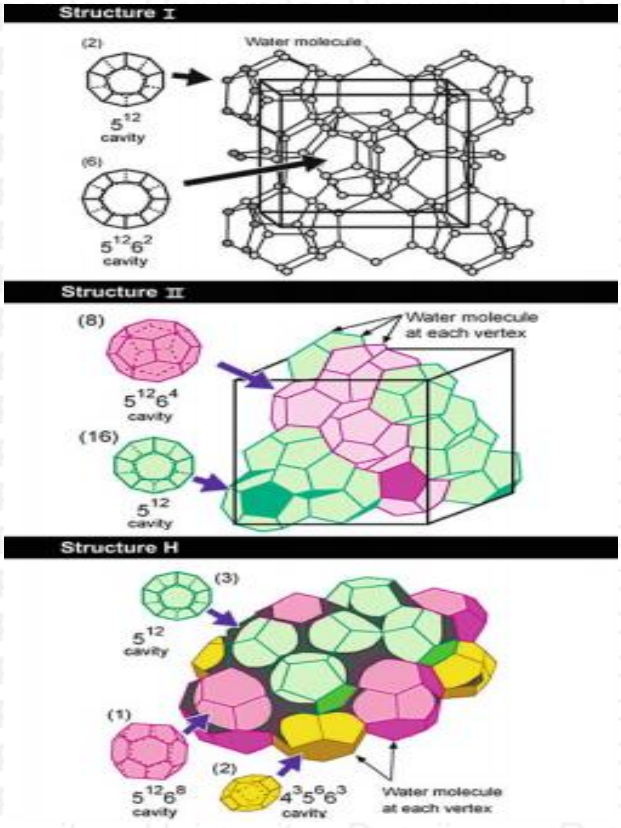
2.3.1 Macam-macam Struktur Molekul Hidrat Gas Alam

Hidrat terbentuk dari molekul gas dan molekul air yang terikat sehingga dapat menyebabkan terbentuknya rongga 3 dimensi yang terkoneksi antar molekul air. Keadaan ini akan membentuk struktur kristal yang berongga dan didalamnya akan ditempati oleh

molekul tamu. Hidrat dapat diklasifikasikan berdasarkan molekul air yang membentuk kristal es (Carrol, 2009).

Ada tiga jenis struktur kristal penyusun hidrat gas alam yaitu struktur kubus I, struktur kubus II dan struktur heksagonal yang sekitar 85% penyusunya adalah air, sehingga sebagian besar sifatnya mirip seperti es. Ada dua jenis struktur penyusun hidrat yaitu struktur hidrat sederhana dan struktur hidrat kompleks. Struktur kubus I dan struktur kubus II merupakan struktur hidrat sederhana sedangkan struktur heksagonal merupakan struktur hidrat kompleks.

Meskipun struktur heksagonal adalah struktur yang paling komplek, namun struktur I dan struktur II masih dianggap paling penting (Birkedal, 2009). Karena struktur heksagonal adalah ilmu yang baru berkembang dan struktur tersebut belum begitu sering ditemukan di alam.



Gambar 2.2 Struktur kristal hidrat. (a) struktur kubus I, (b) struktur kubus II, (c) struktur heksagonal
Sumber: Thakur (2011,p.55)

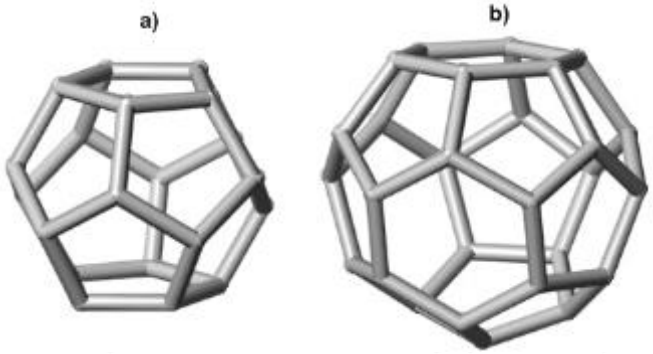
Tabel 2.1
Perbandingan struktur kubus I, struktur kubus II dan struktur heksagonal.

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]	$a = 12$ Å $\alpha = \beta = \gamma = 90°$		$a = 17.3$ Å $\alpha = \beta = \gamma = 90°$		$a = 12.2$ Å $c = 10.1$ Å $\alpha = \beta = 90°, \gamma = 120°$	
Ideal unit cell formula	$6(5^{12}6^2) \cdot 2(5^{12}) \cdot 46H_2O$		$8(5^{12}6^4) \cdot 16(5^{12}) \cdot 136H_2O$		$1(5^{12}6^8)$ $3(5^{12}) \cdot 2(4^35^66^3) \cdot 34H_2O$	
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)	6, $\bar{4}$ 2 m	$5^{12}6^4$ (b)	8, $\bar{4}$ 3 m	$5^{12}6^8$	1, 6/mmm
	5^{12} (a)	2, m3	5^{12} (c)	16, $\bar{3}$ m	5^{12} (g)	3, mmm
					$4^35^66^3$	2, $\bar{6}$ m2
	O(c)	6, $\bar{4}$ 2 m	O(a)	8, $\bar{4}$ 3 m	O(o),	12, m
	O(i)	16, 3 m	O(e)	32, 3 m	O(h)	4, 3 m
	O(k)	24, m	O(g)	96, m	O(n)	12, m
					O(m)	6, mm2
	(1/2 H) (i)	16, 3	2(1/2 H) (e)	32, 3 m	X(1/2 H)	
	3(1/2 H) (k)	24, m	3(1/2 H) (g)	96, m	X(1/2 H)	
	2(1/2 H) (l)	48, 1	(1/2 H) (i)	192, m	X(1/2 H)	

Sumber: Sloan (2008,p.60)

2.3.1.1 Struktur Kubus I

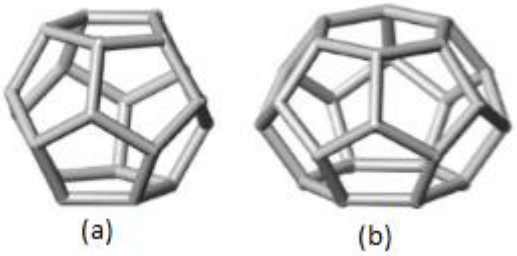
Struktur kubus I memiliki 46 molekul air dan terbuat dari kisi kubus primitif dengan berbagai parameter seperti tabel 2.1. Struktur kubus I merupakan struktur kubus yang paling sederhana. Struktur kubus I terdiri oleh dua pentagonal dodekahedron dan enam tetrakaidekahedron, total delapan polyhedra per sel kristal. Dodekahedron merupakan polihedron yang mempunyai 12 sisi yang tiap sisinya berbentuk segilima beraturan. Dan struktur tetrakaidekahedron merupakan polihedron yang mempunyai 14 sisi dengan 12 sisi pentagonal dan 2 sisi heksagonal.



Gambar 2.3 Struktur kubus I, (a) Dodekahedron, (b) tetrakaidekahedron
Sumber: Birkedal (2009,p.30)

2.3.1.2 Struktur Kubus II

Struktur kubus II mempunyai struktur yang lebih kompleks daripada struktur kubus I. Pada struktur ini dibuat oleh 16 dodekahedron pentagonal dan delapan heksakaidekahedron dan total 136 molekul air yang akan membentuk struktur kisi kristal. Heksakaidekahedron mempunyai ukuran yang lebih besar daripada dodekahedron. Heksakaidekahedron adalah struktur polihedron yang memiliki 16 sisi dengan 12 sisi pentagonal dan 4 sisi heksagonal. Parameter-parameter yang dapat menyusun struktur kubus II bisa dilihat pada tabel 2.1.

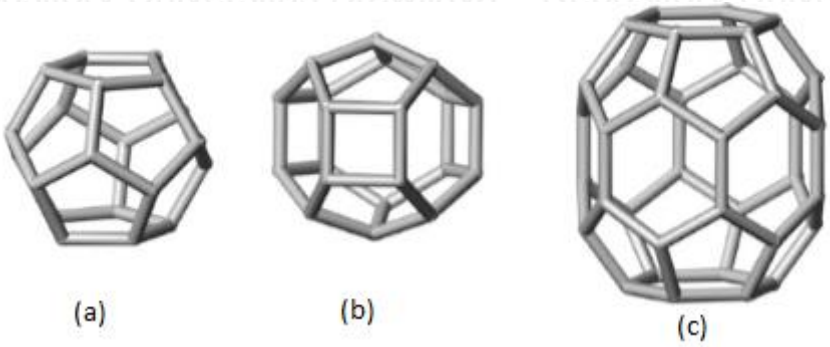


Gambar 2.4 struktur kubus II, (a) dodekahedron (b) heksakaikahedron
Sumber: Birkedal (2009,p.30)

2.3.1.3 Struktur heksagonal

Struktur heksagonal adalah struktur yang paling komplek diantara yang lainya karena rongga yang dibentuk berukuran menengah, namun sangat jarang ditemui di alam jika dibandingkan dengan struktur kubus I dan struktur kubus II. Struktur heksagonal dibentuk oleh tiga dodekahedron pentagonal, dua dodekahedron tidak teratur, dan satu ikosahedron, dan total 34 molekul air membentuk satu sel struktur heksagonal. Ikosahedron tidak beraturan adalah polihedron yang memiliki 20 sisi dengan 12 sisi pentagonal dan 8 sisi

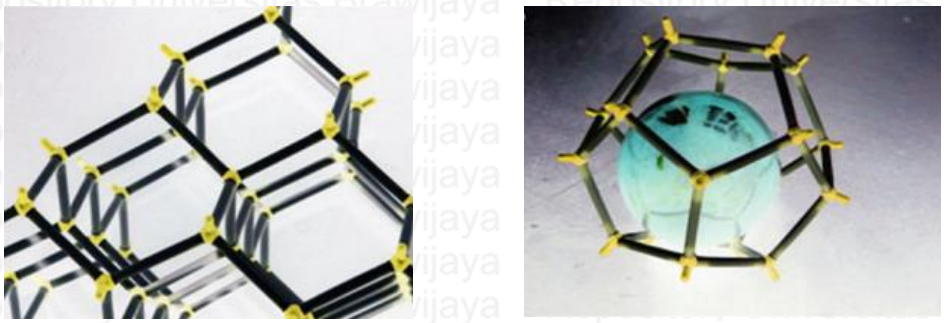
heksagonal. Sedangkan dodekahedron tidak teratur adalah polihedron yang memiliki 12 sisi dengan 3 sisi persegi, 6 sisi pentagonal dan 3 sisi heksagonal.



Gambar 2.5 Penyusun struktur heksagonal, (a) dodekahedron, (b) dodekahedron tidak beraturan, (c) ikosahedron tidak beraturan.
Sumber: Birkedal (2009,p.31)

2.3.2 Perbedaan Struktur Hirat Gas Alam dengan Es

Secara bentuk fisik es dengan hidrat gas alam memiliki bentuk yang sama. Hidrat yang terbentuk oleh struktur kubus I dan struktur kubus II didalam rongganya akan ditempati oleh gas pengisi hidrat yang disebut dengan klarat. Es mempunyai tiga belas buah fase kristal yang berbeda sesuai dengan temperatur dan tekanan (Travesset, 2008). Es heksagonal adalah bentuk padat yang paling umum dari air, karena air yang terikat berbentuk tetrahedral, ia memiliki beberapa kemiripan dengan gas hidrat. Perbandingan ikatan hidrogen pada hidrat rata-rata lebih panjang 1% daripada es dan besar sudut O-O-O berbeda dari es yang memiliki struktur tetrahedral. Struktur tetrahedral memiliki sudut O-O-O sebesar 3.7^{o} sedangkan struktur kubus I dan II sebesar 3.0^{o} (Davidson , 1973). Berikut ini adalah perbedaan propertis es dengan hidrat



Gambar 2.6 Perbedaan struktur es dan hidrat, (a) struktur kristal es, (b) struktur kristal hidrat
Sumber: Thakur (2011,p.53)

Tabel 2.2
Perbandingan proferti s es dengan struktur kubus I dan II

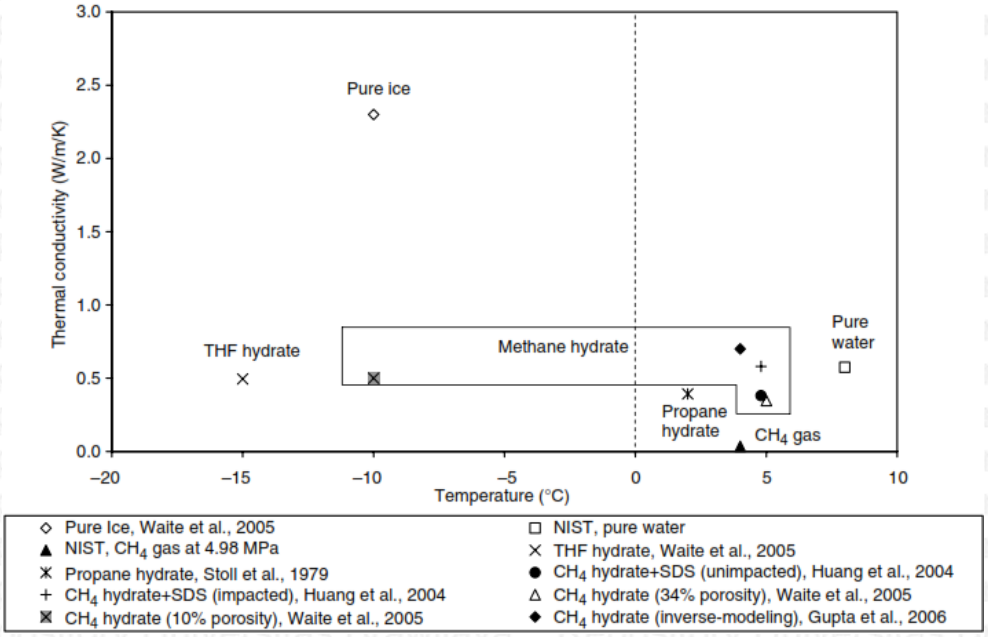
Property	Ice	Structure I	Structure II
Structure and dynamics			
Crystallographic unit cell space group	$P6_3/mmc$	Pm3n	Fd3m
No. of H_2O molecules	4	46	136
Lattice parameters at 273 K (Å)	$a = 4.52$, $c = 7.36$	12.0	17.3
Dielectric constant at 273 K	94	~58	~58
Far infrared spectrum	Peak at 229.3 cm^{-1}	Peak at 229.3 cm^{-1}	with others
H_2O reorientation time at 273 K (μs)	21	~10	~10
H_2O 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^e
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 ($Wm^{-1}K^{-1}$)	2.23	0.49 ± 0.02;	0.51 ± 0.02
at 263 K	2.18 ± 0.01^c	0.51 ± 0.01^c 0.587^d	0.50 ± 0.01^c
Adiabatic bulk compression at 273 K (GPa)	12	14^{est}	14^{est}
Heat capacity ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	1700 ± 200^c	2080	2130 ± 40^c
Refractive index (632.8 nm, −3°C)	1.3082^e	1.346^e	1.350^e
Density (g/cm^3)	0.91^f	0.94 also see Example 5.2	1.291^g

Sumber: Sloan (2008,p.94)

Jika dilihat dari segi kekuatan mekanik antara hidrat dan es, hidrat memiliki kekuatan (ketahanan mulur) yang lebih kuat 20 kali daripada es (Stern et al., 1996). . Hal ini diujicobakan dengan pengukuran deformasi kompresi pada temperatur 260-273 K dan tegangan konstan. Pada penerapan tegangan yang sama, es lebih cepat terdeformasi bila dibandingkan dengan hidrat metana murni. Tingginya nilai kekuatan mekanik dari hidrat metana dibandingkan dengan es berhubungan dengan laju difusi dari air dalam hidrat metana dua kali lebih lambat daripada es (Durham, 2003).

Selain dari sifat mekaniknya, hidrat dan es dapat dibandingkan melalui sifat termalnya. Melalui penelitian Stroll dan Bryan (1997) mereka mengukur nilai konduktivitas termal dari hidrat propana sebesar 0.393 W/mK pada temperatur 215.15 K. Hasilnya menunjukan

bahwa nilai konduktivitas termal hidrat lebih kecil dibandingkan konduktivitas termal es yang sebesar 2.23 W/mk. Perbandingan nilai konduktivitas termal antara hidrat dan es bisa dilihat di gambar 2.5



Gambar 2.7 Konduktivitas termal dari gas, air, es dan hidrat
Sumber: Sloan (2008,p.98)

2.4 Gas Alam

Gas alam memiliki komponen utama yaitu metana (CH_4), yang merupakan molekul hidrokarbon rantai terpendek dan teringan. Selain mengandung metana, gas alam juga mengandung molekul hidrokarbon yang lebih berat seperti etana (C_2H_6), propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}).

