

Ikatan Ahli Teknik Perminyakan Indonesia
Society of Indonesian Petroleum Engineers

JTMGB	Vol. 11	No. 2	Hal. 47-118	Jakarta Agustus 2016	ISSN 2088-7590
-------	---------	-------	-------------	-------------------------	----------------

Jurnal Teknologi Minyak dan Gas Bumi adalah majalah ilmiah diterbitkan setiap kwartal yang menyajikan hasil penelitian dan kajian sebagai kontribusi para profesional ahli teknik perminyakan Indonesia yang tergabung dalam Ikatan Ahli Teknik Perminyakan Indonesia (IATMI) dalam menyediakan media komunikasi kepada anggota IATMI pada khususnya dan mensosialisasikan dunia industri minyak dan gas bumi kepada masyarakat luas pada umumnya.

KEPUTUSAN KETUA UMUM IATMI PUSAT

NO: 003/SK/IATMI/III/2015

Penanggung Jawab : Ir. Alfi Rusin

Pemimpin Redaksi : Ir Raam Krisna

Redaktur Pelaksana : Ir. Andry Halim

Peer Review : Prof. Dr. Ir. Septorotno Siregar (*Enhanced Oil Recovery*)
Prof. Dr. Ir. Pudjo Sukarno (*Integrated Production System*)
Prof. Dr. Ir. Doddy Abdassah, PhD. (*Reservoir Engineering*)
Dr. Ir. RS Trijana Kartoatmodjo (*Production Engineering*)
Dr. Ir. Arsegianto (Ekonomi & Regulasi Migas)
Dr. Ir. Bambang Widarsono (Penilaian Formasi)
Dr. Ir. Sudjati Rachmat, DEA (*Well Stimulation and Hydraulic Fracturing*)
Dr. Ir. Sudarmoyo, SE, MT (Penilaian Formasi)
Dr. Ir. Ratnayu Sitaresmi (Penilaian Formasi - CBM)
Dr. Ir. Sugiatmo Kasmungin (*Reservoir Engineering*)
Dr. Ing. Ir. Bonar Tua Halomoan Marbun (*Drilling Engineering*)
Suryono Adisoemarta, PhD. (*Petroleum Engineering*)

Senior Editor : Ir. Junita Musu, M.Sc.
Ir. Ida Prasanti
Ir. Chairatil Asri

Sekretaris : Ir. Bambang Pudjianto (IATMI)

Layout Design : Alief Syahru Syaifulloh, S.Kom. (Sekretariat IATMI)

Sirkulasi : Abdul Manan, A.Md. (Sekretariat IATMI)

Alamat Redaksi: Patra Office Tower Lt.1 Ruang 1-C
Jl. Jendral Gatot Subroto Kav. 32-34
Jakarta 12950 – Indonesia. Tel/Fax: +62-21-5203057
website: <https://iatmi.or.id> email: pusat@iatmi.or.id

Jurnal Teknologi Minyak dan Gas Bumi (ISSN 0216-6410)
diterbitkan oleh Ikatan Ahli Teknik Perminyakan Indonesia, Jakarta
Didukung oleh Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan ITB

DAFTAR ISI

<i>Artificial Neural Network pada Prediksi Shear Sonic Data untuk Perancangan Hydraulic Fracturing</i>	
Sudjati Rachmat dan Andri Taufik S	47 - 64
<i>Comprehensive Study of Optimum Proppant Design in Hydraulic Fracturing Treatment for Coalbed Methane Reservoir</i>	
Sudjati Rachmat dan Evans Immanuel	65 - 84
<i>Sentivitas Skenario Hydraulic Fracturing pada Model Simulasi Shale Gas: Jarak Antar Rekahan dan Panjang Setengah Rekahan</i>	
Rayner Susanto, Doddy Abdassah dan Dedy Irawan	85 - 102
<i>Studi Komparasi Injektivitas CO₂ Dibawah MMP dan Diatas MMP pada Lapangan "X"</i>	
Steven Chandra	103 - 110
<i>Estimasi Tekanan Tercampur Minimum Melalui Pengukuran Tegangan Antar Muka Menggunakan Metode Pendant Drop</i>	
Muslim dan A.K. Permadi	111 - 118

