

**ANALISIS EFEKTIVITAS WET FAST INCINERATION
COMBUSTION ASSISTED GRAVITY DRAINAGE
(WET- FICAGD) TERHADAP PENINGKATAN
RECOVERY BITUMEN**

SKRIPSI

Diajukan guna Penyusunan Skripsi Program Studi Teknik Perminyakan

Oleh

DHIMAS INDRAGUNAWAN

NPM 183210996



PROGRAM STUDI TEKNIK PERMINYAKAN

UNIVERSITAS ISLAM RIAU

PEKANBARU

2021

**ANALISIS EFEKTIVITAS WET FAST INCINERATION
COMBUSTION ASSISTED GRAVITY DRAINAGE
(WET- FICAGD) TERHADAP PENINGKATAN
RECOVERY BITUMEN**

SKRIPSI

Diajukan guna Penyusunan Skripsi Program Studi Teknik Perminyakan

Oleh

DHIMAS INDRAGUNAWAN

NPM 183210996



PROGRAM STUDI TEKNIK PERMINYAKAN

UNIVERSITAS ISLAM RIAU

PEKANBARU

2021

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas akhir ini disusun oleh :
Nama : Dhimas Indragunawan
NPM : 183210996
Program Studi : Teknik Perminyakan
Judul Proposal : Analisis Efektivitas *Wet Fast Incineration Combustion Assisted Gravity Drainage (Wet-FICAGD)* Terhadap Peningkatan *Recovery* Bitumen.

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Perminyakan, Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Novia Rita, S.T., M.T. (.....)
Penguji I : Fiki Hidayat, S.T., M.Eng. (.....)
Penguji II : Idham Khalid, S.T., M.T. (.....)

Diterapkan di : Pekanbaru

Tanggal : 21 Maret 2022

Disahkan oleh:

Ketua Program Studi

Teknik Perminyakan

DIVERIFIKASI
By noviarita at 19:29:44, 21/03/2022

Novia Rita, S.T, M.T.

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini merupakan karya saya sendiri dan semua sumber yang tercantum di dalam baik yang dikutip maupun tidak dirujuk telah saya nyatakan dengan benar sesuai ketentuan. Jika terdapat unsur penipuan atau pemalsuan data maka saya bersedia dicabut gelar yang telah saya peroleh.

Pekanbaru, 25 November 2021



Dhimas Indragunawan

NPM 183210996



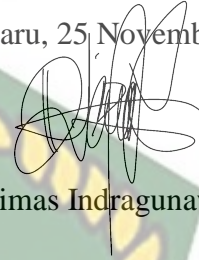
KATA PENGANTAR

Rasa syukur disampaikan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas Rahmat, Taufik dan limpahan ilmu dari-Nya saya dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Penulisan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Perminyakan, Universitas Islam Riau. Saya menyadari bahwa banyak pihak yang telah membantu dan mendorong saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini serta memperoleh ilmu pengetahuan selama perkuliahan. Oleh karena itu saya ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Novia Rita, S.T., M.T selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan masukan dalam penyusunan skripsi ini.
2. Dr. Falan Srisuriyachai, selaku dosen Chulalongkorn University yang telah memberikan beberapa penilaian dan masukan pada skripsi ini.
3. Orang tua yang selalu memberikan dukungan material, dukungan moral dan do'a yang senantiasa mengiringi.
4. Teman-teman dari Akamigas Balongan, Universitas Islam Riau, dan Chulalongkorn University, yang telah membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.
5. Rekan bisnis GUCAS20 serta jajaran eksekutif dan staff DINGUISTIK yang telah melakukan pekerjaannya dengan sangat baik, sehingga membantu saya selaku Founder dan CEO untuk dapat sedikit meluangkan waktu dalam mengerjakan skripsi ini.
6. Yudha dan Nia, selaku sahabat saya, yang telah memberikan dorongan untuk saya segera menyelesaikan skripsi ini.
7. Gusty, Johan, dan Wira, selaku Tim "Ayoklah gas" yang berperan penting dalam menjaga kewarasan saya untuk menyelesaikan skripsi yang cukup menguras otak dan menjalani bisnis start-up sekaligus.
8. Seorang wanita yang senantiasa memaksa saya untuk segera menyelesaikan skripsi ini dan mendapatkan gelar sarjana sesegera mungkin, karena kalau tidak, dia bakal kawin sama laki lain.

Teriring do'a saya, semoga Allah memberi balasan atas kebaikan semua pihak yang membantu. Semoga tugas akhir membawa manfaat bagi ilmu pengetahuan.

Pekanbaru, 25 November 2021



Dhimas Indragunawan



Dokumen ini adalah Arsip Miik :
Perpustakaan Universitas Islam Riau

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	ii
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GRAFIK.....	ix
DAFTAR SINGKATAN	x
ABSTRAK.....	xi
ABSTRACT.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 State of the art	4
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Uraian Metode Penelitian	21
3.2 Flowchart	22
3.3 Data yang digunakan.....	23
3.4 Skenario yang digunakan	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1 Model Simulasi (<i>Base Case</i>).....	31
4.2 Hasil Simulasi	35
4.3 Rekomendasi	48
BAB V KESIMPULAN.....	49
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran.....	50
Daftar Pustaka.....	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema in situ combustion menggunakan sumur vertikal (Coates, Lorimer, & Ivory, 1995).	7
Gambar 2.2 Skema konfigurasi sumur COSH (Kisman & Lau, 1994).	10
Gambar 2.3 Konfigurasi sumur THAI (Ayasse, Bloomer, & Lyngberg, 2005)...11	
Gambar 2.4 White Sand Thai Pilot Test (Rahnema, 2012).	11
Gambar 2.5 Skema wet combustion (Dietz & Weijdema, 1968).	14
Gambar 2.6 Skema ilustrasi analisis SARA (Belgrave, Moore, Ursenbach, & Bennion, 1993).....	15
Gambar 2.7 Region oksidasi crude oil (Belgrave, Moore, Ursenbach, & Bennion, 1993).	17
Gambar 3.1 Diagram Alur Kerja	22
Gambar 4.1 Model tampak IJ-2D Areal (I = 36 grid, J = 3 grid).....	31
Gambar 4.2 Model tampak IK-2D cross-section (I = 36 grid, K = 29 grid)	32
Gambar 4.3 Model tampak JK-2D cross-section (J = 3 grid, K = 29 grid).....	32
Gambar 4.4 Model 3D (I = 36 grid, J = 3, K = 29 grid).....	33
Gambar 4.5 Permeabilitas vertikal pada tampak IK-2D cross-section.....	33
Gambar 4.6 Porositas pada tampak IK-2D cross-section	34
Gambar 4.7 Saturasi minyak pada tampak IK-2D cross-section.....	34
Gambar 4.8 Saturasi Minyak dan Temperature pada 01-12-2005	39
Gambar 4.9 Saturasi Minyak dan Temperature pada 01-12-2008	40
Gambar 4.10 Saturasi Minyak dan Temperature pada 01-03-2011	41
Gambar 4.11 Saturasi Minyak dan Temperature pada 01-07-2011	42
Gambar 4.12 Saturasi Minyak dan Temperature pada 01-04-2017	43

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 State of The Art	4
Tabel 2.2 EOR Screening Kriteria (Aladasani & Bai, 2010)	19
Tabel 3.1 Jadwal Penelitian.....	21
Tabel 3.2 Parameter Grid (Xiaomeng Yang, 2008)	23
Tabel 3.3 Parameter Reservoir dan Bitumen (Xiaomeng Yang, 2008).....	23
Tabel 3.4 Entalpi Air yang digunakan untuk perhitungan penggunaan energi (Xiaomeng Yang, 2008).....	24
Tabel 3.5 Sifat fisik komponen yang digunakan dalam fluid molding (Belgrave et al., 1993)	24
Tabel 3.6 Skema reaksi bitumen (Belgrave et al., 1993)	25
Tabel 3.7 Data kinetik yang dikomputasi dan nilai akhirnya.....	25
Tabel 3.8 Parameter korelasi viskositas	26
Tabel 3.9 Heat loss Parameters dan data end-point permeabilitas relatif	26
Tabel 3.10 Korelasi k-value gas-liquid, (CMG, 2007; Yang, 2008).....	26
Tabel 3.11 Korelasi kapasitas panas liquid (Cpl), dan gas (Cpg), J/gmol°C (CMG, 2007)	27
Tabel 3.12 Base Case: Hybrid SAGD - ISC	28
Tabel 3.13 Skenario simulasi Wet Fast Incineration Combustion Assisted Gravity Drainage (Wet-FICAGD)	29
Tabel 4.1 Skenario Simulasi Pengoperasian Wet-FICAGD	35
Tabel 4.2 Produksi kumulatif minyak dan Oil Recovery Factor.....	38

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Produksi kumulatif minyak	37
Grafik 4.2 Oil Recovery Factor	37
Grafik 4.3 Rata-rata <i>temperature</i>	44
Grafik 4.4 Volume <i>steam chamber</i> yang terbentuk	46
Grafik 4.5 <i>Oil Rate</i>	46
Grafik 4.6 <i>Gas Rate</i>	47



DAFTAR SINGKATAN

CAGD	<i>Combustion Assisted Gravity Drainage</i>
ISC	<i>In-Situ Combustion</i>
Wet-FICAGD	<i>Wet Fast Incineration Combustion Assisted Gravity Drainage</i>
So	<i>Oil Saturation</i>
Sw	<i>Water Saturation</i>
Sg	<i>Gas Saturation</i>
Max	<i>Maximum</i>
Min	<i>Minimum</i>
SAGD	<i>Steam Assisted Gravity Drainage</i>
HTO	<i>High Temperature Oxydation</i>
LTO	<i>Low Temperature Oxydation</i>



**ANALISIS EFEKTIVITAS WET FAST INCINERATION COMBUSTION
ASSISTED GRAVITY DRAINAGE (WET- FICAGD) TERHADAP
PENINGKATAN RECOVERY BITUMEN**

DHIMAS INDRAGUNAWAN

183210996

ABSTRAK

Biaya operasional dan penggunaan oksigen yang cukup besar pada proses *dry combustion* serta efisiensi energi, kehilangan panas, dan tingginya emisi gas CO₂ yang terjadi pada proses SAGD, mengakibatkan perlu dilakukan proses in-situ combustion dengan menambahkan air untuk mengurangi penggunaan oksigen dan pembentuk *steam* secara *in-situ* akibat hasil dari pembakaran yang terjadi di dalam formasi, hal ini dikenal dengan istilah *wet combustion*. Efektivitas *wet combustion* ini ditentukan oleh rasio air-udara yang tepat untuk dapat memproduksi bitumen dengan optimal. Rasio air-udara paling optimal terjadi pada kondisi *super wet combustion*, pada kondisi ini panas yang dihasilkan dapat didistribusikan dengan sangat baik, dalam rentang waktu yang sama dengan proses *hybrid SAGD – ISC*, *super wet combustion* dapat menjangkau formasi lebih jauh untuk dipanaskan, itu menandakan cepatnya proses pembakaran yang terjadi di suatu formasi dalam rentang waktu tertentu, inilah yang disebut dengan *Wet Fast Incineration Combustion Assisted Gravity Drainage (Wet-FICAGD)*. Di dalam penelitian ini dilakukan permodelan dengan simulasi CMG STARS, di mana dibuat 5 skenario dengan konfigurasi rasio air-udara secara berturut turut sebesar 0.33 m³/Mm³, 0.05 m³/Mm³, 0.72 m³/Mm³, 1.22 m³/Mm³, dan 3 m³/Mm³. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa rasio air-udara paling optimal didapatkan dengan konfigurasi rasio sebesar 3 m³/Mm³. *Wet-FICAGD* ini mampu meningkatkan *recovery* bitumen sebesar 14.3% dibandingkan dengan *hybrid SAGD – ISC*, yaitu mencapai 54.1% OOIP. Kecepatan pembakaran yang terjadi mampu meningkatkan rata rata temperature dalam formasi jika dibandingkan dengan *hybrid SAGD-ISC*, yaitu sebesar 210°C pada *Wet-FICAGD* dan 157°C pada *hybrid SAGD – ISC*.

Kata Kunci: Bitumen, *Hybrid SAGD-ISC*, rasio, *wet-FICAGD*, *wet combustion*.

**EFFECTIVITY ANALYSIS OF WET FAST INCINERATION COMBUSTION
ASSISTED GRAVITY DRAINAGE (WET-FICAGD) FOR ENHANCING
BITUMEN RECOVERY**

DHIMAS INDRAGUNAWAN

183210996

ABSTRACT

Operational costs and the use of oxygen are quite large in the dry combustion process as well as energy efficiency, heat loss, and high CO₂ gas emissions that occur in the SAGD process, resulting in the need for an in-situ combustion process by adding water to reduce the use of oxygen and in-situ steam as a result of combustion that occurs in the formation, this is known as wet combustion. The effectiveness of wet combustion is determined by the right air-water ratio to be able to produce bitumen optimally. The most optimal water-air ratio occurs in super wet combustion conditions, in this condition the heat generated can be distributed very well, in the same time span as the SAGD – ISC hybrid process, super wet combustion can reach further formations to be heated, it indicates The rapid rate of combustion that occurs in a formation within a certain period of time is known as Wet Fast Incineration Combustion Assisted Gravity Drainage (Wet-FICAGD). In this study, modeling with CMG STARS simulation was carried out, in which 5 scenarios were made with a water-air ratio configuration of 0.33 m³/Mm³, 0.05 m³/Mm³, 0.72 m³/Mm³, 1.22 m³/Mm³, and 3 m³/Mm³. From the simulation results, it is found that the most optimal water-air ratio is obtained with a ratio configuration of 3 m³/Mm³. Wet-FICAGD was able to increase bitumen recovery by 14.3% compared to hybrid SAGD – ISC, which reached 54.1% OOIP. The combustion speed that occurs is able to increase the average temperature in the formation when compared to the SAGD-ISC hybrid, which is 210°C on the Wet-FICAGD and 157°C on the SAGD-ISC hybrid.

Keywords: Bitumen, Hybrid SAGD-ISC, rasio, wet-FICAGD, wet combustion.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

In-situ Combustion (ISC) telah dikenal selama beberapa tahun sebagai thermal process yang berpotensi tinggi untuk *recovery* minyak berat dan bitumen di dalam *reservoir*. Proses ini telah diteliti secara ekstensif baik skala laboratorium maupun skala lapangan. Beberapa *pilot project* telah dilakukan sejak 1933. Secara teknis, ISC merupakan proses injeksi gas yang menghasilkan gelombang panas ke dalam media berpori. *Heat front* dan gas yang diproduksi ini akan meningkatkan produksi minyak (Turta & Bhattacharya, 2005). *The Combution Front* akan meluas sampai injeksi udaranya menembus reservoir secara kontiniu. Operasi ISC dimulai dengan memanaskan terlebih dahulu perforasi sumur injeksi menggunakan *downhole electrical heater* ataupun reaksi kimia (Abuhesa & Hughes, 2009). Saat suhu target telah direkam pada permukaan formasi, udara diinjeksikan. Dalam beberapa kasus sudah terjadi ledakan bahkan sebelum injeksi mencapai target pada suhu 80°C (Abuhesa & Hughes, 2009). Meskipun investigasi laboratorium dilakukan secara ekstensif dan yang pasti dari metode ini adalah tantangan lingkungannya. Pada penerapannya dilapangan kebanyakan proses ini mengalami kegagalan. Kesulitan ini secara umum diasosiasikan dengan *unfavorable gravity segregation*, *sweep efficiency* yang rendah, dan buruknya kontrol terhadap arah pergerakan ledakan (Bhattacharya & Chattopadhyay, 2007).

Kuantitas udara yang besar diperlukan untuk *per-unit swept volume reservoir*, terutama untuk minyak berat dan bitumen, karena semua material residual yang tersisa di pasir tepat di depan pembakaran harus diproduksi. Banyak dari panas yang dihasilkan terbuang karena kehilangan panas pada *overburden* dan *underburden*, akibatnya energi terbuang percuma di daerah yang terbakar. *Wet combustion* ini menjadi teknik *recovery*, yang mana ditujukan untuk menghemat energi yang dikeluarkan jika dibandingkan

dengan *dry combustion*, Kebutuhan udara yang diinjeksikan lebih rendah dengan menginjeksikan air (Freitag & Exelby, 2006).

Dalam menghindari beberapa kesalahan fatal yang nantinya akan terjadi di lapangan, maka sangat perlu dilakukan simulasi sebelum dilakukannya kegiatan *Wet Fast Incineration Combustion Assisted Gravity Drainage (Wet-FICAGD)*, pada simulasi akan difokuskan untuk menganalisis efek dari rasio air-udara terhadap perolehan kumulatif produksi bitumen, efek dari laju injeksi terhadap kumulatif produksi bitumen dan distribusi panas, efek oksigen terhadap laju alir produksi bitumen, efisiensi energi yang dihasilkan jika dibandingkan dengan *dry combustion*, emisi gas buangan, dan kondisi pengoperasian yang optimal untuk mempersingkat waktu insinerasi pada metode *combustion assisted gravity drainage (Wet-FICAGD)* terhadap peningkatan recovery bitumen.

