LAPORAN

PENELITIAN UNGGULAN FAKULTAS (PUF)

Karakteristik dan Mekanisme Supercritical CO2 dalam Ekstraksi Light Component Hidrokarbon untuk Injeksi CO2 tercampur

TIM PENELITI

Kartika Fajarwati Hartono, S.T., M.T. Reno Pratiwi, S.T., M.T. Aqlyna Fattahanisa, S.T., M.T. Sigit Rahmawan, ST., M.T. Teuku Ananda Rizky (0303028801) (0330107203) (0315089301) (0322119103) 071001700128

Ketua Anggota Anggota Anggota Anggota



TEKNIK PERMINYAKAN Fakultas Teknologi Kebumian dan Energi UNIVERSITAS TRISAKTI <u>2022/2023</u>



UNIVERSITAS TRISAKTI

LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT

Jl. Kyai Tapa No. 1 Grogol, Jakarta Barat 11440, Indonesia Telp. 021-5663232 (hunting), ext. 8141, 8161, Fax. 021-5684021 http://lppm.trisakti.ac.id/ lppm@trisakti.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN LAPORAN PENELITIAN TAHUN AKADEMIK 2022/2023 0418/PUF/FTKE/2022-2023

1.	Judul Penelitian :	Karakteristik dan Mekanisme Supercritical CO2 dalam Ekstraksi Light Component Hidrokarbon untuk Injeksi CO2 tercampur			
2.	Skema Penelitian :	Penelitian Unggulan Fakultas (PUF)			
3.	Ketua Tim Pengusul				
	a. Nama :	Kartika Fajarwati Hartono, S.T., M.T.			
	b. NIDN :	0303028801			
	c. Jabatan/Golongan :	Asisten Ahli/III-B			
	d. Program Studi :	TEKNIK PERMINYAKAN			
	e. Perguruan Tinggi :	Universitas Trisakti			
	f. Bidang Keahlian :	Teknik Perminyakan			
		Villa Bintaro Regency Jalan Sumatera Blok J1/15, Pondok Aren,			
	g. Alamat Kantor/Telp/Fak/surel :	Tangerang Selatan			
		kartika@trisakti.ac.id			
4.	Anggota Tim Pengusul				
	a. Jumlah anggota :	Dosen 3 orang			
	b. Nama Anggota 1/bidang keahlian :	Reno Pratiwi, S.T., M.T./Teknik Kimia			
	c. Nama Anggota 2/bidang keahlian :	Aqlyna Fattahanisa, S.T., M.T./Perminyakan			
	d. Nama Anggota 3/bidang keahlian :	Sigit Rahmawan, ST., M.T./Teknik Produksi			
	e. Jumlah mahasiswa yang terlibat :	1 orang			
	f. Jumlah alumni yang terlibat :	0 orang			
	g. Jumlah laboran/admin :	0 orang			
5.	Waktu Penelitian				
	Bulan/Tahun Mulai	September 2022			
	• Bulan/Tahun Selesai :	Juli 2023			
6.	Luaran yang dihasilkan :	 Hak Kekayaan Intelektual Publikasi di Jurnal 			
7.	Biaya Total	Rp29.840.000,-			



Dr. Ir. Muhammad Burhannudinnur, M.Sc., IPM. NIDN: 0310106704 Jakarta, 31 Agustus 2023 Ketua Tim Pengusul

(Dua Puluh Sembilan Juta Delapan Ratus Empat Puluh Ribu)



Kartika Fajarwati Hartono, S.T., M.T. NIDN: 0303028801

Direktur Ir. Astri Rinanti, M.T., IPM NIDN: 0308097001

IDENTITAS PENELITIAN

Skema Penelitian	: Penelitian Unggulan Fakultas (PUF)
Judul Penelitian	: Karakteristik dan Mekanisme Supercritical CO2 dalam
	Ekstraksi Light Component Hidrokarbon untuk Injeksi
	CO2 tercampur
Fokus Penelitian	: Green Energy
Rumpun Penelitian	: Green Engineering/ Technology
Mata Kuliah yang terkait	: Enhanced Oil Recovery
Topik Pengabdian kepada	: Sharing Knowledge Session Fundamental Mechanism CC
Masyarakat yang terkait	Enhanced Oil Recovery dan Carbon Capture Storage (CC
	sebagai solusi permasalahan green house effect

Tim Peneliti

Peneliti	NIK/ NIM	Posisi	Status	Program Studi	Fakultas
Kartika Fajarwati Hartono, S.T.,	3196	Ketua	Dosen	TEKNIK	FTKE
М.Т.			Trisakti	PERMINY	
				AKAN	
Reno Pratiwi, S.T., M.T.	3059	Anggota	Dosen	TEKNIK	FTKE
			Trisakti	PERMINY	
				AKAN	
Aqlyna Fattahanisa, S.T., M.T.	3568	Anggota	Dosen	TEKNIK	FTKE
			Trisakti	PERMINY	
				AKAN	
Sigit Rahmawan, ST., M.T.	3611	Anggota	Dosen	TEKNIK	FTKE
			Trisakti	PERMINY	
				AKAN	
Teuku Ananda Rizky	07100170	Anggota	Mahasiswa	TEKNIK	FTKE
	0128		Trisakti	PERMINY	
				AKAN	

Lokasi dan atau Tempat Penelitian	:
Masa Penelitian	
Mulai	: September 2022
Berakhir	: Juli 2023
Dana diusulkan	: Rp29.840.000,-
Sumber Pendanaan	: 5.2.03.08.01
Target Kesiapterapan Teknologi	: TKT 3
Produk Inovasi	:
Luaran	: Hak Kekayaan Intelektual
	Publikasi di Jurnal