Gas alam merupakan campuran hidrokarbon ringan dan senyawa non-hidrokarbon yang terbentuk secara alami dan mudah untuk terbakar. Senyawa non-hidrokarbon didalam gas alam sangat bervariasi. Beberapa dari senyawa ini terdiri dari senyawa yang lemah, seperti hidrogen sulfida dan karbon dioksida. Dan lainya terdiri dari gas inert seperti nitrogen, argon dan helium. Adanya hidrogen sulfida dan karbon dioksida pada gas alam akan memberikan dampak buruk ketika gas alam dipergunakan oleh masyarakat. Karena hidrogen sulfida dapat menghasilkan gas racun yang berbahaya dan karbon dioksida dapat mengurangi nilai panas gas. Sehingga sebelum gas alam dipergunakan maka harus diproses terlebih dahulu untuk menghilangkan zat pengotor.

Menurut teori kinetik jika energi kinetik molekul-molekul gas diturunkan dengan menurunkan temperatur secukupnya, maka gaya antar molekul akan menjadi efektif dalam mengikat. Partikel-partikel tekanan akan menjadikan gaya antar molekul efektif. Bila molekul-molekul itu berjauhan maka gaya tarik-menarik akan menjadi lemah, tetapi dengan semakin mendekatnya molekul-molekul dengan yang lainya maka tarikan itu akan meningkat. Gas akan menjadi cair jika tarikanya cukup besar. Gas mempunyai temperatur yang disebut dengan temperatur kritis. Temperatur kritis ialah dimana gas tidak dapat dicairkan meskipun diberikan tekanan yang besar. Tekanan yang dapat diberikan untuk mencairkan gas pada temperatur kritis disebut dengan tekanan kritis.

2.4.1 Gas Butana

Salah satu komponen dari gas alam yang mudah terbakar adalah gas butana (C_4H_{10}). Gas butana memiliki komponen empat atom karbon yang tidak memiliki warna. Gas butana memiliki berat molekul 58 g/mol dan lebih berat jika dibandingkan dengan berat molekul gas propana yang memiliki berat 44 gram/mol. Gas butana mempunyai massa jenis dalam temperatur ruangan sebesar 2.11kg/m^3. Pada temperatur sebesar 20 ^{0}C kelarutan gas butana dalam air murni sebesar 61 mg/L. Beberapa karakteristik umum dari butana dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2.3
Karakteristik umum dari gas alam

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

Sumber: Speight (2007,p.81)

2.4.2 Gas Propana (C_3H_8)

Gas hidrokarbon adalah gas alam yang mudah terbakar (Mokhatab *et al*, 2006). Selain gas butana gas alam juga terdiri dari komponen lain yaitu gas propana (C_3H_8). Gas propana lebih sering digunakan untuk bahan bakar. Gas propana terbentuk dari struktur komponen tiga atom karbon yang berwujud gas pada keadaan normal.

Berat molekul dari gas propana adalah 44 g/mol. Gas propana memilki berat molekul tertinggi dibandingkan gas metana dan gas etana. Beberapa karakteristik umum dari gas propana dapat dilihat pada tabel 2.3.

2.4.3 *Liquified Petroleum Gas* (LPG)

Liquified Petroleum Gas Pertamina atau yang sering kita kenal dengan ELPIJI merupakan gas hidrokarbon hasil produksi dari kilang minyak dan kilang gas yang komponen utamanya terdiri dari gas propana (C_3H_8) dan gas butana (C_4H_{10}). ELPIJI mempunyai berat yang lebih besar daripada udara dengan berat jenis sekitar 2.01 lebih besar daripada berat jenis udara.

Dalam kondisi atmosfer ELPIJI akan berbentuk gas. Namun pemasaran ELPIJI kemasyarakat dalam bentuk cair hal ini disebabkan volume ELPIJ dalam bentuk cair lebih kecil dibandingakan dengan volume ELPIJI dalam bentuk gas meskipun dalam jumlah berat yang sama. Selain itu pada saat dibuat dalam bentuk cair penyimpanan ELPIJI menjadi lebih mudah dibandingkan dalam bentuk gas.

Tekanan gas ELPIJI dalam tabung juga bermacam-macam tergantung pada komposisi dari gas tersebut. Jika gas ELPIJI terdiri dari gas propana murni maka akan membutuhkan tekanan sebesar 2.2 Mpa (22 bar) pada temperatur 55 ^oC. Dan dibutuhkan tekanan sebesar 220 kPa (2.2 bar) untuk butana murni pada temperatur 20 ^oC agar gas tersebut dapat mencair.

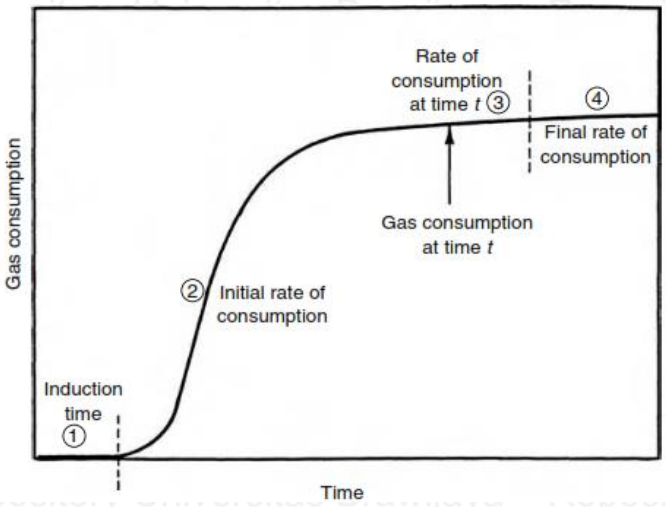
Menurut spesifikasinya ada tiga jenis tipe dari ELPIJI yaitu, ELPIJI propana, ELPIJ Butana, dan ELPIJI Campuran. ELPIJI campuran secara umum memiliki komposisi 50 % gas butana dan 50 % gas propana.

2.5 Pembentukan Hidrat

Hidrat gas alam dapat terbentuk jika syarat pembentukan hidrat sudah terpenuhi. Dimana syarat pembentukan hidrat ialah adanya gas pengisi hidrat atau disebut dengan

klarat, terdapat air bebas dan adanya gaya yang membuat gas alam akan terlarut dalam air. Dengan kondisi tekanan tinggi dan temperatur rendah sampai mendekati titik beku air.

Pada saluran gas dengan pipa tekanan tinggi didalamnya hidrat gas dapat terjadi akibat dua faktor yaitu, adanya air bebas yang terbentuk pada saluran pipa. Dan yang kedua adalah temperatur gas yang dialirkan berada pada temperatur rendah atau mendekati temperatur pembentukan hidrat. Hidrat yang terbentuk bisa berbentuk bubur atau *jelly* sampai dengan berbentuk padat seperti es batu. Sehingga pada saat hidrat terbentuk pada saluran pipa gas akan menyebabkan tersumbatnya saluran gas.



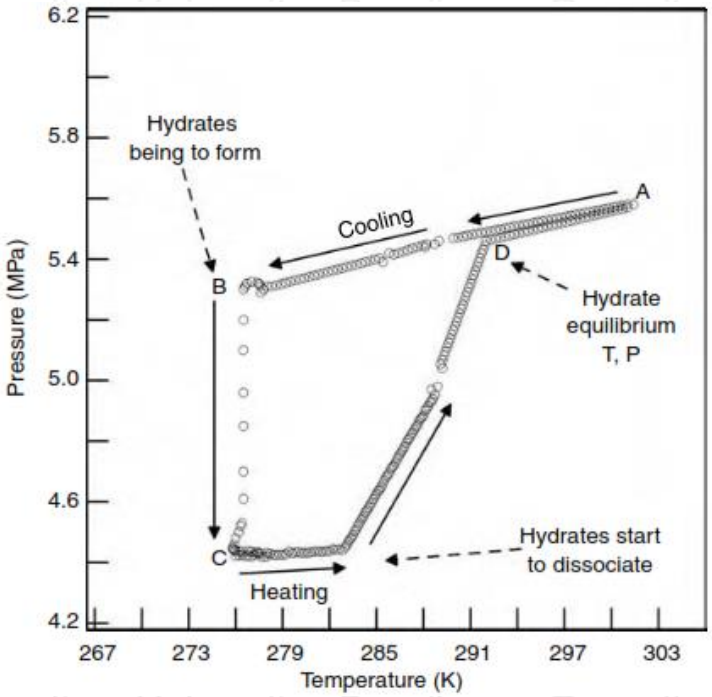
Gambar 2.8 Pengaruh waktu terhadap konsumsi gas pada pembentukan hidrat.
Sumber: Sloan (2008,p.115)

Secara eksperimen pembentukan hidrat dapat dilihat pada gambar 2.8. Pada gambar diatas menjelaskan bahwa konsumsi gas terhadap waktu dalam pembentukan dan pertumbuhan hidrat dalam sistem agitasi (kavitasi atau turbulensi) pada tekanan dan temperatur konstan. Tabung yang didalamnya terdapat air murni ditekan menggunakan gas hidrokarbon dengan tujuan mendapatkan kondisi pembentukan hidrat.

Gas hidrokarbon ditambahkan secara terus menerus kedalam tabung agar gas tersebut tetap menjadi hidrat dan dijaga dalam tekanan konstan. Tingkat konsumsi gas yang diperlukan selama pembentukan hidrat ialah tingkat pembentukan hidrat yang dapat dibentuk oleh gaya kinetik dan perpindahan panas yang terjadi pada sistem tersebut.

Pada gambar 2.8 menjelaskan tentang hubungan konsumsi gas terhadap waktu, dimana dalam siklus tersebut terjadi empat proses. Proses pertama yaitu waktu induksi merupakan waktu terbentuknya inti hidrat atau terbentuknya fase hidrat gas. Namun pada kondisi ini

struktur hidrat belum dapat terbentuk karena masih dalam kondisi metastabil (kemampuan suatu sistem *non-equilibrium* untuk bertahan dalam jangka waktu yang panjang). Pada kondisi kedua masa pertumbuhan hidrat terbentuk dan konsumsi gas begitu cepat dilakukan. Sampai akhirnya pada kondisi ketiga konsumsi gas mulai semakin sedikit dan berakhir pada kondisi keempat. Dari diagram tersebut dapat dijelaskan bahwa hidrat dapat terbentuk dengan jumlah gas yang tertentu. Karena gas hidrat memiliki konsumsi gas yang dapat dijadikan hidrat tergantung dari komposisi air dan temperatur maupun tekanan yang digunakan ketika pembentukan tersebut.



Gambar 2.9 Garis hubungan tekanan dan temperatur pada hidrat metana sederhana.
Sumber: Sloan (2008,p.115)

Pada gambar 2.9 menjelaskan terbentuknya hidrat pada hubungan garis tekanan dan temperatur. Pada eksperimen ini besarnya volume konstan dan tekanan yang terus berubah sepanjang eksperimen.

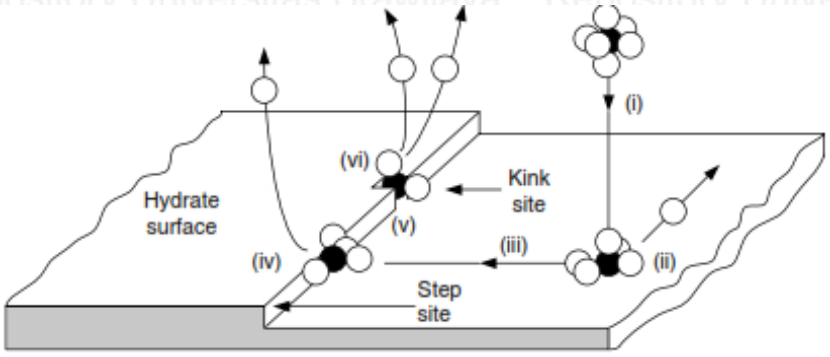
Pada kondisi metastabil sistem mencegah adanya pembentukan hidrat dengan cepat pada titik D. Titik D adalah titik setimbangnya tekanan dan temperatur dari hidrat. Namun tekanan dari sistem akan terus menurun secara linier selama beberapa jam tanpa adanya pembentukan hidrat. Titik A menuju ke titik B ini merupakan waktu induksi dimana baru terbentuknya fase hidrat gas. Pada titik B hidrat sudah mulai terbentuk sampai tekanannya

menurun dengan drastis hingga titik C dan dibiarkan pada kondisi temperatur yang cendrung konstan. Pada kondisi B ke C inilah tekanan dan temperatur terbentuknya hidrat. Dan pada titik C sistem mulai dipanaskan sehingga tekanan kembali meningkat dan struktur hidrat mengalami pemisahan sampai di titik D.

2.6 Pertumbuhan Hidrat

Pada gambar 2.9 pertumbuhan hidrat ditunjukan oleh titik B dan titik C. Tanda dari dimulainya pertumbuhan hidrat ditunjukan dengan adanya perubahan tekanan sistem yang signifikan menurun. Selama proses pertumbuhan hidrat perpindahan panas dan massa merupakan kunci utamanya. Karena proses yang utama ketika hidrat tumbuh adalah ketika perpindahan massa gas menuju ke permukaan hidrat. Lebih dari 15 % dari hidrat mengandung mol gas.

Dilihat dari tingkat molekulnya pertumbuhan hidrat dipengaruhi oleh tiga faktor. Faktor yang pertama ialah kinetika pertumbuhan kristal pada permukaan hidrat. Faktor yang kedua ialah perpindahan massa komponen dari permukaan kristal yang tumbuh. Dan faktor yang terakhir ialah perpindahan panas eksotermis dari pembentukan hidrat yang jauh dari permukaan kristal hidrat yang tumbuh.



Gambar 2.10 Mekanisme pertumbuhan kristal hidrat
Sumber: Sloan (2008,p.151)

Pada gambar 2.10 memperlihatkan proses pertumbuhan kristal hidrat dengan tahapan sebagai berikut:

I. Molekul gas pada gugus air sementara dipindahkan menuju permukaan kristal yang mengalami pertumbuhan. Gugus ini menuju permukaan dengan energi Gibbs yang dihasilkan permukaan kristal.

II. Gugus tersebut teradsorpsi pdaa permukaan kristal. Kristal padat menghasilkan medan gaya ke dalam fluida sehingga menyebabkan gugus tersebut mengikuti permukaan. Setelah adsorbsi (penyerapan), beberapa molekul air terlepas dari gugus dan berdifusi menjauh.

III. Difusi guugs pada permukaan memasuki tahap di dalam kristal. Spesimen yang terabsorpsi menyebar hanya dalam dua dimensi sepanjang permukaan karena terdapat medan gaya yang tegak lurus dengan permukaan kristal.

IV. Gugus menempel pada *step* kristal dengan melepaskan molekul pelarut. Dua permukaan padat dari *step* member sebuah gaya (dengan dua interaksi permukaan reaktan) pada sepesimen yang bergerak.

V. Gugus hanya bisa bergerak pada satu dimensi sepanjang *step*. Gugus berdifusi dari dari daerah *step* menuju ke daerah *kink* (titik cacat pada daerah *step*).

VI. Gugus yang telah diadsorpsi pada daerah *kink*. Pada daerah ini terdapat tiga atau lebih permukaan padat sehingga memberikan gaya yang lebih besar pada spesimen.

VII. Setelah fase VI gugus akan bergerak pada tiga dimensi (tidak ditampilkan).

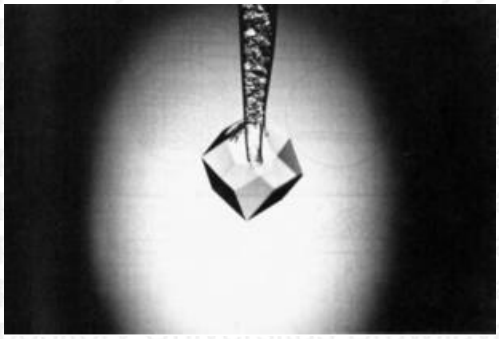
Pada gambar 2.10 nomer (ii), (iv) dan (vi) gugus diintegrasikan pada permukaan kristal. Gugus tersebut masuk ke dalam rongga yang tepat dan molekul pelarut berlebih akan dilepaskan. Bila molekul gas terlalu besar dan tidak dapat masuk ke dalam rongga, maka rongga akan mengalami penataan ulang selama beberapa waktu. Penataan ulang pada rongga yang tepat dapat menjadi tingkat kinetik dan tidak ada rongga yang meregang. Ikatan rongga selesai dengan adanya integrasi akhir dari gugus ke daerah *kink*. Molekul gugus berlebih akan dilepaskan dan spesimen kehilangan energi residu pergerakan sepanjang permukaan kristal.

Hidrat bisa tumbuh sebagai kristal tunggal pada larutan air dan hidrokarbon. Pertumbuhan hidrat kristal tunggal ialah metode yang digunakan untuk menguji efek aditif dari pertumbuhan kristal dan morfologinya. Kristal tunggal tetrahidrofuran dan etilen oksida sangat mudah untuk dibentuk karena kedua unsur pembentuk larut dalam air. Sedangkan kristal tunggal hidrat gas sulit diperoleh (Udachin *et al*., 2002).