Software yang digunakan pada penelitian ini adalah CMG STARS. Model simulasi yang digunakan adalah berdasarkan data konseptual yang diambil dari beberapa referensi dan kemudian disederhanakan untuk disesuaikan dengan waktu penelitian, dan perangkat simulasi. Hasil dari simulasi nanti akan diketahui seberapa cepat *wet combustion* ini dalam melakukan pembakaran dan seberapa besar kemampuan metode *Wet-FICAGD* dalam me-recovery bitumen.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini antara lain adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis efek rasio air-udara terhadap perolehan kumulatif produksi bitumen.
2. Menganalisis laju distribusi panas jika dibandingkan dengan *hybrid SAGD-ISC*.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat antara lain:

1. Menjadi referensi tambahan pada penelitian berikutnya.
2. Rujukan informasi untuk penelitian selanjutnya.
3. Menjadikan publikasi ilmiah berupa paper atau jurnal skala nasional dan internasional

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini tidak keluar dari tujuan yang diharapkan, maka penelitian ini hanya membatasi mengenai beberapa hal berikut:

1. Data yang digunakan adalah data konseptual yang diambil dari beberapa referensi.
2. *Software* yang digunakan adalah CMG STARS.
3. Tidak menimbang beratkan pada faktor keekonomian.
4. Penelitian ini hanya untuk Menganalisis efek rasio air-udara terhadap perolehan kumulatif produksi bitumen dan menganalisis laju distribusi panas jika dibandingkan dengan *hybrid* SAGD-ISC.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 State of the art

Berikut beberapa referensi penelitian terdahulu yang pernah dilakukan secara garis besar sejalan dengan penelitian ini, dengan beberapa metode, software dan skala penelitian yang berbeda.

Tabel 2.1 *State of The Art*

No	Judul Penelitian	Skala Pengujian	Metode	Hasil
1.	<i>Experimental Analysis of Combustion Assisted Gravity Drainage</i> (Rahnema, Barrufet, & Mamora, 2013)	Laboratorium	Menggunakan <i>Cell</i> Baja <i>stainless</i> sebagai bahan eksperimen dengan dipasangkan 48 <i>thermocouples</i> untuk mengukur temperatur di dalam model dan memonitor <i>combustion</i> tersebut.	Mampu menurunkan viskositas minyak berat dari 24800 cp menjadi hanya 874 cp, dan mendapatkan recovery minyak sebesar 82% dari OOIP
2.	<i>Fast Incineration Assisted Importance Drainage (FCAGD) Process for heavy oil Improvement</i> (Khatami, Ghobadi, &	Laboratorium	Sebuah model dengan karakteristik sampel <i>heavy crude oil</i> seperti $^{\circ}\text{API} = 7,24$, <i>Flash Point</i> = 180°F , <i>Pour point</i> = $4^{\circ}\text{centigrade}$, Viskositas = 1758 cp, dan <i>interfacial</i>	Didapatkan <i>recovery</i> minyak sebesar 52% OOIP dari minyak berat tersebut.

Ansari, 2015)

tension = 10 mN/m,
disimulasikan
menggunakan
Eclipse500
simulator dan
kemudian divalidasi
menggunakan
Visual Basic.net
code.

3. *On Evaluation of Steam Assisted Gravity Drainage in Naturally Fractured Reservoirs* Lapangan
(Morteza, et al., 2016)
- Sebuah model *reservoir* dengan deskripsi seperti berikut: Porositas = 0.20, Permeabilitas = 2000 md, Swir = 0.15, Sor = 0.25, Konduktivitas termal formasi = 24 Btu/ft°F, Kapasitas panas batuan = 30 Btu/Day.ft³F, Viskositas minyak = 2000cp, Suhu reservoir = 140°F, Tekanan Reservoir = 1200 psi, Densitas Minyak = 61.5 lbm/ft³, GOR = 67 SCF/STB, Bo = 1.05 bbl/STB
- Disimulasikan menggunakan
- Dapat diketahui bahwa *vertical fracture* dapat meningkatkan 14% *ultimate recovery* lebih banyak dibanding *horizontal fractures*. Kemudian semakin besar jarak *fracture*nya maka akan semakin tinggi produksinya.

		CMG STARS.	
4.	<i>Combustion Assisted Gravity Drainage – Experimental and simulation results of a promising in-situ combustion technology to recover extra-heavy oil</i>	Laboratorium	Menggunakan 3D <i>Combustion Cell</i> dengan dimensi 0.62 cm, 0.41 cm, dan 0.15 cm kemudian diberikan bitumen yang memiliki derajat API sebesar 8.2 API, air, dan 100 mesh pasir. Kemudian dipanaskan hingga 560°C, setelah itu hasilnya disimulasikan menggunakan CMG STARS.
	(Rahnema, Barrufet, & Mamora, 2017)		Mampu mendapatkan <i>recovery</i> minyak sebesar 72% dari OOIP Bitumen tersebut, kemudian dari hasil history matching simulasi yang dilakukan didapatkan kesepakatan yang baik mengenai data eksperimental seperti laju produksi fluida dan <i>recovery</i> , kemudian temperatur <i>combustion</i> serta komposisi gas yang diproduksi

2.2 In-situ combustion

Pada proses ISC konvensional, udara diinjeksikan melalui sumur vertikal yang dikelilingi oleh beberapa sumur produksi. Dengan cara ini, ledakan dilakukan di dekat *central injector* dan dalam kasus yang ideal, hal tersebut secara seragam menyapu volume hidrokarbon menuju sumur produksi. Bagaimanapun, gravitasi mengendalikan *displacing gases* yang mengakibatkan *combustion front* bergerak merata ke arah gerak vertikal mengurangi efisiensi penyapuan total sebagai aliran *displacing gases* secara khusus ke satu sumur saja pada pola sumur tersebut. Masalah lain yang sering ditemui yaitu kehadiran *oil bank* yang dingin di depan minyak yang bergerak. Konfigurasi sumur pada ISC konvensional membutuhkan minyak di *combustion front* menembus *immobile oil* yang lebih dingin. Hal ini dapat menyebabkan masalah lain seperti pengurangan mobilitas *crude oil* dan masalah injeksi (Coates, Lorimer, & Ivory, 1995)



Gambar 2.1 Skema *in situ combustion* menggunakan sumur vertikal (Coates, Lorimer, & Ivory, 1995).

Kebanyakan studi laboratorium pada proses ISC sudah dilakukan menggunakan 1D combustion tube. Pengaturan fisik ini dapat digunakan untuk analisis sensitivitas dan menginvestigasi performa dari reaksi *combustion*. Tapi itu tidak akan memberikan informasi terhadap penyapuan baik areal maupun vertikal (Akin, Bagci, & Kok, 2000).

Beberapa project penelitian telah dilakukan untuk memajukan proses ISC. Penggunaan *hydrogen* dan katalis telah menyita banyak perhatian

beberapa tahun belakangan. Penggunaan katalis seperti tetralin dan *pressurized methane* telah diujikan ke dasar sumur untuk meningkatkan perolehan *heavy oil*. Hasil eksperimen menunjukkan efisiensi dari prosedur ini dalam memperbaiki crude oil sampai dengan 4°API dan mengurangi kandungan *asphaltene* sampai dengan 8%. (Rahnema, 2012)

Telah dilakukan pengujian laboratorium mengenai pertukaran kation antara *metallic salt* dan mineral formasi *clay* untuk meningkatkan reaksi oksidasi yang akan terjadi. Mereka menyimpulkan bahwa metode ini dapat meningkatkan reaksi ledakan. Semakin tinggi konsumsi oksigen dan semakin rendahnya penggunaan energi merupakan kelebihan utama dari proses ini. Hasil dari eksperimen juga mengindikasikan bahwa kehadiran dari katalis dapat meningkatkan efisiensi reaksi *high temperature oxidation* (HTO) (He, 2005). Pada penelitian lainnya, telah dilakukan studi mengenai peningkatan kualitas *heavy oil* terhadap kehadiran katalis untuk sample oil teluk meksiko di dalam sebuah tabung *combustion*. Hasil laboratorium menunjukkan *front development* yang stabil dan laju produksi minyak yang tinggi (Ramirez et al., 2007). Kemudian dikonfirmasi data laboratorium sebelumnya, bahwa *heavy oil* di teluk meksiko memiliki 12.5 °API yang dicampur dengan 500 ppm Al₂O₃ di *batch reactor*. Eksperimen dilakukan di suhu tinggi 270°C. Data eksperimental menunjukkan sebuah peningkatan API *gravity* dan penurunan dalam *metal* dan *sulfur content* dalam sample minyak produksi (Nares, Hernandez, Gamica, & Reyes, 2007)

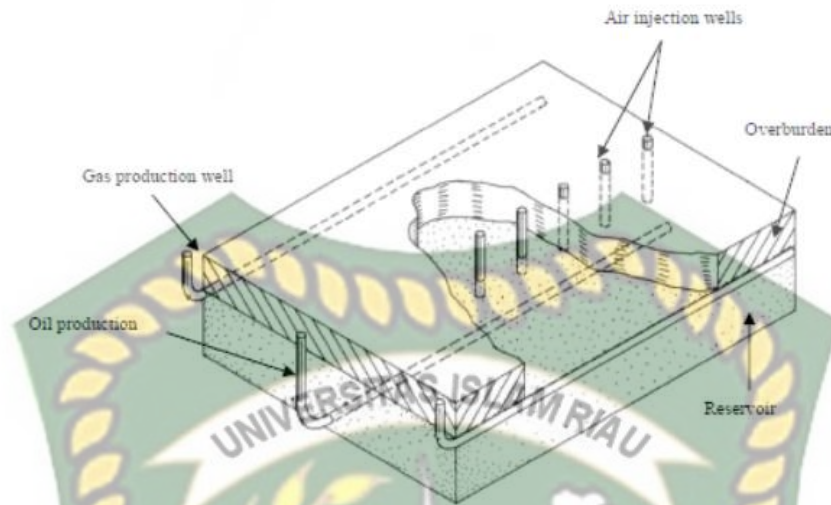
Pada *dry air injection*, porsi yang signifikan dalam membentuk akumulasi panas di belakang *combustion front*. Satu pendekatan alternative adalah dengan *wet combustion*. Pada metode ini, air diinjeksikan bersama dengan udara dan goalnya adalah untuk memulihkan porsi dari panas yang diakumulasikan di belakang zona oksidasi dan menyalurkannya hingga ke zona *combustion front*. Pada proses ini, udara juga dibutuhkan untuk mengurangi pengurangan *residual oil* di permukaan batuan. Beberapa projek penelitian yang dilakukan Chien dkk pada 1976, Joseph dan Pusch pada 1980, telah mengevaluasi mekanisme dari *wet combustion* untuk mencari tau

parameter parameter penting untuk laju injeksi air-udara yang optimal. Injeksi air yang berlebihan dapat memiliki dampak yang cukup buruk terhadap reaksi oksidasi yang terjadi dengan mengurangi tekanan parsial pada oksigen di zona *combustion* (Lapene, et al., 2009).

Wet combustion dibagi menjadi *normal-wet* dan *super-wet combustion* berdasarkan rasio udara dan air yang diinjeksikan. Pada *normal-wet combustion*, rata rata suhu *combustion front* adalah 600°C. Suhu di depan ledakan akan berkurang seiring dengan pergerakan ledakan menjauhi sumur injeksi, pada *super-wet combustion*, suhu di depan ledakan menjadi lebih rendah yaitu sekitar 250°C, karena rasio air-udara yang diinjeksikan lebih tinggi. Mekanisme pendorong pada wet combustion adalah ISC, *steam*, dan *Hot water*. Bagaimanapun, pada *dry combustion*, udara dan flue gas menjadi tenaga penggerak (Shokoya, Mehta, Moore, Maini, & Darvish, 2002).

2.3 Injeksi udara pada sumur produksi horizontal

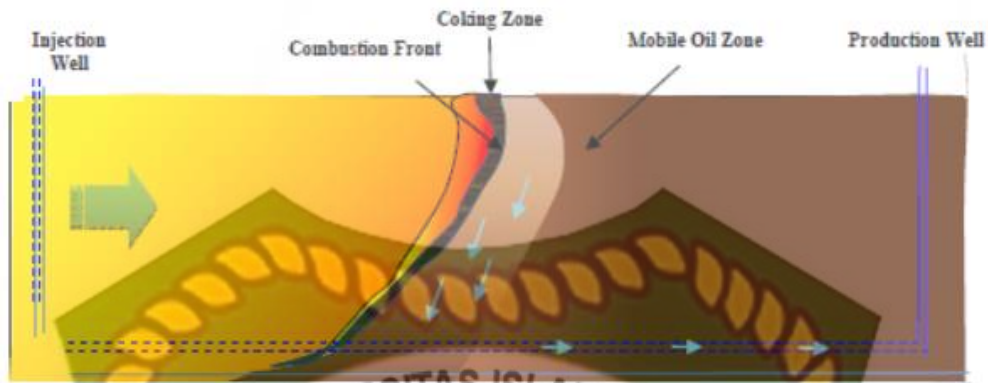
Telah dilakukan studi sebuah rangkaian sumur baru untuk ISC, yaitu dengan menggunakan *lateral well* untuk melepaskan *flue gas* ke *reservoir*. Proses COSH (*combustion override split production horizontal well*) mereka menggunakan rangkaian sumur vertikal untuk injeksi udara. *Flue gases* diproduksi oleh sumur vertikal atau horizontal yang dibor jauh dari titik injeksi. Juga minyak dan kondensat bergerak melalui bawah sumur produksi horizontal. *Gravity drainage* menstabilkan penyebaran *combustion front* di sepanjang sumur produksi. Proses COSH memungkinkan gas dan *liquid* diproduksi terpisah melalui sumur yang berbeda dan mempertahankan kendali proses tersebut. Pada gambar 2.2 menunjukkan perbedaan bagian bagian dari metode ini termasuk bagian dari formasi dengan sumur injeksi udara, produksi gas, dan produksi minyak (Kisman & Lau, 1994).



Gambar 2.2 Skema konfigurasi sumur COSH (Kisman & Lau, 1994).

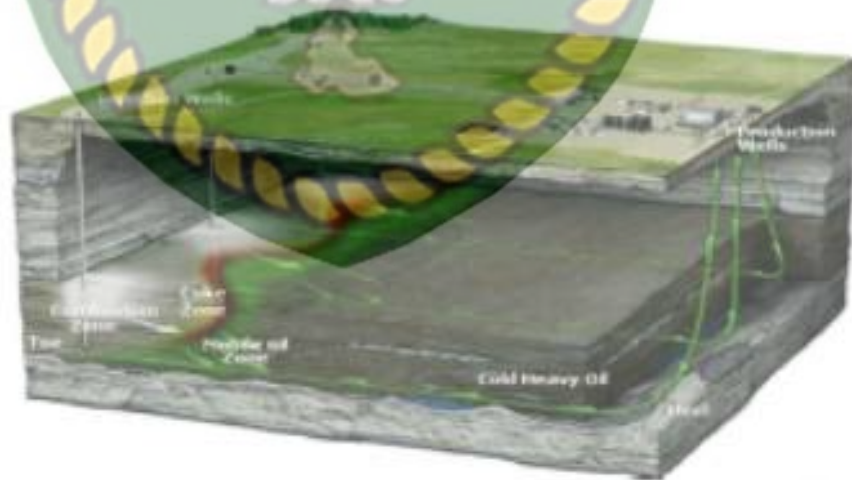
2.4 Toe to heel air injection

Toe to heel air Injection (THAI) adalah teknologi yang masih terbilang baru, jarak proses perpindahan minyak yang dekat merupakan hasil dari proses combustion yang stabil dengan kemampuan untuk memproduksi minyak yang dapat bergerak secara langsung ke bagian sumur produksi horizontal. (Ayasse et al., 2005). Proses THAI ini memanfaatkan kelebihan dari sumur produksi horizontal dan sumur injeksi vertikal. Proses ini didasari pada *gravity drainage* dan produksi minyak dengan jarak yang dekat. Bagaimanapun, itu dapat menghindari beberapa masalah dari ISC konvensional. Gambar 2.3 merupakan skema konfigurasi sumur THAI. Pada awal proses, *Steam* disirkulasikan di dalam sumur untuk membangun komunikasi panas dan tekanan. Memanaskan sumur injeksi dan kemudian dilanjutkan dengan penginjeksian udara akan membuat sebuah ledakan di sekitar *heel* pada sumur produksi horizontal. Permukaan ledakan lebih dikembangkan didalam *upper layer* disebuah formasi, dan *mobilized oil* bergerak secara vertikal menuju sumur produksi dengan gaya gravitasinya (Rahnema, 2012).



Gambar 2.3 Konfigurasi sumur THAI (Ayasse, Bloomer, & Lyngberg, 2005)

sebuah *pilot test* telah dilakukan terkait dengan THAI ini, di formasi McMurray Athabasca oil sands pada 2005 oleh Ayyase dan tim. Tiga pasang sumur vertikal dan horizontal, dan 19 sumur observasi vertikal telah digunakan untuk *recovery* bitumen, hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4. Injeksi udara telah dimulai pada pasangan sumur pertama pada 2006 dan 2 sumur lainnya telah dilakukan pengujian di tahun 2007, pada percobaan ini ditargetkan produksinya mencapai 600 BOPD untuk setiap sumur produksi (Rahnema, 2012).