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	ii
Identitas Penelitian	iii
DAFTAR ISI	1
DAFTAR TABEL	2
DAFTAR GAMBAR	3
RINGKASAN PENELITIAN	4
BAB 1. PENDAHULUAN	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	7
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	13
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	17
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	24
DAFTAR PUSTAKA	25
LAMPIRAN 1. ROAD MAP PENELITIAN	
LAMPIRAN 2. LUARAN PENELITIAN	

DAFTAR TABEL

Table 4.1 Recovery Factor Injeksi CO2 Crude Sample RDg dan JTB pada 70°C dan 90°C 23

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram fase CO ₂	. 7
Gambar 2.2 Karakteristik CO2 dalam fase Superkritis	8
Gambar 2.3 Perubahan Densitas terhadap Penurunan Tekanan untuk CO ₂ Superkritis (Sc-CO ₂) p	ada
Kondisi Isothermal	9
Gambar 2.4 Kelakuan Fasa pada Diagram Terner untuk Methane (C1) dan Pseudo Komponen	12
Gambar 2.5 Diagram Terner Proses Vaporisasi-Kondensasi pada Peoses MCM	12
Gambar 3.1 Skema Apparatus Visual Fluid Eval PVT	15
Gambar 3.2 Analisa Komposisi Sample Crude Oil	15
Gambar 4.1 Swelling Factor (SF) terhadap Tekanan dan Temperature pada crude sample RDG	17
Gambar 4.2 Swelling Factor (SF) terhadap Tekanan dan Temperature pada crude sample JTB	18
Gambar 4.3 Hubungan Densitas CO ₂ dengan Temperature dan Tekanan Injeksi CO ₂	19
Gambar 4.4 Hubungan Densitas CO ₂ dengan Swelling Factor Fungsi dari P dan T	20
Gambar 4.5 Perubahan Komposisi Crude Oil RDG Fungsi dari Tekanan	21
Gambar 4.5 Perubahan Komposisi Crude Oil JTB Fungsi dari Tekanan	22

RINGKASAN PENELITIAN

CO₂ merupakan salah satu substansi yang memiliki keunikan. Dalam industri perminyakan, supercritical CO₂ digunakan untuk meningkatkan produksi minyak (*Enhanced Oil Recovery*) melalui proses injeksi ke dalam reservoir pada tekanan dan temperature tinggi. Implementasi injeksi CO₂ untuk meningkatkan produksi minyak cukup berhasil dan merupakan salah satu metode Enhanced Oil Recovery (EOR) yang menjanjikan. Banyak penelitian terkait injeksi CO₂ yang dilakukan untuk mengetahui nilai perolehan minyak. Namun, masih sedikit penelitian yang dilakukan secara mendalam terkait karakteristik dan mekanisme CO₂ dalam proses ekstraksi komponen hidrokarbon. Ekstraksi komponen hidrokarbon oleh CO2 merupakan salah satu mekanisme fundamental yang dapat menjelaskan keefektifan injeksi CO₂ dalam proses penyapuan (displacement) minyak tersisa dalam reservoir (residual oil in place). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk investigasi/meneliti pengaruh temperatur dan tekanan supercritical CO₂ dalam mekanisme ekstraksi dan vaporisasi komponen hidrokarbon dan nilai perolehan minyak (*oil recovery factor*). Penelitian ini dilakukan pada kondisi tekanan dan temperature tinggi yang meniru temperature reservoir, yaitu 90°C dan 70°C. Aparatus eksperimen yang digunakan untuk observasi swelling dan proses ekstraksi adalah PVT Fluid Eval dan Gas Chromatography (GC). Sedangkan injeksi CO₂ pada proses penyapuan minyak dilakukan menggunakan apparatus slim tube. Hasil dari eksperimen menunjukkan bahwa mekanisme swelling-ekstraksi pada interaksi antara CO₂ dengan crude oil sangat bergantung pada tekanan, temperature, dan komposisi crude oil. Selain itu, perolehan minyak (Recovery Factor) dari injeksi CO2 pada temperature yang lebih tinggi menunjukkan RF yang lebih tinggi dibandingkan injeksi CO₂ pada temperature yang lebih rendah.

Kata Kunci :

Supercritical CO₂, Oil Recovery Factor, Injeksi CO₂, *swelling*, ekstraksi, *Recovery Factor (RF)*, *PVT Fluid Eval*

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

CO₂ merupakan salah satu substansi yang memiliki keunikan secara nature (Rudyk et al., 2017). Dalam kondisi operasi temperature 31°C dan tekanan 1070 Psi, CO₂ berada pada fase superkritis (Sc-CO₂) dimana pada fase tersebut CO₂ memiliki densitas seperti liquid dan viskositas seperti gas (Liu et al., 2017). Keunikan dari Sc-CO₂ tersebut banyak dimanfaatkan dibeberapa sektor industri terutama dalam proses ekstraksi. Dalam industri perminyakan, Sc-CO₂ digunakan dalam meningkatkan produksi minyak (Enhanced Oil Recovery) melalui proses injeksi ke dalam reservoir pada tekanan dan temperature tinggi. Implementasi injeksi CO₂ untuk meningkatkan produksi minyak cukup berhasil dan merupakan salah satu metode EOR yang menjanjikan. Meskipun injeksi CO₂ EOR cukup berhasil diimplementasikan, namun penelitian terkait mekanisme Sc-CO₂ dalam injeksi CO₂ tercampur belum banyak dibahas terutama untuk implementasi reservoir dengan temperature yang cukup tinggi. Perlu diketahui bahwa, reservoir minyak di Indonesia memiliki karakteristik reservoir dengan temperatur yang tinggi karena letak Indonesia pada jalur gunung api aktif atau vulkanik (ring of fire). Beberapa investigator melakukan penelitian injeksi CO₂ pada temperature reservoir yang cukup rendah, yaitu berkisar 30-50°C (Abdurrahman et al., 2015; Abedini et al., 2014; Hartono et al., 2019; Mansour et al., 2016; Rezk & Foroozesh, 2019). Hal ini akan memberikan mekanisme swelling dan ekstraksi sebagai akibat dari interaksi antara CO₂ dengan crude oil yang berbeda jika dilakukan pada temperature yang relative tinggi. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan melakukan investigasi dan observasi terkait karakteristik dan mekanisme injeksi supercritical CO₂ (Sc-CO₂) sampai dengan tekanan 5000 psi dan dilakukan pada temperature reservoir 70°C dan 90°C.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan kajian literatur, beberapa permasalahan yang muncul dan akan dijawab dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1. Bagaimana pengaruh temperatur dan tekanan Sc-CO₂ dalam mekanisme swelling dan ekstraksi komponen hidrokarbon dalam crude oil?
- 2. Bagaimana pengaruh temperatur dan tekanan Sc-CO2 terhadap densitas crude oil?
- 3. Bagaimana pengaruh temperature dan injeksi tekanan Sc-CO₂ terhadap perolehan minyak (*Recovery Factor*)?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian yang diusulkan ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh temperature dan tekanan Sc-CO₂ dalam mekanisme ekstraksi dan vaporisasi komponen hidrokarbon.