Estimasi Tekanan Tercampur Minimum Melalui Pengukuran Tegangan Antar Muka Menggunakan Metode *Pendant Drop*

Minimum Miscibility Pressure Estimation through Interfacial Tension Test Using Pendant Drop Method

Muslim¹ dan A.K. Permadi²

¹muslim@eng.uir.ac.id;

²asepkpermadi@tm.itb.ac.id

¹Universitas Islam Riau, Jl. Kaharuddin Nasution No. 113, Pekanbaru, Riau;

²Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia

Abstrak

Penentuan tekanan tercampur minimum (TTM) merupakan faktor penting dalam perencanaan injeksi gas CO₂ untuk mendapatkan perolehan minyak yang maksimum dari suatu lapangan atau reservoir. *Slim tube test* merupakan suatu metode untuk menentukan TTM yang telah diakui oleh industri. Namun demikian, terdapat beberapa kekurangan dalam menggunakan metode ini antara lain membutuhkan waktu yang lama dan memerlukan banyak sampel untuk mendapatkan nilai TTM yang diinginkan.

Studi ini bertujuan untuk memperkirakan TTM melalui pengukuran tegangan antar muka atau *interfacial tension* (IFT) menggunakan metode *pendant drop*. Metode ini membutuhkan waktu yang relatif lebih cepat dan memerlukan sampel yang relatif lebih sedikit dibandingkan dengan metode *slim tube test*. Studi ini menggunakan dua sampel minyak yaitu Sampel A dan Sampel B dimana Sampel A mempunyai API *gravity* lebih tinggi dari Sampel B.

Hasil studi menunjukkan bahwa TTM yang diperoleh adalah sebesar 1611 psia pada temperatur 60°C dan sebesar 1777 psia pada temperatur 66°C untuk Sampel A. Sedangkan untuk Sampel B TTM yang dihasilkan adalah sebesar 1918 psia dan 2072 psia masing-masing pada temperatur yang sama seperti digunakan pada Sampel A. Besaran API *gravity* sangat berpengaruh terhadap besaran TTM yang dihasilkan. Semakin tinggi API *gravity* maka semakin rendah TTM dan begitu juga sebaliknya. Dalam hal ini, API *gravity* yang tinggi menyebabkan CO₂ lebih mudah terlarut dan tercampur dengan minyak. Perkiraan TTM melalui pengukuran tegangan antar muka menggunakan metode *pendant drop* sangat menguntungkan untuk dilakukan karena dapat menghemat waktu, sampel, dan biaya yang dikeluarkan untuk mendapatkan harga TTM.

Kata kunci: Tekanan tercampur minimum, CO₂, *pendant drop*, tegangan antar muka.

Abstract

Minimum miscibility pressure (MMP) determination is an important factor for a successful CO₂ injection plan in order to obtain maximum oil recovery from a field or reservoir. The method of slim tube test has been used and well accepted by industry for determining the MMP. However, the method still has some limitations in nature; for example it requires much time and samples to obtain the required MMP.

This study is aimed to estimate the MMP through an interfacial tension (IFT) test by using the method of pendant drop. The method is relatively quicker and requires less samples compared to those required by the slim tube test. In this study, two samples were used namely Sample A and Sample B where Sample A has higher API gravity.

The result shows that the MMP for Sample A was obtained as 1611 psia and 1777 psia at the temperature of 60°C and 66°C, respectively. Meanwhile, for Sample B it was obtained as 1918 psia and 2072 psia for the same temperatures used for Sample A, respectively. The API gravity affects the MMP significantly. The higher the API gravity the lower the MMP and vice versa. In this case, the API gravity makes the CO₂ to dissolve and be miscible with oil more easily. The estimation of MMP through an interfacial tension test using pendant drop method provides advantages because it saves time, use less samples, and requires less cost.