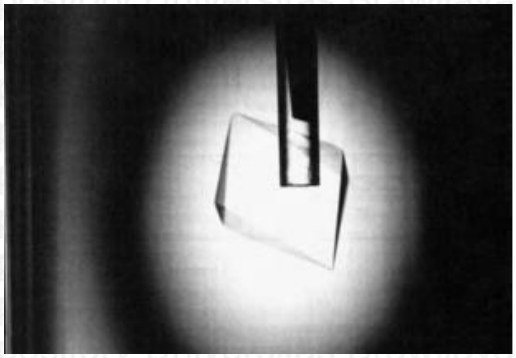
Pada gambar 2.11 dan 2.12 memperlihatkan kristal hidrat tunggal dari struktur kubus I dan II yang dibentuk dari persamaan stoikiometri dari etilen oksida (gambar 2.11) dan tetrahidrofuran (gambar 2.12) masing-masing dalam kondisi diam (Larson *et al*., 1996). Kristal tunggal etilen oksida mempunyai 110 bidang kristal struktur I. Sedangkan kristal

tunggal tetrahidrofuran mempunyai 111 bidang kristal struktur II. Pada pertumbuhan kristal tunggal, bidang yang sangat lambat untuk tumbuh telah diamati.

Pertumbuhan kristal tunggal dengan 111 bidang pada struktur II tumbuh sangat lambat karena mengandung dominasi bidang heksagonal daripada bidang kristal lainnya. Hal ini disebabkan bidang heksagonal jauh lebih tegang (sudut antara O-O-O adalah 120^{o}) daripada bidang pentagonal (108^{o}) relatif terhadap tetrahedral (109^{o}) dan air (sudut antara H-O-H adalah 104.5^{o}). Pernyataan yang sama juga dapat menjelaskan bidang 110 pada struktur I.



Gambar 2.11 Kristal hidrat tunggal etilen oksida (sI)
Sumber: Sloan (2008,p.156)



Gambar 2.12 Kristal hidrat tunggal tetrahidrofuran (sII)
Sumber: Sloan (2008,p.156)

2.7 Penguraian Hidrat

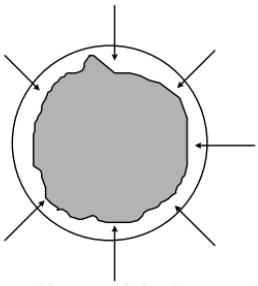
Penguraian hidrat adalah proses pemisahan hidrat menjadi air dan gas kembali dengan proses endotermik(panas yang bersumber dari luar sistem). Proses penguraian ini sangat penting untuk dipahami dalam sistem pemipaan gas. Agar bisa menguraikan hidrat yang terbentuk pada saluran pipa gas.

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk proses penguraian hidrat dalam industri distribusi gas alam menggunakan sistem pemipaan. Beberapa metode yang ada

antara lain adalah *depressurization, thermal stimulation ,thermodynamic inhibitor injection atau methods combination*.

Pada gambar 2.9 menunjukan proses penguraian hidrat terjadi pada titik C menuju ke titik D. Pada sistem tersebut ditunjukan pada titik C diberikan panas dari luar sistem untuk melihat tingkat penguraian dari hidrat tersebut. Ketika panas dari luar istem masuk akan mengakibatkan tekanan didalam sistem akan ikut meningkat, sehingga sistem akan kembali menuju ke titik D. Titik D adalah kondisi setimbang dari hidrat (tekanan dan temperatur penguraan hidrat)

Gambaran konseptual modern dari penguraian hidrat melibatkan penguraian hidrat radial yang ditunjukkan pada gambar 2.13 dibandingkan penguraian hidrat aksial pada gambar 2.14. Gambaran paling benar berdasarkan perpindahan panas dari penguraian hidrat, dimana hidrat berada di tengah dikelilingi fasa air stasioner. Fasa air stasioner bisa menghasilkan panas untuk penguraian hidrat (Davies et al., 2006). Disosiasi radial merupakan fenomena fisik yang terjadi secara kebetulan karena penguraian hidrat lebih cepat secara signifikan bila dibandingkan dengan disosiasi aksial. Hal ini dapat disebabkan oleh dimensi radial lebih kecil dibandingkan dimensi longitudinal dan daerah perpindahan panas permukaan radial lebih besar daripada permukaan aksial.



Gambar 2.13 Disosiasi radial
Sumber: Sloan (2008,p.177)

Gambar 2.14 Disosiasi aksial
Sumber: Sloan (2008,p.177)

Struktur disosiasi radial didukung oleh bukti secara langsung dari *X-ray Computd Tomography* (CT) saat melakukan penelitian disosiasi metana pada inti hidrat (Gupta, 2007).

Penelitian dengan gambar CT *X-Ray* ini menangkap kepadatan dari profil inti hidrat, dan menunjukkan hidrat memisah secara disosiasi radial.

2.8 Gas Ideal dan Teori Kinetika Molekul Gas

2.8.1 Gas Ideal

Gas ideal merupakan gas teoritis yang terdiri dari partikel-partikel titik yang bergerak secara acak dan tidak saling berinteraksi. Konsep dari gas ideal ini sangat berguna karena memenuhi hukum gas ideal, sebuah persamaan keadaan yang disederhanakan, sehingga dapat dianalisis dengan mekanika statistika.

Pada kondisi normal seperti temperatur dan tekanan standar, kebanyakan gas nyata tidak sama dengan gas ideal, namun berperilaku seperti gas ideal. Banyak gas seperti nitrogen, oksigen, hidrogen, gas mulia, karbon dioksida dan gas alam dapat diperlakukan seperti gas ideal dengan perbedaan yang masih bisa ditolerir.

2.8.2 Persamaan Gas Ideal

Boyle, Charles dan Gay-Lussac sudah 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 menjelaskan bahwa setiap zat yang terdiri dari sebagian besar partikel yang sangat kecil. Pada dasarnya, semua sifat-sifat yang dimiliki gas termasuk tekanan, volume dan temperatur merupakan akibat dari perilaku molekul yang membentuk gas (Cengel, 2004).

Ada lima kondisi yang menjelaskan bahwa perilaku molekul sesuai dengan teori kinetik molekular gas ideal yaitu:

1. Gas terdiri dari kumpulan-kumpulan partikel kecil (molekul) yang bergerak secara garis lurus. Pergerakan dari molekul ini sesuai dengan Hukum Newton.
2. Molekul-molekul pada suatu gas tidak mempunyai volume. Molekul-moleul tersebut merupakan sebuah titik.
3. Satu molekul dengan molekul lainnya yang saling bertumbukan secara elastis sempurna sehingga tidak ada energi yang diperoleh maupun yang hilang selama tumbukan.
4. Tidak adanya gaya tarik atau gaya tolak antara setiap molekul.
5. Energi kinetik rata-rata molekul dapat ditunjukkan pada Persamaan 2-1, yaitu:

$$EK = \frac{3}{2}kT \quad \text{..... (2-1)}$$

dengan:

EK = Energi kinetik (J)

T = Temperatur absolut (K)

k = Konstanta Steven Boltzman (1.38 x 10^{-23}J/K)

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

$$pV = nRT \quad \text{..... (2-2)}$$

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)

2.8.3 Persamaan Gas Nyata

Gas nyata adalah kebalikan dari gas ideal. Pada gas ideal, volume pada molekul gas diabaikan (tidak memiliki volume) dan dianggap sebagai titik. Dan 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 dikarenakan adanya penurunan temperatur dan peningkatan tekanan. Namun, volume molekul tidak dapat diabaikan.

Pada gas ideal, kekuatan tarik antar molekul dianggap tidak ada. Kekuatan tarik antar molekul dapat diabaikan ketika berlaku pada tekanan rendah dengan temperatur tinggi karena pada kondisi tersebut molekul gas saling berjauhan. Tapi 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, diataranya adalah:

1. Persamaan keadaan van der Waals

   Persamaan keadaan van der Waals yang ditunjukkan Persamaan 2-3 adalah model pertama yang menggambarkan keadaan gas nyata. Molekul dilihat sebagai partikel yang

memiliki volume, sehingga besaran V tidak boleh kurang dari suatu konstanta. Selain itu, molekul juga saling berinteraksi pada jarak tertentu sehingga membuat pengaruh pada tekanan yang terjadi. Oleh karena itu, adanya penyesuaian dari gas ideal menjadi gas nyata dengan mengganti nilai V (volume) diganti dengan (V-b) dan niai p (tekanan) diganti dengan $(p+\frac{a}{V^2})$.

$$(p + \frac{a}{V^2})(V - b) = nRT \quad \text{(2-3)}$$

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 oleh Persamaan 2-5 adalah perbaikan dari persamaan keadaan van der Waals. Konstanta a dan b pada persamaan keadaan Redlich-Kwong dipengaruhi olhe tekanan kritis dan temperatur kritis gas. Persamaan keadaan Redlich-Kwong cukup akurat untuk nantinya memprediksi sifat-sifat gas pada kondisi sesuai Persamaan 2-4.

$$\frac{p}{p_c} < \frac{T}{2T_c} \quad \text{(2-4)}$$

$$p = \frac{nRT}{V-b} - \frac{a}{T^{0.5}V(V+b)} \quad \text{(2-5)}$$

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 oleh Persamaan 2-6 merupakan perbaikan dari persamaan keadaan Redlich-Kwong. Pada persamaan keadaan Soave-Redlich-Kwong terdapat konstanta α yang dipengaruhi oleh faktor asentrik (ω), tekanan tereduksi (P_r) dan temperatur tereduksi (T_r) yang ditunjukkan pada Persamaan 2-7. Faktor asentrik merupakan ukuran ketidak bulatan suatu molekul yang ditunjukkan pada Persamaan 2-8. Persamaan 2-9 dan 2-10 masing-masing merupakan tekanan dan temperatur tereduksi yang mempengaruhi konstanta α.

$$p = \frac{nRT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V(V+b)} \quad \text{(2-6)}$$

$$\alpha = \left\{1 + (0.48508 + 1.55171\omega - 0.15613\omega^2)\left(1 - T_r^{0.5}\right)\right\}^2 \quad \text{(2-7)}$$

$$\omega = -1 - \log P_r \quad \text{(2-8)}$$

$$p_r = \frac{p}{p_c} \quad \text{(2-9)}$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad \text{(2-10)}$$

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 2-11 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 2-12 dan 2-8. 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.

$$p = \frac{nRT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V^2 + 2bV - b^2)} \quad \text{.....(2-11)}$$

$$\alpha = \left\{1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.2699\omega^2)\left(1 - T_r^{0.5}\right)\right\}^2 \quad \text{.....(2-12)}$$

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 2-13 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.

$$pV = nZRT \quad \text{..... (2-13)}$$

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 2-14. 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 2-15 dan 2-16 merupakan penjabaran dari konstanta pada Persamaan 2-14.

$$Z^3 + c_2 Z^2 + c_1 Z - c_0 = 0 \quad \text{..... (2-14)}$$

$$A = \frac{\Omega_a \alpha p_r}{{T_r}^2} \quad \text{..... (2-15)}$$

$$B = \frac{\Omega_b p_r}{T_r} \quad \text{..... (2-16)}$$

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,p.13)

2.8.4 Konsep Mol

Partikel materi (atom, molekul atau ion) mempunyai ukuran yang sangat kecil. Namun sekecil apapun jumlah zat akan mengandung sejumlah besar partikel, sehingga dalam penggunaan bilangan yang sangat besar ini digunakan satuan mol. Mol berasal dari bahasa latin moles yaitu sejumlah massa. Istilah molekul merupakan bentuk lain dari kata moles yang artinya sejumlah kecil massa.

1 mol = 6,02 x 10^{23} (602 milliar triliun)

Bilangan 6,02 x 10^{23} disebut tetapan Avogadro. Tetapan Avogadro adalah satuan jumlah yang luar biasa besarnya. Hubungan mol dengan jumlah partikel adalah:

$x = n \times 6{,}02 \times 10^{23}$

n menunjukkan jumlah mol. Jumlah mol tentu berbeda dengan massa molar, di mana massa molar menyatakan jumlah massa 1 mol zat sebesar

$m_m = m/n$

m menyatakan massa dari zat sedangkan m_m menyatakan massa molar.

2.9 Perpindahan Panas

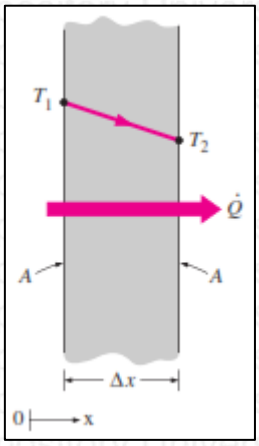
Energi panas dapat ditransfer dari satu sistem ke sistem yang lain, sebagai hasil dari perbedaan temperatur. Adapun transfer energi panas selalu terjadi dari medium suhu yang lebih tinggi ke suhu yang lebih rendah, dan perpindahan panas berhenti ketika dua medium

mencapai suhu yang sama. Perpindahan panas memiliki pengertian yaitu perpindahan energi dari suatu sistem yang memiliki temperatur lebih tinggi menuju sistem lain yang memiliki temperatur lebih rendah.

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

1. Konduksi

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



Gambar 2.15 Skema Perpindahan Panas Konduksi
Sumber: Cengel (2003,p.18)

Besarnya perpindahan panas konduksi dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{Q} = -kA\frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{.....(2.1)}$$

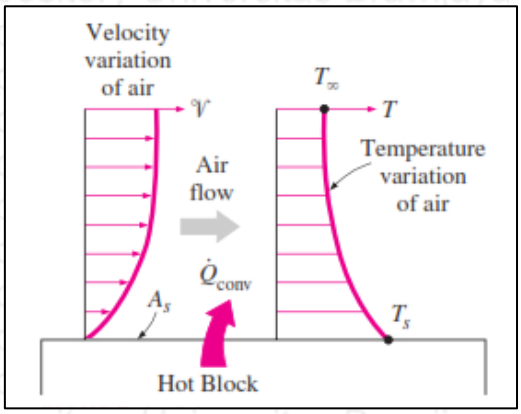
dengan :

$\dot{Q}$ = laju perpindahan panas konduksi (J)
k = konduktivitas termal material (J/m.K)
A = luas permukaan bidang kontak perpindahan panas konduksi (m^2)
ΔT = perbedaan temperatur antara kedua permukaan (K)

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



Gambar 2.16 Skema Perpindahan Panas Konveksi
Sumber: Cengel (2003,p.26)

Besarnya perpindahan panas konveksi dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{Q} = h\,A\,(T_s - T_\infty) \quad \text{.....(2.2)}$$

dengan :

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

h = koefisien perpindahan panas konveksi (J/m^2.K)

A = luas permukaan bidang kontak perpindahan panas konveksi (m^2)

T_s = temperatur permukaan zat padat (K)

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

3. Radiasi

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

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A T^4 \quad \text{.....(2.3)}$$

dengan :

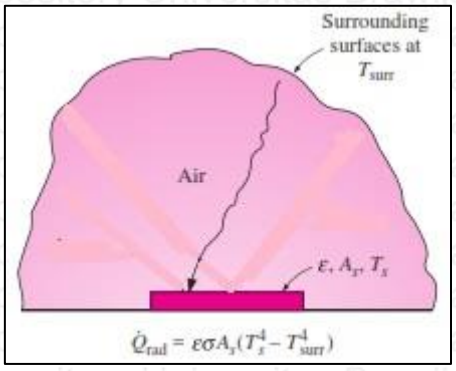
$\dot{Q}$ = laju perpindahan panas radiasi (J)

ε = emisivitas suatu zat ($0 \leq \varepsilon \leq 1$)

σ = konstanta Stefan-Boltzman (5.67×10^8 J/m^2.K^4)

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

T = temperatur absolut zat (K)



Gambar 2.17 Skema Perpindahan Panas Radiasi
Sumber: Cengel (2003,p.29)

2.9 Hipotesa

Berdasarkan kajian teori yang telah dibahas maka didapatkan hubungan antara karakteristik pembentukan hidrat propana butana terhadap variasi penurunan temperatur pembentukan. Didapatkan bahwa semakin diturunkan temperatur pembentukanya dan pada tekanan yang tetap maka pembentukan hidrat akan terjadi lebih cepat. Hal ini dikarenakan penurunan temperatur akan menyebabkan proses perpindahan panas yang terjadi akan semakin besar. Semakin tinggi laju pendinginan akan menyebabkan lapisan es yang mengelilingi hidrat akan semakin kuat sehingga lapisan es semakin tidak mudah untuk mengurai dan hidrat dalam keadaan semakin stabil.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian eksperimental yaitu dengan melakukan pengamatan secara langsung untuk memperoleh data sebab akibat melalui eksperimen guna mengetahui pengaruh variasi temperatur pembentukan terhadap karakteristik pembentukan gas hidrat propana butana. Kajian literatur dari berbagai sumber, baik berupa buku maupun jurnal yang terkait dengan penelitian ini digunakan untuk menambahkan informasi yang diperlukan.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Fenomena Dasar Mesin Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Waktu penelitian dilaksanakan pada tanggal 28 Februari-30 April 2017

3.3 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat tiga variabel yang digunakan yaitu:

1. Variabel bebas

   Variabel bebas adalah variabel yang besar nilainya ditentukan oleh peneliti dan harganya dapat diubah-ubah dengan metode tertentu untuk mendapatkan nilai variabel terikat dari objek penelitian, sehingga dapat diperoleh hubungan antara keduannya. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi temperatur pembentukan sebesar, 275 K, 273 K, dan 271 K

2. Variabel terikat

   Variabel terikat adalah variabel yang besar nilainya tergantung dari nilai variabel bebasnya dan tidak dapat ditentukan sendiri oleh peneliti. Variabel terikat dapat diketahui setelah penelitian dilakukan. Variabel terikat yang diamati dalam penelitian ini adalah laju pembentukan, stabilitas dan kapasitas penyimpanan gas hidrat propana butana.

3. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang besar nilainya ditentukan sebelum penelitian dan nilainya dikondisikan konstan selama proses penelitian berlangsung. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah:

- Volume air demin yang dimasukkan pada *crystallizer* adalah 50 cm^3
- Tekanan pada *crystallizer* sebesar 3 bar.
- Kecepatan putar *crystallizer* sebesar 200 rpm.
- Komposisi gas LPG adalah 50% propana dan 50% butana

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Garam

Garam digunakan sebagai bahan untuk membuat larutan garam. Garam akan dicampur dengan air dan kemudian didinginkan hingga temperatur 271 K. Garam berfungsi untuk menurunkan titik beku dari air.

2. Gas ELPIJI Campuran

Gas ELPIJI Campuran dalam tabung yang komposisinya adalah gas propana dan gas butana digunakan sebagai bahan pembuatan gas hidrat .

Spesifikasi:

- Kemurnian : 90 %
- Tekanan : Maks. 13 bar

3. Aquades

Aquades digunakan sebagai bahan untuk membuat gas hidrat yang dicampurkan bersama gas propana butana di dalam *crystallizer*.

Spesifikasi:

- Merk : Hydrobatt
- *Resistivity* : 100 x 10^4 Ω cm

3.4.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. *Crystallizer*

   Crystallizer digunakan sebagai tempat untuk membuat gas hidrat dari gas propana butana dengan air demin. *Crystallizer* berbentuk tabung berongga seperti pada gambar di bawah ini.

   Spesifikasi:

   - Bahan : *Stainless steel*
   - Volume : 150 cm^3

2. Regulator gas

   Regulator gas digunakan untuk mengatur tekanan gas yang keluar dari kompresor menuju *crystallizer*.

   Spesifikasi:

   - Merk : SMC
   - Tekanan max: 9.9 kgf/cm^2 / 150 psi

3. *Flowmeter* gas

   Flowmeter gas digunakan untuk mengukur jumlah massa gas propana dan gas butana yang dimasukan didalam *cristallyzer*.

4. Motor listrik

   Motor listrik digunakan sebagai alat untuk memutar *crystallizer* sehingga gas propana butana dengan air demin di dalam *crystallizer* tercampur.

   Spesifikasi:

   - Merk : Vema
   - Tipe : Y2-212-4
   - Fase : 3 fase
   - Rangkaian : Δ, Y
   - Putaran max : 1370 rpm
   - Tegangan : 220/380 V
   - Daya : 0.5 Hp
   - Frekuensi : 50 Hz

5. *Inverter*

   Inverter digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor.

   Spesifikasi:

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

6. Pompa air

   Pompa air digunakan untuk mensirkulasi air dingin menuju *cooling bath*

   Spesifikasi:

   - Merk : Atman
   - H max : 2 m
   - Q max : 200 l/h

7. *Thermocouple*

   Thermocouple digunakan sebagai sensor untuk mengambil data temperatur di dalam *crystallizer*.

   Spesifikasi:

   - Tipe : Pt
   - Temperatur : -100^{o}C – 400^{o}C

8. *Pressure sensor*

   Pressure sensor digunakan sebagai sensor untuk mengambil data tekanan di dalam *crystallizer*.

   Spesifikasi:

   - Merk : Autonics
   - Model : PSAN-L1CPV-R1/8
   - *Power* : 12-24VDC(MALE)
   - *Port* : R(PT)1/8

9. Mesin pendingin

   Mesin pendingin digunakan untuk mendinginkan larutan garam.

10. *High Pressure* Regulator

High pressure regulator digunakan untuk mengatur tekanan gas yang keluar dari tabung gas propana butana (LPG) ke dalam kompresor.

Spesifikasi:

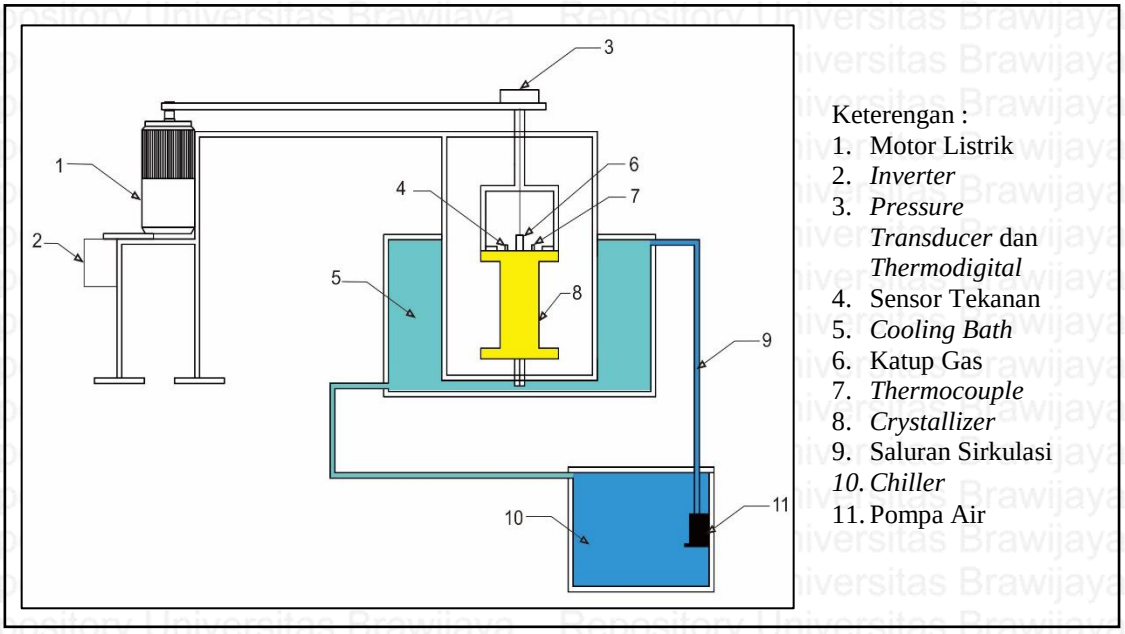
- Inlet : 0.5 – 10 bar
- Outlet : 0 – 2 bar
- Kapasitas : 0 – 08 kg/h

11. *Cooling bath*

Digunakan sebagai tempat pendinginan dari *cristallyzer*

3.5 Instalasi Alat Penelitian

Instalasi alat yang digunakan pada penelitian ini ditunjukan pada gambar 3.1



Keterengan :
1. Motor Listrik
2. *Inverter*
3. *Pressure Transducer* dan *Thermodigital*
4. Sensor Tekanan
5. *Cooling Bath*
6. Katup Gas
7. *Thermocouple*
8. *Crystallizer*
9. Saluran Sirkulasi
10. *Chiller*
11. Pompa Air

Gambar 3.1 Instalasi alat penelitian

Pada instalasi alat ini mengunakan motor listrik tiga fasa yang digunakan untuk memutar *cristallyzer*. Kecepatan motor diatur denga menggunakan inverter. Sebelum *cristallyzer* di pasang, maka terlebih dahulu dimasukan gas dan *aquades* melalui katup gas. Pada *cristallyzer* dilengkapi dengan dua alat ukur yaitu sensor tekanan menggunakan *presure transduser* dan sensor temperatur mengunakan *termoucaple*. Selama proses berlangsung *cristallyzer* akan didinginkan oleh *cooling bath* dan air pendinginan *cooling bath* akan disirkulasikan melalui pompa air dan selang sirkulasi yang diambil dari mesin pendingin.

3.6 Prosedur Penelitian

3.6.1 Persiapan Penelitian

Persiapan penelitian yang pertama dilakukan adalah mengkalibrasi semua alat ukur yang digunakan. Masukan *aquades* kedalam *cristallyzer* sebanyak 50 cm^3 kemudian masukan gas campuran propana butana kedalam *cristallyzer* dengan menggunakan kompresor hermatik, dan pastikan massa alir gas yang masuk ke *cristallyzer* di hitung. Tutup katup gas setelah tekanan didalam *cristallyzer* mencapai 0.3 Mpa.

Setelah selesai memasukan aquades dan gas campuran propana butana, pasang intalasi alat seperti gambar 3.1. Masukanlah air kedalam mesin pendingin sebanyak 50 liter dan tambahkan garam dapur sebanyak 1.5 Kg. Aturlah temperatur mesin pendingin sampai temperatur paling rendah. Tunggu temperatur pada termocauple mesin pendingin menunjukan temperatur 273 K dan jaga temperatur agar tetap konstan pada temperatur tersebut dengan mengatur *termocontrol* pada mesin pendingin.

3.6.2 Pengambilan Data

3.6.2.1 Laju Pembentukan Hidrat

Pasanglah instalasi seperti pada gambar 3.1. Setelah persiapan penelitian dilakukan nyalakan pompa air pada mesin pendingin untuk disalurkan menuju *cooling bath*. Atur lagi termocontr*ol* pada mesin pendingin sampai temperatur termoucaple pada *cooling bath* menunjukan 273 K. Aturlah frekwensi motor melalui alat inverter untuk mendapatkan putaran *cristallyzer* sebesar 200 rpm. Ambilah data penurunan tekanan pada *presure tranduser* selama proses berlangsung. Pengambilan data selesai ketika penurunan tekanan pada *cristallyzer* konstan atau tidak terjadi perubahan tekanan pada *cristallyzer*.

3.6.2.2 Penguraian Hidrat

Setelah selesai pengambilan data laju pembentukan hidrat. Turunkan temperatur *coling bath* menjadi 268 K dengan cara mengatur *termocontrol* pada mesin pendingin. Buka katup gas pada *cristallyzer* agar gas propana butana yang tidak menjadi hidrat terbuang keluar *cristallyzer*. Tutup kembali katup gas. Setelah temperatur *cooling bath* konstan maka ambilah data temperatur dan tekanan didalam *cristallyzer* selama 5 jam.

3.6.2.3 Kapasitas Penyimpanan Hidrat

Setelah selesai pengambilan data penguraian hidrat. Naikan temperatur *cooling bath* menjadi temperatur ruang agar hidrat mengalami dekomposisi dan melepas gas propanan butanan yang terjebak pada struktur hidrat. Ambilah data tekanan gas, waktu dan temperatur selama proses sampai temperatur didalam *cristallyzer* sebesar 300 K .

Ulangilah langkah pengambilan data laju pembentukan hidrat, penguraian hidrat dan kapasitas penyimpanan hidrat dengan merubah variasi temperatur *cooling bath* sesuai dengan variabel yang digunakan.

3.6.2.4 Nilai Mol Gas di Dalam *Crystallizer*

Untuk mencari nilai mol gas didalam *crystallizer* dibutuhkan nilai dari densitas dan volume gas yang masuk ke dalam *crystallizer* untuk mendapatkan nilai massa gas yang masuk. Volume dari gas yang masuk ke dalam *crystallizer* didapatkan dari flowmeter yang dipakai. Debit yang dipakai pada flowmeter sebesar 1.92 L/menit. Waktu yang dibutuhkan untuk memasukan gas ke dalam *crystallizer* sebesar 3 Bar dicatat. Lalu digunakan rumus $\frac{t}{60}$x1.92 L/menit maka didapatkan volume yang masuk ke dalam flowmeter. Untuk nilai densitas didapatkan dari pengukuran langsung dari percobaan massa gas. *Crystallizer* yang mempunyai massa sebesar 21488.62 gram dan mempunyai volume 0.15 L dmasukan gas propana butana sebesar 3 bar. Setelah gas masuk ke dalam *crystallizer* massa nya ditimbang kembali menggunakan timbangan elektrik, didapatkan massanya sebesar 2188.9641 gram. Dari selisih massa yang didapatkan nilai sebesar 0.3441 gram, massa dari gas ini dibagi dengan volume dari *crystallizer* yaitu 0.15 L dan didapatkan densitas gas propana butana pada 3 bar adalah 2.294 gram/Liter. Setelah didapatkan nilai massa yang masuk ke dalam *crystallizer* dibagi dengan Mr dari LPG maka didapatkan nilai mol gas aktual yang ada di dalam *crystallizer*.

3.6.3 Pengolahan Data

3.6.3.1 Laju Pembentukan Hidrat

Pengolahan data untuk laju pembentukan hidrat yaitu melakukan perhitungan mol dengan menggunakan persamaan gas nyata dan persamaan gas dengan volume yang didapatkan dari *flowmeter*. Kemudian membuat grafik laju pembentukan hidrat dengan membandingkan pengaruh waktu terhadap tekanan dan temperatur pembentukan serta

membuat grafik laju pembentukan hidrat dengan membandingkan pengaruh waktu konsumsi mol gas hidrat propana butana teoritis dan aktual yang terbentuk.

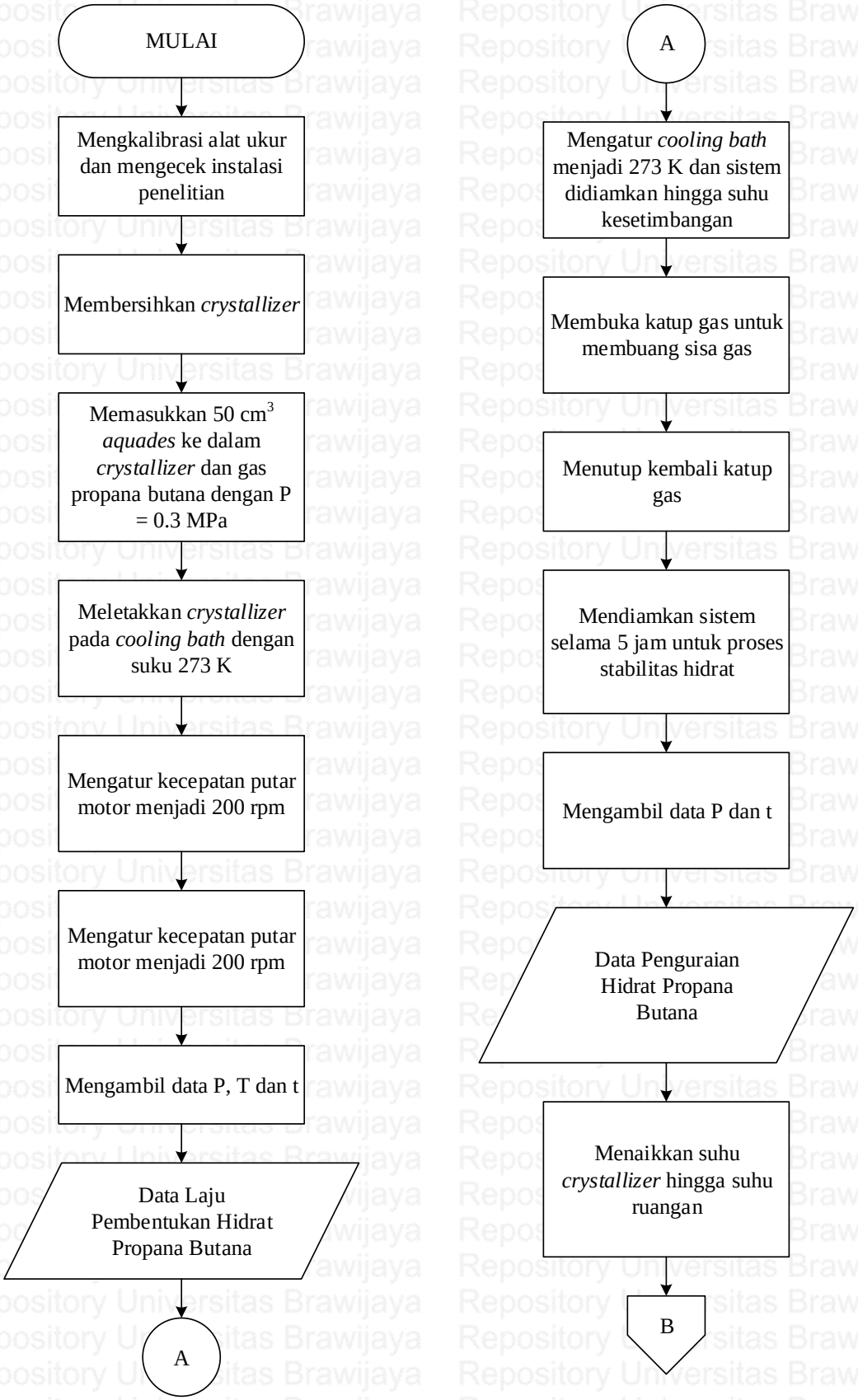
3.6.3.2 Stabilitas Hidrat

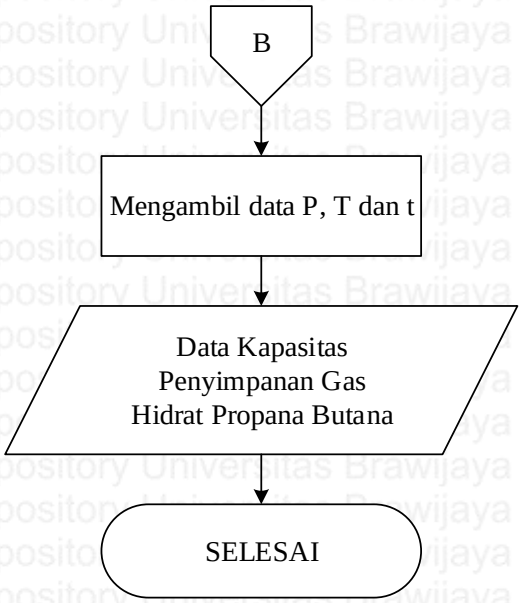
Pengolahan data untuk stabilitas hidrat yaitu melakukan perhitungan mol dengan menggunakan persamaan gas nyata pada setiap 15 menit, kemudian membuat grafik stabilitas hidrat propana butana dengan membandingkan pengaruh banyaknya mol gas terurai dengan waktu.