Gambar 2.4 White Sand Thai Pilot Test (Rahnema, 2012).

2.5 Injeksi hybrid ISC-Steam

Sederhananya metode ini disebut sebagai *wet injection*, dimana oksigen dan air diinjeksikan ke dalam formasi secara bersamaan. Sebuah teknik yang menggunakan *steam* super panas yang diinjeksikan kedalam formasi diikuti oleh injeksi udara bertekanan tinggi. Pada tahap selanjutnya steam dan udara diinjeksikan secara bersamaan untuk meningkatkan penurunan viskositas pada *crude oil* (Rahnema, 2012).

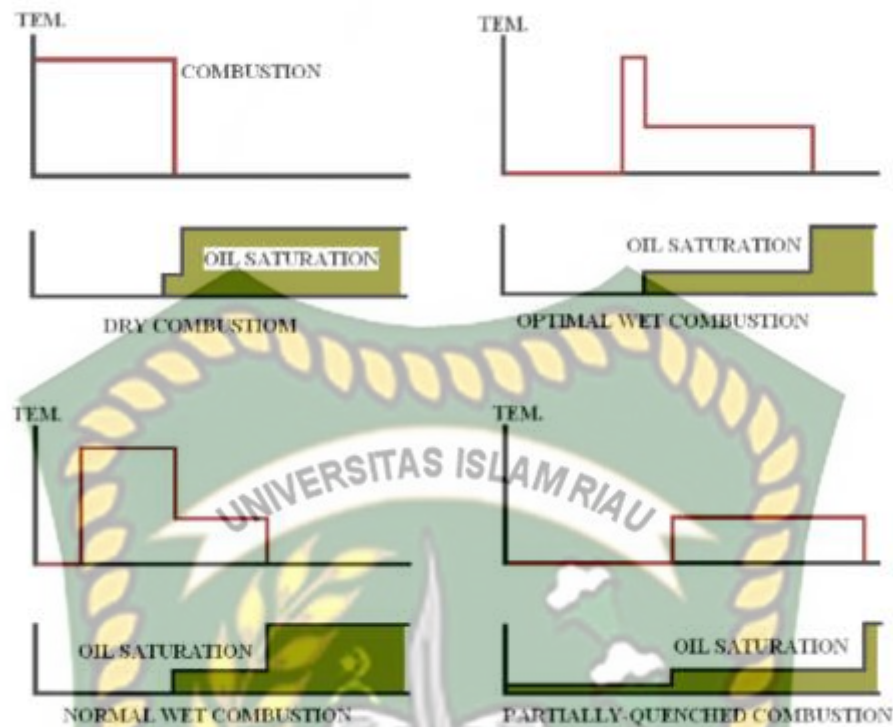
Air diinjeksikan kedalam formasi setelah dilakukannya ISC untuk mempertahankan panas *in-situ* yang terakumulasi dan menghantarkannya ke bagian upstream pada sebuah reservoir (Rahnema, 2012). Selain itu *steam* dapat juga diinjeksikan dengan air menggunakan *cyclic periods*. Untuk mengoptimalkan prosedur dan rasio udara/steam maka pada proses *recovery* difokuskan pada *low-temperature oxidation* (LTO) oleh injeksi campuran *steam* dan *oxygen* (Cram & Redford, 1977). Dengan menginjeksikan sejumlah *steam* berkualitas tinggi, udara, dan air ke dalam reservoir untuk menciptakan *steam chamber* di dalam formasi. Berdasarkan penelitian dengan menggunakan metode tersebut menunjukkan bahwa *wet combustion* memiliki hasil yang lebih signifikan dibandingkan dengan *dry combustion*, dan juga biaya yg diperlukan lebih rendah dibandingkan dengan *steam flooding*. Terdapat dua macam cara penginjeksian *steam* dan udara ke dalam *reservoir*, yaitu *continuous* dan *cyclic*. Mengurangi viskositas minyak berat dengan membentuk *steam* secara *in-situ*. Dalam metode ini, panas dari pembakaran mengubah air yang diinjeksikan menjadi fasa *steam* di reservoir. Pada mulanya, komunikasi tekanan dan suhu antar sumur telah dibangun dahulu dengan menginjeksikan *steam*. Setelah itu, udara bertekanan tinggi diinjeksikan melalui *reservoir* dan membentuk *combustion front* di belakang *steam front*. Idealnya, *combustion front* mengikuti *steam front* dengan mengontrol laju injeksi udara. Selain itu, *flue gasses* bergerak di bagian *upstream* dari formasi dan mengurangi viskositas minyak. Injeksi udara pada sumur horizontal juga dapat digunakan dengan berbagai proses thermal (Rahnema, 2012).

2.6 Wet Combustion

Lebih dari setengah total panas yang terbentuk tersimpan dibelakang *combustion front* selama proses *dry combustion*. Banyak upaya telah dilakukan untuk menyelesaikan masalah ini. Satu dari beberapa upaya ini adalah dengan menggunakan air, karena air memiliki penyimpanan panas yang tinggi dan kemampuan untuk menguap. Sejak air memiliki penyimpanan panas yang kira-kira ratusan kali lebih besar dibandingkan udara, itu dapat memanfaatkan panas dari *burnt zone*, yang mana pada akhirnya memberikan perpindahan *front* yang lebih efisien dengan *steam* tersebut. Jadi penggunaan air selama *combustion* berlangsung adalah untuk mengurangi penggunaan udara selama proses berlangsung dan meningkatkan kecepatan *combustion front* yang mana secara efektif akan berdampak pada perbaikan nilai keekonomisan proyek tersebut (Alipour S. , 2013).

Pada *wet combustion*, air dan udara dapat diinjeksikan melalui sumur injeksi secara bergantian ataupun bersamaan (normalnya kegiatan *wet combustion* diikuti dengan *dry combustion* sekitar 3 bulan). Semua bagian dari air akan menguap dan melewati *combustion front* dan menghantarkan panas ke depan. Perlakuan seperti ini memiliki berbagai keuntungan, pertama, metode ini dapat memperluas *steam* atau zona panas yang mana memiliki kapasitas panas yang tinggi untuk mengurangi viskositas pada *cold oil*. Kedua, metode ini dapat juga dioperasikan pada tekanan rendah dan kandungan *fuel* yang sedikit. Ketiga, jumlah dari udara injeksi atau rasio udara terhadap minyak berkurang, yang mana dapat membantu meningkatkan keekonomian (Parrish, Pollock, & Craig, 1974).

Parameter utama *wet combustion* adalah dengan mengoptimalkan rasio air-udara. Secara kuantitatif, pada **gambar 2.5** menunjukkan perubahan profil suhu di dalam reservoir pada rasio air-udara yang bervariasi (Dietz & Weijdema, 1968).



Gambar 2. 5 Skema wet combustion (Dietz & Weijdema, 1968).

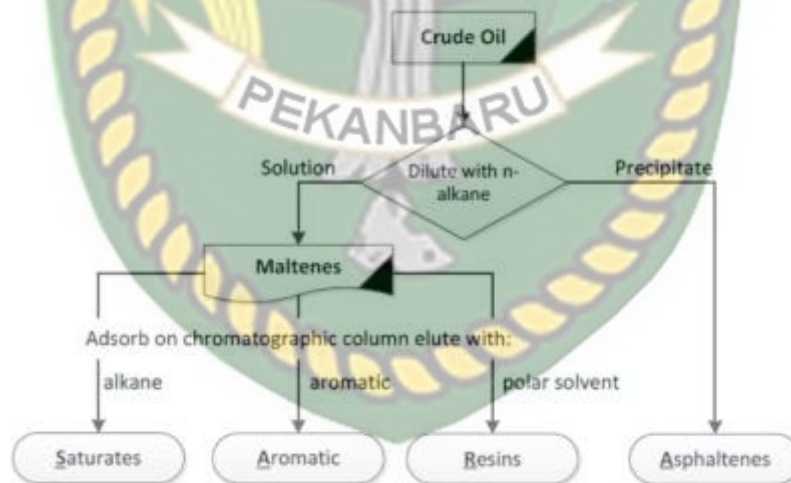
Jika rasio air-udara adalah nol, *combustion* mengacu pada *dry combustion*. Penambahan air ke udara mengubah proses tersebut menjadi *wet combustion* dan meningkatkan kemampuan aliran injeksi untuk memulihkan panas. Meningkatkan rasio air-udara akan meningkatkan kecepatan konveksi ke titik dimana dapat cocok dengan kecepatan burning front. Dengan rasio air-udara yang optimal, Suhu zona *combustion* tetap tinggi dan *hot water front* bergerak lebih cepat daripada *combustion front*. Panas dihantarkan dan secara efektif digunakan sebagai *oil displacement* (Dietz dan Weijdema, 1968; Alipour, 2013).

2.7 Pemodelan kinetik dan numerik combustion

Pada proses *In-situ combustion*, banyak perubahan fisik maupun reaksi kimia yang terjadi secara bersamaan atau secara berurutan di sekitar *combustion front* (Lin, Chen, Lee, & Culham, 1984). Mekanisme perubahan fisik dan reaksi kimia terjadi disekitar zona *combustion* dapat dipelajari secara efektif melalui pemodelan numerik (Alipour S. , 2014).

Ada beberapa simulasi numerik dari eksperimen *combustion tube* untuk memahami reaksi kinetik selama *in-situ combustion*. Diantaranya model Belgrave adalah model representatif dan terkenal yang dikembangkan untuk *heavy oil* (bitumen) (Belgrave, Moore, Ursenbach, & Bennion, 1993).

Fraksi SARA merupakan sebuah model kompleks untuk mewakili komponen *heavy oil*. Di dalam model ini, S dinotasikan sebagai *Saturates*, A adalah *Aromatic*, R adalah *Resin*, dan A adalah *Asphaltenes*. *Saturates*, *aromatic*, dan *resin* merupakan pembagian dari *Maltenes* yang mana larut di dalam *pentane*, sedangkan *Asphaltenes* tidak. Pada **gambar 2.6** menunjukkan skema ilustrasi dari analisis SARA. Jika komponen komponen lainnya dimasukkan ke dalam model, maka itu akan meningkatkan kerumitan komputasinya. Bagaimanapun, model Belgrave dengan mempertimbangkan fraksi SARA digunakan untuk mewakili sample minyak berat. Ada empat fasa dan tujuh komponen yang diasumsikan pada model belgrave ini. Fasa fasa ini diantaranya adalah fasa minyak, air, gas, dan *solid* (Alipour S. , 2014).



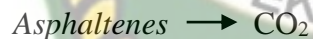
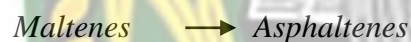
Gambar 2.6 Skema ilustrasi analisis SARA (Belgrave, Moore, Ursenbach, & Bennion, 1993)

Fasa minyak dibagi menjadi komponen berat (*Asphaltene*) dan komponen ringan (*Maltenes*). Secara definisi. Fasa solidnya adalah *coke*, yang merupakan produk tetap dari reaksi antara hidrokarbon. *Coke* ini terpisah dari minyak dan itu tidak terlarut dalam *toluene*. Fasa air adalah air yang

diasumsikan *immiscible* dengan komponen lainnya di dalam fasa *liquid* tetapi *miscible* dengan gas (Alipour S. , 2014).

Selain itu, fasa lainnya adalah fasa gas. Udara diinjeksikan ke model dan menyebabkan reaksi kimia, karbondioksida terproduksi. Bagaimanapun berkaitan dengan komposisi udara dan produk kimianya, komponen komponen tersebut adalah oksigen, nitrogen, dan oksida (Alipour S. , 2014).

Secara umum terdapat tiga reaksi utama di dalam model Belgrave, yaitu *thermal cracking*, reaksi oksidasi, dan *coke combustion* (Belgrave, Moore, Ursenbach, & Bennion, 1993). Saat komponen minyak berat dipanaskan, minyak ringan menguap dan menyisakan residu komponen *maltenes*. Reaksi termal cracking mewakili *thermolysis* dari komponen *maltenes* menjadi *coke* dan gas. Pada reaksi *thermal cracking*, oksigen tidak dilibatkan (Alipour S. , 2014) Skema umum reaksi *thermal cracking* yang terjadi adalah sebagai berikut,



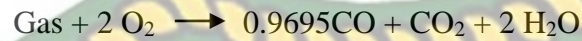
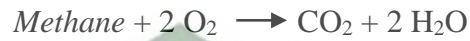
Coke yang terproduksi oleh *thermal cracking* digunakan sebagai sumber bahan bakar untuk menciptakan reaksi oksidasi. Reaksi oksidasi terbagi menjadi beberapa bagian, yaitu *low temperature oxidation* (LTO) pada suhu relatif rendah, dan *high temperature oxidation* (HTO) pada suhu relatif tinggi. Bentuk dari reaksi LTO adalah sebagai berikut,



Sedangkan, bentuk reaksi HTO adalah sebagai berikut,

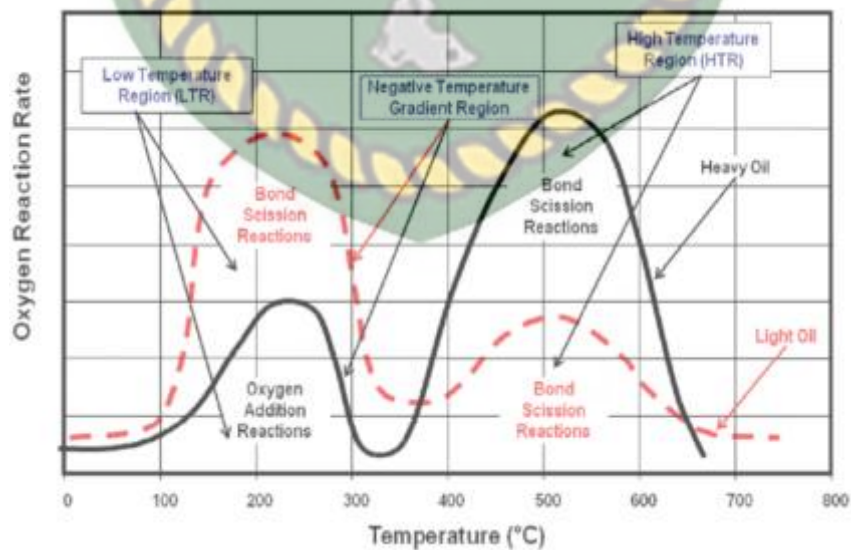


Selain enam reaksi diatas, terdapat reaksi tambahan yang juga sangat penting untuk kelengkapan model simulasi yang akan dibuat, yaitu dua reaksi untuk gas phase combustion dari metana dan gas yang ditambahkan di dalam model (Yang, 2008).



Bagaimanapun, zona reaksi yang diantisipasi dalam proses *in situ combustion* bersifat kompleks dan berinteraksi dalam skala yang relatif kecil. Pada gambar 2.7 menunjukan sebuah skema penggunaan oksigen versus suhu. Berdasarkan pada rentang suhu, terdapat dua bagian, yaitu *low temperature region* (LTR) dan *high temperature region* (HTR). Di setiap region, keduanya dapat terjadi dalam waktu yang bersamaan, tapi pasti ada satu yang lebih dominan (Alipour S. , 2014).

LTO mengambil bagian pada suhu di bawah 300°C (dominan di antara 150 dan 300°C) dan rentang penggunaan oksigennya rendah, sedangkan HTO menjadi reaksi mekanisme yang dominan saat berada pada suhu di atas 350°C dengan rentang laju penggunaan oksigen yang lebih tinggi (Alipour S. , 2014).



Gambar 2.7 Region oksidasi *crude oil* (Belgrave, Moore, Ursenbach, & Bennion, 1993).

Reaksi LTO sangat tidak efektif dalam memobilisasi minyak karena produksi hidrokarbon yang lebih berat (komponen minyak beroksigen) dan *coke* selama hasil dari LTO pada kondisi lebih viskos ataupun *immobile oil*. Di sisi lain, reaksi HTO sangat efektif untuk memobilisasi minyak, terutama pada *heavy oil combustion*. Bagaimanapun, hal yang paling penting adalah memulai dan menjaga proses oksidasi tersebut dalam mode HTO. Sekali zona *high temperature combustion* tercipta, *supply* oksigen yang cukup dibutuhkan untuk memaintain reaksi oksidasi di rentang suhu dimana reaksi HTO dominan (Alipour S. , 2014).