2. Mengetahui pengaruh temperatur dan tekanan Sc-CO₂ terhadap densitas crude oil.

3. Mengetahui pengaruh temperature dan injeksi tekanan Sc-CO₂ terhadap perolehan minyak (*Recovery Factor*).

1.4. Batasan Penelitian

Penelitian ini memiliki batasan dan limitasi, yaitu:

- 1. Sample yang digunakan adalah *dead oil*, yaitu sample yang diambil dari *stock tank*.
- Crude oil sample yang digunakan adalah *light oil* dengan *specific gravity* minyak adalah 36°API, dimana crude sample tersebut diambil dari salah satu lapangan di Indonesia.
- 3. Pengujian ekstraksi komponen hidrokarbon oleh Sc-CO₂ dilakukan dengan analisa Gas Chromatograph (GC).
- 4. *Recovery Factor (RF)* injeksi Sc-CO₂ dilakukan dengan ekperimen slim tube.

1.5. Kaitan Penelitian dengan Road Map Penelitian Pribadi dan Road Map Penelitian Fakultas

Penelitian ini masih berkaitan dengan penelitian sebelumnya, dimana rangkaian penelitian ini merupakan *Road Map* Penelitian Pribadi. Penelitian sebelumnya adalah injeksi CO₂ dengan metode *swelling test*, sedangkan usulan penelitian saat ini adalah mekanisme fenomena ekstraksi komponen hidrokarbon oleh Sc-CO₂. Kedua topik penelitian tersebut sangat berkaitan dan sesuai dengan road map penelitian pribadi. Selain itu, penelitian ini juga selaras dan berkaitan dengan *Road Map* Penelitian Fakultas terkait *Green Energy and Environment*. Pemanfaatan CO₂ untuk peningkatan produksi minyak merupakan salah satu solusi untuk mengurangi *greenhouse emission*, namun juga membantu pemerintah untuk membantu menyediakan kebutuhan energi nasional

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Properties dari CO₂ Superkritis (Sc-CO₂)

Gambar 2.1 adalah diagram fase untuk CO₂. Terlihat bahwa daerah fase superkritis CO₂ berada diatas titik kritis CO₂, yaitu temperature 30.98°C dan 1070.3 Psi. Dalam fase superkritis, CO₂ memiliki sifat seperti liquid (*liquid-like*) (densitas tinggi) dan *gas-like* (viskositas rendah dan difusivitas tinggi) seperti terlihat pada Gambar 2.2. Sifat-sifat tertentu dari Sc-CO₂ dapat dimanfaatkan untuk banyak tujuan ilmiah dan proses industri yang berguna (Brunner, 2010). Beberapa solvent seperti propana dan liquid superkritis lainnya seperti nitrogen, karena kompresibilitasnya yang relatif rendah maka tekanan yang sangat besar diperlukan untuk membuat suatu perubahan yang siginifikan dalam densitasnya (Raveendran et al., 2005; Siagian & Grigg, 1998). Sedangkan pada Sc-CO₂ perubahan densitas yang signifikan dapat dilakukan dengan mengubah atau menaikkan tekanan (Saini, 2019). Ilustrasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.3



Gambar 2.1 Diagram fase CO₂

Perlu diketahui bahwa semua sifat termodinamika zat murni, dalam Sc-CO₂, dapat diperoleh dengan bentuk turunan dari persamaan fundamental keadaan yang eksplisit dalam energi Helmholtz, yang merupakan fungsi dari dua variabel bebas—densitas dan suhu (Span dan Wagner 1996). Di sisi lain, kita tahu bahwa, seperti sifat termodinamika lainnya, daya solvasi Sc-CO₂ juga dapat dengan mudah disesuaikan dengan memanipulasi kondisi tekanan dan suhu sistem. Namun, terdapat karakteristik

dasar tertentu yang perlu dipertimbangkan untuk pemahaman mendasar tentang daya solvasi Sc-CO₂ (Lebedev et al., 2013). Raveendran et al., 2005 telah memberikan pembahasan rinci tentang sifat dasar CO_2 (yaitu, Sc-CO₂) sebagai pelarut.



