

**STUDI POTENSI PENERAPAN DAN PERANCANGAN
TURBOEXPANDER CO₂ SUPERKRITIS UNTUK
MENINGKATKAN KEEKONOMIAN LAPANGAN GAS
RAKSASA EAST NATUNA**

TESIS

**Karya tulis sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Magister dari
Institut Teknologi Bandung**

**Oleh
MERANDY PALA'BIRAN
NIM: 23117012
(Program Studi Magister Teknik Mesin)**



**INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
Agustus 2020**

ABSTRAK

STUDI POTENSI PENERAPAN DAN PERANCANGAN TURBOEXPANDER CO₂ SUPERKRITIS UNTUK MENINGKATKAN KEEKONOMIAN LAPANGAN GAS RAKSASA EAST NATUNA

Oleh
Merandy Pala'biran
NIM:23117012
(Program Studi Magister Teknik Mesin)

Lapangan East Natuna di Laut China Selatan (LCS) diperkirakan memiliki isi gas awal di tempat 222 triliun kaki kubik (TCF) dengan kandungan CO₂ sebesar 71%. Karena kandungan gas CO₂-nya yang sangat tinggi, menyebabkan tantangan yang sangat besar untuk mengembangkan proyek di lapangan yang ditemukan pada tahun 1974 ini. Sebuah *plant* penghilang gas CO₂ yang sangat besar dan mahal harus dibangun untuk menangani permasalahan ini, yang kemudian membuat pengembangan lapangan gas ini sangat sulit untuk menjadi ekonomis. Untuk itu, penelitian ini bertujuan untuk mencari potensi aplikasi alat turboexpander untuk membuat proyek pengembangan lapangan gas ini dapat lebih ekonomis. Selanjutnya, penelitian ini juga melakukan desain detail dan simulasi numerik alat turboexpander yang akan dipasang pada setiap kepala sumur. Karena data yang tersedia hanya pada kondisi reservoir, maka penelitian ini dilakukan dengan studi desain dan simulasi numerik yang terintegrasi dari kondisi bawah permukaan hingga kondisi permukaan.

Hasil dari studi ini didapatkan bahwa desain sistem dengan penerapan alat *wellhead* turboexpander pada setiap sumur gas dapat mengurangi kebutuhan energi sistem lapangan serta meningkatkan nilai parameter ekonomi IRR dan NPV dalam pengembangan lapangan gas raksasa East Natuna secara signifikan. Skenario dengan menggunakan *wellhead* turboexpander dapat mengurangi konsumsi energi *processing plant* hingga 1,83 GW dengan nilai IRR skenario sebesar 12,68% atau meningkatkan IRR lapangan sebanyak 7,28% dibanding skenario tanpa menggunakan *wellhead* turboexpander yang hanya sebesar 5,4%, dengan efisiensi minimum turboexpander untuk dapat diterapkan yaitu sebesar 79%. Dari hasil perancangan dan simulasi numerik turboexpander, desain paling optimum dari turboexpander didapat pada konfigurasi jumlah sudu rotor sebanyak 26 buah, sudu *nozzle* sebanyak 25 buah, dan sudut sudu *nozzle* sebesar 72°, di putaran 25000 rpm. Turboexpander yang didesain dapat menghasilkan daya sebesar 4,65 MW dari setiap sumur gas yang memiliki laju alir gas 184.6 MMSCFD, dengan bilangan Mach maksimum sebesar 0,95, dan efisiensi 86,6%.

Kata kunci: Lapangan gas East Natuna, Efisiensi energi fasilitas pemurnian gas, proses Dual Pressure Low Temperature, Turboexpander

ABSTRACT

POTENTIAL APPLICATION AND DESIGN OF SUPERCRITICAL CO₂ TURBOEXPANDER TO IMPROVE THE ECONOMY OF EAST NATUNA GIANT GAS FIELD

by

Merandy Pala'biran

NIM:23117012

(Master's Program in Mechanical Engineering)

The East Natuna Field at the South China Sea (SCS) has an estimated original gas in place of 222 trillion cubic feet (TCF) with 71% CO₂ content. Because of his very high CO₂ content, it causes a tremendous challenge to develop a project for this field that was discovered in 1974. A huge, costly CO₂ removal plant has to be constructed that makes the project very difficult to be economical. For this reason, this study is intended to seek the potential application of a turboexpander to lower the cost, such as that can make this project economical. Furthermore, a detailed design and numerical simulation of the turboexpander that will be installed at each wellhead is performed. Because data that available is only in the reservoir condition, this research was conducted with a design study and numerical simulation integrated from subsurface conditions to surface conditions.

The results of this study found that the system design with the application of turboexpander wellhead devices in each gas well can reduce the energy requirements of the field system and significantly increase the economical parameters of IRR and NPV in the development of the East Natuna giant gas field. Scenarios using a wellhead turboexpander can reduce processing plant energy consumption by 1.83 GW with a scenario IRR value of 12.68% or increase field IRR by 7.28% compared to scenarios without using a turboexpander which is only 5.4%, with the minimum efficiency of turboexpander that can be applied is equal to 79%. From the results of the turboexpander design and numerical simulation, the most optimum design of the turboexpander design is obtained in the configuration of 26 rotor blades, 25 nozzle blades, and 72° nozzle blade angle, at 25000 rpm rotation. The designed turboexpander can produce 4.65 MW of power from each well with 184.6 MMSCFD gas flowrate, a maximum Mach number of 0.95, at an efficiency of 86.6%.