Secara umum, sebagai reaksi kimia terjadi dan zat pertama bereaksi terhadap zat yang kedua untuk menghasilkan zat yang ketiga, sebuah laju reaksi mengukur kecepatan dari reaksi kimia dan bergantung pada suhu. Persamaan Arrhenius memberikan ketergantungan laju konstanta dari reaksi kimia pada suhu (T) dan *activation energy* (Ea). Persamaan laju reaksi secara umum ditunjukkan pada persamaan berikut, (Alipour S. , 2014)

$$r_i = FF_i \exp(E_a/RT)C_j^{e_{ij}} \quad (2.1)$$

Dimana,

FF = Faktor frekuensi reaksi

Ea = *Activation energy* dari reaksi, J/gmol

T = suhu absolut, K

Cj = Faktor konsentrasi komponen j untuk fasa liquid dan solid, g/cc

eij = Orde reaksi komponen j di dalam reaksi i

R = konstanta gas, 8.3145 (J/molK)

Selain itu, ada yang disebut reaksi *enthalpy* (Hr). Hr bernilai positif artinya bahwa energi telah dilepaskan, dan apabila bernilai negative artinya energi diserap. Hanya reaktan yang diasumsikan untuk mengontrol laju tersebut (Alipour S. , 2014).

2.8 EOR Screening

Screening kriteria merupakan langkah penting sebelum ditentukannya metode EOR yang akan diimplementasikan pada sebuah lapangan minyak bumi. Screening ini sendiri merupakan metode pengujian suatu reservoir dengan didasarkan pada kriteria yang telah ditentukan yang kemudian hasilnya akan dipertimbangkan sebelum diimplementasikan (Gunawan, 2020).

Tabel 2.2 adalah tabel kriteria yang merupakan hasil publikasi A. Aladasani pada tahun 2010 yang didasarkan pada implementasi EOR yang dilakukan di 633 proyek minyak bumi dari tahun 1998 sampai dengan 2008. Terdapat beberapa parameter pada table *screening* EOR, pada parameter sifat fisik minyak bumi terdiri dari *gravity* ($^{\circ}$ API) dan viskositas (cp), sedangkan pada karakteristik *reservoir* terdiri dari porositas (%), saturasi minyak (%PV), jenis formasi, permeabilitas (mD), ketebalan reservoir (ft), kedalaman reservoir (ft), suhu reservoir ($^{\circ}$ F) (Aladasani & Bai, 2010).

Tabel 2.2 EOR Screening Kriteria (Aladasani & Bai, 2010)

EOR Method	Oil Properties		Reservoir Characteristics						
	API Gravity	Oil Viscosity (cp)	Porosity (%)	So (%PV)	Formation	K (mD)	Net Thickness (ft)	Depth (ft)	T ($^{\circ}$ F)
Combustion	10-38, Avg. 23.6	2770-1.44, Avg. 504.8	14-35, Avg. 23.3	50-94, Avg. 67	Sandstone or Carbonate (Prefer carbonate)	10-15000, Avg. 2605.7	>10	400-11300, Avg. 5569.6	64.4-230, Avg. 175.5
Steam	8-30, Avg. 14.5	5E6-3 d, Avg. 32971.3	12-65, Avg. 32.2	35-90, Avg. 66	Sandstone	1-15000, Avg. 2605.7	>20	200-9000, Avg. 1643.6	10-350, Avg. 105.8

2.9 Kelebihan dan Kekurangan *Wet Combustion*

Kelebihan yang utama dari metode *wet combustion* adalah untuk mengurangi penggunaan udara dan meningkatkan kecepatan pembakaran yang mana sudah pasti akan berefek pada keekonomisan proyek tersebut. Selain itu

kelebihan lainnya dari metode ini di antaranya yaitu, pertama, metode ini dapat memperluas steam atau zona panas yang mana memiliki kapasitas panas yang tinggi untuk mengurangi viskositas pada *cold oil*. Kedua, metode ini dapat juga dioperasikan pada tekanan rendah dan kandungan *fuel* yang sedikit. Ketiga, jumlah dari udara injeksi atau rasio udara terhadap minyak berkurang, yang mana dapat membantu meningkatkan ekonomi. Meskipun begitu, dari beberapa penelitian menyebutkan bahwa perolehan minyak kumulatif yang diperoleh dengan metode *In-situ Combustion* masih berada di bawah perolehan penggunaan metode SAGD. (Alipour, 2014; Rahnema, 2012).



Dokumen ini adalah Arsip Miik :

Perpustakaan Universitas Islam Riau

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

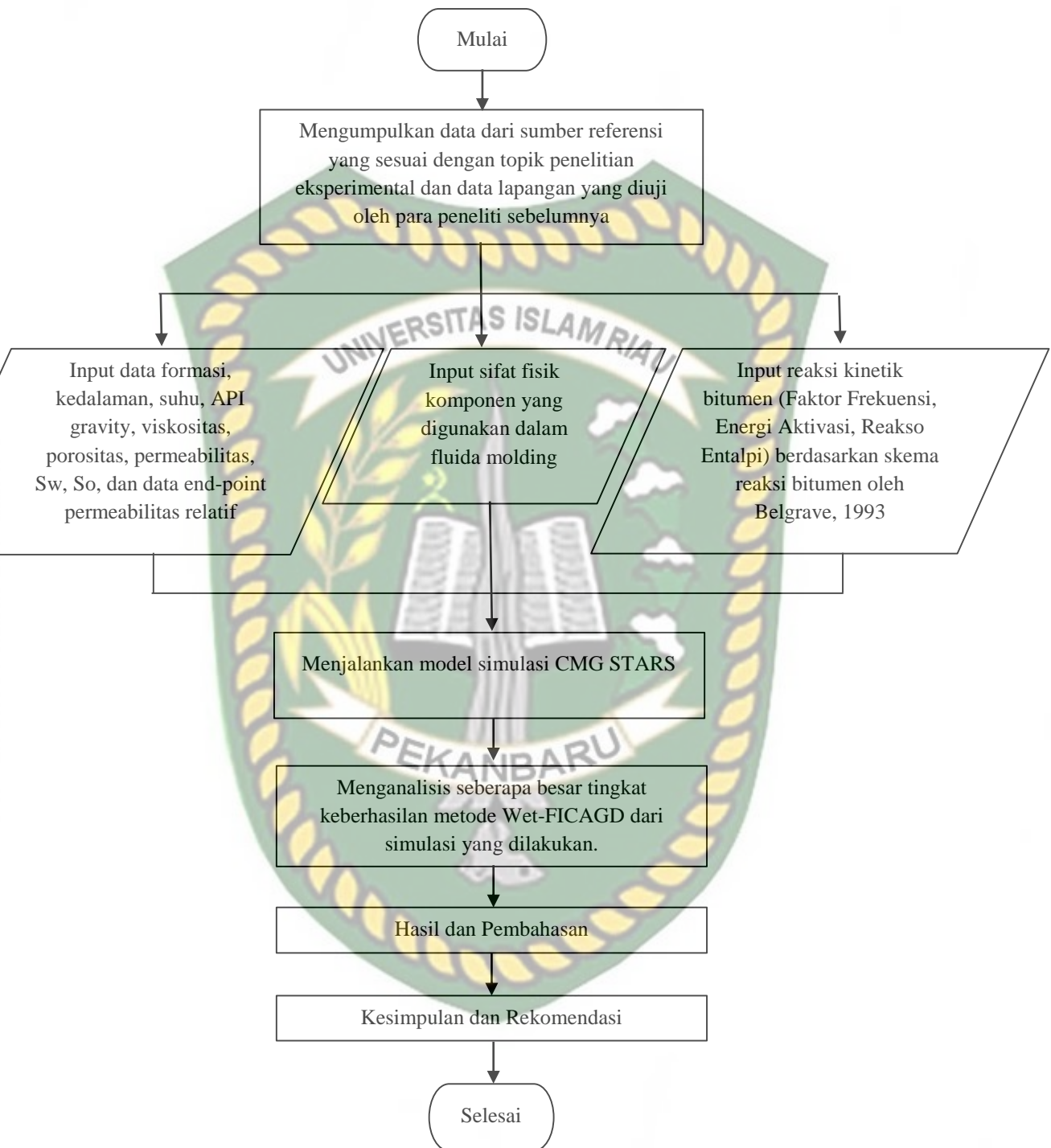
3.1 Uraian Metode Penelitian

Studi ini berjudul Analisis Efektivitas *Wet Fast Incineration Combustion Assisted Gravity Drainage* (Wet-FICAGD) Terhadap Peningkatan *Recovery* Bitumen. Studi ini bertujuan untuk menganalisis efek dari rasio air-udara terhadap perolehan kumulatif produksi bitumen, efek dari laju injeksi terhadap kumulatif produksi bitumen dan distribusi panas, efek oksigen terhadap laju alir produksi bitumen, efisiensi energi yang dihasilkan jika dibandingkan dengan *dry combustion*, emisi gas buangan, dan kondisi pengoperasian yang optimal untuk mempersingkat waktu insinerasi pada metode *combustion assisted gravity drainage* (Wet-FICAGD) terhadap peningkatan *recovery* bitumen. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Simulasi *Reservoir* Teknik Perminyakan Fakultas Teknik Universitas Islam Riau dengan metode simulasi menggunakan *software* CMG STARS.

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian

TAHAP PENELITIAN	TAHUN 2021											
	September				Oktober				November			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur												
Pengumpulan Data												
Pengolahan Data												
Interpretasi												
Analisis												
Hasil Pembahasan												

3.2 Flowchart



Gambar 3.1 Diagram Alur Kerja

3.3 Data yang digunakan

Berikut adalah data yang digunakan untuk mendukung kesuksesan dari simulasi yang akan dilakukan nanti:

Tabel 3.2 Parameter *Grid* (Xiaomeng Yang, 2008)

Parameter <i>Grid</i>	Nilai
Model grid	<i>Cartesian</i>
Jumlah <i>grid</i> arah horizontal	36
Total panjang <i>grid</i> , (m)	64
Jumlah <i>grid</i> arah vertikal	29
Total <i>net pay</i> , (m)	29
Jumlah <i>grid</i> sepanjang sumur produksi	3
Total panjang, (m)	750

Tabel 3.3 Parameter *Reservoir* dan Bitumen (Xiaomeng Yang, 2008)

Parameter <i>Reservoir</i> dan <i>Heavy Oil</i>	Nilai
<i>Pay</i> , h (m)	29
Porositas (%)	29 (Average) 40 (Max)
Permeabilitas Horizontal, (md)	3500 (Average) 5100 (Max)
Permeabilitas Vertikal (md)	1162 (Average) 2050 (Max)
Rasio Permeabilitas, K_v/K_h	0.3
Saturasi Minyak, S_o (%)	71 (Average) 92 (Max)
Tekanan <i>reservoir</i> , (kPa)	1200
Tekanan Operasi, (kPa)	4100
Suhu <i>Reservoir</i> , (°C)	10
Panjang sumur horizontal, (m)	750
Viskositas minyak, (cp)	50
Densitas Minyak, (°API)	12

Tabel 3.4 Entalpi Air yang digunakan untuk perhitungan penggunaan energi (Xiaomeng Yang, 2008)

Kondisi	Entalpi, Kj/Kg
<i>water @101kpa</i>	0,36722
<i>Saturated water @4000 kpa</i>	2,8102
<i>Saturated steam @4000 kpa</i>	2800,3
<i>Steam quality</i>	0.9

Tabel 3.5 Sifat fisik komponen yang digunakan dalam fluid molding (Belgrave et al., 1993)

Komponen	Berat Molekul, kg/mol	Tc, °C	Pc, kPa
<i>Maltenes</i>	0,4067	618,85	1478
<i>Asphaltenes</i>	1,0932	903,85	792
<i>Coke</i>	0,01313	6536	10436
<i>Water</i>	0,01802	373,85	22107
O2	0,032	-119,15	5046
Gas	0,0432	21,85	7176
CH4	0,01604	-82,55	4600
CO2	0,04401	31,05	7376
CO	0,02801	-140,25	3496
N2	0,02801	-146,95	3394

Tabel 3.6 Skema reaksi bitumen (Belgrave et al., 1993)

Reactions	Reaction, #	Kinetics
Thermal Cracking	1	<i>Maltenes</i> → 0,372 <i>asphaltenes</i>
	2	<i>Asphaltenes</i> → 83,223 <i>coke</i>
	3	<i>Asphaltenes</i> → 37,683 Gas
Low Temperature Oxidation (LTO)	4	<i>Maltenes</i> + 3,431O ₂ → 0,4726 <i>Asphaltenes</i>
	5	<i>Asphaltenes</i> + 7,513O ₂ → 101,539 <i>Coke</i>
High Temperature Oxidation (HTO)	6	(<i>Coke</i>) CH _{1.13} + 1,232 O ₂ → CO ₂ + 0,5635 H ₂ O
Gas Phase Combustion	7	<i>Methane</i> + 2 O ₂ → CO ₂ + 2 H ₂ O
	8	Gas + 2 O ₂ → 0,9695 CO + CO ₂ + 2 H ₂ O

Tabel 3.7 Data kinetik yang dikomputasi dan nilai akhirnya

Reaksi	Faktor Frekuensi, A	Energi Aktivasi, Ea, J/mol	Reaksi Entalpi, J/mol
1	4,054e+10 day ⁻¹	1,163E+06	0,00E+00
2	1,815e+4 day ⁻¹	4,021E+04	0,00E+00
3	1,117e+14 day ⁻¹	1,763E+04	0,00E+00
4	2,116e+5 day-1 kPa ^{-0.4246}	4,611E+06	1,295E+04
5	1,085e+5 day-1 kPa ^{-4.7627}	3,312E+07	2,857E+05
6	3,881 day-1 kPa ⁻¹	8,205E+05	4,950E+05
7	3,020e+10 day-1 kPa-1	5,945e+4	8,910e+5
8	1,311e+8 day-1 kPa-1	2,662e+5	4,436e+5

Tabel 3.8 Parameter korelasi viskositas

<i>Oil Phase Components</i>	A	B
<i>maltenes</i>	1,94E-05	6,89E+03
<i>asphaltenes</i>	1,62E-3	2,98E+04

Tabel 3.9 Heat loss Parameters dan data end-point permeabilitas relatif

<i>Heat loss parameters in Horizontal Directions</i>		
<i>Heat Capacity, J/m³°C</i>	6,2E+04	
<i>Thermal Conductivity, J/m day°C</i>	6,5E+4	
<i>Curve End-points</i>	15°C	800°C
<i>S_{wirr}</i>	0,05	0,006789
<i>S_{orw}</i>	0,15	0,2946
<i>S_{gc}</i>	0,05	0,35
<i>S_{org}</i>	0,07	0,0266
<i>K_{rorw}</i>	0,10	0,05083
<i>K_{rocw}</i>	1	0,5031

Tabel 3.10 Korelasi k-value gas-liquid, (CMG, 2007; Yang, 2008)

Komponen	Kv1	Kv4	Kv5
Maltenes	1,89E+7	-6562,3	-80,1
Asphaltenes	0	0	0
O2	1,18E+7	-3816,4	-227
Gas	8,62E+8	-3103,4	-273
CH4	5,45E+5	-879,8	-266
CO2	8,62E+8	-3103,4	-273
CO	2,32E+5	-530,2	-260

Tabel 3.11 Korelasi kapasitas panas *liquid* (Cpl), dan gas (Cpg), J/gmol°C (CMG, 2007)

Komponen	Cpl1	Cpl2	Cpl3	Cpl4
<i>Maltenes</i>	994,1	0	0	0
<i>Asphaltenes</i>	2514,6	0	0	0
O2	46,4	3,95E-1	-7,05E-3	3,99E-5
Gas	-3981	5,25E+1	-2,27E-1	3,29E-4
CH4	-0,02	1,20	-9,87E-3	3,17E-5
CO2	-3981	5,25E+1	-2,27E-1	3,29E-4
CO	125,6	-1,70	1,07E-2	4,19E-6
N2	76,5	-3,52E-1	-2,67E-3	5,01E-5
Komponen	Cpg1	Cpg2	Cpg3	Cpg4
<i>Maltenes</i>	0	0	0	0
<i>Asphaltenes</i>	0	0	0	0
H2O	32,2	1,92E-3	1,06E-5	-3,60E-9
O2	28,1	-3,68E-6	1,75E-5	-1,06E-8
Gas	19,8	7,34E-2	-5,60E-5	1,71E-8
CH4	19,3	5,21E-2	1,20E-5	-1,13E-8
CO2	19,8	7,34E-2	5,60E-5	1,71E-8
CO	30,9	-1,29E-2	2,79E-5	-1,27E-8
N2	31,2	-1,36E-2	2,68E-5	-1,17E-8

3.4 Skenario yang digunakan

Untuk semua skenario simulasi akan dijalankan selama 12 tahun, dan di 3 bulan pertama akan diinjeksikan *steam* super panas bertekanan tinggi terlebih dahulu untuk melakukan *pre-heating* dan meningkatkan mobilitas minyak disekitar sumur injeksi dan produksi, serta mempercepat komunikasi termal antar sumur. Kemudian di Tahun ke-6 dilakukan *dry combustion* untuk meningkatkan kembali suhu di dalam formasi.

Berikut adalah kondisi *base case* yang digunakan sebagai *base model* untuk simulasi *wet combustion* pada penelitian ini.