Gambar 2.2 Karakteristik CO₂ dalam fase Superkritis (Sun et al., 2017)

Menurut Raveendran dkk (2005), deskripsi "kimia" tingkat molekuler yang lebih tinggi dari perilaku solvasi CO₂ menunjukkan bahwa CO₂ dapat bertindak sebagai asam Lewis yang lemah (yaitu, suatu zat, seperti ion H+, dengan kemampuan untuk menerima sepasang elektron non-ikatan) serta basa Lewis (yaitu, zat, seperti ion OH⁻, yang dapat menyumbangkan sepasang elektron non-ikatan). Juga, berbagai bukti teoretis dan eksperimental menunjukkan bahwa CO₂ dapat berpartisipasi dalam interaksi ikatan hidrogen (Raveendran et al. 2005). Oleh karena itu, pada tingkat fundamental, CO₂ perlu dipertimbangkan sebagai pelarut polar, dan sifat pelarutnya bergantung pada interaksi zat terlarut-zat terlarut, zat terlarut-pelarut, dan pelarut-pelarut. Ini adalah sifat interaksi zat terlarut-pelarut yang spesifik lokasi (yaitu, seberapa mudah energi interaksi zat terlarut-larutan berpasangan dapat diatasi oleh energi interaksi zat terlarut-pelarut berpasangan), yang pada akhirnya menentukan kelarutan bahan dalam CO₂ (Raveendran et al., 2005).

Sifat menarik dan berguna yang disebutkan di atas menempatkan CO₂ ke dalam posisi unik diantara liquid superkritis. CO₂ superkritis merupakan substansi yang paling banyak digunakan dengan banyak aplikasi dan proses industri seperti ekstraksi superfluida (SFE), peningkatan produksi minyak (EOR), dan siklus daya Sc-CO₂ Brayton (Brunner, 2010). Di sisi lain, dalam implementasi EOR, penggunaan CO₂ yang paling efisien adalah Sc-CO₂ sebagai solvent dalam *miscible flooding* (Holm, 2007). Oleh karena itu, mencapai *miscibility* antara CO₂ yang diinjeksikan kedalam reservoir adalah kunci untuk setiap proyek EOR yang sukses. Namun, apa sifat dasar dari kelarutan tak terbatas (yaitu, miscibility lengkap) yang terjadi antara CO₂ yang diinjeksikan dan minyak reservoir dan secara termodinamika

dimanifestasikan oleh MMP (*first contact miscibility* atau *multiple contact miscibility*)?. Pembahasan ini akan didiskusikan pada sub-bab selanjutnya.



Gambar 2.3 Perubahan Densitas terhadap Penurunan Tekanan untuk CO₂ Superkritis (Sc-CO₂) pada Kondisi Isothermal (Atia & Mohammedi, 2018)

Sifat menarik dan berguna yang disebutkan di atas menempatkan CO₂ ke dalam posisi unik diantara liquid superkritis. CO₂ superkritis merupakan substansi yang paling banyak digunakan dengan banyak aplikasi dan proses industri seperti ekstraksi superfluida (SFE), peningkatan produksi minyak (EOR), dan siklus daya Sc-CO₂ Brayton (Brunner, 2010). Di sisi lain, dalam implementasi EOR, penggunaan CO₂ yang paling efisien adalah Sc-CO₂ sebagai solvent dalam *miscible flooding* (Holm, 2007). Oleh karena itu, mencapai *miscibility* antara CO₂ yang diinjeksikan kedalam reservoir adalah kunci untuk setiap proyek EOR yang sukses. Namun, apa sifat dasar dari kelarutan tak terbatas (yaitu, miscibility lengkap) yang terjadi antara CO₂ yang diinjeksikan dan minyak reservoir dan secara termodinamika dimanifestasikan oleh MMP (*first contact miscibility* atau *multiple contact miscibility*)?. Pembahasan ini akan didiskusikan pada sub-bab selanjutnya.

2.2 Injeksi Miscible

Seperti yang sudah dijelaskan diatas bahwa miscibility terjadi pada tekanan MMP. Secara teori, perolehan minyak yang didapatkan jika injeksi dilakukan secara proses miscible akan didapatkan 90% perolehan minyak tersisa (Moghadasi et al., 2018). Dalam proses injeksi secara miscible, ada dua tipe proses yang terjadi:

(1) First-contact miscibility (FCM)

Pada proses ini, CO₂ dan minyak bercampur pada semua komposisi dan proporsi terjadi pada saat kedua fluida saling berkontak pertama kali dan membentuk fase yang homogen.

(2) Multiple-contact miscibility (MCM)

Secara umum pada proses ini, CO₂ dan minyak tidak tercampur pada saat kedua fluida berkontak pertama kalinya. Miscibility terjadi secara dinamik yang disebut sebagai multicontact dalam reservoir. Proses ini disebut dengan multiple contact miscibility (MCM). Selama proses ini, komposisi fluida injeksi dan fluida reservoir berubah melalui fenomena transfer massa antara CO₂ dan minyak. Fenomena transfer masa pada multicontact miscibility terjadi melalui dua proses/fenomena, yaitu:

- *(a) Vaporizing gas drive (VGD): miscibility* dicapai melalui proses vaporisasi/ektraksi hidrokarbon dengan berat molekul ringan dan sedang dari minyak kedalam CO₂
- (b) Condensing gas drive (CGD): miscibility dicapai melalui transfer massa dari CO₂ kedalam crude oil.

Dengan kata lain, MCM terjadi ketika CO₂ berinteraksi dengan minyak yang mengakibatkan zona tercampur dinamik dalam media berpori.

Secara diagram terner, posisi CO₂ dan crude oil pada proses FCM dapat dilihat melalui gambar 3. Pada gambar 3, komponen C₁ dan C₂₋₆ membentuk fase homogen pada berbagai komposisi, begitu juga komponen C₂₋₆ terhadap komponen C₇₊. Namun, komponen C₁ terhadap C₇₊ hanya dapat membentuk fase homogen pada komposisi dan proporsi tertentu. Garis merah pada line komposisi C₁ – C₇₊ menunjukkan bahwa pada proporsi tersebut, C₁ dan C₇₊ tidak tercampur atau dengan kata lain tidak terbentuk fase yang homogen pada tekanan (P₁) tertentu.