Keywords: *Minimum miscibility pressure, CO₂, pendant drop, interfacial tension test.*

I. PENDAHULUAN

Berbagai metode yang dapat digunakan untuk menentukan tekanan tercampur minimum (TTM) telah dikembangkan. Metode yang telah sering digunakan antara lain *slim tube test* (Yellig dan Metcalfe, 1980; El-Sharkawy, 1996), korelasi (Johnson dan Pollin, 1981), *rising bubble apparatus* (Christiansen and Kim, 1987), *vanishing interfacial tension test* (Rao, 1997), dan simulasi *numeric* (Ahmed, 2000). Namun, berbagai metode tersebut di atas memiliki kekurangan masing-masing seperti yang telah disampaikan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Jarrel dkk (2002) dan Johns dkk (2000) mengungkapkan bahwa metode *slim tube test* memerlukan waktu yang lama dan banyak sampel minyak untuk mendapatkan nilai TTM yang ingin diketahui. TTM yang dihasilkan dari pengukuran *rising bubble apparatus* sangat subjektif dan kasar (Thomas dkk, 1994; Farzad dan Amani, 2012). Penentuan TTM menggunakan simulasi memerlukan input data yang berkualitas tinggi dan *over tuning* yang berlebihan akan memberikan dampak negatif terhadap TTM yang dihasilkan (Lee and Reitzel, 1982; Firoozabadi and Khalid, 1986).

Di antara metode penentuan TTM yang telah diterapkan hingga saat ini dan terbukti telah memberikan hasil yang signifikan serta penyimpangan yang tidak terlalu jauh dari metode *slim tube* adalah metode *vanishing interfacial tension test* (VIT). Metode ini dikembangkan oleh Rao (1997). Pada prinsipnya, VIT adalah penentuan TTM yang dilakukan dari hasil pengukuran tegangan antar muka atau interfacial tension (IFT) antara CO₂ dan minyak menggunakan metode *pendant drop* atau *sessile drop*. Metode ini sangat efektif untuk menentukan TTM dengan cara melakukan plot IFT terhadap tekanan. Pada saat tegangan antar muka sama dengan nol maka tekanan pada kondisi tersebut diasumsikan sebagai TTM. Salah satu kelebihan metode ini adalah singkatnya waktu yang diperlukan untuk mendapatkan nilai TTM serta tidak diperlukannya jumlah sampel minyak yang banyak selama pengujian berlangsung (Ayirala dan Rao, 2006).

Studi ini melakukan kajian tentang penentuan TTM melalui pengujian tegangan antar muka antara CO₂ dan minyak menggunakan metode *pendant drop*. Setelah Rao (1997)

menemukan metode ini untuk menentukan TTM, peneliti lain telah melakukan beberapa pengujian lanjutan dengan menggunakan metode ini seperti yang dilakukan oleh Nobakth dkk (2008); Jessen dan Orr Jr (2008); Ayirala dan Rao (2006); dan Hawthorne dkk (2014). Dalam studi ini, sampel minyak yang digunakan berasal dari salah satu lapangan minyak yang berada di Formasi Air Benakat, Cekungan Sumatera Selatan. Penggunaan metode ini dapat mempercepat penentuan TTM yang diperlukan. Selain itu, pengukuran TTM ini sangat penting sebagai langkah awal sebelum melakukan injeksi gas CO₂ di lapangan yang akan sedang direncanakan. Lake (1989), menyampaikan bahwa injeksi CO₂ dengan mekanisme tercampur (*miscible*) dapat memberikan tambahan perolehan minyak sebesar 10-20% dan dengan mekanisme injeksi tidak tercampur (*immiscible*) dapat memberikan perolehan minyak sebesar 5-10% dari cadangan minyak awal atau *original oil in-place* (OOIP).