Keywords: East Natuna gas field, Gas sweetening plant energy efficiency, Dual Pressure Low Temperature process, Turboexpander

**STUDI POTENSI PENERAPAN DAN PERANCANGAN
TURBOEXPANDER CO₂ SUPERKRITIS UNTUK
MENINGKATKAN KEEKONOMIAN LAPANGAN GAS
RAKSASA EAST NATUNA**

Oleh
Merandy Pala'biran
NIM:23117012
(Program Studi Magister Teknik Mesin)

Institut Teknologi Bandung

Menyetujui
Tim Pembimbing

Tanggal 28 Agustus 2020

Pembimbing I

(Prof.Dr.Ing.Ir. Priyono Soetikno DEA)

NIP. 19530611 197800 1 001

Pembimbing II

(Prof.Ir. Tutuka Ariadji M.Sc., Ph.D)

NIP. 19640826 199001 1 001

PEDOMAN PENGGUNAAN TESIS

Tesis Magister yang tidak dipublikasikan terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Institut Teknologi Bandung, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis dengan mengikuti aturan HAKI yang berlaku di Institut Teknologi Bandung. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kaidah ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Sitasi hasil penelitian Tesis ini dapat ditulis dalam bahasa Indonesia sebagai berikut:

Pala'biran, Merandy. (2019): *Studi Potensi Penerapan dan Perancangan Turboexpander CO₂ Superkritis Untuk Meningkatkan Keekonomian Lapangan Gas Raksasa East Natuna*, Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung.

dan dalam bahasa Inggris sebagai berikut:

Pala'biran, Merandy. (2019): *Potential Application and Design of Supercritical CO₂ Turboexpander to Improve The Economy of East Natuna Giant Gas Field*, Master's Thesis, Institut Teknologi Bandung.

Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh tesis haruslah seizin Dekan Sekolah Pascasarjana, Institut Teknologi Bandung

*Dipersembahkan kepada
ibu (Ujianti Sattu),
bapak (Juprianus Palabiran),
dan adik (Mardiyanto, Dewi, Gabriel),
serta tanah airku tercinta, Indonesia.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat kasih dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tesis ini dengan judul “*Studi Potensi Penerapan dan Perancangan Turboexpander CO₂ Superkritis Untuk Meningkatkan Keekonomian Lapangan Gas Raksasa East Natuna*”. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh kelulusan sebagai Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan studi S-2 diantaranya:

1. Ibu dan Bapak serta adik-adik tercinta yang selalu mendo'akan penulis serta memberi dukungan lahir dan batin yang tiada habisnya hingga penulis mampu menyelesaikan laporan tesis ini dengan baik.
2. Bapak Prof.Dr.Ing.Ir. Priyono Soetikno DEA. selaku pembimbing 1 dan dosen di Teknik Mesin ITB yang membimbing dan selalu memberikan masukan serta motivasi dalam pengerjaan tesis ini.
3. Bapak Prof.Ir.Tutuka Ariadji M.Sc.,Ph.D. selaku pembimbing 2 dan dosen di Teknik Perminyakan ITB, yang juga memberikan dedikasi untuk membimbing penulis dari awal hingga selesai pengerjaan tesis ini.
4. Sahabat Lab Hidrodinamika ITB (Mas Nono, Rachman, Rijal, Wisnu, Mas Bagus, Mas Aris), teman Konversi Energi & KK.Energi Baru Terbarukan, teman S2 T.Mesin Angkatan 2017 & 2018, teman kosan Y.D. Aditya, dan sahabat lain yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu, atas bantuan, doa, masukan dan semangatnya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penelitian dan laporan tesis ini masih terdapat kekurangan, sehingga penulis memohon saran dan masukan lain yang membangun penulis sehingga dapat menjadi lebih baik lagi di masa mendatang. Penulis berharap semoga tesis ini dapat dimanfaatkan sebaik-baiknya oleh semua pihak, utamanya untuk kepentingan umum dan menambah referensi ilmiah.