Gambar 2.4 Kelakuan Fasa pada Diagram Terner untuk Methane (C1) dan Pseudo Komponen (Moghadasi et al., 2018)

Diagram terner pada Gambar 2.5 merepresentasikan proses miscibility yang terjadi melalui *multi-contact miscibility (MCM)*. Injeksi solvent pada crude oil menunjukkan bahwa kedua fluida tersebut tidak tercampur (*miscible*), yang terlihat pada *tie line* melewati area dua fase. Namun, selama proses injeksi solvent melalui media berpori dan kontak dengan crude oil, beberapa komponen minyak akan menguap (vaporisasi) dan terjadi transfer massa kedalam fase gas (solvent). Sebagai hasilnya adalah, komposisi gas dan minyak juga berubah. Komposisi campuran yang baru digambarkan dengan V₁ (fase gas) dan L₁ (fase liquid). Seperti terlihat pada gambar 2.5 (b) fase uap (*vapor phase*) V₁ berubah menjadi liquid (L₁) dan berkontak dengan minyak (O). minyak dan uap yang bercampur ditunjukkan pada V₁O, dimana pada diagram terner direpresentasikan dengan M₂. Proses ini akan terus berlanjut hingga fase uap tercampur (miscible) dengan minyak, karena *tie line* campuran antara uap dan minyak tersebut akan menjadi satu fase.

Multi-contact miscibility ini terjadi pada saat CO₂ yang diinjeksikan ke dalam reservoir minyak, dimana system minyak dan gas adalah multi komponen. Mekanisme vaporisasi dan kondensasi merupakan prinsip yang terjadi pada proses MCM ini (Moghadasi et al., 2018). Zick (1986) dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa kondisi dan kelakuan maksimum-minimum yang ditunjukkan selama proses injeksi CO₂ merepresentasikan kombinasi proses vaporisasi dan kondensasi (Dindoruk, 2020).



Gambar 2.5 (a) Diagram Terner Proses Vaporisasi-Kondensasi pada Peoses MCM; (b) Vaporization Gas Drive (VGD) pada Media Berpori

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini diusulkan melalui skema Penelitian Unggulan Fakultas (PUF) dengan durasi penelitian berdasarkan desain ekperimen adalah 10 bulan. Kegiatan penelitian dilakukan di laboratorium *Pertamina Research and Technology Innovation*. Beberapa pengujian dan analisa dilakukan di Lemigas dan ITB. Adapun waktu pelaksanaan penelitian adalah awal November 2022 (pengambilan sample dan persiapan alat) dan diperkirana selesai bulan Juni 2023

3.2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan data primer dari eksperimen laboratorium. Eksperimen laboratorium yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah Visual Fluid Eval PVT apparatus yang bertujuan untuk mengobservasi perubahan volume crude oil dan ekstraksi beberapa komponen hidrokarbon pada saat injeksi CO₂ pada kondisi tekanan dan temperature tinggi (*Supercritical*). Adapun skema dari Visual Fluid Eval PVT apparatus dapat dilihat pada Gambar 3.1. *Crude sample* yang digunakan adalah *light - dead crude oil* yang diambil dari *stock tank* salah satu lapangan di Indonesia. *Specific gravity* dari crude sample yang akan digunakan adalah 36°API.

Kondisi operasi untuk eksperimen laboratorium dilakukan pada kondisi reservoir dan HPHT (*high pressure high temperature*). Temperature disesuaikan dengan temperatur reservoir yaitu, $T = 194^{\circ}F$ (90°C) dan $T = 158^{\circ}F$ (70°C), sedangkan tekanan dilakukan pada 5 titik tekanan tinggi, yaitu: P = 1000, 2000, 3000, 4000, dan 5000 psi. Adapun observasi dan investigasi dilakukan dengan melihat perubahan volume minyak, perubahan densitas crude, dan fenomena ekstraksi beberapa komponen hidrokabron oleh supercritical CO₂.

3.3. Metode Analisis

Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif yang didapatkan dari hasil eksperimen laboratorium, dimana luaran dari eksperimen berupa data densitas dengan penngaruh tekanan dan temperature; dan data komposisi komponen hidrokarbon. Selain itu observasi fenomena seperti perubahan volume minyak yang disebabkan adanya mekanisme swelling dan ekstraksi dilakukan secara visual melalui sapphire glass pada sapphire window seperti Gambar 3.1. Komposisi inisial sample crude oil dapat ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.1 Skema Apparatus Visual Fluid Eval PVT



Gambar 3.2 Analisa Komposisi Sample Crude Oil

3.4. Indikator Capaian Penelitian

Indikator capaian penelitian:

- Mendapatkan data swelling dan eksraksi dari perubahan volume minyak dan perubahan komposisi minyak dari Gas Chromatography pada berbagai variasi tekanan tinggi (1000; 2000; 3000; 4000; dan 5000 psi).
- 2. Mendapatkan data perubahan densitas minyak setelah injeksi CO2 superkritis.
- 3. Luaran Penelitian berupa HKI dan publikasi di Proceeding Internasional bereputasi

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Temperatur dan Tekanan terhadap Swelling Factor (SF)

Pengujian mekanisme swelling pada interaksi antara CO₂ dengan crude oil dilakukan pada tekanan tinggi yaitu 1000; 2000; 3000; dan 4000 Psi. Kondisi operasi tekanan ini adalah kondisi injeksi dalam skema miscible CO₂. Gambar 4.1 adalah *Swelling Factor* terhadap tekanan dan temperature untuk injeksi CO₂ dalam crude sampel RDG. Terlihat bahwa ada peningkatan volume minyak hingga 1.4 kali dari volume inisial sampai dengan tekanan puncak *swelling factor* (*SF*) di tekanan 2000 Psi pada temperature 70°C. Namun, setelah tekanan 2000 psi, terlihat ada penurunan pada volume minyak. Pada kondisi temperature 90°C menunjukkan pola grafik SF yang setipe dengan temperature 70°C. Puncak *Swelling Factor* pada kondisi temperature 90°C terjadi pada tekanan 2500 Psi. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperature, maka rate dari peningkatan volume karena injeksi CO₂ semakin lama. Penurunan volume minyak yang cukup signifikan terjadi setelah puncak SF tercapai. Adanya penurunan volume minyak ini disebabkan karena beberapa komponen hidrokarbon terkekstraksi oleh CO₂ pada tekanan yang cukup tinggi.