Tabel 3.12 Base Case: Hybrid SAGD - ISC

Skenario			
Base Case			
Tgl	Constraints	Injected Fluid	
1/1/2005	STF MAX 0 CONT REPEAT	WATER	1
	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	TEMP	252
		STEAM QUALITY	0,9
1/4/2005	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	1
		TEMP	252
		STEAM QUALITY	0,9
1/4/2006	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	1,00E-13
		O2	1
		TEMP	252
		STEAM QUALITY	0,9
1/4/2007	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	1
		TEMP	252
		STEAM QUALITY	0,9
1/4/2008	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	1,00E-13
		O2	1
		TEMP	252
		STEAM QUALITY	0,9
1/4/2009	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	1
		TEMP	252
		STEAM QUALITY	0,9
1/4/2010	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	1,00E-13
		O2	1
		TEMP	252
		STEAM QUALITY	0,9
1/4/2011	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	1
		TEMP	252
		STEAM QUALITY	0,9
1/4/2012	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	1,00E-13
		O2	1
		TEMP	252
		STEAM QUALITY	0,9
1/4/2013, 2015	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	1
		TEMP	252
		STEAM QUALITY	0,9
1/4/2014, 2016	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	1,00E-13
		O2	1
		TEMP	252
		STEAM QUALITY	0,9

Tabel 3.13 Skenario simulasi *Wet Fast Incineration Combustion Assisted Gravity Drainage (Wet-FICAGD)*

Tujuan	Skenario	Deskripsi
Mencari rasio air-udara terbaik	Skenario 1	<i>Steam</i> (3 bulan)
		Co-Inj air-udara dengan rasio (75/25) $3\text{m}^3/\text{Mm}^3$
	Skenario 2	<i>Steam</i> (3 bulan)
		Co-Inj air-udara dengan rasio (50/50) 3
	Skenario 3	<i>Steam</i> (3 bulan)
		Co-Inj air-udara dengan rasio (25/75)
	Skenario 4	<i>Steam</i> (3 bulan)
		Co-Inj air-udara dengan rasio (90/10)
	Skenario 5	<i>Steam</i> (3 bulan)
		Co-Inj air-udara dengan rasio (10/90)
Membandingkan laju percepatan pembakaran (distribusi panas) dengan <i>Hybrid SAGD - ISC</i>	Skenario <i>Wet-FICAGD</i> terbaik vs <i>Hybrid SAGD - ISC</i> terbaik	
Membandingkan Oil Recovery dengan <i>Hybrid SAGD - ISC</i>	Skenario <i>Wet-FICAGD</i> terbaik vs <i>Hybrid SAGD - ISC</i> terbaik	
Menganalisis kondisi pengoperasian yang optimal	Skenario terbaik	

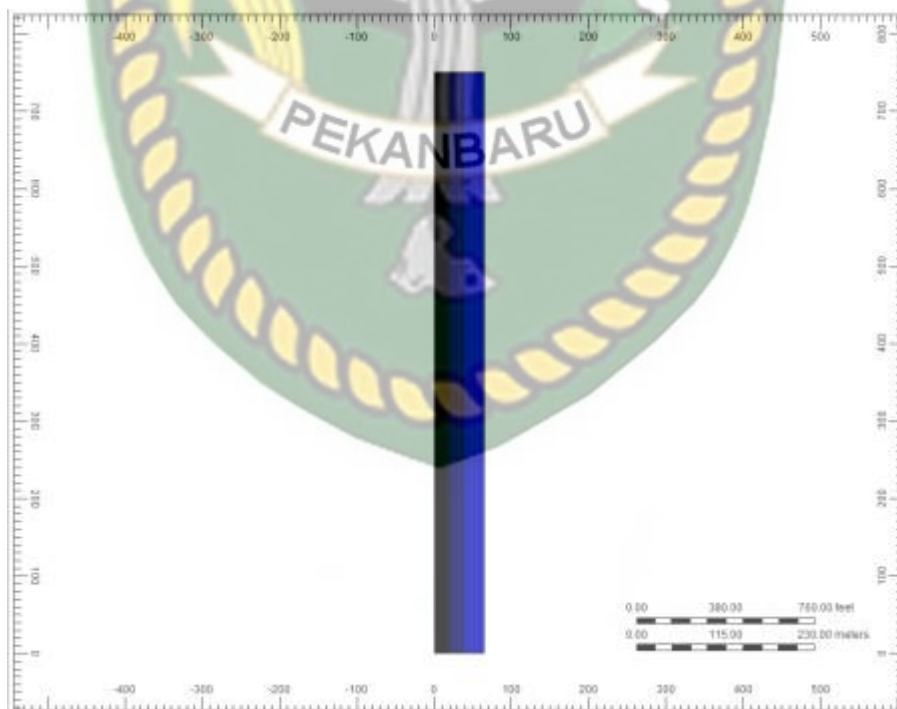
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Hadist riwayat tirmidzi menjelaskan “bahwa barang siapa yang menghendaki kehidupan di dunia maka wajib baginya memiliki ilmu dan barang siapa yang menghendaki kehidupan akherat, maka wajib baginya memiliki ilmu dan barang siapa menghendaki keduanya maka wajib baginya memiliki ilmu” (HR. Tirmidzi). Maka dari itu, penelitian ini berdasarkan ilmu pengetahuan yang berkembang dan didukung oleh teknologi yang pesat. Sama halnya dengan dunia perminyakan, khususnya dalam mengembangkan lapangan dengan karakteristik *heavy oil* terlebih lagi bitumen, yang memerlukan teknologi yang lebih canggih lagi untuk dapat mengalirkannya hingga ke permukaan. Salah satu metode *Thermal EOR* terbaru yang dinilai mampu menghasilkan perolehan *heavy oil* dan bitumen yang signifikan adalah *In-Situ Combustion (ISC)*. Namun pada praktiknya *ISC konvensional (Dry Combustion)* ini dinilai boros energi dan kurang ramah terhadap lingkungan. Maka dicetuskanlah oleh penelitian setelahnya dengan menggunakan *Hybrid SAGD-ISC*, dengan mengurangi 50% pengoperasian *ISC (penginjektian Oksigen)* dari konvensional *ISC* yang dinilai lebih ramah lingkungan dan hemat energi, dengan perolehan minyak yang tidak kalah baik daripada *ISC konvensional*. Kemudian tidak cukup sampai disitu, tercetuslah teori mengenai *wet combustion* yang dinilai mampu untuk mengurangi jumlah penggunaan energi oleh air sebagai penyimpan panas yang baik. Kemudian juga dinilai mampu untuk melakukan pembakaran yang lebih luas dan cepat akibat proses *in-situ steam* yang dihasilkan dari air yang diinjeksikan bersamaan dengan udara. Peneliti mencoba untuk membuktikan dan menganalisis efektivitas *wet combustion* ini dalam meningkatkan *recovery* bitumen dan seberapa cepat pembakaran yang dapat dihasilkan, terlebih lagi jika dibandingkan dengan metode *hybrid SAGD-ISC*.

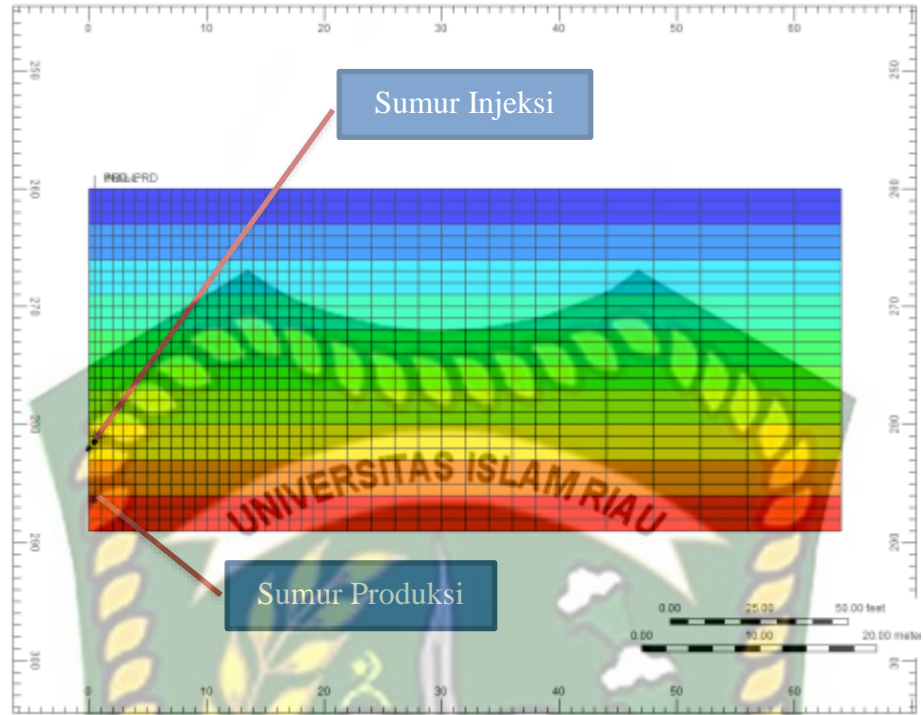
4.1 Model Simulasi (*Base Case*)

Berikut merupakan model yang terbentuk dari data reservoir yang dimiliki, berisikan 3.132 blok dengan tipe *half symmetry* 3D model dengan *geological* dan saturasi fasa yang heterogen. Terdapat 36 blok *horizontal* (*I-direction*) yang memiliki panjang total 64 meter. 29 *grid* arah vertikal (*K-direction*) dengan ketebalan 29 meter. Terdapat 3 blok dengan masing masing panjang 250 meter pada arah sumur (*J-direction*) dengan total panjang 750 meter. Sumur injeksi terletak 7 meter di atas dasar *reservoir* dan jarak antara sumur injeksi dan sumur produksi secara vertikal adalah 5 meter.

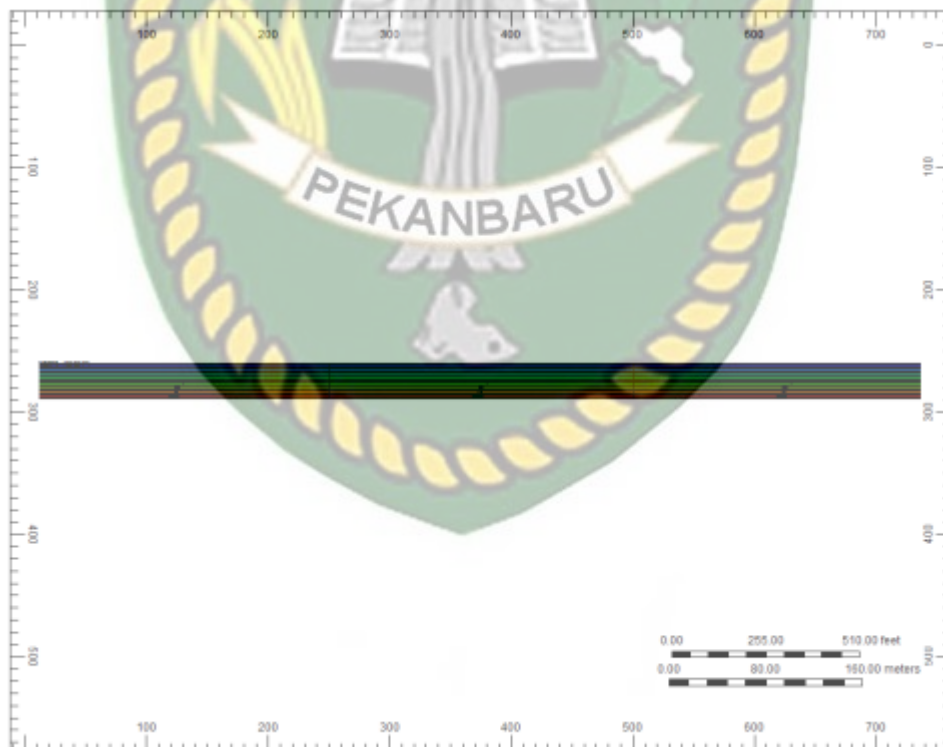
Permeabilitas rata rata formasi pada model yang dibuat sebesar 3500 mD, dengan porositas rata rata sebesar 29%. Dari penyebaran saturasi minyak yang ditunjukkan pada **Gambar 4.7**, dapat dilihat bahwa zona minyak yang tebal dari ketebalan 14 – 29 m pada *pay zone* tersebut. Dan dari ketebalan 0 – 14 m merupakan zona air yang jumlahnya cukup signifikan. Reservoir ini memiliki tekanan inisial sebesar 1200 kPa (174 psi) dan 10°C (50 °F).



Gambar 4.1 Model tampak IJ-2D *Areal* (I = 36 *grid*, J = 3 *grid*)



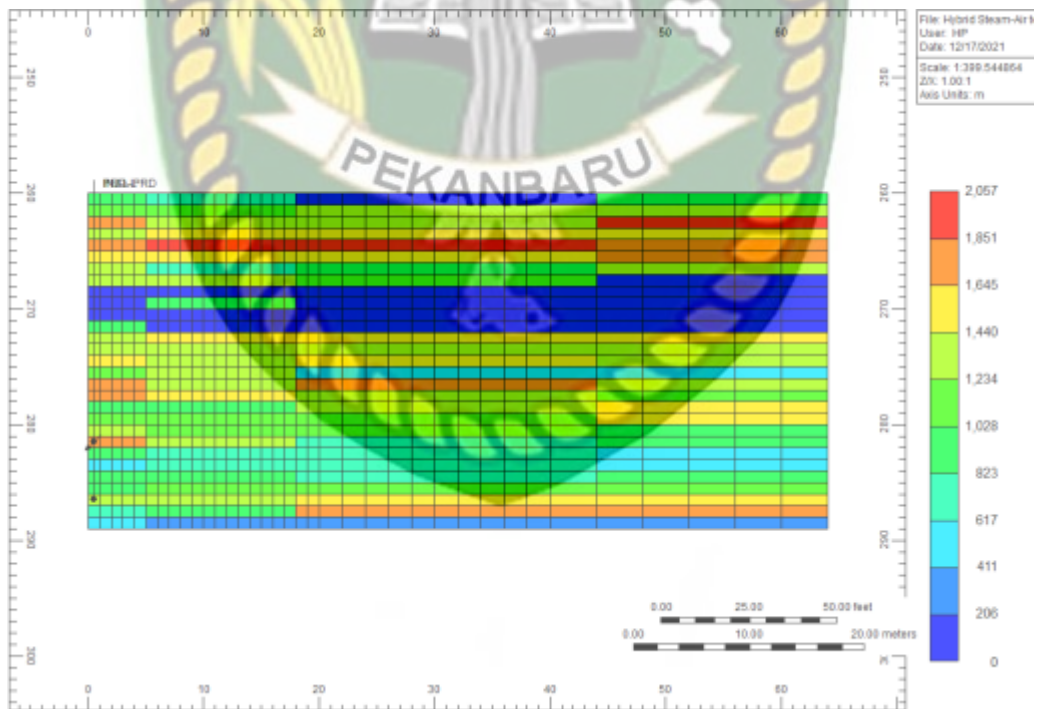
Gambar 4.2 Model tampak IK-2D cross-section (I = 36 grid, K = 29 grid)



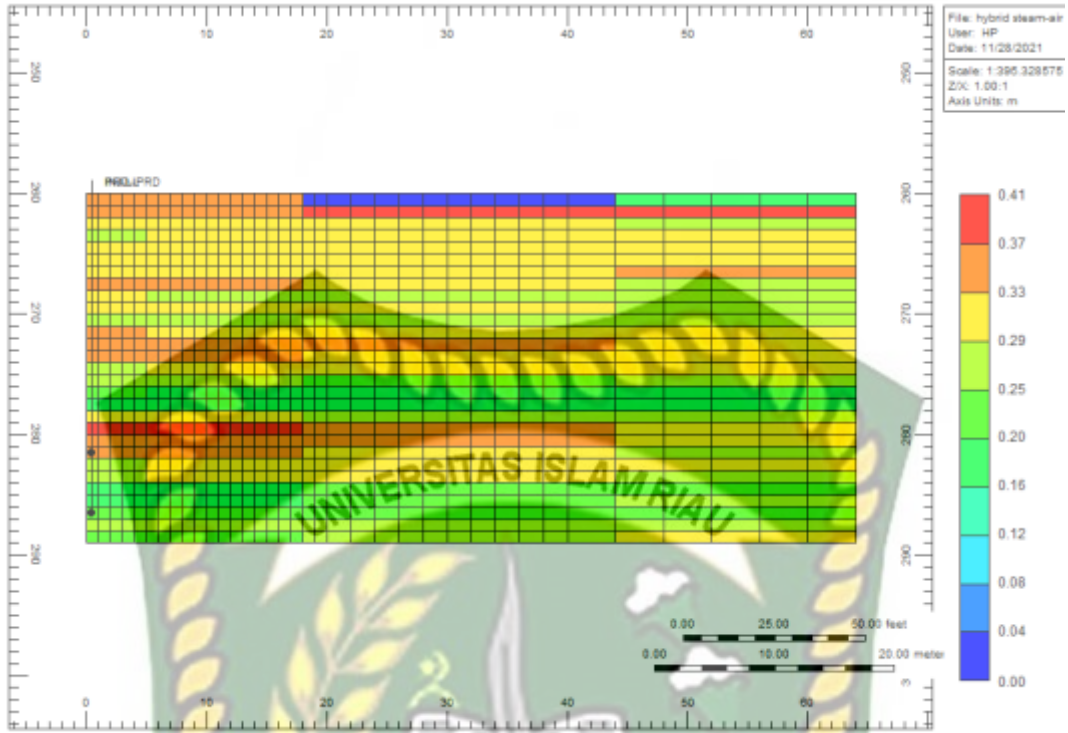
Gambar 4.3 Model tampak JK-2D cross-section (J = 3 grid, K = 29 grid)