Bandung, Agustus 2020

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PEDOMAN PENGGUNAAN TESIS	iv
HALAMAN PERUNTUKAN	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMBANG DAN SIMBOL	xviii
BAB I Pendahuluan	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	4
I.3 Tujuan Penelitian	4
I.4 Manfaat Penelitian	4
I.5 Batasan Masalah	5
I.6 Metode Penelitian	5
BAB II Dasar Teori	7
II.1 Deskripsi Lapangan Gas Natuna	7
II.2 Kajian Pustaka Karakteristik Fluida CO ₂	8
II.2.1 Sifat Umum Fluida CO ₂	8
II.2.2 Perilaku dan Diagram Fasa Campuran CH ₄ -CO ₂	9
II.3 Proses <i>Gas Sweetening</i>	9
II.4 Turboexpander	11
II.4.1 Aplikasi Turboexpander untuk <i>Power Recovery</i>	11
BAB III Metodologi Penelitian	15
III.1 Metode dan Diagram Alur Penelitian	15
III.2 Ketersediaan Data Penelitian	22
BAB IV Kajian Sistem Produksi Gas dan Carbon Geosequestration ...	23
IV.1 Hasil Kajian Reservoir Gas East Natuna	23
IV.2 Desain Skema Proses Pemisahan CO ₂ dan CH ₄ (<i>Natural Gas Sweetening Process</i>)	24
IV.2.1 Skema awal fasilitas permukaan untuk proses pemisahan CH ₄ dan CO ₂ pada lapangan gas East Natuna	25
IV.2.2 Pemilihan Metode <i>Natural Gas Sweetening</i>	30
IV.2.3 Perancangan dan Simulasi <i>Process Flow Diagram</i>	34
IV.2.3.1 <i>Simple Distillation Process Flow Diagram</i>	35
IV.2.3.2 <i>Complete Distillation Process Flow Diagram</i>	38
IV.2.4 Analisis Tekanan Injeksi Untuk Sumur Injeksi CO ₂	45
IV.2.5 Sistem Pendinginan Untuk Kondenser	49

IV.2.6	Analisis Energi Lapangan	51
IV.2.7	Hasil Akhir Rancangan Proses Natural Gas Sweetening.....	55
IV.3	Performa Reservoir Sistem <i>Carbon Geosequestration</i>	61
IV.3.1	Perubahan Konsentrasi Fraksi CO ₂	61
IV.3.2	Perubahan Produksi Air (<i>Field Water Production</i>) dan Produksi Gas	63
IV.4	Analisis Skenario Tanpa <i>Wellhead</i> Turboexpander	65
IV.5	Analisis dan perbandingan skenario sistem <i>gas sweetening</i> .	72
IV.6	Analisis Ekonomi Lapangan	74
IV.6.1	Strategi Ekonomi Produksi Gas Lapangan East Natuna.....	74
IV.6.2	Metode Perhitungan Ekonomi.....	77
IV.6.3	Skenario Ekonomi 1 (Produksi menggunakan Turboexpander).....	82
IV.6.3.1	Deskripsi Skenario 1	82
IV.6.3.2	Hasil Perhitungan Ekonomi Skenario 1	85
IV.6.4	Skenario 2 (Produksi Tanpa menggunakan Turboexpander).....	86
IV.6.4.1	Deskripsi Skenario 2	86
IV.6.4.2	Hasil Perhitungan Ekonomi Skenario 2	89
IV.6.5	Perbandingan Nilai Profitabilitas Skenario 1 dan 2.	90
IV.6.6	Perbandingan Model Ekonomi Gross Split terhadap PSC pada Skenario 1	92
IV.6.7	Analisis Sensitivitas Ekonomi.....	95
IV.6.7.1	Sensitivitas Ekonomi dari Penjualan Gas CO ₂	95
IV.6.7.2	<i>Spider Chart</i> Sensitivitas beberapa parameter ekonomi	97
IV.6.7.3	Sensitivitas Ekonomi dari Rancangan Turbexpander	98
BAB V	Perancangan dan Simulasi Numerik Alat Turboekspander	101
V.1	Perancangan Turboexpander	101
V.1.1	Kondisi awal rancangan Turboexpander	101
V.1.2	Desain <i>Rotor</i>	105
V.1.3	Desain <i>Nozzle</i>	109
V.1.4	Desain <i>Nose Cone</i>	111
V.1.5	Desain <i>Volute</i>	113
V.1.6	Desain <i>Diffuser</i>	115
V.1.7	<i>Assembly</i> Komponen	116
V.2	Studi Simulasi CFD Turboexpander.....	118
V.2.1	<i>Meshing</i>	118
V.2.2	Pengaturan Simulasi.....	123
V.2.3	Simulasi Desain Awal (<i>Preliminary Design</i>)	124
V.2.3.1	Analisa Pola Aliran <i>Preliminary Design</i>	125
V.2.3.2	Performa Turbin <i>Preliminary Design</i>	131
V.2.4	Optimasi Desain Turbin	132
V.2.4.1	Simulasi Variasi Jumlah Sudu <i>Rotor</i>	133
V.2.4.2	Simulasi Variasi Jumlah Sudu <i>Nozzle</i>	134

V.2.4.3 Simulasi Variasi <i>Blade Angle Nozzle</i> (β_2) dan pengaruh penggunaan <i>nozzle-rotor clearance</i>	137
V.2.5 Analisis Desain Akhir Turbin	140
V.2.5.1 Perbandingan Desain	140
V.2.5.2 Performansi Desain Akhir Turboexpander	143
BAB VI Simpulan	149
VI.1 Kesimpulan	149
VI.2 Saran	151

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

LAMPIRAN A (Studi Simulasi Reservoir)

LAMPIRAN B (Studi Reservoir Sistem *Carbon Geosequestration*)

LAMPIRAN C (*Project Schedule* dan Asumsi Harga Skenario Ekonomi)

LAMPIRAN C1	: <i>Project Schedule</i> Skenario Ekonomi 1
LAMPIRAN C2	: <i>Project Schedule</i> Skenario Ekonomi 2
LAMPIRAN C3	: Asumsi Harga Kebutuhan Fasilitas Skenario 1
LAMPIRAN C4	: Asumsi Harga Kebutuhan Fasilitas Skenario 2