Gambar 4.1 Swelling Factor (SF) terhadap Tekanan dan Temperature pada crude sample RDG

Gambar 4.2 menunjukkan fenomena swelling untuk crude sample JTB pada temperature 90°C dan 70°C. Sampel crude RDG dan JTB memiliki komposisi yang berbeda, dimana sample RDG lebih ringan daripada sample JTB. Pada sample JTB, puncak dari swelling factor baik itu pada temperature 70°C maupun 90°C berada pada tekanan 2500 Psi dengan nilai SF yang hamper sama, yaitu 1.4 kali dari volume inisial. Setelah tekanan 2500 Psi, ada penurunan volume minyak yang cukup signifikan. Hal ini menunjukkan ada mekanisme swelling, yaitu proses vaporisasi dan ekstraksi yaitu hilangnya beberapa komponen hidrokabon oleh CO₂ superkritis. Fenomena ekstraksi yang terjadi pada interaksi antara CO₂ dengan crude oil bergantung pada densitas dari CO₂ itu sendiri, yang dijelaskan lebih lanjut pada sub-bab 4.2.



Gambar 4.2 Swelling Factor (SF) terhadap Tekanan dan Temperature pada crude sample JTB

4.2 Pengaruh Tekanan dan Temperature Injeksi CO₂ terhadap Densitas Minyak

Hubungan antara perubahan densitas terhadap temperature dan tekanan injeksi CO_2 dapat dilihat pada Gambar 4.3. Kemampuan CO_2 dalam mengekstrak beberapa komponen hidrokarbon terutama lightintermediate component bergantung pada tekanan injeksi dan konsisi temperature. Semakin tinggi tekanan, maka densitas CO_2 juga akan semakin tinggi yang artinya bahwa semakin tinggi juga kemampuan CO₂ dalam mengekstraksi beberapa komponen hidrokarbon dalam crude oil, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Namun, kemampuan ini menurun dengan temperature yang semakin tinggi. Oleh karena itu, laju swelling pada reservoir dengan temperature tinggi lebih lama dibandingkan pada reservoir dengan temperature yang lebih rendah. Namun, hal ini juga bergantung pada komposisi crude oil.



Gambar 4.3 Hubungan Densitas CO2 dengan Temperature dan Tekanan Injeksi CO2

Hubungan densitas CO_2 dengan *swelling factor* sebagai fungsi dari tekanan dan temperature dapat dilihat pada Gambar 4.4. Trend pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa kapasitas ekstraksi komponen hidrokarbon bergantung terutama pada temperatur. Terlihat bahwa pada temperature yang lebih rendah (70°C), terjadi penurunan swelling factor yang lebih signifikan dibanding temperature yang lebih tinggi (90°C). Hal ini menunjukkan bahwa pada tekanan injeksi CO_2 yang sama, kapasitas CO_2 dalam mengekstraksi komponen hidrokarbon lebih banyak terjadi pada temperature yang lebih rendah. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa temperatur mempunyai pengaruh yang cukup signifikan dalam mekanisme fundamental CO_2 injeksi terutama pada fenomena vaporisasi dan ekstraksi beberapa komponen hidrokarbon.



Gambar 4.4 Hubungan Densitas CO₂ dengan Swelling Factor Fungsi dari Tekanan dan Temperatur

4.3 Ekstraksi Komponen Hidrokarbon Ringan – Intermediate oleh CO2

Seperti dijelaskan diatas, ekstraksi komponen hidrokarbon adalah salah satu mekanisme fundamental yang dapat menjelaskan mengapa CO₂ merupakan salah satu metode EOR yang efektif dalam meningkatkan perolehan minyak. Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 secara berturut-turut adalah perubahan komposisi hidrokarbon dari crude sample RDG dan JTB sebagai fungsi dari tekanan. Kedua grafik tersebut menunjukkan trend yang sama, yaitu adanya pengurangan komponen hidrokarbon rantai rendah hingga intermediate (*light - intermediate component*). Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 terlihat bahwa pengurangan komponen hidrokarbon ringan sampai menengah (*light - intermediate component*) semakin tinggi dengan meningkatnya tekanan injeksi CO₂. Namun, disisi lain terlihat ada peningkatan persen mole pada komponen hidrokarbon yang lebih berat. Fenomena ini terjadi karena adanya kemungkinan presipitasi asphaltene sebagai dampak dari interaksi antara CO₂ dengan crude oil. Sehingga hasil dari studi ini dapat disimpulkan bahwa injeksi CO₂ merupakan salah satu metode EOR yang cukup prospektif dan efektif. Hal ini terlihat dari mekanisme fundamental yang terjadi dari interaksi CO₂ dengan crude oil. Namun, injeksi CO₂ juga memiliki dampak sebagai akibat interaksi antara CO₂ dengan crude oil, seperti adanya potensi presipitasi asphaltene. Hak ini tentunya perlu

investigasi lebih lanjut terkait faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya presipitasi asphaltene sebagai efek dari injeksi CO₂ ke fluida reservoir, seperti tekanan injeksi, temperature reservoir, dan komposisi dari crude oil atau fluida reservoir.