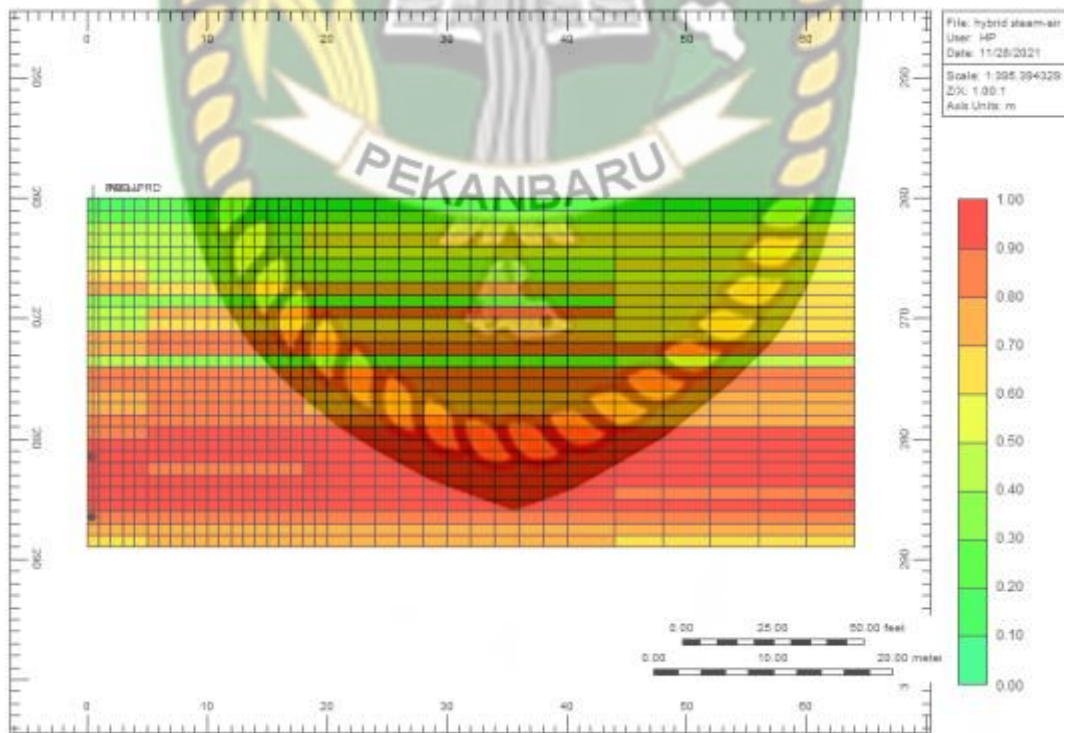
Gambar 4.4 Model 3D (I = 36 grid, J = 3, K = 29 grid)



Gambar 4.5 Permeabilitas vertikal pada tampak IK-2D *cross-section*



Gambar 4.6 Porositas pada tampak IK-2D *cross-section*



Gambar 4.7 Saturasi minyak pada tampak IK-2D *cross-section*

4.2 Hasil Simulasi

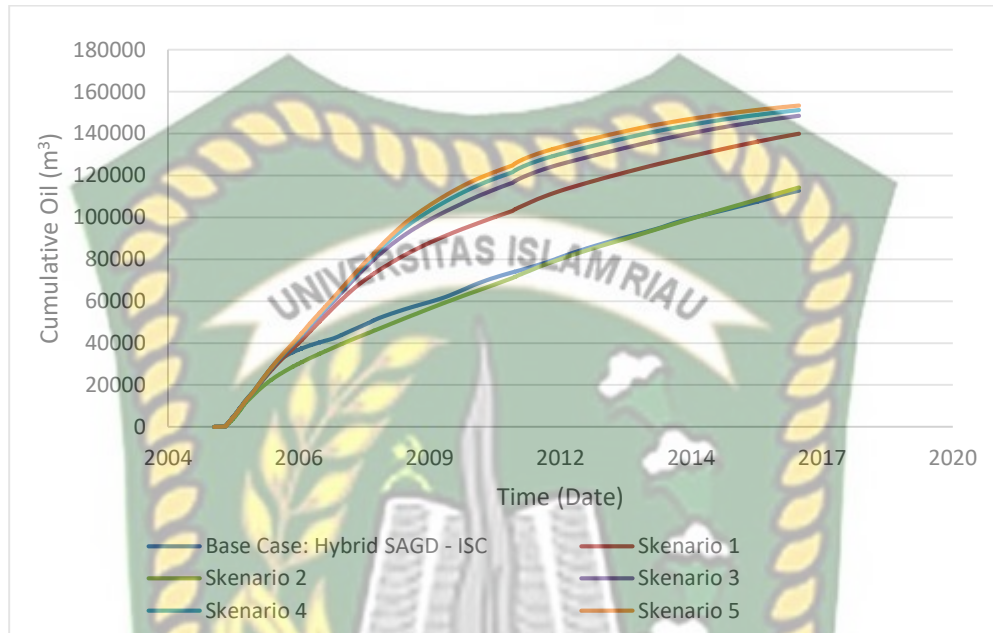
Untuk mendapatkan hasil yang valid dan representatif, maka dibuatlah 5 skenario untuk kemudian dilakukan analisis mengenai komposisi rasio air-udara yang optimal untuk diinjeksikan agar mendapatkan perolehan minyak yang paling optimal selama 12 tahun masa produksi. Berikut adalah komposisi fluida injeksi yang digunakan dalam penelitian ini:

Tabel 4.1 Skenario Simulasi Pengoperasian *Wet-FICAGD*

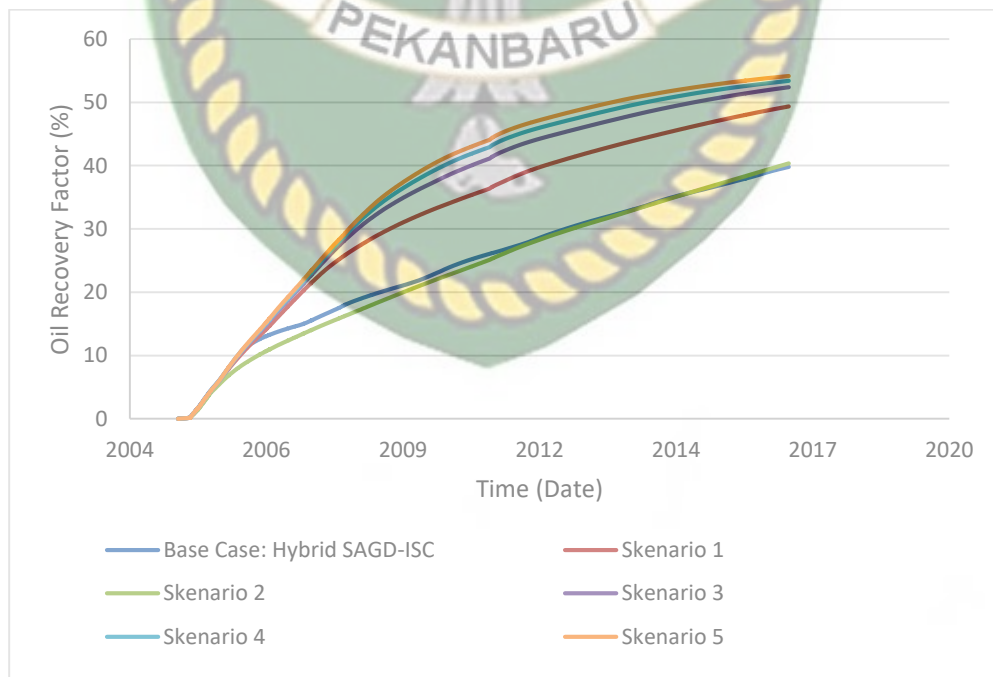
MENCARI RASIO AIR-UDARA TERBAIK					
S1.1 WAR 25/75					
Tgl	Constraints	Injected Fluid & Stream Attributes			
1/1/2005	STF MAX 0 CONT REPEAT	WATER	1	Fraksi	
	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	TEMP	252	°C	
		STEAM Q	0,9		
		PRESS	4100	kPa	
1/4/2005	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0,25		
		O2	0,75		
		TEMP	252	°C	
1/4/2011	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0		
		O2	1		
		TEMP	252	°C	
1/7/2011	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0,25		
		O2	0,75		
S1.2 WAR 5/95					
Tgl	Constraints	Injected Fluid & Stream Attributes			
1/1/2005	STF MAX 0 CONT REPEAT	WATER	1		
	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	TEMP	252	°C	
		STEAM Q	0,9		
		PRESS	4100	kPa	
1/4/2005	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0,05		
		O2	0,95		
		TEMP	252	°C	
1/4/2011	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0		
		O2	1		
		TEMP	252	°C	
1/7/2011	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0,05		
		O2	0,95		

S1.3 WAR 42/58					
Tgl	Constraints	Injected Fluid & Stream Attributes			
1/1/2005	STF MAX 0 CONT REPEAT	WATER	1		
	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	TEMP	252	°C	
		STEAM Q	0,9		
		PRESS	4100	kPa	
1/4/2005	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0,42		
		O2	0,58		
		TEMP	252	°C	
1/4/2011	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0		
		O2	1		
		TEMP	252	°C	
1/7/2011	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0,42		
		O2	0,58		
S1.4 WAR 55/45					
Tgl	Constraints	Injected Fluid & Stream Attributes			
1/1/2005	STF MAX 0 CONT REPEAT	WATER	1		
	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	TEMP	252	°C	
		STEAM Q	0,9		
		PRESS	4100	kPa	
1/4/2005	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0,55		
		O2	0,45		
		TEMP	252	°C	
1/4/2011	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0		
		O2	1		
1/7/2011	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0,55		
		O2	0,45		
S1.5 WAR 75/25					
Tgl	Constraints	Injected Fluid & Stream Attributes			
1/1/2005	STF MAX 0 CONT REPEAT	WATER	1		
	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	TEMP	252	°C	
		STEAM Q	0,9		
		PRESS	4100	kPa	
1/4/2005	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0,75		
		O2	0,25		
1/4/2011	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0		
		O2	1		
		TEMP	252	°C	
1/7/2011	BHP MAX 4100 CONT REPEAT	WATER	0,75		
		O2	0,25		

Dari skenario diatas, didapatkan hasil perolehan kumulatif minyak sebagai berikut:



Grafik 4.1 Produksi kumulatif minyak



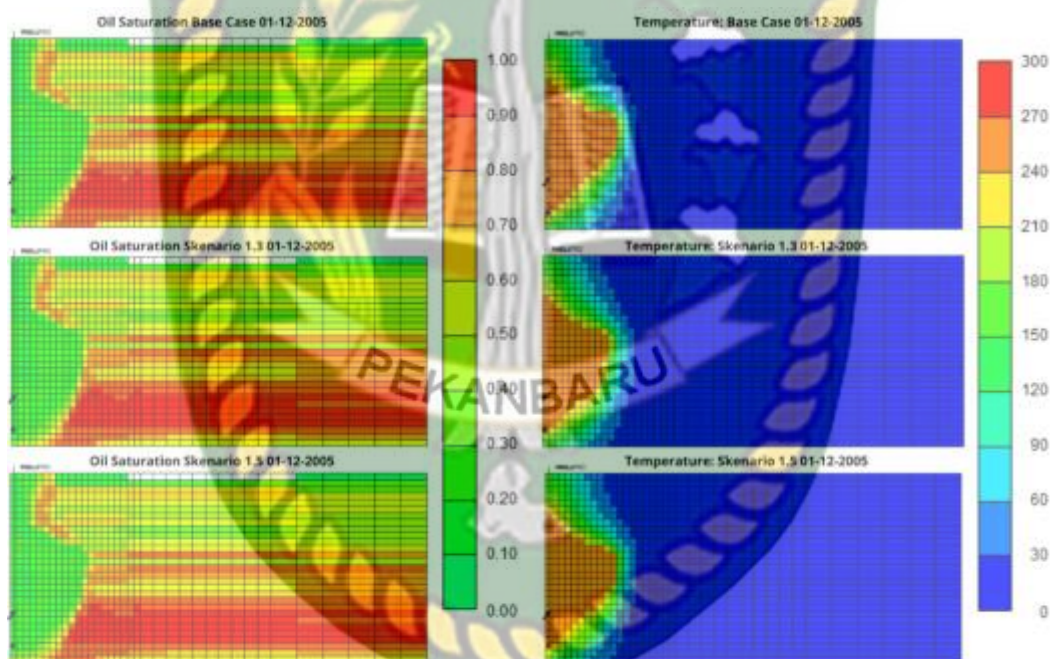
Grafik 4.2 Oil Recovery Factor

Tabel 4.2 Produksi kumulatif minyak dan *Oil Recovery Factor*

	Skenario					
	<i>Base Case</i>	Skenario 1 (25/75)	Skenario 2 (5/95)	Skenario 3 (42/58)	Skenario 4 (55/45)	Skenario 5 (75/25)
m ³	112704,7	139949,7	114307,8	148528,2	151307,8	153481,6
bbl	708891,0	880257,1	718974,4	934214,3	951697,4	965370,2
RF (%)	39,8	49,4	40,3	52,4	53,4	54,1

Pada *Base Case Hybrid SAGD – ISC*, diperoleh kumulatif minyak selama 12 tahun sebesar 112704,7 m³ (708891 bbl) dengan *Recovery Factor* (RF) sebesar 39,8%. Kemudian pada skenario 1, dengan menggunakan rasio air-udara sebesar 25/75, didapatkan kumulatif produksi minyak sebesar 139949,7 m³ (880257,1 bbl), ini berarti skenario 1 mengalami peningkatan RF sebesar 9,6% dari *base case*, yaitu mampu mencapai 49,4%. Pada skenario 2, dengan menggunakan rasio air-udara sebesar 5/95, didapatkan kumulatif produksi minyak sebesar 114307,8 m³ (718974,4 bbl), ini berarti skenario 2 mengalami peningkatan RF sebesar 0,5% dari *base case*, yaitu mampu mencapai 40,3%, namun ini juga ditandai dengan penurunan jika dibandingkan dengan skenario 1, yaitu menurun sebesar 9,1%. Selanjutnya pada skenario 3, dengan menggunakan rasio air-udara sebesar 42/58, didapatkan kumulatif produksi minyak sebesar 148528,2 m³ (934214,3 bbl), ini menunjukkan bahwa pada skenario 3 ini mengalami kenaikan RF sebesar 12,6% dari *base case*, 3% dari skenario 1, dan 12,1% dari skenario 2, yaitu mampu mencapai 52,4%. Begitu juga dengan skenario 4 (55/45) dan 5 (75/25), berhasil mengalami peningkatan hingga mencapai 13,6% dan 14,3% dari *base case*, yaitu mencapai 53,4% dengan perolehan kumulatif minyaknya sebesar 151307,8 m³ (951697,4 bbl) pada skenario 4 dan 54,1% dengan perolehan kumulatif minyaknya sebesar 153481,6 m³ (965370,2 bbl) pada skenario 5.

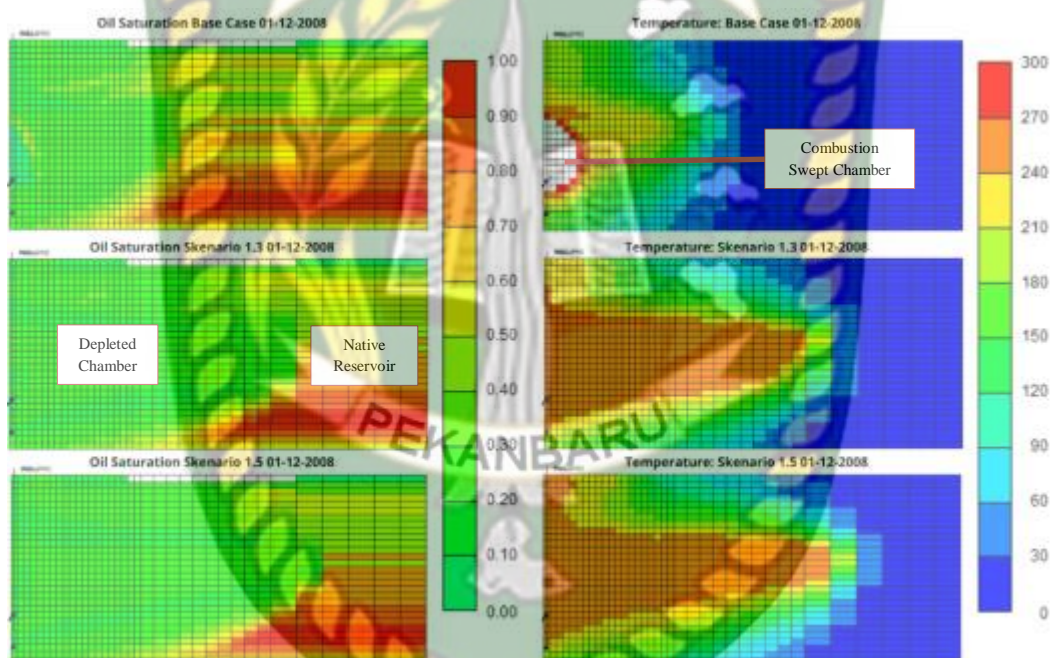
Dari beberapa pernyataan di atas, dapat dikatakan bahwa meningkatnya *recovery* minyak berbanding lurus dengan besarnya rasio air-udara pada pengoperasian *wet combustion*. Menurut Greaves (1987), batas teratas untuk *normal wet combustion* adalah $2,5 \text{ m}^3/\text{Mm}^3$. Dan batas atas untuk *super-wet combustion* adalah $3,75 \text{ m}^3/\text{Mm}^3$, pada titik tersebut terjadi peristiwa padamnya sebagian *combustion front* pada proses pembakaran (*partial quenching*). Diketahui bahwa pada Skenario 1,2,3, dan 4, berturut turut memiliki rasio air-udara sebesar $0,33 \text{ m}^3/\text{Mm}^3$, $0,05 \text{ m}^3/\text{Mm}^3$, $0,72 \text{ m}^3/\text{Mm}^3$, dan $1,22 \text{ m}^3/\text{Mm}^3$, ini memenuhi syarat untuk terjadinya *normal wet combustion*. Sedangkan pada skenario 5 memiliki rasio air-udara sebesar $3,00 \text{ m}^3/\text{Mm}^3$, maka yang terjadi adalah *super-wet combustion*.