LAMPIRAN D (Koordinat Profil Sudu Pengarah & *Nose Cone*)

LAMPIRAN D1	: Koordinat profil sudu pengarah (<i>Nozzle</i>)
LAMPIRAN D2	: Koordinat profil <i>Nose Cone</i>

LAMPIRAN E (Detail Perhitungan Perancangan Turbin *Preliminary Design*)

LAMPIRAN F (Gambar Mekanik Desain Akhir Turboexpander)

LAMPIRAN F1	: <i>Assembly</i> Turboexpander
LAMPIRAN F2	: Gambar mekanik <i>rotor</i>
LAMPIRAN F3	: Gambar mekanik <i>nozzle ring</i>
LAMPIRAN F4	: Gambar mekanik <i>volute</i>
LAMPIRAN F5	: Gambar mekanik <i>diffuser</i>
LAMPIRAN F6	: Gambar mekanik <i>nose cone</i>
LAMPIRAN F7	: Gambar mekanik <i>shaft</i>
LAMPIRAN F8	: Gambar mekanik <i>journal foil bearing</i>
LAMPIRAN F9	: Gambar mekanik <i>thrust foil bearing</i>
LAMPIRAN F10	: Gambar mekanik <i>labyrinth seal</i>
LAMPIRAN F11	: Gambar mekanik <i>end gland cap</i>

DAFTAR TABEL

Tabel II.1	Estimasi <i>Gas-In Place</i> Reservoir Natuna, TCF (Fenter dkk., 1996)	8
Tabel III.1	Rangkuman data-data lapangan yang tersedia	22
Tabel IV.1	Hasil Penyelesaian Cadangan Model Reservoir	23
Tabel IV.2	Data kondisi fluida keluaran dari sumur yang hasil studi reservoir	23
Tabel IV.3	Data atau spesifikasi awal untuk rancangan skema pemurnian gas alam dari reservoir gas East Natuna di <i>onshore</i>	29
Tabel IV.4	Perbandingan penggunaan energi tiap metode pemurnian gas CH ₄ dari kandungan CO ₂ dalam wujud %LBM (Pellegrini dkk, 2017)	33
Tabel IV.5	Perbandingan distribusi penggunaan energi tiap metode pemurnian gas CH ₄ dari kandungan CO ₂ (Pellegrini dkk, 2017)	34
Tabel IV.6	Asumsi-asumsi dalam perancangan dan simulasi proses .	38
Tabel IV.7	Detail dari spesifikasi desain <i>stripping column</i>	43
Tabel IV.8	Detail dari spesifikasi desain <i>condenser</i>	43
Tabel IV.9	Detail dari spesifikasi desain <i>reboiler</i>	43
Tabel IV.10	Rangkuman data hubungan laju alir, tekanan injeksi permukaan dan tekanan injeksi di <i>bottom hole</i> untuk reservoir gas East Natuna	46
Tabel IV.11	Rangkuman kebutuhan energi dalam bentuk daya atau energi per satuan waktu, dari total energi yang diproduksi dan energi yang dibutuhkan untuk lapangan gas East Natuna	52
Tabel IV.12	Parameter-paramater untuk menghitung kebutuhan gas CH ₄ untuk suplai energi mandiri di lapangan gas East Natuna	54
Tabel IV.13	Spesifikasi <i>stripping column</i> pada Skenario 2	67
Tabel IV.14	Spesifikasi <i>condenser</i> pada Skenario 2	67
Tabel IV.15	Spesifikasi <i>reboiler</i> pada Skenario 2	67
Tabel IV.16	Tabel hasil analisis kebutuhan energi <i>plant</i> dengan Skenario 2	69
Tabel IV.17	Perbedaan kondisi fluida yang akan masuk ke <i>stripping column</i> pada dua jenis Skenario	72
Tabel IV.18	Rangkuman untuk perbandingan total kebutuhan energi keseluruhan plant, net sell gas CH ₄ , dan net sell gas CO ₂ pada kedua skenario	74
Tabel IV.19	<i>Base Split</i> pada sistem <i>Gross Split</i> (PERMEN ESDM No.08 Tahun 2017)	78
Tabel IV.20	Ketentuan dan besarnya koreksi atau <i>additional split</i> pada sistem <i>gross split</i> (PERMEN ESDM No.08 Thn 2017) ...	78
Tabel IV.21	Aturan tambahan <i>split</i> dari <i>progressive split</i> menurut PERMEN ESDM No.08 Tahun 2017	79