Gambar 4.5 Perubahan Komposisi Crude Oil RDG Fungsi dari Tekanan



Gambar 4.6 Perubahan Komposisi Crude Oil JTB Fungsi dari Tekanan

4.4 Pengaruh Temperature dan Tekanan Injeksi CO₂ terhadap Perolehan Minyak (Recovery Factor)

Table 1 adalah perolehan minyak (*recovery factor*) dari injeksi CO₂ pada crude sample RDG dan JTB temperature 70°C dan 90°C dan variasi tekanan. Injeksi CO₂ dilakukan dengan proses displacement menggunakan aparatus slim tube. Table 1 menunjukkan *recovery factor* (RF) pada temperature yang lebih tinggi (90°C) mempunyai RF yang lebih tinggi dibandingkan temperature lebih rendah (70°C), baik injeksi yang dilakukan pada crude sample RDG maupun JTB. Hal ini terjadi karena pada temperature yang lebih rendah, viskositas crude oil akan semakin tinggi. Oleh karena itu, ada potensi ketidakstabilan crude oil dalam media berpori (slim tube) yang disebabkan naiknya viskositas. Ketidakstabilan crude oil dapat menyebabkan komponen asphaltene dalam crude oil terpresipitasi atau terdeposisi dalam media berpori. Hal ini menyebabkan terganggunya proses penyapuan (*displacement*) minyak oleh CO₂ dalam media berpori. Namun demikian, hal ini perlu investigasi dan observasi lebih lanjut terkait fenonema presipitasi asphaltene dalam media berpori sebagai efek dari injeksi CO₂.

Fenomena presipitasi asphaltene dalam media berpori akan diinvestigasi lebih lanjut pada penelitian selanjutnya.

Injection	RDG 7	RDG 70°C		RDG 90°C		JTB 70°C		JTB 90°C	
Prossure	Cumulative	Recovery	Cumulative	Recovery	Cumulative	Recovery	Cumulative	Recovery	
(Dei)	Oil Volume	Factor							
(1 51)	(cc)	(%)							
1000	61.29	51	61.87	51.56	56.97	47.48	55	45.84	
2000	74.12	61.7	94.72	78.93	77	64.18	76	64	
2500	-	-	-	-	-	-	91.55	76.3	
3000	94.2	78.5	112.19	93.49	103	86.46	108.72	90.6	
3500	102.81	85.68	-	-	105.51	87.93	-	-	
4000	101.49	84.58	112.2	93.5	106.91	89.09	112.19	93.49	
5000	99.53	82.94	112.2	93.5	98.38	82	113.38	94.48	
MMP 3517 Psi		2639 Psi		3066 Psi		3299 Psi			

Table 4.1 Recovery Factor Injeksi CO₂ Crude Sample RDg dan JTB pada 70°C dan 90°C

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Adapun kesimpulan dari hasil eksperimen yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

- 1. Mekanisme swelling-ekstraksi pada interaksi antara CO₂ dengan crude oil sangat bergantung pada tekanan, temperature, dan komposisi crude oil.
- 2. Laju swelling pada temperature 90°C lebih lambat dibandingkan temperature operasi 70°C.
- Mekanisme ekstraksi komponen hidrokarbon oleh CO₂ sangat bergantung pada densitas dari CO₂. Semakin tinggi densitas dari CO₂, maka akan semakin tinggi juga kemampuan CO₂ dalam mengekstraksi beberapa komponen hidrokarbon dari crude oil.
- Perolehan minyak (*Recovery Factor*) dari injeksi CO₂ pada temperature yang lebih tinggi menunjukkan RF yang lebih tinggi dibandingkan injeksi CO₂ pada temperature yang lebih rendah.
- 5. Fenomena presipitasi asphaltene yang terjadi sebagai efek dari injeksi CO₂ akan diteliti lebih lanjut pada penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- M Abdurrahman, M., Permadi, A. K., & Bae, W. S. (2015). An improved method for estimating minimum miscibility pressure through condensation-extraction process under swelling tests. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *131*, 165–171. <u>https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.04.033</u>
- Abedini, A., Mosavat, N., & Torabi, F. (2014). Determination of Minimum Miscibility Pressure of Crude Oil–CO₂ System by Oil Swelling/Extraction Test. 2, 431–439. <u>https://doi.org/10.1002/ente.201400005</u>
- Atia, A., & Mohammedi, K. (2018). A Review on the Application of Enhanced Oil/Gas Recovery through CO₂ Sequestration. Carbon Dioxide Chemistry, Capture and Oil Recovery. <u>https://doi.org/10.5772/intechopen.79278</u>
- Brunner, G. (2010). Applications of supercritical fluids. In *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering* (Vol. 1, pp. 321–342). <u>https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-073009-101311</u>
- Cao, M., & Gu, Y. (2013a): Fluid Phase Equilibria Temperature effects on the phase behaviour, mutual interactions and oil recovery of a light crude oil CO₂ system. Fluid Phase Equilibria, 356, 78–89. https://doi.org/10.1016/j.fluid.2013.07.006
- Cao, M., & Gu, Y. (2013b): Oil recovery mechanisms and asphaltene precipitation phenomenon in immiscible and miscible CO₂ flooding processes. Fuel, 109, 157–166. <u>https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.018</u>
- Cao, M., & Gu, Y. (2013c): Oil recovery mechanisms and asphaltene precipitation phenomenon in immiscible and miscible CO₂ flooding processes. *Fuel*, 109, 157–166. <u>https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.018</u>
- Dindoruk, B. (2020). SPE-200462-MS Measurement of Minimum Miscibility Pressure: A State of the Art Review. <u>http://onepetro.org/SPEIOR/proceedings-pdf/20IOR/1-20IOR/D011S016R001/2369859/spe-200462-ms.pdf/1</u>
- Dong, M., Huang, S., Dyer, S. B., & Mourits, F. M. (2001): A comparison of CO₂ minimum miscibility pressure determinations for Weyburn crude oil.
- Elsharkawy, A. M., Poettmann, F. H., & Christiansen, R. L. (1996): Measuring CO₂ Minimum Miscibility Pressures : Slim-Tube or Rising-Bubble Method ? 5, 443–449.
- Hartono, K., Aditya, Y., Sudibjo, R., Fathaddin, M. T., Pratiwi, R., & Fadliah, F. (2019). Determination of CO₂ volume injection effect to reservoir fluid characteristic in miscible CO2 displacement. *Journal of Physics: Conference Series*, 1402(5). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/5/055014
- Holm, L. W. (2007). Miscibility and Miscible Displacement. *Journal of Petroleum Technology*, *38*(08), 817–818. <u>https://doi.org/10.2118/15794-pa</u>
- Jessen, K., California, S., & Jr, F. M. O. (2008): On Interfacial-Tension Measurements To Estimate Minimum Miscibility Pressures. October 11–14.