3.6.3.3 Kapasistas Penyimpangan Hidrat

Pertama yaitu melakukan perhitungan volume gas hidrat secara teoritis dan aktual pada saat sistem telah mencapai temperatur ruangan. Nilai aktual didapatkan dari volume gas yang melalui flowmeter dengan menggunakan debit 0.84 Liter/menit. Kemudian membuat diagram kapasitas penyimpanan gas hidrat propana butana dengan membandingkan antara volume gas hidrat yang mencapai temperatur 300 K dengan volume gas secara teoritis.

3.7 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

BAB IV
DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengolahan Data

Hasil penelitian tentang pengaruh variasi temperatur *cooling bath* terhadap karakteristik pembentukan gas hidrat campuran propana dan butana sesuai dengan teori dan hipotesa yang sudah dibuat. Pada bab ini akan membahas tentang data hasil pengujian, contoh perhitungan serta grafik beserta amalisa dan pembahasannya.

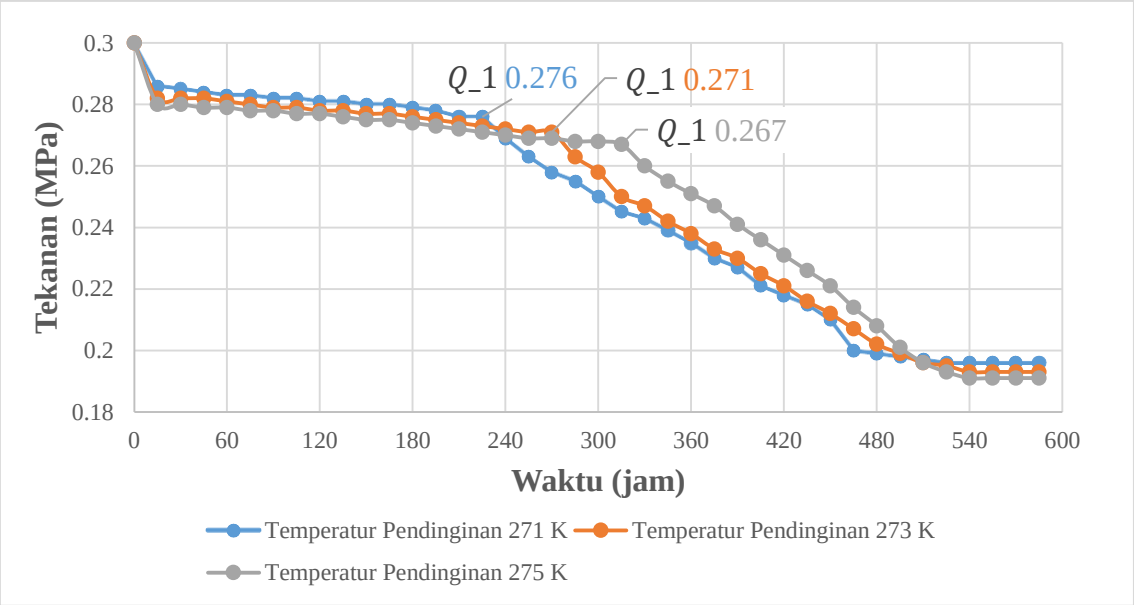
4.2 Data Hasil Pengujian

Penelitian ini dilakukan 3 kali sesuai dengan variasi yang sudah ditentukan sebelumnya, yaitu pembentukan gas hidrat propana butana dengan temperatur *cooling bath* 271 K, 273 K, dan 275 K dengan tekanan awal yaitu 3 bar. Gas yang besarnya 3 bar dimasukan kedalam *crystallizer* dan bercampur dengan air demineralisasi dengan volume 50 cm^3 , kemudian *crystallizer* diputar dengan putaran sebesar 200 rpm untuk semua variasi. Dari penelitian ini nantinya akan didapatkan karakteristik dari gas hidrat propana butana yang meliputi laju pembentukan, stabilitas dan kapasistas penyimpanan.

Data yang didapatkan berupa tekanan dan temperatur. Untuk mendapatkan data temperatur dipasang termokopel tipe Pt dan untuk mendapatkan data tekanan maka dipasang *pressure digital sensor* pada *crystallizer*. Adapun data yang didapat dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

4.2.1 Data Laju Pembentukan Gas Hidrat Propana Butana

Pembentukan gas hidrat propana butana dilakukan selama 10 jam dengan variasi *cooling bath* yaitu 271 K, 273 K, 275 K yang pada tiap satu variasinya temperatur *cooling bath* dijaga konstan selama pembentukan.

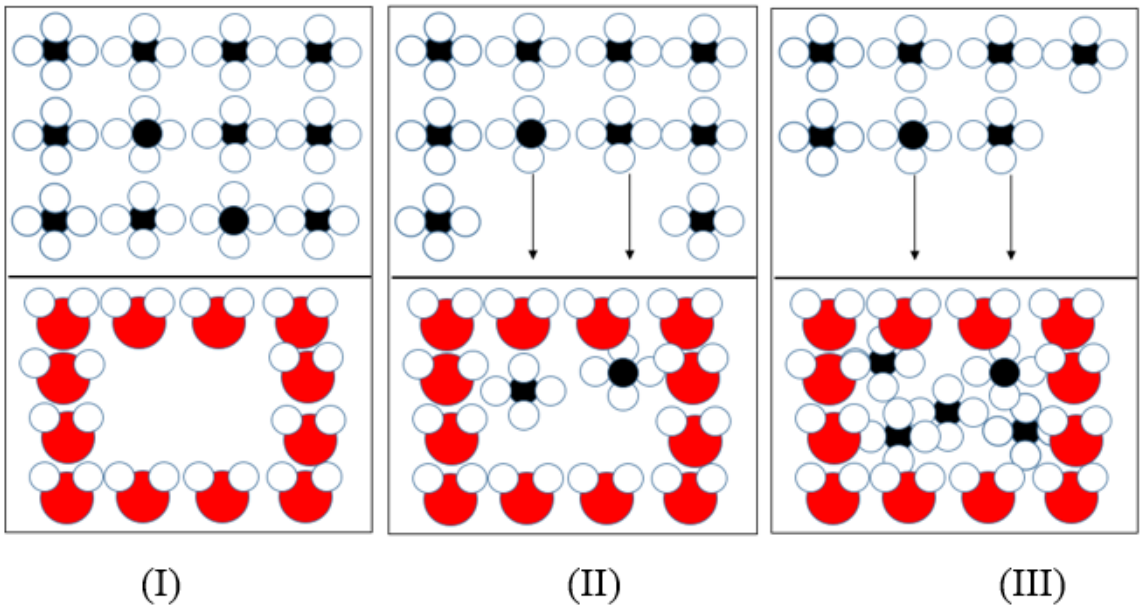


Gambar 4.1 Grafik hubungan antara tekanan gas dalam *crystallizer* terhadap waktu pada pembentukan hidrat

Temperatur awal dari gas campuran propana butana dalam *crystallizer* dengan tekanan 0.3 MPa adalah 296 K pada semua variasi. Kemudian *crystallizer* akan diturunkan temperatur nya sesuai dengan variasi temperatur pendinginannya dan dijaga konstan selama 10 jam. Namun tekanan pembentukan hidrat setiap variasi temperatur pendinginan berbeda-beda. Pada temperatur *cooling bath* 271 K tekanan pembentukan hidrat adalah 0.276 MPa. Temperatur *cooling bath* 273 K tekanan pembentukan hidrat adalah 0.271 MPa. Sedangkan pada temperatur *cooling bath* 275 K tekanan pembentukan hidrat adalah 0.267 MPa. Hal ini dikarenakan semakin diturunkannya temperatur pendinginannya akan membuat perpebaadan temperatur sistem dan *cooling bath* akan semakin besar maka perpindahan panas yang terjadi akan semakin besar dan membuat laju pembentukan hidrat akan semakin cepat.

Pada gambar diatas disemua variasi data, nilai tekanan awal akan turun secara drastis lalu menurun secara linear, dan pada sudah mencapai titik Q_1 tekanan mengalami penurunan secara drastis hal ini dikarenakan pada saat sebelum sampai titik pembentukan (Q_1) dari hidrat yang terbentuk adalah fase uap dan cair. Titik Q_1 menunjukan pembentukan hidrat berhenti dari fase uap dan cair. Setelah melewati titik Q_1 fase berubah menjadi uap dan es, pada saat melewati Q_1 inti dari hidrat mulai menarik gas dari permukaan ke es untuk ditarik ke inti. Hal ini dapat dilihat dengan menurunnya tekanan secara drastis. Setelah tekanan

turun drastis tekanan akan menuju titik dimana hidrat sudah terbentuk sepenuhnya, hal ini ditandai dengan adanya tekanan dan temperatur yang konstan.



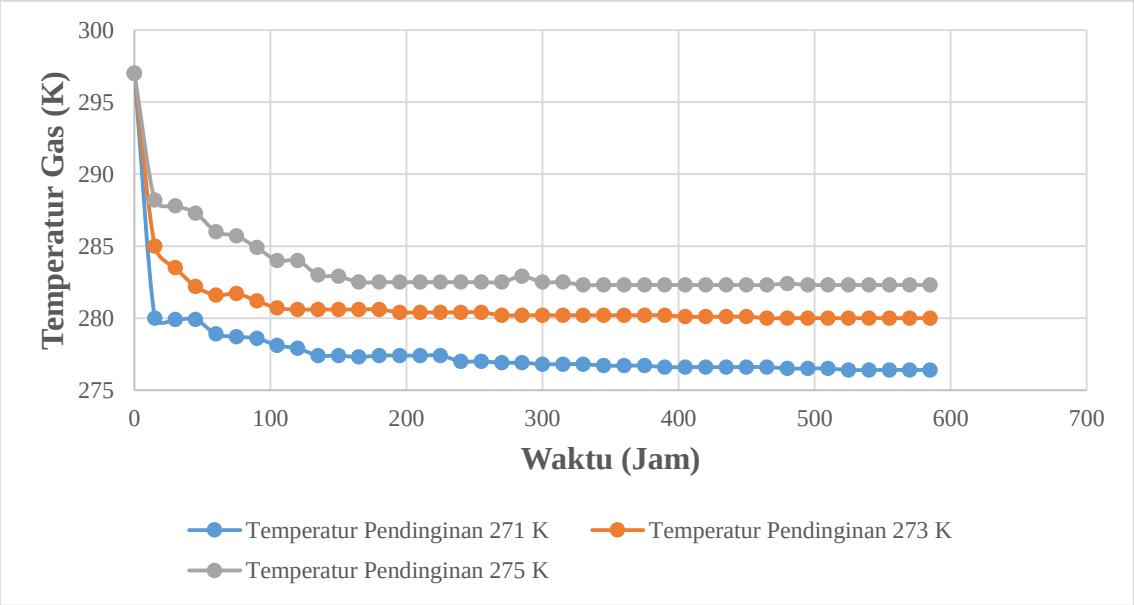
Gambar 4.2 Kinetika Pembentukan Hidrat

Pada Gambar 4.2 warna merah menunjukan atom dari oksigen, warna putih adalah atom dari hydrogen sedangkan warna hitam sebagai karbon. Menunjukan kinetika pembentukan hidrat yang menggambarkan profil dari Gambar 4.1 dengan tahapan sebagai berikut :

I. Gas campuran propana butana yang berada di atas permukaan hidrat. Setelah adanya gaya dan temperatur *cooling bath* tekanan sistem akan turun dengan drastis, dikarenakan inti dari hidrat akan masuk kedalam rongga yang ada pada molekul dari air.

II. Pada kondisi ini, inti hidrat akan memulai proses pembentukannya yang ditandai dengan adanya penurunan tekanan dan temperatur secara linier. Fase pada proses ini masih dalam wujud uap dan cair. Proses I dan II terjadi sebelum memasuki titik Q_1.

III. Selanjutnya, dengan masuknya inti dari hidrat maka inti akan menarik molekul gas lainnya yang ditandai dengan penurunan tekanan secara drastis namun temperatur cenderung konstan. Fase dalam proses ini sudah dalam wujud uap dan es. Proses III terjadi setelah melewati titik Q_1.



Gambar 4.3 Grafik hubungan antara temperatur gas dalam *crystallizer* terhadap waktu pada saat pembentukan hidrat

Tabel 4.1
Laju Pembentukan Gas Hidrat Propana Butana

Laju Pembetukan Gas Hidrat Propana Butana				
Variasi *cooling bath*	T_{0B} (°C)	P_{0B} (bar)	T_{1B} (°C)	P_{1B} (bar)
271 K	24	3	3.4	1.96
273 K	24	3	7	1.93
275 K	24	3	9.3	1.91

Keterangan :

T_{0B} (°C) : Temperatur awal sistem pada pembentukan gas hidrat propana butana

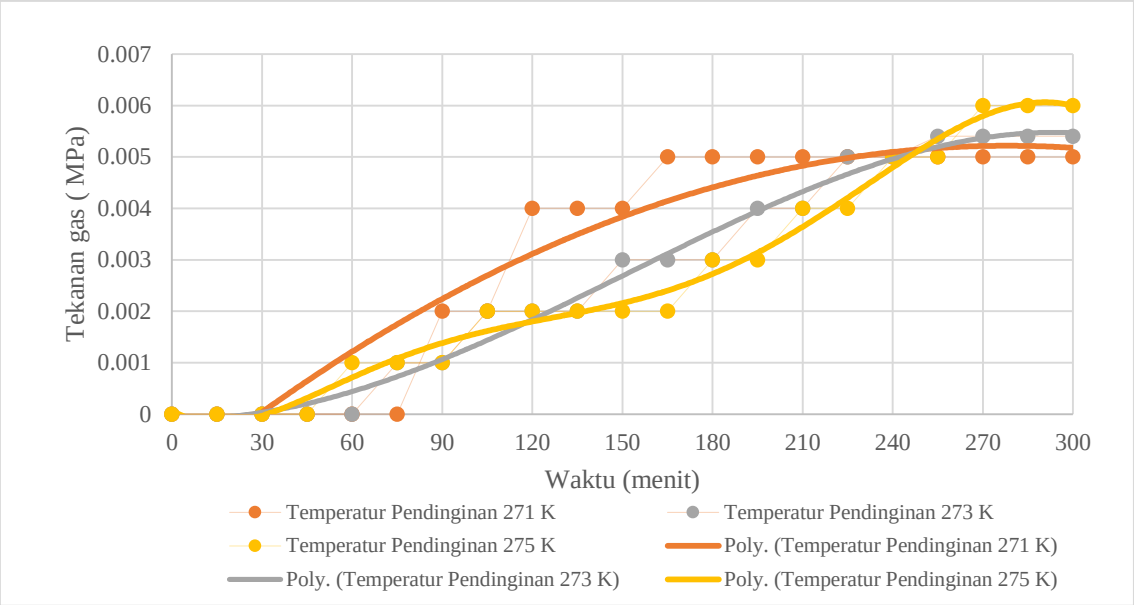
T_{1B} (°C) : Temperatur akhir sistem pada pembentukan gas hidrat propana butana

P_{0B} (bar) : Tekanan awal gas pada pembentukan gas hidrat propana butana pada *crystallizer*

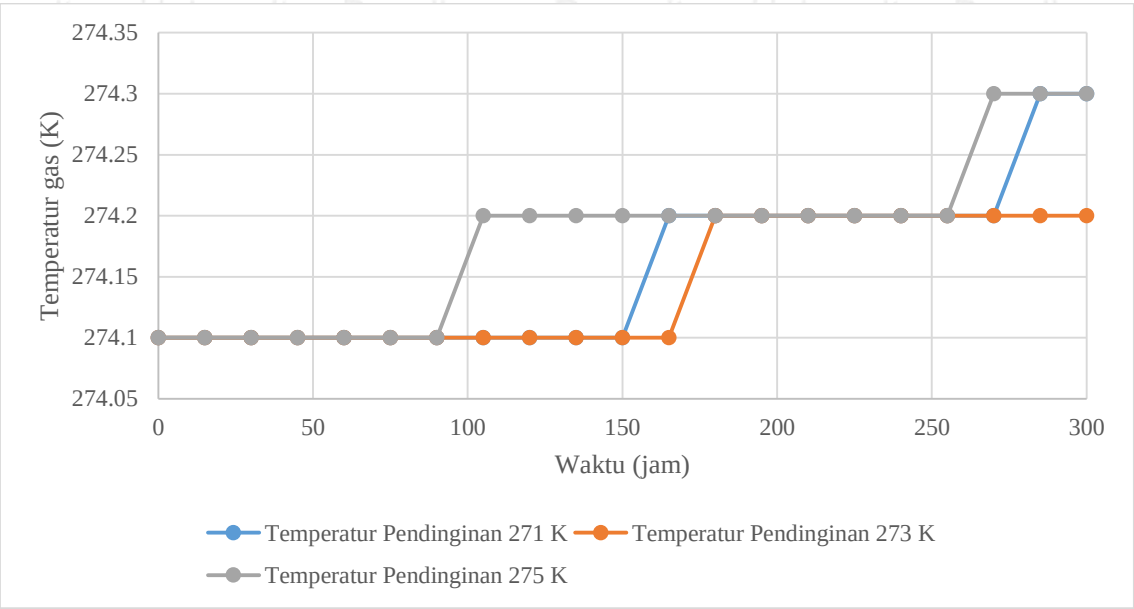
P_{1B} (bar) : Tekanan akhir gas pada pembentukan gas hidrat propana butan pada *crystallizer*

4.2.2 Data Stabilitas Gas Hidrat Propana Butana

Stabilitas gas hidrat propana butana dilakukan selama 5 jam dengan temperatur ±-5°C hal ini disesuaikan dengan diagram kesetimbangan tiga fasa gas hidrat.