Tabel IV.22	Besarnya koreksi <i>split</i> dari parameter <i>split</i> tetap untuk lapangan gas East Natuna	79
Tabel IV.23	Rangkuman besaran <i>split</i> untuk pengembangan lapangan gas East Natuna	84
Tabel IV.24	Kebutuhan <i>tangible</i> untuk fasilitas <i>offshore</i> Skenario 1...	84
Tabel IV.25	Kebutuhan <i>tangible</i> untuk <i>subsea pipeline</i> Skenario 1....	84
Tabel IV.26	Kebutuhan <i>tangible</i> untuk kabel bawah laut Skenario 1 ..	84
Tabel IV.27	Kebutuhan <i>tangible</i> untuk <i>onshore processing plant</i> pada Skenario 1	84
Tabel IV.28	Kebutuhan <i>intangible</i> untuk <i>abandonment & site restoration</i> Skenario 1	84
Tabel IV.29	Asumsi fiskal ekonomi pada Skenario 1.....	85
Tabel IV.30	Jumlah produk gas yang dapat dijual pada Skenario 1.....	85
Tabel IV.31	Nilai profitabilitas ekonomi Skenario 1 pada lapangan gas East Natuna	86
Tabel IV.32	Kebutuhan <i>tangible</i> untuk fasilitas <i>offshore</i> Skenario 2...	88
Tabel IV.33	Kebutuhan <i>tangible</i> untuk <i>subsea pipeline</i> Skenario 2....	88
Tabel IV.34	Kebutuhan <i>tangible</i> untuk kabel bawah laut pada Skenario 2.....	88
Tabel IV.35	Kebutuhan <i>tangible</i> untuk <i>onshore gas processing plant</i> pada Skenario 2	88
Tabel IV.36	Kebutuhan <i>intangible</i> untuk <i>abandonment & site restoration</i> Skenario 2	88
Tabel IV.37	Jumlah produk gas yang dapat dijual pada Skenario 2.....	89
Tabel IV.38	Nilai profitabilitas ekonomi Skenario 2 pada lapangan gas East Natuna	90
Tabel IV.39	Besaran tambahan NPV ke kontraktor dan negara jika Skenario 1 (menggunakan turboekspander) pada lapangan gas East Natuna diterapkan.....	92
Tabel IV.40	Asumsi fiskal dan data produksi untuk analisa Skenario 1 menggunakan PSC.....	93
Tabel IV.41	Nilai profitabilitas ekonomi Skenario 1 pada lapangan gas East Natuna dengan model PSC.....	94
Tabel IV.42	Perbandingan studi profitabilitas ekonomi lapangan gas East Natuna	94
Tabel IV.43	Tabel hubungan persentase CO ₂ yang terjual dari total gas CO ₂ yang terproduksi ke beberapa parameter pada discount rate 10%	95
Tabel IV.44	Hubungan efisiensi turboexpander ke beberapa parameter teknis dan ekonomi.....	99
Tabel V. 1	Properti fluida yang keluar dari sumur gas desain lapangan gas East Natuna	103
Tabel V. 2	Data termodinamik fluida masuk dan keluar turboexpander yang ingin dirancang	103
Tabel V. 3	Rangkuman parameter hasil perancangan <i>rotor</i>	107
Tabel V. 4	Rangkuman parameter hasil perancangan <i>nozzle</i>	110
Tabel V. 5	Hasil perhitungan dimensi <i>volute</i> setiap segemen (per 30°)	113

Tabel V. 6	Rangkuman parameter hasil perancangan <i>volute</i>	115
Tabel V. 7	Rangkuman parameter hasil perancangan <i>diffuser</i>	116
Tabel V. 8	Statistik mesh pada <i>rotor</i>	119
Tabel V. 9	Jumlah mesh komponen turboexpander untuk simulasi CFD	122
Tabel V. 10	Pengaturan simulasi turboexpander.....	123
Tabel V. 11	Tabel hasil simulasi numerik desain awal turboexpander pada $\dot{m} = 91.84 \text{ kg/s}$	131
Tabel V. 12	Tabel hasil simulasi variasi jumlah sudu <i>rotor</i>	133
Tabel V. 13	Tabel hasil simulasi variasi jumlah sudu <i>nozzle</i>	134
Tabel V. 14	Hasil simulasi variasi <i>blade angle nozzle</i> (β_2) pada $n \text{ rotor} = 26$, $n \text{ nozzle} = 25$, putaran 25000 rpm	137
Tabel V. 15	Perbandingan beberapa parameter perhitungan desain menggunakan metode desain Aungier (2005), dan hasil simulasi pada desain akhir	142

DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1	Peta Lokasi Lapangan Natuna (Fenter dkk., 1996).....	7
Gambar II. 2	Diagram Fasa CO ₂ (Alabdulkarem dkk., 2012).....	8
Gambar II. 3	Contoh chart untuk Pemilihan Proses untuk <i>Acid Gas Treating</i> berdasarkan Tekanan Parsial Gas (Tennyson dan Schaf, 1977)	10
Gambar II. 4	Penerapan dari turboexpander Direct-Connected Compressor untuk suatu sistem pendinginan atau cryogenic untuk LNG liquefaction process (Mokhatab, 2014).....	12
Gambar II. 5	Turboexpander jenis direct-connected compressor turboexpander yang didesain oleh L.A. Turbine (laturbine.com).....	13
Gambar II. 6	Skema power absorption dari tipe gear and generator turboexpander.....	13
Gambar II. 7	Desain turboexpander milik Atlas Copco 2018 (atlascope-gap.com).....	14
Gambar III. 1	Diagram alir proses pemodelan reservoir	16
Gambar III. 2	Diagram alir simulasi produksi reservoir.....	17
Gambar III. 3	Diagram alir perancangan dan simulasi proses natural gas <i>sweetening</i>	18
Gambar III. 4	Diagram alir simulasi sistem <i>carbon capture storage</i> (CCS)	19
Gambar III. 5	Diagram alir perhitungan keekonomian lapangan gas	20
Gambar III. 6	Diagram alir perancangan alat turboexpander	21
Gambar IV. 1	Perbandingan performansi produksi model reservoir: (a) model reservoir sebenarnya Fenter dkk. (1996), (b) model reservoir sederhana yang dimodelkan pada studi ini.....	24
Gambar IV. 2	Rencana <i>staging</i> atau tahapan pemanfaatan raw gas dari reservoir gas East Natuna (Studi IATMI, 2018)	25
Gambar IV. 3	Hasil simulasi reservoir dengan menggunakan 40 sumur dan total laju alir lapangan sebesar 7384 MMSCFD.....	26
Gambar IV. 4	Skema rencana alokasi gas CO ₂ yang terproduksi dari reservoir gas East Natuna (Studi IATMI, 2018)	27
Gambar IV. 5	Konsep dari pengembangan lapangan gas East Natuna pada studi ini yaitu dengan skema <i>Carbon Capture and Storage</i> (CCS) ditambah dengan pemanfaatan alat Turboexpander untuk <i>energy recovery</i> pada studi ini.	28
Gambar IV. 6	Spesifikasi kualitas gas alam yang dianjurkan pada sistem <i>pipeline</i> dan <i>sell gas</i> dari Engineering Data Book (2004) (Kidnay, 2006)	30
Gambar IV. 7	Diagram pemilihan metode natural gas <i>sweetening</i> (Revolin, 2016).....	31
Gambar IV. 8	Beberapa metode <i>natural gas sweetening</i> menggunakan metode <i>cryogenic</i>	34

Gambar IV. 9	Gambaran umum dari proses <i>Dual Pressure Low-Temperature</i> (WO2014054945 A2), digambarkan oleh Revolin (2018).....	36
Gambar IV. 10	Hasil simulasi proses <i>shortcut distillation</i> pada proses <i>Dual Pressure Low-Temperature</i> untuk kondisi lapangan gas East Natuna	37
Gambar IV. 11	Zona <i>gas hydrate</i> dan kondisi tekanan dan temperature keluaran turboexpander.....	39
Gambar IV. 12	Skematik dan hasil simulasi pada aliran gas untuk 1-kluster dari kepala sumur di <i>offshore production platform</i> menuju pipa transmisi.....	40
Gambar IV. 13	Gambaran desain skematik jaringan pipa transmisi gas dari platform produksi di <i>Offshore</i> (Titik A) menuju fasilitas pemrosesan gas di Pulau Natuna Besar, Kepulauan Riau (Titik B). (Google Map, 2019).....	41
Gambar IV. 14	Hasil rancangan kondisi jalur transmisi <i>offshore-onshore</i>	41
Gambar IV. 15	Hasil perancangan <i>stripping column</i> untuk proses <i>Dual Pressure Low-Temperature</i>	42
Gambar IV. 16	Skema penyaluran fluida produk keluaran dari kondenser dan reboiler dari setiap kolom pemisahan pada total 8 kolom pemisahan.....	44
Gambar IV. 17	Gambaran lengkap skematik untuk process flow diagram pada desain pemisahan menggunakan metode <i>Dual Pressure Low-Temperature</i> untuk kondisi produksi dari 1 kluster sumur.....	45
Gambar IV. 18	Sensitivitas tekanan minimum injeksi pada permukaan sumur pada beberapa rentang laju alir injeksi.....	46
Gambar IV. 19	Hubungan dari tekanan injeksi permukaan terhadap laju alir fluida injeksi.....	47
Gambar IV. 20	Grafik hubungan lajur alir dan tekanan injeksi pada reservoir gas East Natuna.....	48
Gambar IV. 21	Hasil dari perancangan sistem refrigerasi untuk kondenser pada <i>stripping column</i> untuk pemurnian gas alam di lapangan gas East Natuna	51
Gambar IV. 22	Distribusi penggunaan atau kebutuhan energi untuk pengembangan lapangan gas East Natuna	53
Gambar IV. 23	Hasil akhir neraca massa produk untuk pemrosesan gas yang terproduksi dari lapangan gas East Natuna dengan menggunakan metode <i>Dual Pressure Low Temperature</i>	56
Gambar IV. 24	Diagram fasa dan kondisi operasi untuk fasa fluida yang keluar dari kondenser <i>stripping column</i> (71.21% CO ₂ + 28.79% CH ₄)	56
Gambar IV. 25	Diagram fasa dan kondisi operasi untuk fasa fluida yang keluar dari kondenser <i>stripping column</i> (2.97% CO ₂ + 97.07% CH ₄)	57