- Jessen, K., & Orr, F. M. (2007): On IFT measurements to estimate minimum miscibility pressures. Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6, 3618–3625. https://doi.org/10.2523/110725-ms
- Lebedev, M., Mikhaltsevich, V., Bilenko, O., Dance, T., Pervukhina, M., & Gurevich, B. (2013). Experimental laboratory study on the acoustic response of sandstones during injection of supercritical CO2 on CRC2 sample from otway basin Australia. *Energy Procedia*, 37, 4106–4113. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.312
- Liu, B., Li, J., Qi, C., Li, X., Mai, T., & Zhang, J. (2017). Mechanism of asphaltene aggregation induced by supercritical CO2: Insights from molecular dynamics simulation. *RSC Advances*, 7(80), 50786–50793. <u>https://doi.org/10.1039/c7ra09736k</u>
- Mansour, E. M., Al-Sabagh, A. M., Desouky, S. M., Zawawy, F. M., & Ramzi, M. R. (2016). Experimental Approach of Minimum Miscibility Pressure for CO2 Miscible Flooding: Application to Egyptian Oil Fields. *International Journal of New Technology and Research*, 2(5), 105–112.
- Moghadasi, R., Rostami, A., & Hemmati-sarapardeh, A. (2018). Enhanced Oil Recovery Using CO 2. In Fundamentals of Enhanced Oil and Gas Recovery from Conventional and Unconventional Reservoirs. Elsevier Inc. <u>https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813027-8.00003-5</u>.
- Mosavat, N., Abedini, A., & Torabi, F. (2014): Phase Behaviour of CO₂-Brine and CO₂-oil systems for CO₂ storage and enhanced oil recovery: Experimental studies. Energy Procedia, 63, 5631–5645. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.596
- Raveendran, P., Ikushima, Y., & Wallen, S. L. (2005). Polar attributes of supercritical carbon dioxide. *Accounts of Chemical Research*, 38(6), 478–485. <u>https://doi.org/10.1021/ar040082m</u>
- Rezk, M. G., & Foroozesh, J. (2019). Heliyon Phase behavior and fluid interactions of a CO 2 -Light oil system at high pressures and temperatures. Heliyon, 5(April), e02057. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02057
- Rudyk, S., Spirov, P., Samuel, P., & Joshi, S. J. (2017). Vaporization of Crude Oil by Supercritical CO₂ at Different Temperatures and Pressures: Example from Gorm Field in the Danish North Sea. Energy and Fuels, 31(6), 6274–6283. <u>https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00313</u>
- Saini, D. (2019). SPRINGER BRIEFS IN Dayanand Saini CO₂-Reservoir Oil Miscibility Experimental and Characterization and Determination Approaches.
- Siagian, U. W. R., & Grigg, R. B. (1998). SPE 39684 The Extraction of Hydrocarbons from Crude Oil by High Pressure CO₂.
- Sun, Y., Du, Z., Sun, L., & Pan, Y. (2017). Phase behavior of SCCO₂ sequestration and enhanced natural gas recovery. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 7(4), 1085–1093. <u>https://doi.org/10.1007/s13202-016-0282-2</u>
- Tsau, J. S., Bui, L. H., & Willhite, G. P. (2010): Swelling / Extraction Test of a Small Sample Size for Phase Behavior Study, SPE 12972 (April), 24–28.

- Welker, J. R. and Dunlop, D. D. (1963): Physical Properties of Carbonated Oils. Petroleum Transactions SPE 567.
- Whitson, C., H and Brule, M. R., (2000): Phase Behavior. Monograph SPE Henry L. Doherty Series, Volume 20, Richardson, Texas
- Zhang, K., Jia, N., Zeng, F., Li, S., & Liu, L. (2019): A review of experimental methods for determining the Oil–Gas minimum miscibility pressures. Journal of Petroleum Science and Engineering, 183 (July), 106366. <u>https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106366</u>
- Zhang, K., Tian, L., & Liu, L. (2018): A new analysis of pressure dependence of the equilibrium interfacial tensions of different light crude oil–CO₂ systems. International Journal of Heat and Mass Transfer, 121, 503–513. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.014</u>
- Zhou, D., & Orr, F. M. (1995): An Analysis of Rising Bubble Experiments to Determine Minimum Miscibility Pressures, SPE 30786 1, 883–892

LAMPIRAN 1. ROAD MAP PENELITIAN





PETA JALAN PENELITIAN <RENO PRATIWI>



LAMPIRAN 2. LUARAN PENELITIAN

LUARAN 1:

Kategori Luaran: Hak Kekayaan Intelektual Status: Tercatat/Tersedia Jenis HKI: Hak Cipta Nama HKI: Karya Tulis berupa Poster dengan judul Swelling-Extraction Mechanisms of CO2-Crude Oil System in High Reservoir Temperature

LUARAN 2:

Kategori Luaran: Publikasi di Jurnal Status: Jenis Publikasi Jurnal : Internasional Bereputasi Nama Jurnal : Petroleum ISSN : EISSN : Lembaga Pengindek : Url Jurnal : https://www.keaipublishing.com/en/journals/petroleum/ Judul Artikel : The Interpretation of the Swelling/Extraction Test in High Reservoir Temperature to Determine Minimum Miscibility Pressure