II. METODOLOGI

Metode yang digunakan untuk menentukan TTM dalam studi ini adalah uji laboratorium menggunakan peralatan *goniometer* produksi dari Ramehart Ltd. Perkiraan TTM akan diperoleh dari hasil plot antara tegangan antar muka antara CO₂ dan minyak pada temperatur 60°C dan 66°C. Sampel minyak yang digunakan berasal dari salah satu lapangan minyak yang berada di Cekungan Sumatera Selatan. Tabel 1 menunjukkan informasi tentang sampel minyak yang digunakan selama pengujian berlangsung. Tabel 2 dan 3 memberikan informasi tentang komposisi sampel minyak yang digunakan. Gas CO₂ yang digunakan mempunyai tingkat kemurnian sebesar 99,99%. *View cell* yang digunakan mampu menahan tekanan hingga 3.000 psia dan temperatur 300°C. Diameter *cell* adalah 30 cm dan tingginya 60 mm. Panjang jarum yang digunakan adalah 50 mm dan diameternya adalah 0,91 mm. Jarum tersebut ditempatkan di dalam *view cell* untuk mengalirkan minyak hingga di ujung jarum saat pengukuran tegangan antar muka dilakukan. Gambar 1 menunjukkan ilustrasi peralatan yang digunakan selama eksperimen. Eksperimen untuk menentukan TTM dilakukan melalui tiga tahap kegiatan yaitu pra-eksperimen, eksperimen, dan pasca eksperimen.

Kegiatan pra-eksperimen meliputi pembersihan *view cell* dan *tubing line* menggunakan *toluene* dan gas nitrogen. Semua *tubing line* yang digunakan dalam eksperimen ini harus dibersihkan untuk menghindari terjadinya penyumbatan saat minyak dialirkan menuju *view cell*. *View cell* tersebut harus dibersihkan dari sampel minyak yang tersisa atau lengket pada dinding kaca (*window glass*). *View cell* harus dipanaskan sesuai temperatur yang telah ditentukan yaitu 60°C dan 66°C. Sampel minyak dituangkan ke dalam *oil chamber* yang mempunyai kapasitas maksimal 100 ml.

Kegiatan eksperimen dimulai dengan memompakan air menggunakan Isco Pump 160D menuju *oil chamber*. Laju alir pompa yang diberikan sebesar 0,1-0,5 cc/menit. Tekanan pengujian dilakukan mulai dari 700 psia sampai 2.500 psia. Pengukuran tegangan antar muka dilakukan pada setiap tekanan yang diberikan dan temperatur yang konstan. Tekanan yang dihasilkan dari pompa harus lebih besar dari tekanan yang ada di dalam *view cell*. Hal ini dilakukan untuk menjaga agar minyak dapat mengalir hingga ke ujung jarum di dalam *view cell*. Tekanan di dalam *cell* dihasilkan dari gas CO₂ yang diinjeksikan ke dalamnya menggunakan Isco Pump 260D. Sebuah *valve* dan *back pressure* diletakkan di antara *oil chamber* dan *view cell*. *Back pressure* digunakan untuk mengantisipasi tekanan balik dari *view cell* dan *valve* digunakan untuk mengontrol laju alir minyak yang akan dialirkan hingga ke ujung jarum. Pengukuran tegangan antar muka dilakukan secara komputerisasi menggunakan *software DROPimage* yang sudah tersedia dalam paket alat uji dari Ramhart Ltd. Pada saat butiran atau tetesan minyak sudah sampai di ujung jarum dan keadaannya sudah stabil selama beberapa saat (sekitar 30 sampai 60 detik), kemudian dilakukan pengambilan gambar secara otomatis dengan menggunakan kamera yang sudah tersedia pada peralatan tersebut. Program yang ada di dalam komputer akan menghitung nilai tegangan antar muka secara geometris berdasarkan gambar yang diperoleh serta beberapa *input* data lainnya seperti bahan jarum yang digunakan serta densitas minyak yang digunakan. Pengambilan gambar dilakukan sebanyak tiga kali untuk mendapatkan hasil yang optimal.