Gambar IV. 26	Diagram fasa dan kondisi operasi untuk fasa fluida yang keluar dari reboiler pada <i>stripping column</i> (99% CO ₂ + 1% CH ₄)	58
Gambar IV. 27	Skema <i>process flow diagram</i> secara lengkap untuk fasilitas produksi-injeksi dan pemurnian gas alam yang dirancang untuk lapangan gas East Natuna	60
Gambar IV. 28	Pola migrasi gas CO ₂ yang diinjeksikan menuju sumur-sumur produksi	61
Gambar IV. 29	Kurva prediksi kenaikan konsentrasi CO ₂ pada total produksi gas lapangan	62
Gambar IV. 30	Hasil simulasi <i>forecasting</i> terhadap laju produksi air pada skema produksi-injeksi CO ₂ lapangan gas East Natuna ...	63
Gambar IV. 31	Detail sumur-sumur yang terlebih dahulu memproduksi air	64
Gambar IV. 32	PFD awal dari Skenario 2	65
Gambar IV. 33	Kondisi fluida yang akan masuk dan keluar dari <i>stripping column</i> pada Skenario 2	66
Gambar IV. 34	Simulasi proses refrigerasinya untuk heat removal pada satu (1) <i>stripping column</i> di Skenario 2	68
Gambar IV. 35	Produk akhir dari mass balance alokasi gas-gas pada untuk Skenario 2	71
Gambar IV. 36	Skema akhir dari Skenario 2 untuk produksi dari satu (1) kluster sumur produksi	71
Gambar IV. 37	Strategi ekonomi untuk produksi lapangan gas East Natuna oleh Muliandari. (2018)	74
Gambar IV. 38	Skenario alternatif untuk strategi ekonomi di lapangan gas East Natuna	75
Gambar IV. 39	Skema aturan gross split (SKK Migas, 2017)	77
Gambar IV. 40	Skema ekonomi lapangan gas East Natuna	80
Gambar IV. 41	Grafik perbandingan <i>cash flow</i> per-tahun untuk Skenario 1 dan Skenario 2	90
Gambar IV. 42	Grafik hubungan antara persen (%) penjualan CO ₂ terproduksi dari total CO ₂ terproduksi terhadap nilai NPV pada discount rate 10% untuk lapangan gas East Natuna.	96
Gambar IV. 43	Grafik hubungan antara persen (%) penjualan CO ₂ terproduksi dari total CO ₂ terproduksi terhadap nilai IRR untuk lapangan gas East Natuna	96
Gambar IV. 44	<i>Spider chart</i> Skenario 1 untuk faktor ekonomi NPV pada lapangan gas East Natuna	97
Gambar IV. 45	Hubungan efisiensi turboexpander terhadap tekanan masuk ke kolom pemisah (<i>stripping column</i>)	100
Gambar V. 1	Bagian-bagian dan indeks jenis parameter pada turboexpander	101
Gambar V. 2	Diagram alir perancangan rotor	105
Gambar V. 3	Kurva efisiensi vs putaran turbin untuk fluida kerja dari sumur gas East natuna	106
Gambar V. 4	Tampilan desain sudu pada BladeGen TM	108

Gambar V. 5	Tampilan <i>import</i> geometri sudu dari BladeGen™ ke Inventor™	108
Gambar V. 6	Tampak 3-Dimensi rancangan <i>rotor</i>	109
Gambar V. 7	Bentuk desain hasil rancangan <i>profile nozzle</i>	110
Gambar V. 8	Tampilan 3D dari desain <i>ring nozzle</i> dengan total 17 profil <i>nozzle</i>	111
Gambar V. 9	<i>Plot excel</i> garis kurva atas dan bawah <i>nose cone</i>	112
Gambar V. 10	Tampilan 3D desain dari <i>nose cone</i>	112
Gambar V. 11	Diagram alir perancangan <i>volute</i> dengan menggunakan metode Aungier. (2005).....	113
Gambar V. 12	Gambar 2D <i>volute</i> yang dibentuk menggunakan fitur <i>circular pattern</i>	114
Gambar V. 13	Desain 3D dari rancangan <i>volute</i>	114
Gambar V. 14	Skematik <i>duct cone diffuser</i> (Aungier, 2005)	115
Gambar V. 15	Desain 3D dari rancangan <i>diffuser</i>	116
Gambar V. 16	Tampilan <i>assembly</i> komponen tanpa <i>diffuser</i>	117
Gambar V. 17	Tampilan <i>assembly</i> komponen dengan <i>diffuser</i>	117
Gambar V. 18	Tampilan <i>meshing</i> pada <i>rotor</i> turbin dengan menggunakan Turbogrid.....	118
Gambar V. 19	Tampilan <i>meshing</i> antar sudu pada <i>rotor</i> turbin dengan menggunakan Turbogrid.....	119
Gambar V. 20	Mesh ruang fluida <i>nozzle</i> turboexpander.....	120
Gambar V. 21	<i>Orthogonal quality</i> pada <i>meshing nozzle</i>	120
Gambar V. 22	<i>Skewness Index</i> pada <i>meshing nozzle</i>	120
Gambar V. 23	Mesh ruang fluida <i>volute</i> turboexpander	121
Gambar V. 24	<i>Orthogonal quality</i> pada <i>meshing volute</i>	121
Gambar V. 25	<i>Skewness Index</i> pada <i>meshing volute</i>	121
Gambar V. 26	Mesh ruang fluida <i>diffuser</i> turboexpander.....	121
Gambar V. 27	<i>Orthogonal quality</i> pada <i>meshing diffuser</i>	122
Gambar V. 28	<i>Skewness Index</i> pada <i>meshing diffuser</i>	122
Gambar V. 29	Penggabungan mesh domain fluida tiap komponen turboexpander pada Ansys CFX	123
Gambar V. 30	Contoh hasil nilai <i>imbalance</i> simulasi pada Ansys CFX yang telah mencapai konvergensi.....	125
Gambar V. 31	Perubahan tekanan fluida kerja melewati area <i>stage nozzle</i> dan <i>rotor</i>	126
Gambar V. 32	Vektor arah dan besar kecepatan pada nominal desain turboexpander.....	127
Gambar V. 33	Profil vektor kecepatan fluida pada <i>blade to blade rotor</i> .	128
Gambar V. 34	Profil <i>Mach number</i> pada meridional sudu rotor	128
Gambar V. 35	Streamline fluida pada desain nominal turboexpander area <i>nozzle</i> dan <i>rotor</i> dengan putaran 25000 rpm.....	129
Gambar V. 36	Distribusi <i>Mach Number</i> pada tampak samping rancangan <i>diffuser</i>	130
Gambar V. 37	Distribusi profil temperatur pada tampak samping rancangan <i>diffuser</i>	130
Gambar V. 38	<i>Spanwise blade</i> 10% (dekat hub) saat n rotor = 27 ($n > 26$ buah)	133