Gambar 4.4 Grafik hubungan antara tekanan gas dalam *crystallizer* terhadap waktu pada saat stabilitas hidrat



Gambar 4.5 Grafik hubungan antara temperatur gas dalam *crystallizer* terhadap waktu pada saat stabilitas hidrat

Tabel 4.2
Stabilitas Gas Hidrat Propana Butana

Stabilitas Gas Hidrat Propana Butana			
Variasi *cooling bath*	T_S (°C)	P_{0S} (bar)	P_{1S} (bar)
271 K	3.4	0	0.05
273 K	7	0	0.06
275 K	9.3	0	0.06

Keterangan :

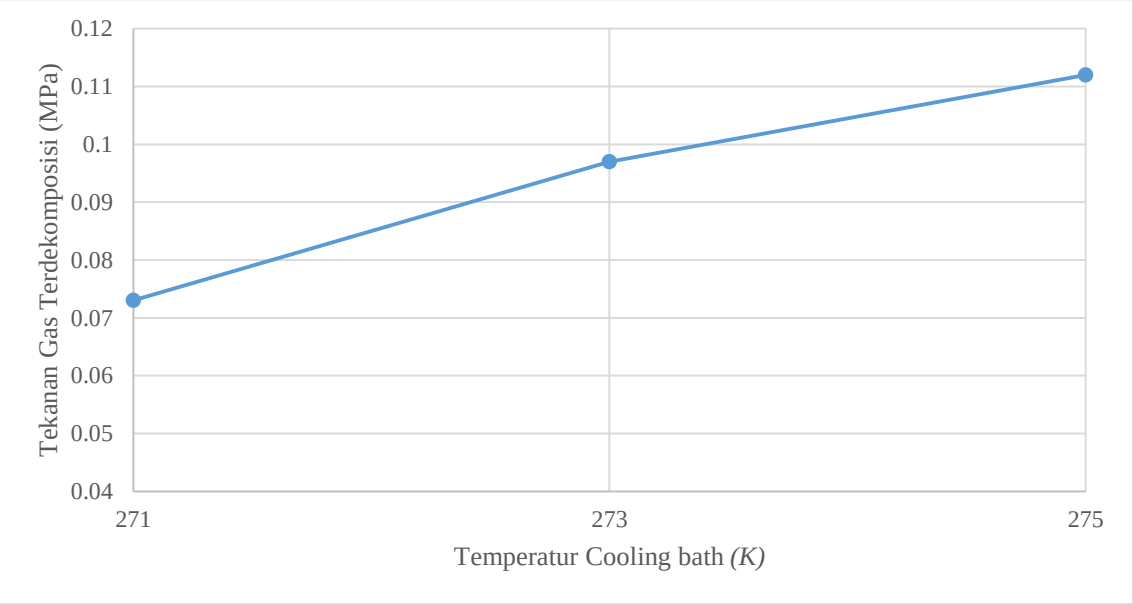
T_S (°C) : Temperatur sistem pada stabilitas gas hidrat propana butana

P_{0S} (bar) : Tekanan awal gas pada stabilitas gas hidrat propana butana

P_{1S} (bar) : Tekanan akhir gas pada stabilitas gas hidrat propana butana

4.2.3 Data Kapasistas Penyimpanan Gas Hidrat Propana Butana

Setelah pengambilan data stabilitas hidrat selesai maka dilanjutkan dengan pengambilan data kapasitas penyimpanan gas hidrat propana butana dengan membiarkan system terdekomposisi dengan temperatur ruangan (27 °C). Kapasitas penyimpanan gas hidrat kurang lebih membutuhkan waktu selama 5 jam untuk mencapai temperatur ruangan dari temperatur stabilitas hidrat (-5°C).



Gambar 4.6 Diagram Tekanan yang terdekomposisi pada saat Kapasitas Penyimpanan Hidrat

Tabel 4.3
Kapasitas Penyimpanan Gas Hidrat Propana Butana

Kapasitas Penyimpanan Gas Hidrat Propana Butana			
Variasi *cooling bath*	t (menit)	T_P (°C)	P_P (bar)
271 K	301	27.429	0.73
273 K	299	27.129	0.97
275 K	300	27.041	1.12

Keterangan :

T_P (°C) : Temperatur sistem pada kapasitas penyimpanan gas hidrat propana butana

P_P (bar) : Tekanan gas pada kapasitas penyimpanan gas hidrat propana butana

t (menit) : Waktu yang diperlukan untuk hidrat mencapai temperatur 27 ^{0}C dari temperatur -5 ^{0}C

4.3 Contoh Perhitungan

4.3.1 Perhitungan Mol Konsumsi Gas Propana Butana pada Laju Pembentukan Hidrat

Contoh perhitungan diambil dari variasi temperatur *cooling bath* pada temperatur 271 K dan tekanan awal gas 3 bar pada laju pembentukan gas hidrat propana butana saat menit ke 585. Laju pembentukan gas hidrat dihitung dari nilai mol gas yang terbentuk pada hidrat.

- Data Hasil Penelitian

  T_{0B} : 24 (^{0}C)

  T_{1B} : 3.4 (^{0}C)

  P_{0B} : 3 (bar)

  P_{1B} : 1.96 (bar)

- Perhitungan Tekanan Gas yang ada didalam Hidrat
  - $\Delta P_H = P_{0B} - P_{1B}$
  - $\Delta P_H = 3 - 1.96$
  - $\Delta P_H = 1.04\ bar$

- Perhitungan Faktor Kompresibilitas

Tabel 4.4
Tekanan kritis (Pc) 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

$\Delta PH = 1.04 \text{ x } 0.1$

$\Delta PH = 0.104$ Mpa

$$T = T_1\text{B} + 273$$

$$T = 3.4 + 273$$

$$T = 276.4\ K$$

- Mencari P_{cr}

$$P_{cr} = \frac{P_B + P_P}{2}$$

$$= \frac{3.80 + 4.25}{2}$$

$$= 4.025\ MPa$$

- Mencari P_r

$$P_r = \frac{\Delta\text{PH}}{P_{cr}}$$

$$= \frac{0.104\ MPa}{4.025\ MPa}$$

$$= 0.04870$$

- Mencari T_{cr}

$$T_c = \frac{T_B + T_P}{2}$$

$$= \frac{425 + 370}{2}$$

$$= 397.5\ K$$

- Mencari T_r

$$T_r = \frac{T}{T_{cr}}$$

$$= \frac{276.4\ K}{397.5\ K}$$

$$= 0.69517$$

Maka didapatkan :

$P_r = 0.04870$

$T_r = 0.69517$

- Faktor asentrik (ω)

$\omega = -1 - \log p_r$

$= -1 - \log 0.04870$

$= 0.31251$

- Koefisien yang dipengaruhi Pr dan Tr (α)

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

$= \{1 + (0.37464 + 1.54226x0.31251 - 0.2699x0.31251^2)(1 - 0.69517^{0.5})\}^2$

$= 1.29507$

- Persamaan keadaan Peng Robinson

$A = \frac{\Omega_a \alpha p_r}{T_r^2}$; $\Omega_a = 0.45724$

$= \frac{0.45724 \text{ x } 1.29507 \text{ x } 0.04870}{0.69517^2}$

$= 0.05967$

$B = \frac{\Omega_b p_r}{T_r}$; $\Omega_a = 0.07779$

$= \frac{0.07779 \text{ x } 0.04870}{0.69517}$

$= 0.00545$

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

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

$c_2 = B - 1$

$= 0.00545 - 1$

$= -0.99455$

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

$= 0.05967 - 2 \text{ x } 0.00545 - 3 \text{ x } 0.00545^2$

$= 0.04868$

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

$= 0.05967 \text{x } 0.007222 - 0.00545^2 - 0.00545^3$

$= 0.00030$

- Determinan persamaan keadaan Peng Robinson

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

$= \frac{3 \text{ x } (-0.99455) - 0.04868^2}{3}$

$= -0.99534$

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

$= \frac{2(-0.99455)^3 - 9(-0.99455)(0.04868) + 27(0.00030)}{27}$

$= 0.08970$

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

$= \frac{-0.99534^3}{27} + \frac{0.08970^2}{4}$

$= -0.03451$

- Faktor kompresibilitas (Z)

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

$= 1.33389$

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

$$= 2\sqrt{\frac{-(-0.99534)}{3}}\cos(1.33389) - \frac{(-0.99455)}{3}$$

$$= 0.60189$$

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

$$= 2\sqrt{\frac{-(-0.99534)}{3}}\cos(1.33389 + 120) - \frac{(-0.99455)}{3}$$

$$= -0.09854$$

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

$$= 2\sqrt{\frac{-(-0.99534)}{3}}\cos(1.33389 + 240) - \frac{(-0.99455)}{3}$$

$$= -0.63914$$

- Perhitungan Volume Gas

$$Y = 6.6855x + 80.567$$

$$= 6.6855 \text{ x } (1.96) + 80.567$$

$$= 0.00009367\ m^3$$

- Perhitungan Nilai Mol Gas

$$n = \frac{P\ x\ V}{Z\ x\ R\ x\ T}$$

$$= \frac{\Delta PH\ x\ y}{Z\ x\ R\ x\ T_{1B}}$$

$$= \frac{1.96\ x\ 0.00009367}{0.60189\ x\ 8.31447\ x\ (0.104 + 273)}$$

$$= 0.01327\ mol$$

4.3.2 Perhitungan Volume Kapasitas Penyimpanan Hidrat

Contoh perhitungan diambil dari variasi *cooling bath* temperatur 271 K pada kapasitas penyimpanan gas hidrat propana butana yang mencapai temperatur 27^0C dengan waktu 301 menit. Kapasitas penyimpanan hidrat yang dihitung adalah volume gas yang terdekomposisi hingga temperatur ruangan dengan volume gas gas hidrat secara teoritis dengan volume air 50 cm^3.

- Perhitungan Massa Air

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = 1\ {}^{gr}/_{cm^3}\ x\ 50\ cm^3$$

$$= 50\ gr$$

- Perhitungan mol air (H_2O)

$$nh = \frac{m}{Mr(H2O)}$$

$$= \frac{50}{18}$$

$$= 2.78\ mol$$

- Perhitungan massa dari gas propana butana yang dapat menjadi hidrat secara teoritis menggunakan massa air seberat 50 gr.

$$H_g = m\ x\ 15.5\ \%$$

$$= 50\ gr\ x\ 0.155$$

$$= 7.75\ gr$$

- Perhitungan mol gas dari gas propana butana yang bias menjadi hidrat secara teoritis menggunakan massa air seberat 50 gr.

$$nt = \frac{m}{M_{r\ (LPG)}}$$

$$= \frac{H_g}{M_{r\ (LPG)}}$$

$$= \frac{7.75}{102}$$

$= 0.07598\ mol$

- Perhitungan volume gas hidrat propana butana secara teoritis

$$Vt = \frac{n_t}{P_t}$$
$$= \frac{0.07598}{1.01325}$$
$$= 0.07498\ cm^3$$

- Perhitungan volume gas hidrat propana butana secara aktual menggunakan persamaan gas nyata.

$$PV = n\ Z\ R\ T$$

Dapat diasumsikan bahwa nilai Z, R dan T gas hidrat propana butana baik aktual maupun teoritis dalam keadaan standar yaitu tekanan 1 atm dan temperatur 27 ^{0}C teoritis adalah sama.

$$Va = \frac{n_a}{P_p}$$
$$= \frac{0.00685}{0.221458}$$
$$= 0.030931388\ cm^3$$

- Perhitungan kapasitas penyimpanan gas hidrat propana butana

$$Kp = \frac{V_a}{V_t}$$
$$= \frac{0.030931388}{0.07498}$$
$$= 0.41249001\ \ V/V$$

- Perhitungan volume gas hidrat propana butana secara aktual menggunakan volume gas yang mengalir pada flowmeter. Didapatkan volume gas yang mengalir pada flowmeter menggunakan debit 0.84 L/Min sebesar 0.93 detik. Maka volume aktual nya adalah :

$$V_a = \frac{t}{60} \text{ x } 0.84\ \frac{L}{min}$$

$$= \frac{21}{60} \text{ x } 0.84 \frac{L}{min}$$

$$= 0.029857223$$

- Perhitungan kapasitas penyimpanan gas hidrat propana butana aktual menggunakan flowmeter

$$Kp = \frac{V_a}{V_t}$$

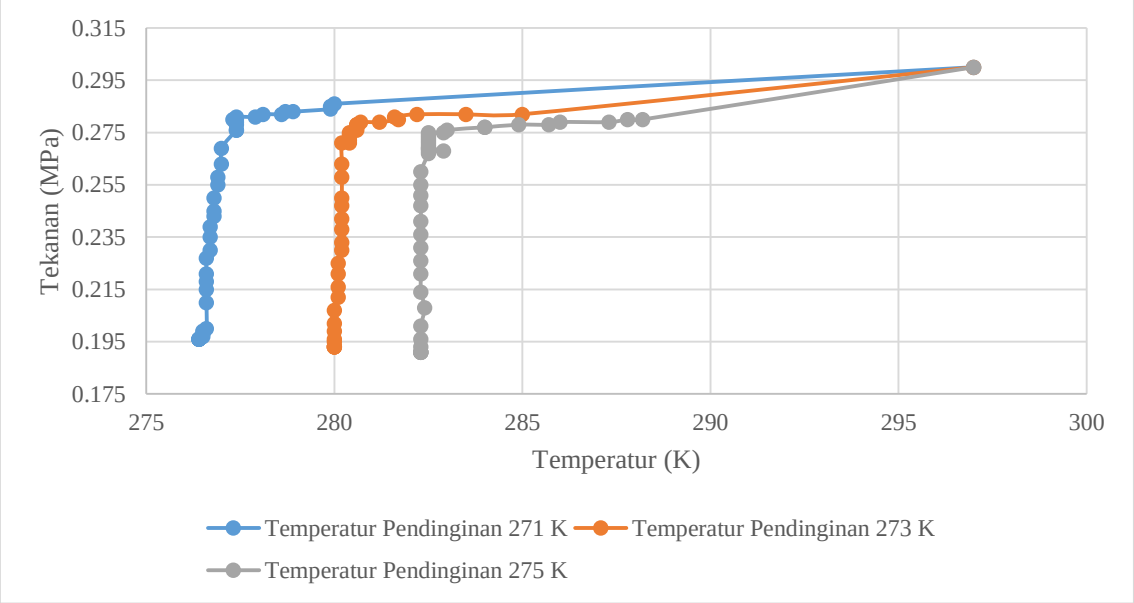
$$= \frac{0.029857223}{0.07498}$$

$$= 0.398202496 \ V/V$$

4.4 Pembahasan

4.4.1 Analisa Laju Pembentukan Hidrat Propana Butana dengan Variasi Temperatur *Cooling bath*

4.4.1.1 Analisa Grafik Hubungan Antara Tekanan dan Temperatur Gas Pada Saat Laju Pembentukan Hidrat



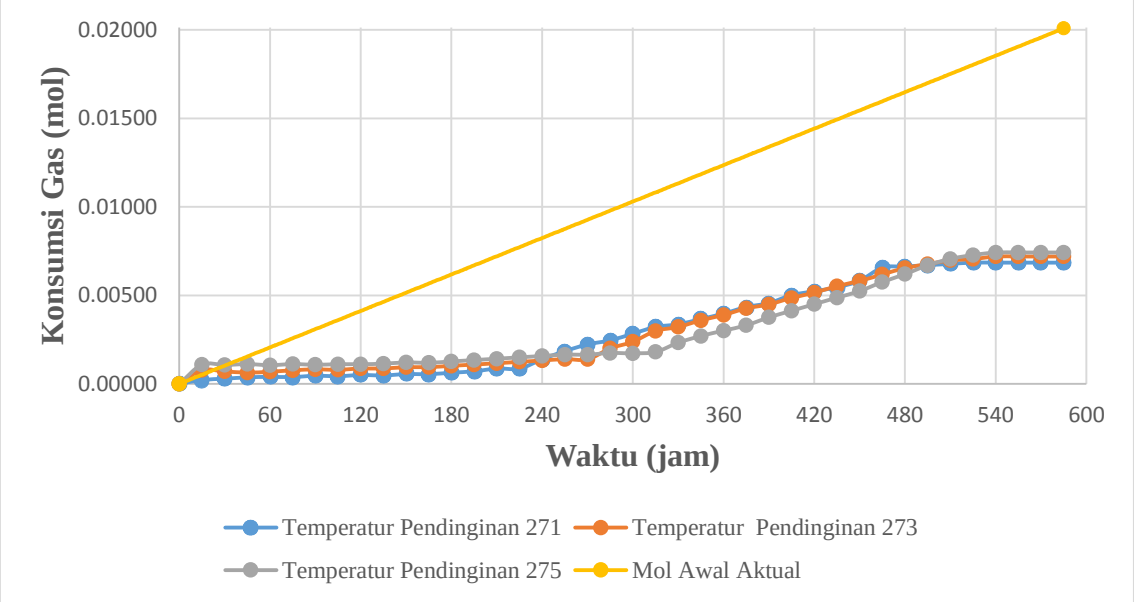
Gambar 4.7 Grafik Hubungan Antara Tekanan dan Temperatur Gas Pada Saat Laju Pembentukan Hidrat

Gambar diatas adalah grafik hubungan antara tekanan dan temperatur gas pada saat laju pembentukan hidrat. Pembentukan hidrat terjadi pada saat temperatur sistem (molekul air dan molekul gas dalam *crystallizer*) sudah mencapai temperatur kesetimbangan hidrat. Pembentukan hidrat ditandai dengan menurunnya tekanan secara signifikan namun tidak

diiringi dengan penurunan temperatur yang signifikan, temperatur cenderung lebih konstan. Terbentuk dan bertumbuhnya hidrat akan melewati dua fase yaitu fase waktu induksi dan fase pertumbuhan hidrat. Pada *induction time* ditandai dengan adanya penurunan tekanan secara linier karena adanya perubahan temperatur awal yaitu 297 K menuju temperatur pembentukannya masing-masing sesuai dengan variasinya masing-masing. Pada fase pertumbuhan hidrat ditandai dengan adanya penurunan tekanan yang sangat signifikan dan temperatur nya sudah konstan. Gambar 4.6 merupakan profil tekanan pembentukan hidrat campuran propana butana memiliki profil yang sama dengan profil tekanan pembentukan hidrat propana pada Gambar 2.1.