Gambar 4.8 Saturasi Minyak dan *Temperature* pada 01-12-2005

Pada pengoperasian *wet combustion* ini, rasio air-udara menentukan seberapa luas distribusi panas yang dihasilkan yang mengindikasikan kecepatan dalam proses pembakaran yang terjadi pada proses tersebut. Dapat dilihat pada **gambar 4.8** yang merupakan akhir dari tahun pertama penginjeksian *Steam* (SAGD) pada *base case* dan *wet combustion* pada skenario 3 dan 5, setelah dilakukannya injeksi *steam* super panas terlebih

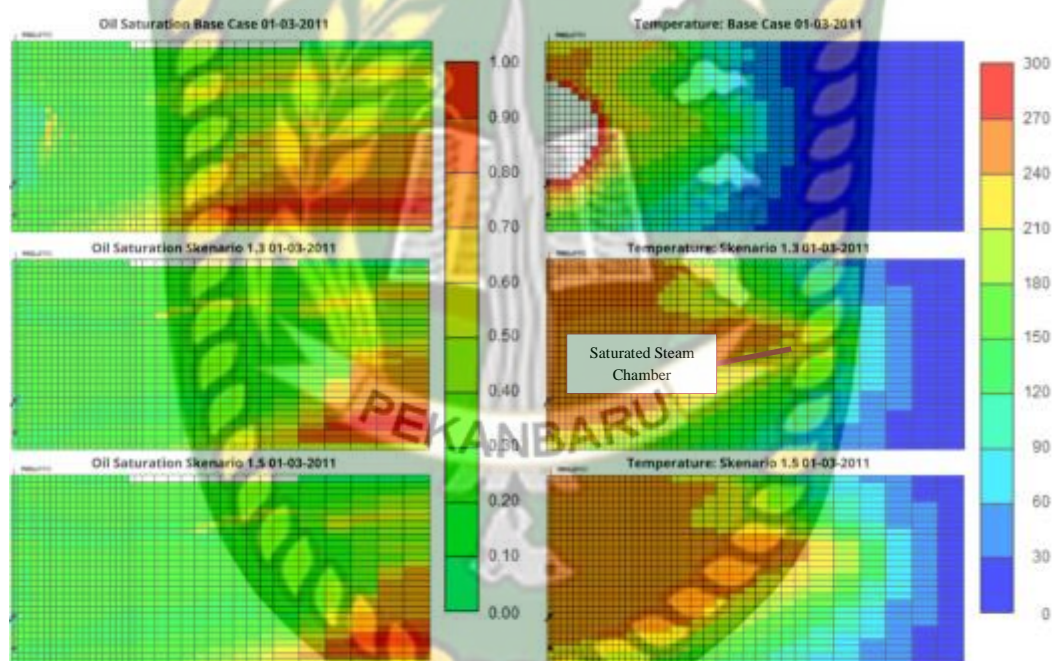
dahulu secara *ex-situ* pada 3 bulan pertama untuk membentuk komunikasi *thermal* antar sumur. Pada kondisi ini, semua skenario tersebut masih memiliki jangkauan distribusi panas yang relatif sama, sehingga *recovery* minyak yang terproduksi juga relatif sama. Hal ini terjadi karena ketiga skenario ini masih mengandalkan steam sebagai *drive mechanism* utamanya, hanya saja yang membedakan jika *base case* steamnya secara *ex-situ*, skenario 3 dan 5 steamnya terbentuk secara *in-situ* yang diakibatkan oleh pemanasan air yang diinjeksikan oleh proses pembakaran yang terjadi, dan proses yang terjadi juga belum cukup lama untuk menghasilkan perbedaan yang signifikan antara skenario 3 dan 5.



Gambar 4.9 Saturasi Minyak dan *Temperature* pada 01-12-2008

Pada **gambar 4.9** terlihat bahwa ketiga skenario tersebut sudah mengalami perbedaan yang cukup signifikan, terutama pada base case dengan skenario 3 dan 5. Pada tanggal tersebut, sedang berlangsung pengoperasian *dry combustion*, sehingga jika dilihat terdapat *combustion swept chamber*, yaitu wilayah tempat terjadinya pembakaran, sehingga menghasilkan *temperature* yang sangat tinggi, yaitu lebih dari 300°C, dan memiliki nilai $S_o = 0$. Hal ini terjadi karena pada *dry combustion*, minyak di wilayah

combustion swept chamber ikut terbakar, sehingga tidak terdapat minyak di wilayah tersebut. Sementara itu pada skenario 3 dan 5, karena penginjeksian udara dibarengi dengan penginjeksian air, maka air ini berperan sebagai *cooling agent*, yang artinya suhu yang dihasilkan dari proses pembakaran yang terjadi di dalam formasi tidak dapat setinggi *dry combustion*, hanya sekitar 250°C - 270°C. Air ini juga bermanfaat untuk mengurangi konsumsi minyak yang ikut terbakar di dalam formasi. Sehingga akan lebih banyak minyak yang mampu diproduksi, hal ini dapat dilihat pada **grafik 4.1** dan **grafik 4.2**.



Gambar 4.10 Saturasi Minyak dan *Temperature* pada 01-03-2011

Kemudian pada **gambar 4.10** yang merupakan tahun ke 6 dari 12 tahun pengoperasian, terlihat bahwa pada setiap skenario mengalami perluasan distribusi panas yang sangat signifikan, yang sudah berhasil meningkatkan *temperature* lebih dari setengah bagian dari formasi. Selisih dari penyebaran panas antara *base case* dengan skenario 3 dan 5 tertinggal sangat jauh, yang mana mengindikasikan bahwa metode *wet combustion* ini memiliki kecepatan pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan dengan

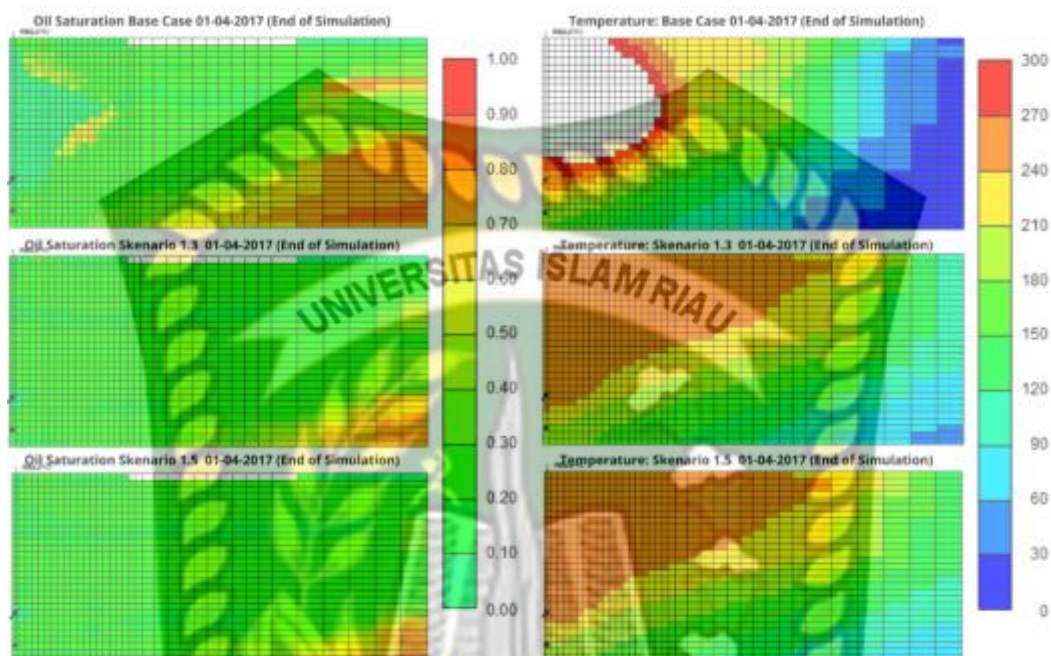
hybrid SAGD – dry combustion. Saturated steam chamber yang terbentuk akibat proses pembakaran pada *wet combustion* sangat efisien dalam melakukan distribusi panas, terlebih lagi pada *wet combustion*, memiliki tenaga penggerak yang lebih kompleks dibandingkan dengan *SAGD – dry combustion*, yaitu *hot water, steam*, dan gas, sehingga dapat menjangkau lebih jauh dan lebih cepat.



Gambar 4.11 Saturasi Minyak dan *Temperature* pada 01-07-2011

Pada *wet combustion* juga perlu dilakukan *dry combustion* selama 3 bulan untuk meningkatkan kembali panas pada formasi tersebut. Pada **grafik 4.5** terlihat bahwa proses penginjeksian *dry combustion* berhasil memulihkan panas yang berefek pada pelandaian penurunan laju produksi minyak, yang mana ini sangat baik untuk *recovery* yang lebih optimum. Selanjutnya dapat dilihat pada **gambar 4.11** yang merupakan akhir priode dari penginjeksian *dry combustion* pada skenario 3 dan 5, bahwa terlihat terjadi pembentukan *combustion swept chamber* dan *superheated steam chamber*. *Superheated steam chamber* merupakan fasa air yang sudah menjadi gas sepenuhnya, yang mana suhu yang dihasilkan sangat tinggi, namun *combustion swept chamber* yang dihasilkan tersebut tidak dapat bertahan cukup lama, akibat *wet*

combustion yang diinjeksikan 3 bulan setelahnya. Namun ini sudah cukup untuk mengembalikan panas dan memulihkan laju produksi minyak.

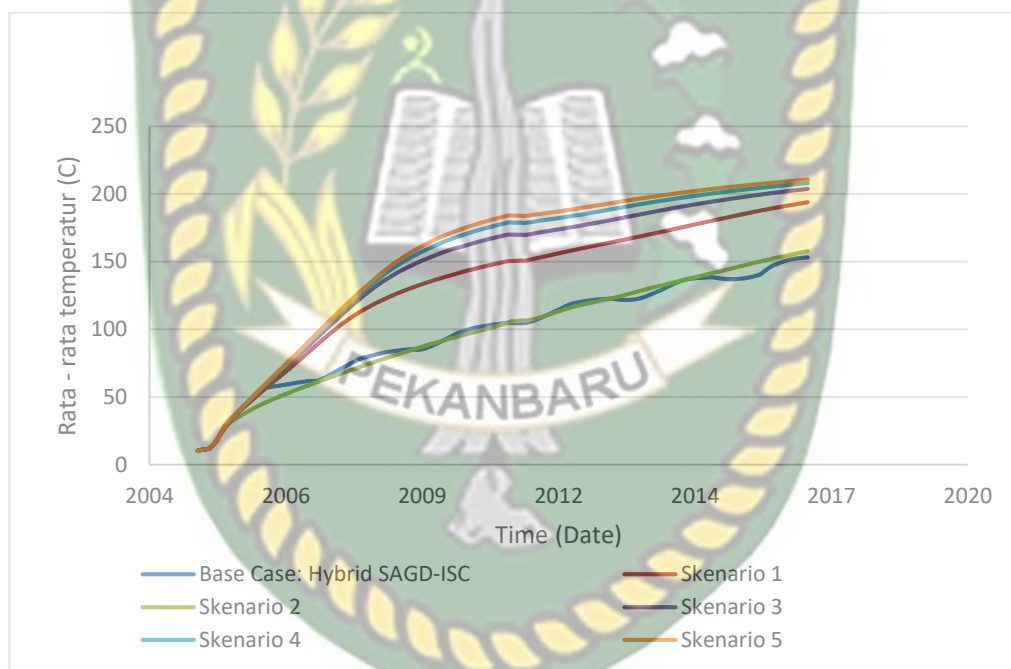


Gambar 4.12 Saturasi Minyak dan *Temperature* pada 01-04-2017

Hasil akhirnya dapat dilihat pada **gambar 4.12** yang merupakan akhir dari periode simulasi yang dilakukan. Terlihat bahwa yang jangkauannya paling luas adalah skenario 5 yang memiliki rasio air-udara sebesar $3.00 \text{ m}^3/\text{Mm}^3$ (*Super-wet combustion*). Maka inilah yang dikatakan sebagai *Wet-Fast Incineration CAGD*, karena memiliki kemampuan dalam melakukan pembakaran dan distribusi panas yang sangat cepat, jika dibandingkan dengan *normal wet combustion*, terlebih lagi dengan *Hybrid Steam-ISC* ataupun *dry combustion* itu sendiri.

Luasnya jangkauan panas yang dihasilkan, berbanding lurus dengan *recovery* minyak yang dapat diperoleh. Kenaikan sebesar 14,3% pada skenario 5 dibandingkan dengan *hybrid SAGD - ISC* yaitu RF mencapai 54,1% merupakan hasil yang sangat baik. Pada skenario 5 memiliki rasio air-udara sebesar 75% air dan 25% udara (oksigen) atau $3,00 \text{ m}^3/\text{Mm}^3$, sedangkan pada *base case alternating hybrid SAGD - ISC* memiliki rasio waktu

penginjeksian 50% steam dan 50% udara (oksigen), masing masing setiap 1 tahun dalam 12 tahun pengoperasian. Di sini dapat dilihat bahwa skenario 5 berhasil mengurangi setengah dari porsi udara (oksigen) yang diinjeksikan pada *base case*, namun hasilnya dapat meningkat dengan signifikan. Sifat air sebagai penyimpan panas terbaik inilah kunci dari keberhasilan metode *wet-FICAGD* ini. Dengan air yang ikut diinjeksikan, dapat mengurangi penggunaan oksigen yang diketahui sangat mahal, dengan terbentuknya *steam chamber* yang dapat dilihat pada **grafik 4.4**, dengan rasio tersebut, berhasil mengurangi setengah volume dari yang seharusnya dilakukan pada *base case* dengan tetap mengalami kenaikan produksi, maka secara ekonomi, ini sangat baik dan menguntungkan.