Gambar V. 39	Grafik hubungan antara jumlah sudu <i>rotor</i> terhadap efisiensi turbin.....	134
Gambar V. 40	Hasil dari simulasi hubungan variasi jumlah sudu <i>nozzle</i> terhadap efisiensi dan torsi turbin	135
Gambar V. 41	Perbandingan kondisi turbin pada <i>stage</i> turbin antara jumlah sudu <i>nozzle</i> $n=25$ dan $n > 25$ ($n=60$). Dimana: (a) bilangan Mach $n=25$, (b) bilangan Mach $n=60$, (c) <i>Static Entropy</i> $n=25$, (d) <i>Static Entropy</i> $n=60$	136
Gambar V. 42	Hubungan variasi <i>blade angle nozzle</i> (β_2) terhadap efisiensi turbin.....	138
Gambar V. 43	Distribusi perubahan kecepatan fluida yang memasuki turbin pada beberapa variasi sudut sudu <i>nozzle</i> (β_2).....	139
Gambar V. 44	Perbandingan hasil simulasi desain awal (<i>preliminary design</i>) dan desain akhir (<i>final design</i>) yang digunakan ..	140
Gambar V. 45	Kecepatan fluida pada penampang <i>blade to blade</i>	141
Gambar V. 46	(a) bilangan Mach dan (b) entropi statik pada penampang meridional dari <i>rotor passage</i> untuk <i>final design</i>	141
Gambar V. 47	Distribusi nilai bilangan Mach (a), massa jenis fluida (b), dan tekanan (c) dari <i>cross section</i> turboexpander	143
Gambar V. 48	3D Streamline kecepatan fluida melalui turboexpander ..	144
Gambar V. 49	Distribusi bilangan Mach (a), dan distribusi nilai entropi statik (b) pada <i>stage cross section</i>	144
Gambar V. 50	Pengaruh <i>mass flow rate</i> terhadap performa turboexpander.....	145
Gambar V. 51	Pengaruh kecepatan putar rotor terhadap performa turboexpander.....	146
Gambar V. 52	Perbandingan desain turboexpander yang didesain terhadap beberapa turboexpander dari beberapa manufaktur	147
Gambar V. 53	Bentuk 3 dimensi dari <i>final design</i> turboexpander fluida kerja superkritis	148
Gambar V. 54	Bentuk 3 dimensi konsep penerapan Turboexpander CO ₂ superkritis di lapangan gas.....	148

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>	101
CH ₄	Metana	1
CO ₂	Karbon Dioksida	1
DST	<i>Drill Stem Test</i>	20
EOS	<i>Equation of State</i>	31
GWC	<i>Gas water contact</i>	33
H ₂ S	Asam Sulfur	1
IRR	<i>Internal Rate of Return</i>	111
LCS	Laut Cina Selatan	1
LNG	Liquified Natural Gas	10
LNU	Laut Natuna Utara	1
NPV	<i>Net Present Value</i>	111
OD	<i>Outer Diameter</i>	144
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>	108
POT	<i>Pay Out Ratio</i>	111
TCF	Trillion Cubic Feet	1
LAMBANG		
ft	feet	1
h_1	Entalpi spesifik masuk turbin	129
h_2	Entalpi spesifik keluar turbin	129
h_3	Entalpi spesifik masuk rotor	133
h_4	Entalpi spesifik keluar rotor	133
k	Permeabilitas batuan	27
$\dot{m}$	Laju alir gas	129
n_s	putaran spesifik turbin	133
x_i	Profil sumbu x nose cone	138
y_i	Profil sumbu y nose cone	138
β_4	Sudut sudu sisi masuk	133
η_{ts}	<i>Total to static efficiency</i> turbin	133
θ_c	Sudut <i>cone diffuser</i>	142
ρ	Radius ogive dari <i>nose</i>	137
ω	Putaran rotor	133
$\emptyset$	Porositas Batuan	27