Pada Gambar 4.6 menunjukan bahwa hubungan tekanan dan temperatur didalam *crystallizer* pada variasi temperatur *cooling bath* dan tekanan pembentukannya sebesar 0.3 MPa. Terdapat 3 variasi temperatur *cooling bath* yaitu 271 K, 273 K, 275 K. Variasi dari temperatur *cooling bath* akan mempengaruhi temperatur pembentuksan hidrat dalam *crystallizer*. Dimana dengan adanya temperatur yang berbeda-beda menyebabkan tekanan awal pertumbuhan hidrat berbeda-beda juga. Hal ini dikarenakan semakin diturunkannya temperatur pendinginannya akan membuat perbedaan temperatur sistem dan *cooling bath* akan semakin besar maka perpindahan panas yang terjadi akan semakin besar dan membuat laju pembentukan hidrat akan semakin cepat. Pada saat laju pembentukan hidrat semakin cepat maka tekanan akan semakin cepat untuk turun.

4.4.1.2 Analisa Grafik Hubungan Antara Konsumsi Gas dan Waktu Pada Saat Laju Pembentukan Hidrat

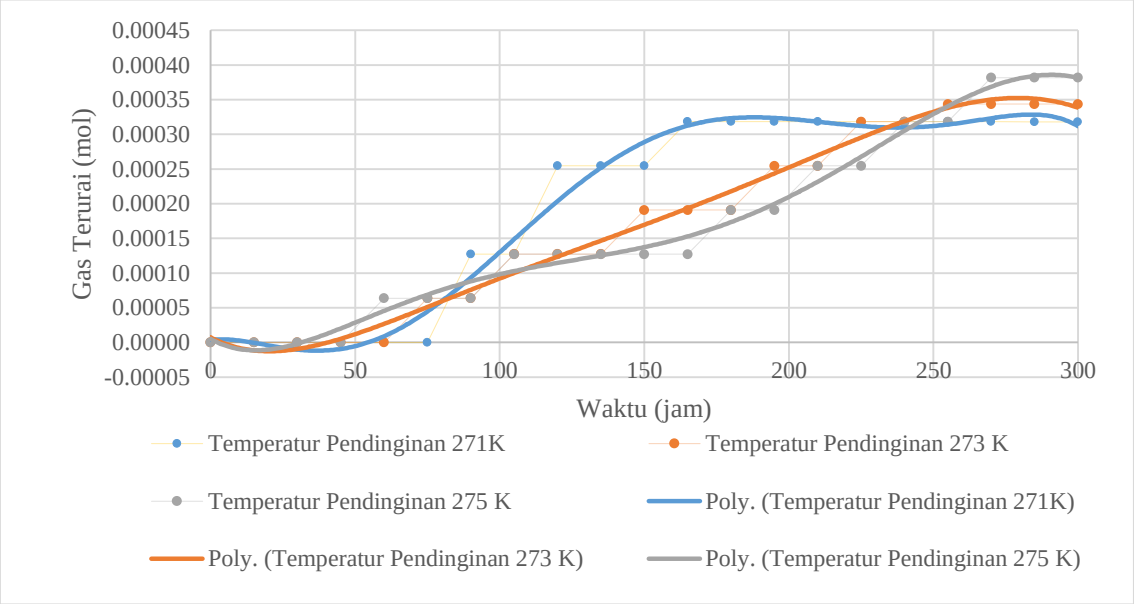


Gambar 4.8 Grafik Hubungan Antara Konsumsi Gas dan Waktu Pada Saat Laju Pembentukan Hidrat

Gambar 4.8 merupakan grafik hubungan antara Konsumsi gas dan waktu pada saat laju pembentukan hidrat dengan variasi temperatur *cooling bath* sebesar 271 K, 273 K, 275 K. Konsumsi gas adalah banyaknya gas yang dibentuk menjadi hidrat selama proses pembentukan. Pada Gambar 4.8 dapat dilihat nilai konsumsi gas yang paling besar ada pada temperatur *cooling bath* 275 K. Hal ini dikarenakan pada saat temperatur pendinginan semakin besar maka waktu untuk terbentuknya hidrat akan semakin lama, oleh karena itu waktu yang dibutuhkan inti untuk menarik gas dari dari permukaan ke inti akan semakin lama, dengan waktu yang semakin lama ini membuat jumlah gas yang dikonsumsi akan semakin besar. Sedangkan nilai konsumsi gas yang paling kecil ada pada temperatur *cooling bath* 271 K. Hal ini disebabkan oleh semakin cepatnya hidrat yang terbentuk akibat temperatur *cooling bath* yang semakin menurun, maka perpindahan panas yang terjadi antara *cooling bath* dengan sistem akan semakin cepat. Dengan semakin cepatnya hidrat terbentuk maka semakin sedikit pula gas yang dikonsumsi.

4.4.2 Analisa Stabilitas Hidrat Propana Butana dengan Variasi Temperatur *Cooling bath*

4.4.2.1 Analisa Grafik Hubungan Gas Terurai dan Waktu Pada Saat Stabilitas Hidrat



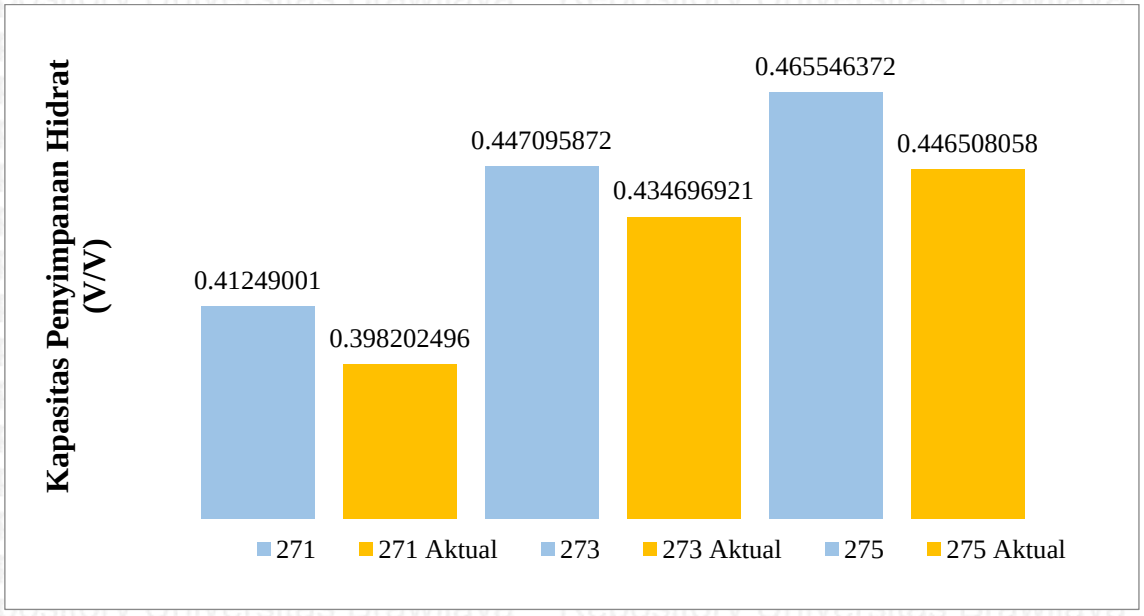
Gambar 4.9 Grafik Hubungan Gas Terurai dan Waktu Pada Saat Stabilitas Hidrat

Gambar 4.9 adalah grafik hubungan gas terurai dan waktu pada stabilitas hidrat. Stabilitas hidrat adalah suatu kemampuan hidrat untuk mempertahankan strukturnya agar tidak terdekomposisi menjadi gas dan cair. Stabilitas hidrat dapat dipengaruhi oleh dua faktor. Pertama, hidrat mempunyai lapisan es disekitar Kristal hidrat yang menahan dari terjadinya penguraian lebih lanjut. Yang kedua, penguraian pada *crystallizer* terjadi pada sistem yang tertutup. Gas propana dan butana yang terurai akan menaikan tekanan pada *crystallizer*. Meningkatnya tekanan pada sistem akan menghambat laju penguraian dari hidrat.

Setelah hidrat terbentuk menjadi fase kristal hidrat selanjutnya akan disimpan pada temperatur *cooling bath* sebesar 268 K. Yang selanjutnya akan diamati berapa kenaikan tekanan yang dialami hidrat selama kurung waktu 5 jam. Pada Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa nilai stabilitas yang paling baik ada pada temperatur *cooling bath* 271 K, hal ini disebabkan oleh semakin rendah nya temperatur maka akan membuat lapisan es yang mengelilingi kristal hidrat akan semakin kuat. Semakin kuatnya lapisan es yang mengelilingi hidrat dikarenakan temperatur pada lapisan es hidrat semakin rendah, semakin rendahnya temperatur lapisan es akan membuat kristal hidrat semakin sulit untuk terurai.

4.4.3 Analisa Kapasitas Penyimpanan Hidrat Propana Butana dengan Variasi Temperatur *Cooling bath*

4.4.3.1 Analisa Diagram Kapasitas Penyimpanan Hidrat Teoritis dan Aktual



Gambar 4.10 Diagram Kapasitas Penyimpanan Hidrat Teoritis dan Aktual

Gambar 4.10 adalah diagram kapasitas penyimpanan hidrat campuran propana butana dengan variasi temperatur *cooling bath* sebesar 271 K, 273 K, 275 K. Kapasitas penyimpanan hidrat merupakan kemampuan hidrat dalam menyimpan gas alam. Semakin banyaknya gas campuran propana butana yang dikonsumsi pada saat laju pembentukan maka kapasitas penyimpanan hidrat akan semakin besar. Kapasitas penyimpanan hidrat yang digunakan pada hal ini merupakan perbandingan antara volume gas dari hidrat yang terurai dalam *crystallizer* (V_a) dengan volume gas tersebut dalam keadaan standar (1 atm untuk tekanan dan 27 °C). Kapasitas penyimpanan yang paling besar ada pada variasi temperatur *cooling bath* 275 K dengan nilai sebesar 0.465546372 V/V.

Hal ini dikarenakan semakin besar temperatur *cooling bath* maka perpindahan panas dari *cooling bath* ke dalam sistem akan semakin lambat, dengan semakin lambat perpindahan panas akan membuat laju pembentukan hidrat semakin lambat pula. Semakin lambat laju pembentukan hidrat maka semakin banyak gas yang dikonsumsi. Semakin banyaknya gas yang dikonsumsi oleh hidrat akan membuat nilai kapasitas penyimpanan akan semakin besar.

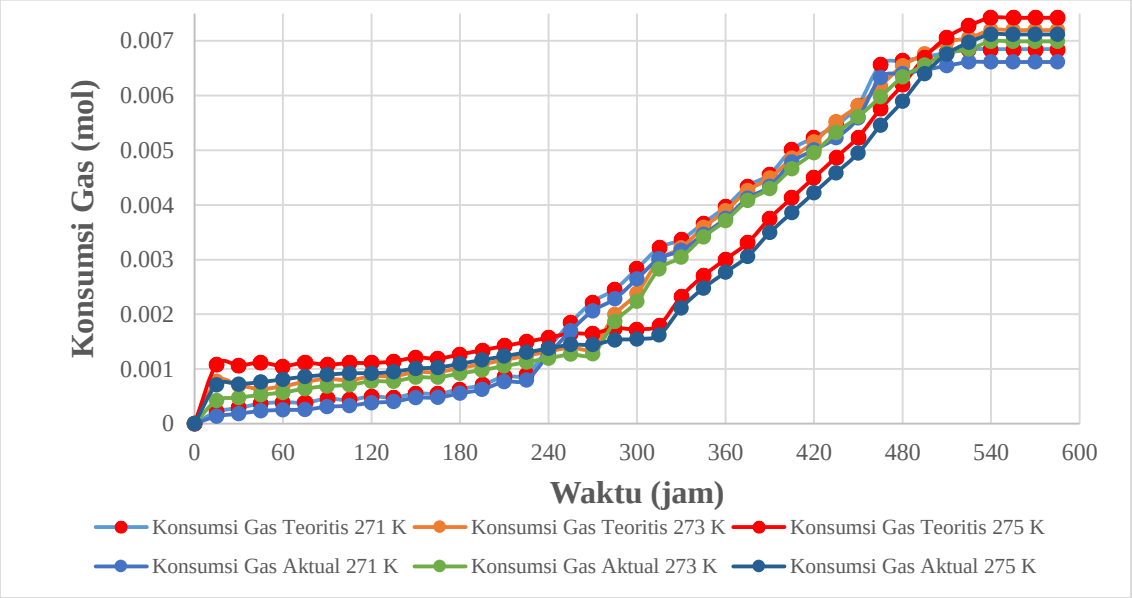
Pada Gambar 4.10 nilai kapasitas penyimpanan aktual didapatkan dari nilai volume gas aktual hidrat yang terurai dalam *crystallizer* (V_a) diperoleh dari flowmeter. Gas yang terurai

akan dibuang melewati flowmeter untuk dihitung volume gas yang sebenarnya ada didalam *crystallizer*.

Pada Gambar 4.10 didapatkan perbedaan nilai kapasitas penyimpanan dengan yang menggunakan kapasitas penyimpanan dari persamaan yang ada. Nilai dari kapasitas penyimpanan hidrat aktual selalu lebih kecil dibandingkan dengan kapasitas hidrat secara teoritis, hal ini disebabkan adanya *losses* yang dialami oleh gas hidrat yang keluar pada saluran sebelum mencapai flowmeter.