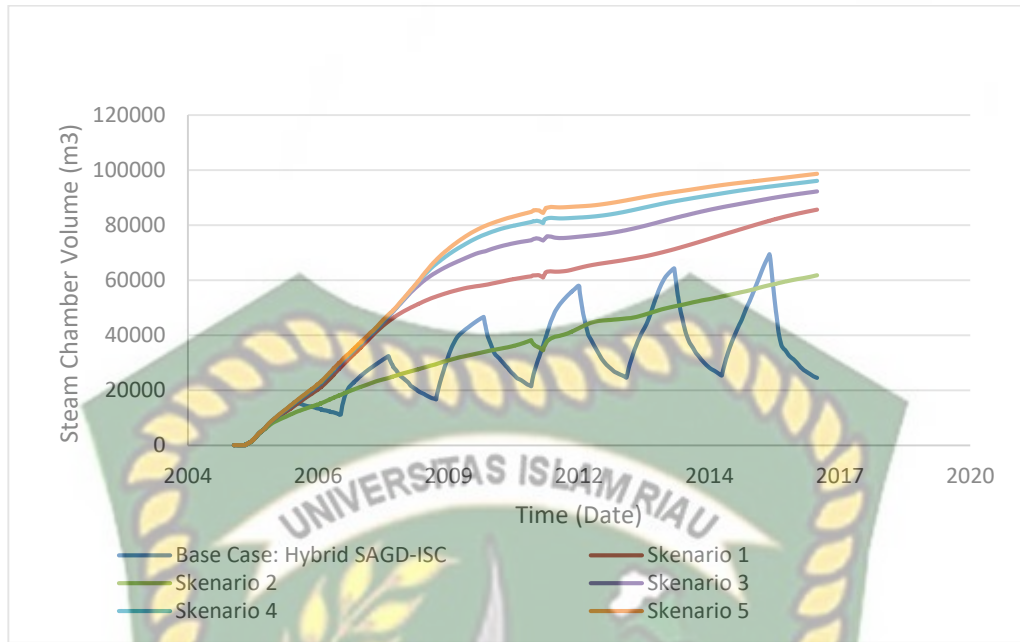
Grafik 4.3 Rata-rata *temperature*

Jika dilihat lebih lanjut pada **grafik 4.3**, rata rata temperature yang dimiliki skenario *wet combustion* jauh lebih tinggi dibandingkan dengan hybrid SAGD – ISC. jika ditinjau kembali pada **gambar 4.12**, hal ini bukan disebabkan oleh panas yang dihasilkan dalam suatu proses pembakaran, tapi hal ini disebabkan oleh penyebaran panas yang merata oleh *wet combustion*, jangkauan panas yang lebih jauh jika dibandingkan dengan *hybrid SAGD* –

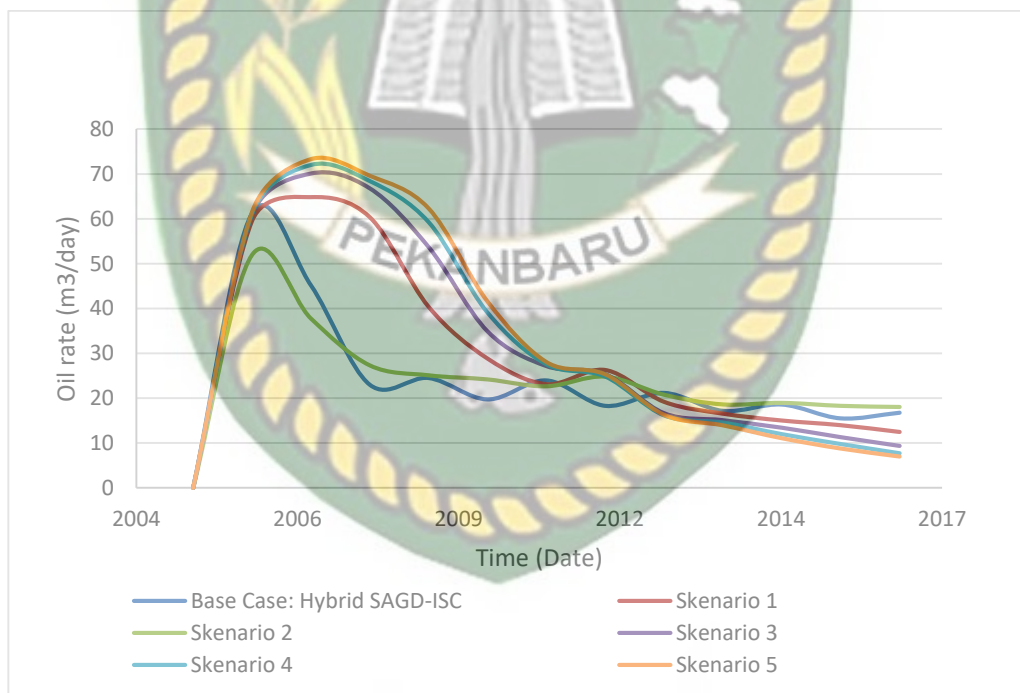
ISC. dalam teorinya, sekali proses pembakaran oleh *dry combustion* menghasilkan panas yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan *wet combustion*. Namun rata-rata *temperature* disini adalah *temperature* rata rata pada formasi tersebut.

Eskalasi yang terjadi pada Skenario 1, 2, 3, 4, dan 5, tidak lepas dari peranan rasio air-udara yang diinjeksikan. Terlihat bahwa pada skenario 2 dengan rasio air-udara sebesar (5/95) yang mana hampir menjadi *dry combustion*, memiliki rata rata *temperature* paling rendah dibanding 4 skenario *wet combustion* lainnya. Maka dari sini dapat ditarik kesimpulan bahwa peningkatan rata rata *temperature* di dalam formasi ini berbanding lurus dengan besarnya rasio air-udara yang diinjeksikan. Semakin besar rasionya maka akan semakin besar *steam chamber* yang terbentuk seperti dapat dilihat pada **grafik 4.4**, maka akan semakin luas distribusi panasnya, sehingga menyebabkan tingginya rata rata *temperature* pada formasi tersebut.

Pada **grafik 4.4** mempertegas bahwa proses *dry combustion* yang dilakukan baik pada hybrid SAGD-ISC dan *wet combustion* cenderung mengurangi jumlah volume *steam chamber* yang terbentuk di dalam formasi. Semakin berkurang jumlah *steam* yang terbentuk di dalam formasi, maka formasi tersebut akan semakin kehilangan *steam* sebagai media penghantar panas yang baik. Hal ini dapat mempengaruhi kecepatannya dalam mendistribusikan panas ke dalam formasi tersebut. Jika panas tidak terdistribusikan dengan baik ke dalam formasi, maka akan semakin kehilangan potensi minyak yang dapat diturunkan viskositasnya dan diproduksi ke permukaan.



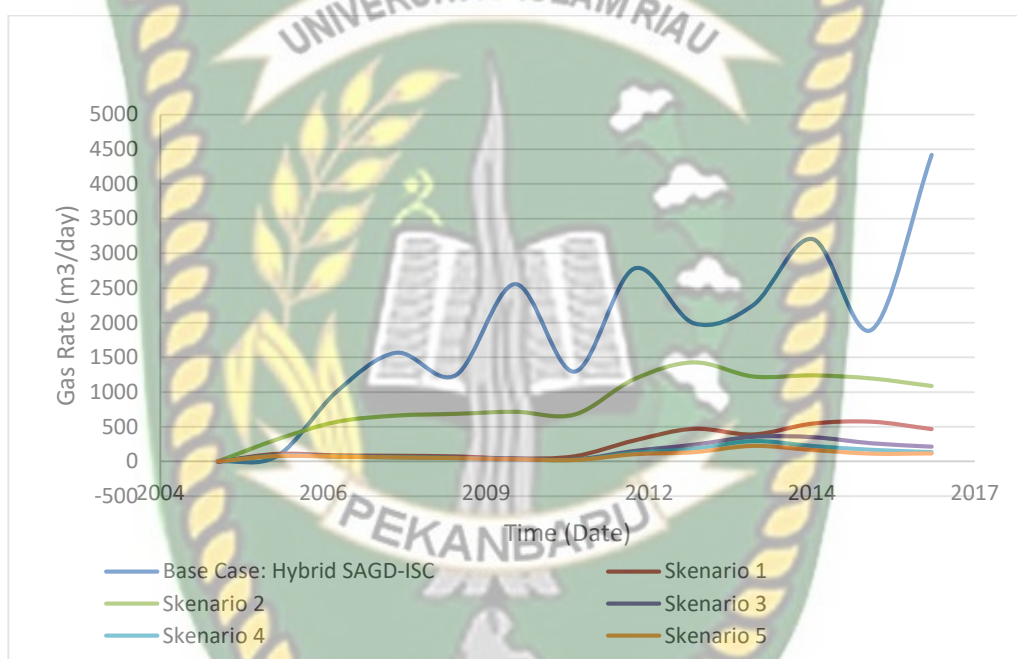
Grafik 4.4 Volume *steam chamber* yang terbentuk



Grafik 4.5 Oil Rate

Pada setiap pengopearasian *wet combustion*, wajib dilakukannya penginjeksian *dry combustion* selama 3 bulan. Melalui **grafik 4.5** terjawab dengan baik alasan mengapa perlu dilakukan penginjeksian *dry combustion* pada pengoperasian *wet combustion*. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat

pelandaian penurunan produksi yang terjadi ketika penginjeksian *dry combustion* dilakukan. Pemulihan panas ini dapat terjadi karena pada proses *dry combustion* memiliki suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan *wet combustion* yang sebelumnya telah dilakukan. Panas ini nantinya akan memulihkan panas yang sudah terbentuk sebelumnya. Ketika panasnya meningkat kembali, maka kemampuannya untuk menurunkan viskositas dan distribusi panasnya akan meningkat juga.



Grafik 4.6 Gas Rate

Pengoperasian *in-situ combustion* tidak lepas dari dampaknya terhadap lingkungan, terutama dalam menghasilkan gas gas yang terbentuk dari proses pembakaran di dalam formasi yang dapat mencemari lingkungan di dalam formasi ataupun di permukaan yang ikut terproduksi oleh minyak, seperti gas CO₂, CO, gas *methane*, hingga H₂S. Jika ditinjau dari **grafik 4.6**, metode *hybrid SAGD-ISC* yang dioperasikan memiliki *gas rate* yang sangat tinggi, yang jumlahnya nyaris 500x lipat lebih besar dibandingkan dengan metode *Wet-FICAGD* yang dilakukan pada skenario 5, yang mana memiliki produksi gas yang sangat rendah. Hal ini dapat terjadi karena pada *hybrid SAGD-ISC*

tenaga penggerak utamanya adalah steam yang diinjeksikan secara *ex-situ* dan gas yang dihasilkan dari proses pembakaran secara *in-situ*, dibandingkan dengan *Wet-FICAGD*, yang tenaga penggerak utamanya adalah *steam*, gas, dan *hot water*. Ketiga komposisi penggerak utama pada *wet-FICAGD* ini memiliki efisiensi terbaik dalam melakukan penyapuan minyak jika dibandingkan dengan gas dan *steam* saja yang terjadi pada *hybrid SAGD-ISC* tersebut.

4.3 Rekomendasi

Untuk mendapatkan jangkauan panas yang lebih luas dan pembakaran yang lebih cepat, serta dengan pertimbangan penggunaan oksigen, dan dampaknya terhadap lingkungan akibat gas yang dihasilkan dari proses pembakaran. Dibandingkan menggunakan *dry combustion*, *hybrid SAGD-ISC*, ataupun *normal wet combustion*. Gunakanlah rasio air-udara di range 2,6 – 3,5 m^3/Mm^3 untuk mencapai *Wet-FICAGD* pada kondisi *super-wet combustion*.

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Semakin tinggi rasio air-udara, maka akan semakin luas distribusi panas yang dapat dihasilkan, hal ini menandakan cepatnya pembakaran yang terjadi di dalam formasi. Peningkatan rasio air-udara berbanding lurus dengan peningkatan kumulatif produksi minyak. Rasio air-udara paling optimum untuk pengoperasian *Wet-FICAGD* berada di range 2,6 – 3,5 m^3/Mm^3 , yaitu pada kondisi *super-wet combustion*. Dengan begitu, perolehan produksi minyak tertinggi berhasil dicapai oleh skenario 5 dengan rasio air-udara sebesar 3 m^3/Mm^3 , dengan jumlah produksi kumulatif mencapai 153481,6 m^3 (965370.2 bbl) dengan recovery factor sebesar 54,1% OOIP, yang mana lebih tinggi 14,3% jika dibandingkan dengan hybrid SAGD-ISC.
2. Laju distribusi panas pada *wet combustion* lebih cepat dan lebih luas jangkauannya dalam jangka waktu tertentu jika dibandingkan dengan *hybrid SAGD – ISC*. Pada akhir masa periode simulasi, panas rata-rata pada *reservoir* tersebut cukup terpaut jauh perbedaannya antara *wet-FICAGD* dengan *hybrid SAGD – ISC*, pada *wet-FICAGD* memiliki rata-rata *temperature* 210°C, sedangkan *hybrid SAGD – ISC* sebesar 157°C, hal ini terjadi karena distribusi panas ini dipengaruhi oleh keberadaan air yang digunakan sebagai fluida injeksi dalam proses *wet combustion*. semakin tinggi rasio air-udara yang diinjeksikan, maka akan semakin cepat dan luas distribusi panas yang terjadi. Dimana pada proses *wet combustion* terdapat 3 mekanisme penghantar panas ke seluruh lapisan *reservoir*, yaitu gas, *steam*, dan *hot water*, sedangkan *hybrid SAGD – ISC* hanya memiliki *steam* dari proses SAGD dan Gas dari proses ISC.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa hal yang selanjutnya perlu dipertimbangkan untuk dijadikan bahan penelitian lebih lanjut terkait Wet-FICAGD. Diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai *alternating water – air injection* pada metode *wet combustion*, untuk dapat dibandingkan keefektifannya dengan *co-injection* yang dilakukan pada penelitian ini.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap dampak pemadaman sebagian akibat terlalu banyak air yang diinjeksikan terhadap laju alir produksi minyaknya.



Daftar Pustaka

- Abuhesa, M. B., & Hughes, R. (2009). Comparison of Conventional and Catalytic in Situ Combustion Process for Oil Recovery. *Energy & Fuels*, 186-192.
- Akin, S., Bagci, S., & Kok, M. V. (2000). Dry Forward Combustion with Divers Well Configurations. *SPE* 62551.
- Aladasani, A., & Bai, B. (2010). Recent Developments and Updated Screening Criteria of Enhanced Oil Recovery Techniques. *SPE* 130726.
- Alipour, S. (2013). *Numerical Modeling and History Matching of Super Wet Combustion Tube Test*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Alipour, S. (2014). *Numerical Modeling and History Matching of Super-Wet Combustion Tube Test*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Ayasse, C., Bloomer, C., & Lyngberg, E. (2005). First Field Pilot of the THAI Process. *Petroleum Society*.
- Belgrave, J., Moore, R., Ursenbach, M., & Bennion, D. (1993). A Comprehensive Approach to In-Situ Combustion Modeling. *SPE Advanced Technology Series*, 98-107.
- Bhattacharya, R., & Chattopadhyay, S. (2007). Challenges in Work Over Jobs During In-Situ Combustion Process in India - A Field Experience. *SPE* 109906.
- Coates, R., Lorimer, S., & Ivory, J. (1995). Experimental and Numeric Simulations of a Novel Top Down In-Situ. *SPE* 30295, 487-498.
- Cram, P., & Redford, D. (1977). Low Temperature Oxidation Process for the Recovery of Bitumen. *The Journal of Canadian Petroleum*, 72-83.
- Dietz, D., & Weijdema, J. (1968). Wet and Partially Quenched Combustion. *Thermal Recovery*, 411-415.
- Freitag, N., & Exelby, D. (2006). A SARA-Based Model for Simulating the Pyrolysis Reactions That Occur in High-Temperature EOR Processes. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 38-44.
- Gunawan, R. (2020). *Prediksi Pemodelan Performa In-Situ Combustion (ISC) Pada Struktur X Lapangan Y*. Jakarta: Universitas Pertamina.

- Khatami, A., Ghobadi, A. E., & Ansari, S. E. (2015). Fast Incineration Assisted Importance Drainage (FCAGD) Process for Heavy Oil Improvement. *International Journal of Petroleum Engineering*, 82-88.
- Kisman, K., & Lau, E. (1994). A New Combustion Process Utilizing Horizontal Wells and Gravity Drainage. *Journal of Canadian Petroleum Technology*.
- Lapene, A., Castanier, L., Debenest, G., Quintard, M., Kamp, A., & Corre, B. (2009). Effects of Water on Kinetics of Wet In-Situ Combustion. *SPE 121180*.
- Lin, C., Chen, W., Lee, S., & Culham, W. (1984). Numerical Simulation of Combustion Tube Experiments and the Associated Kinetics of In-Situ Combustion. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 657-666.
- Morteza, S., Hosseini, T., Esfahani, S., Doulatabadi, M. H., Sarapardeh, A. H., & Mohammadi, A. H. (2016). On Evaluation of Steam Assisted Gravity Drainage in Naturally Fractured Reservoir. *Petroleum*.
- Nares, H., Hernandez, P., Gamica, M., & Reyes, M. (2007). Heavy-Crude-Oil Upgrading with Transition Metals. *SPE 107837*.
- Parrish, D. R., Pollock, C. B., & Craig, F. (1974). Evaluation of COFCAW as a Tertiary Recovery Method, Sloss Field, Nebraska. *SPE 3777*, 676-686.
- Rahnema, H. (2012). *Combustion Assisted Gravity Drainage (CAGD): An In-Situ Combustion Method to Recover Heavy Oil and Bitumen from Geologic Formation Using a Horizontal Injector/Producer*. Texas: Texas A&M University.
- Rahnema, H., Barrufet, M. A., & Mamora, D. D. (2013). Experimental Analysis of Combustion Assisted Gravity Drainage. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 85-96.
- Rahnema, H., Barrufet, M., & Mamora, D. D. (2017). Combustion Assisted Gravity Drainage - Experimental and Simulation Result of Promising in-situ combustion technology to recover extra-heavy oil. *Journal of Petroleum Science and Engineering*.
- Shokoya, O., Mehta, S., Moore, R., Maini, B., & Darvish, M. (2002). Evaluation of the Miscibility and Contribution of Flue Gas to Oil Recovery Under High Pressure Air Injection. *Journal of Canadian Petroleum Technology*.
- Turta, A., & Bhattacharya, R. (2005). Current Status of the Commercial In Situ Combustion Projects and New Approaches to Apply ISC. *Canadian International Petroleum Conference*, 2.



Dokumen ini adalah Arsip Miik :

Perpustakaan Universitas Islam Riau