4.4.4 Analisa Validasi Perbandingan antara Konsumsi Gas Teoritis Perhitungan dan Konsumsi Gas Aktual Hidrat Pengukuran dengan Waktu

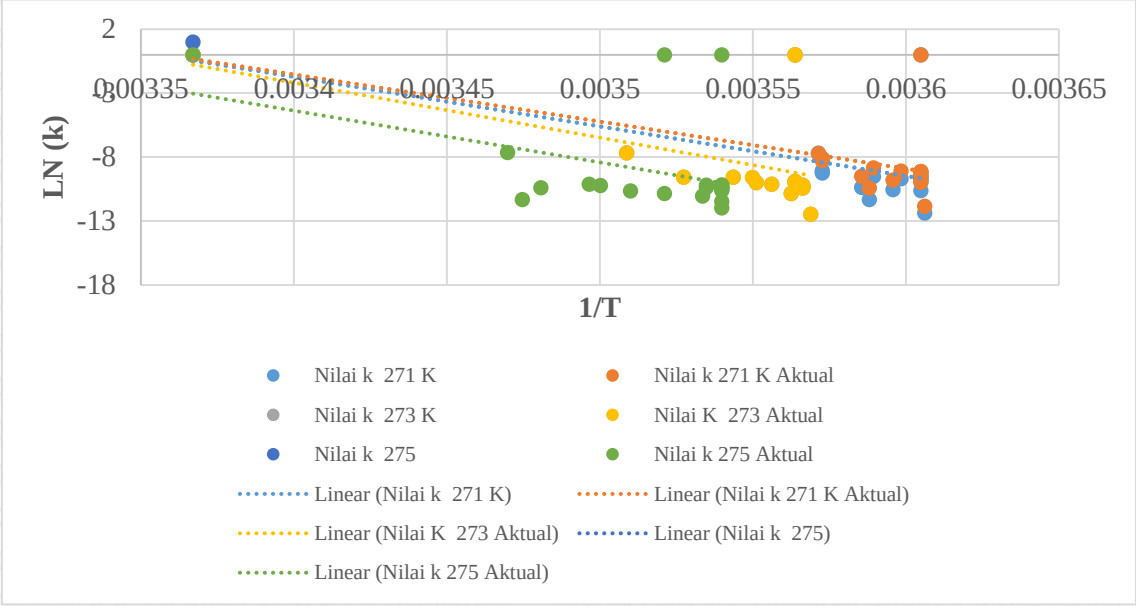
4.4.4.1Analisa Grafik Validasi Perbandingan antara Konsumsi Gas Teoritis Perhitungan dan Konsumsi Gas Aktual Hidrat Pengukuran dengan Waktu



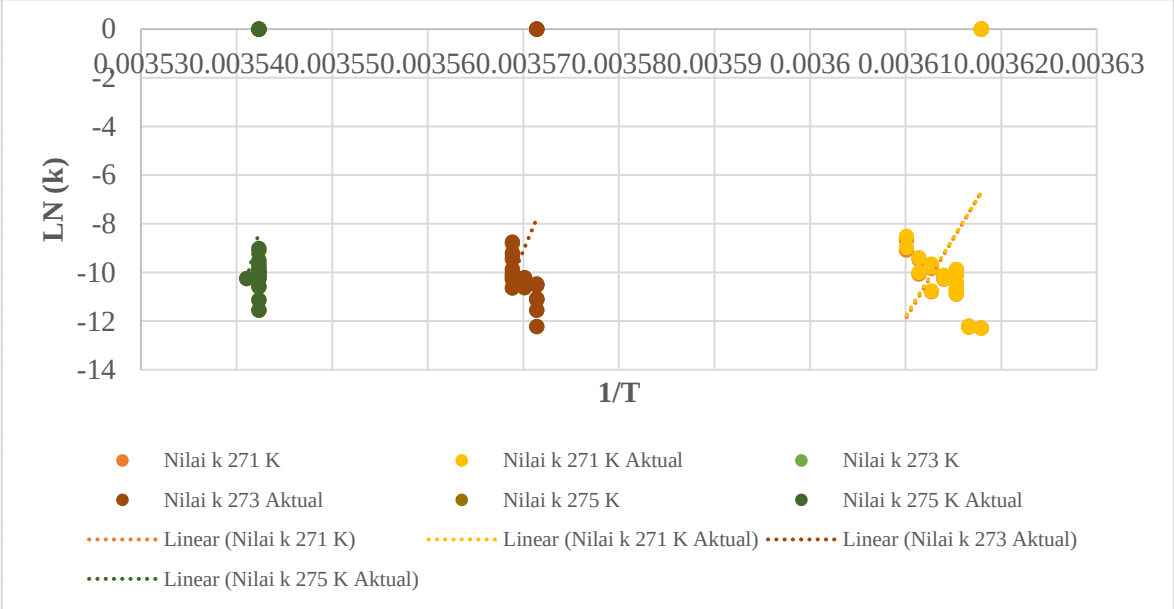
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan antara Konsumsi Gas Teoritis dan Konsumsi Gas Aktual Hidrat dengan Waktu

Gambar 4.11 adalah grafik perbandingan antara konsumsi gas teoritis dan konsumsi gas aktual. Dimana nilai konsumsi gas teoritis berdasarkan dengan perhitungan menggunakan persamaan gas nyata. Sedangkan konsumsi gas aktual didapatkan dari jumlah gas yang terurai pada kapasitas penyimpanan. Pada gambar diatas dapat dilihat nilai konsumsi gas pada saat laju pembentukan hidrat aktual lebih kecil dibandingkan dengan nilai konsumsi gas teoritis. Faktor yang membuat nilai aktual lebih kecil dibandingkan dengan nilai gas adalah adanya faktor k. Faktor k adalah faktor konstanta laju pembentukan hidrat yang

dipengaruhi bukan hanya dari waktu saja, faktor k juga dipengaruhi oleh temperatur, tekanan. Penjelasan nilai k akan diterangkan pada grafik dibawah ini.



Gambar 4.12 Grafik nilai k pada fase pertama



Gambar 4.13 Grafik nilai k pada fase kedua

Gambar diatas menunjukan nilai k dari masing-masing temperatur pembentukan, dapat dilihat dari masing-masing temperatur pembentukan. Nilai k dari aktual nilainya lebih besar dibandingkan dengan nilai k teoritis. Hal ini menyebabkan konsumsi gas aktual akan lebih kecil dibandingkan dengan nilai konsumsi gas teoritis karena semakin besar nilai k maka faktor kecepatan pembentukan dari hidrat akan semakin besar pula. Dengan naiknya nilai

faktor konstanta laju pembentukan hidrat maka gas yang dikonsumsi akan semakin sedikit. Pada gambar diatas faktor nilai k dibagi menjadi dua fase, hal ini disebabkan oleh adanya dua fase yang dialami oleh hidrat pada saat laju pembentukan hidrat, fase yang pertama yaitu waktu induksi dimana fase hidrat menunjukan fase uap dan cair, dan fase yang kedua menunjukan bahwa hidrat dalam fase uap dan padat.

Mengacu pada Gambar 4.8 dan 4.11 terdapat nilai mol gas awal secara aktual pada saat laju pembentukan hidrat. Sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$n_{awal} = n_s + n_{KP} \quad \text{..... (4-2)}$$

Dimana :

n_{awal} = Jumlah mol gas pada awal sebelum laju pembentukan hidrat dimulai

n_s = Jumlah mol gas yang tidak menjadi hidrat dan dibuang pada saat data stabilitas hidrat akan diambil

n_{KP} = Jumlah mol gas yang menjadi hidrat dan ada pada kapasitas penyimpanan hidrat

Dari persamaan diatas menunjukan bahwa jika jumlah mol gas pada awal sebelum laju pembentukan hidrat dimulai (n_{awal}) dikurangi dengan jumlah mol gas yang menjadi hidrat yang ada pada kapasitas penyimpanan (n_{KP}) maka didapatkan jumlah mol gas yang tidak menjadi hidrat (n_s). Jika jumlah mol gas pada awal sebelum laju pembentukan hidrat dimulai (n_{awal}) dikurangi dengan jumlah mol gas yang tidak menjadi hidrat (n_s) maka akan mendapat jumlah mol gas yang menjadi hidrat (n_{KP}). Dengan adanya persamaan ini dapat disimpulkan bahwa jumlah mol gas yang dikonsumsi sama dengan jumlah mol gas yang ada pada kapasitas penyimpanan hidrat. Adapun nilai konsumsi gas secara teoritis dari masing-masing temperatur pembentukan adalah sebagai berikut: Temperatur 271 K nilai konsumsi gas teoritis nya sebesar 0.00685 mol. Temperatur 273 K nilai konsumsi gas teoritis nya sebesar 0.00719 mol. Temperatur 275 K nilai konsumsi gas teoritis nya sebesar 0.00742 mol. Sedangkan nilai konsumsi gas aktual pada masing-masing temperatur pembentukan adalah sebagai berikut: Temperatur 271 K nilai konsumsi gas aktual nya sebesar 0.00661 mol. Temperatur 273 K nilai konsumsi gas aktual nya sebesar 0.00699 mol. Temperatur 275 K nilai konsumsi gas aktual nya sebesar 0.00712 mol.

Dengan menggunakan persamaan yang ada diatas dan mengacu pada hasil yang didapatkan pada Gambar 4.11 maka didapatkanlah hasil jumlah mol gas yang dikonsumsi pada saat laju pembentukan hidrat sama dengan jumlah mol gas yang ada pada kapasitas penyimpanan hidrat.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Semakin rendahnya temperatur pembentukan maka laju pembentukan hidrat gas campuran propana butana akan semakin cepat, dan waktu yang dibutuhkan untuk terbentuknya hidrat akan semakin cepat.
2. Semakin rendahnya temperatur pembentukan maka stabilitas hidrat yang terbentuk akan semakin baik.
3. Semakin naiknya temperatur pembentukan akan membuat nilai kapasitas penyimpanan hidrat semakin besar.
4. Jumlah mol gas yang dikonsumsi pada saat laju pembentukan sama dengan nilai kapasitas penyimpanan hidrat

5.2 Saran

Dari penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, maka penulis menyampaikan beberapa hal yang perlu dikembangkan untuk penelitian kedepannya, yaitu :

1. Perlu dilakukannya penelitian yang lebih lanjut tentang laju pembentukan, stabilitas dan kapasitas penyimpanan hidrat dengan menggunakan gas alam yang lain sebagai gas penyusun.
2. Perlu dilakukannya penelitian yang lebih lanjut tentang laju pembentukan, stabilitas dan kapasitas penyimpanan hidrat dengan variasi volume air dalam *crystallizer*.
3. Perlu dilakukannya penelitian yang lebih lanjut tentang kekuatan hidrat dengan komposisi hidrat CO_2 sebagai klatrat.

DAFTAR PUSTAKA

Carroll, John. 2009. *Natural Gas Hydrate A Guide for Engineers. Second Edition. British Library*, USA.

Cengel, Y. A. dan Boles, M. A. 2006. *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.

Durham, W. B., Strern, L. A. dan Kirby, S. H. 2003. *Ductile Flow of Methane Hydrate*. *Can J. Phys*. 81: 373-380.

Ganji, H., Manteghian, M., Zadeh, Sadaghiani, K., Omiddkhah, R.M. & Mofrad, Rahimi, H. 2007. *Effect of Different Surfactants on Methane Hydrate Formation Rate, Stability and Storage Capacity*. Iran .

Guo, Boyun., Ghalambor, Ali. 2005. *Natural Gas Engineering Handbook. University of Louisiana at Lafayette*, USA.

Hilyard, Joseph F. 2012. The *Oil & Gas Industry A Nontechnical Guide*. Pennwell, USA.

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.

Kotz, Treichel and Townsend. 2012. *Chemistry&Chemical Reactivity. Eighth Edition. Brooks/Cole. Cengage Learning*. Kanada.

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 Standp Of The Lewis Theory of Valence*. *J. Am. Chem. Soc*. 42: 1419.

Linga, Praveen., Kumar, Rajnish., Lee, Dong Ju., Ripmeester, John. & Englezos, Peter. 2010. *A New Apparatus to Enhace The Race of Gas Hydrate Formation: Application to Capture of Carbon Dioxcide. International Jurnal of Greenhouse Gas Control*, Canada.

Mokhatab, S., Poe, W. A., and Speight, J. G. 2006. *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing*. Amsterdam: Elsevier.

Sloan, E.D., Koh, Carolyn, A. 2008. *Clathrate Hydrate of Natural Gases. Third Edition. Taylor & Francis Group*, LLC.

Speight, J. G. 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Texas: Gulf Publishing Company.

Thakur, Kumar, Naresh., Rajput, Sanjeev. 2011. *Exploration of Gas Hydrate. Geophysical Techniques*. Springer, London New York.

Wardana, ING. 2008. Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran. PT. Danar Wijaya. *Brawijaya University Press*: Malang

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data hasil penelitian

Data Laju Pembentukan Hidrat									
	275 K			273 K			271 K		
NO	WAKTU	TEMPERATUR	Tekanan	WAKTU	TEMPERATUR	TEKANAN	WAKTU	TEMPERATUR	TEKANAN
	MENIT	K	Mpa	MENIT	K	Mpa	MENIT	K	Mpa
1	0	297	0.3	0	297	0.3	0	297	0.3
2	10	288.2	0.28	10	285	0.282	10	280	0.286
3	20	287.8	0.28	20	283.5	0.282	20	279.9	0.285
4	30	287.3	0.279	30	282.2	0.282	30	279.9	0.284
5	40	286	0.279	40	281.6	0.281	40	278.9	0.283
6	50	285.7	0.278	50	281.7	0.28	50	278.7	0.283
7	60	284.9	0.278	60	281.2	0.279	60	278.6	0.282
8	70	284	0.277	70	280.7	0.279	70	278.1	0.282
9	80	284	0.277	80	280.6	0.278	80	277.9	0.281
10	90	283	0.276	90	280.6	0.278	90	277.4	0.281
11	100	282.9	0.275	100	280.6	0.277	100	277.4	0.28
12	110	282.5	0.275	110	280.6	0.277	110	277.3	0.28
13	120	282.5	0.274	120	280.6	0.276	120	277.4	0.279
14	130	282.5	0.273	130	280.4	0.275	130	277.4	0.278
15	140	282.5	0.272	140	280.4	0.274	140	277.4	0.276
16	150	282.5	0.271	150	280.4	0.273	150	277.4	0.276
17	160	282.5	0.27	160	280.4	0.272	160	277	0.269
18	170	282.5	0.269	170	280.4	0.271	170	277	0.263
19	180	282.5	0.269	180	280.2	0.271	180	276.9	0.258
20	190	282.9	0.268	190	280.2	0.263	190	276.9	0.255
21	200	282.5	0.268	200	280.2	0.258	200	276.8	0.25
22	210	282.5	0.267	210	280.2	0.25	210	276.8	0.245
23	220	282.3	0.26	220	280.2	0.247	220	276.8	0.243
24	230	282.3	0.255	230	280.2	0.242	230	276.7	0.239
25	240	282.3	0.251	240	280.2	0.238	240	276.7	0.235
26	250	282.3	0.247	250	280.2	0.233	250	276.7	0.23
27	260	282.3	0.241	260	280.2	0.23	260	276.6	0.227
28	270	282.3	0.236	270	280.1	0.225	270	276.6	0.221
29	280	282.3	0.231	280	280.1	0.221	280	276.6	0.218
30	290	282.3	0.226	290	280.1	0.216	290	276.6	0.215
31	300	282.3	0.221	300	280.1	0.212	300	276.6	0.21
32	310	282.3	0.214	310	280	0.207	310	276.6	0.2
33	320	282.4	0.208	320	280	0.202	320	276.5	0.199
34	330	282.3	0.201	330	280	0.199	330	276.5	0.198
35	340	282.3	0.196	340	280	0.196	340	276.5	0.197
36	350	282.3	0.193	350	280	0.195	350	276.4	0.196
37	360	282.3	0.191	360	280	0.193	360	276.4	0.196
38	370	282.3	0.191	370	280	0.193	370	276.4	0.196
39	380	282.3	0.191	380	280	0.193	380	276.4	0.196
40	390	282.3	0.191	390	280	0.193	390	276.4	0.196

Repository Universitas Brawijaya

Data Stabilitas Hidrat									
	271 K			273 K			275 K		
NO	WAKTU	TEMPERATUR	Tekanan	WAKTU	TEMPERATUR	Tekanan	WAKTU	TEMPERATUR	Tekanan
	MENIT	K	Mpa	MENIT	K	Mpa	MENIT	K	Mpa
1	0	274.1	0	0	274.1	0	0	274.1	0
2	15	274.1	0	10	274.1	0	15	274.1	0
3	30	274.1	0	20	274.1	0	30	274.1	0
4	45	274.1	0	30	274.1	0	45	274.1	0
5	60	274.1	0	40	274.1	0	60	274.1	0.001
6	75	274.1	0	50	274.1	0.001	75	274.1	0.001
7	90	274.1	0.002	60	274.1	0.001	90	274.1	0.001
8	105	274.1	0.002	70	274.1	0.002	105	274.2	0.002
9	120	274.1	0.004	80	274.1	0.002	120	274.2	0.002
10	135	274.1	0.004	90	274.1	0.002	135	274.2	0.002
11	150	274.1	0.004	100	274.1	0.003	150	274.2	0.002
12	165	274.2	0.005	110	274.1	0.003	165	274.2	0.002
13	180	274.2	0.005	120	274.2	0.003	180	274.2	0.003
14	195	274.2	0.005	130	274.2	0.004	195	274.2	0.003
15	210	274.2	0.005	140	274.2	0.004	210	274.2	0.004
16	225	274.2	0.005	150	274.2	0.005	225	274.2	0.004
17	240	274.2	0.005	160	274.2	0.005	240	274.2	0.005
18	255	274.2	0.005	170	274.2	0.0054	255	274.2	0.005
19	270	274.2	0.005	180	274.2	0.0054	270	274.3	0.006
20	285	274.3	0.005	190	274.2	0.0054	285	274.3	0.006
21	300	274.3	0.005	200	274.2	0.0054	300	274.3	0.006

Data Kapasitas Penyimpanan Hidrat			
271 K		273 K	275 K
	0.073 Mpa	0.097 Mpa	0.112 Mpa

Repository Universitas Brawijaya
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
REPOSITORY.UB.AC.ID

Repository Universitas Brawijaya
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
REPOSITORY.UB.AC.ID