Kegiatan pasca eksperimen meliputi pembersihan *tubing line* dan *view cell*, serta *oil chamber* menggunakan *toluene* dan gas nitrogen. Semua prosedur ini harus dilakukan untuk menjaga peralatan tetap bersih dan menghindari kerusakan akibat tertinggalnya sisa minyak pada peralatan yang digunakan. Langkah terakhir yang dilakukan setelah kegiatan eksperimen selesai adalah membuat plot tegangan antar muka hasil proses dari program yang ada di dalam komputer terhadap tekanan pada temperatur yang telah ditentukan. Setelah plot tegangan antar muka CO₂-minyak diperoleh, hasil plot tersebut digunakan untuk memperkirakan TTM dengan asumsi TTM sama dengan tekanan pada saat tegangan antar muka sama dengan nol.

III. HASIL EKSPERIMEN

Hasil eksperimen memberikan harga TTM untuk Sampel Minyak A dan B pada temperatur yang ditetapkan sesuai dengan kondisi di lapangan yaitu 60°C dan 66°C. Gambar 2, 3, 4, dan Gambar 5 menunjukkan TTM pada masing-masing temperatur. TTM yang diperoleh untuk Sampel Minyak A dengan API *gravity* 41,38 dan temperatur 60°C dan 66°C adalah masing-masing 1611 dan 1777 psia. Sedangkan untuk Sampel Minyak B dengan API *gravity* 20 TTM yang dihasilkan pada temperatur yang sama adalah 1918 dan 2072 psia.

IV. PEMBAHASAN

Eksperimen yang dilakukan dalam studi ini telah berhasil mengukur tegangan antar muka antara CO₂ dan minyak. Hasil eksperimen tersebut dapat digunakan untuk memperkirakan TTM untuk sistem CO₂-minyak dimaksud. Eksperimen yang dilakukan menggunakan dua jenis sampel minyak yang masing-masing mempunyai API *gravity* berbeda. Sampel Minyak A yang mempunyai API *gravity* 41,38 menghasilkan TTM yang lebih kecil dibandingkan dengan TTM yang diperoleh untuk Sampel Minyak B yang mempunyai API *gravity* 20 pada temperatur yang sama. Gambar 2 dan 4 ataupun Gambar 3 dan 5 memberikan informasi tentang harga TTM yang berbeda untuk sampel minyak dengan API *gravity* yang berbeda. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa API *gravity*

sangat berpengaruh terhadap TTM. Harga API *gravity* yang tinggi pada suatu sampel minyak menggambarkan jumlah komponen ringan yang tinggi yang terkandung di dalam sampel minyak tersebut. Keadaan ini menyebabkan gas CO₂ lebih mudah untuk tercampur dengan sampel minyak. Sebaliknya, harga API *gravity* suatu sampel minyak memberikan informasi jumlah komponen berat yang tinggi yang terkandung di dalam sampel minyak tersebut. Jumlah komponen berat dapat pula dilihat dari berat molekul heptana plus untuk masing-masing sampel minyak. Semakin banyak komponen berat yang terkandung dalam sampel minyak akan menyebabkan semakin tinggi tekanan yang diperlukan agar CO₂ bisa tercampur di dalam sampel minyak tersebut. Argumentasi ini bersesuaian dengan apa yang pernah dikemukakan oleh Mungan (1981). Mungan menyebutkan bahwa berat molekul minyak dapat mempengaruhi besaran TTM hasil pengukuran di laboratorium.

Sesuai dengan keadaan di lapangan, eksperimen dalam studi ini menggunakan dua harga temperatur yaitu 60°C dan 66°C. Temperatur yang tinggi mengakibatkan CO₂ lebih sulit untuk terlarut atau tercampur ke dalam sampel minyak. Agar bisa terlarut atau tercampur maka diperlukan tekanan, yaitu TTM, yang lebih besar. Kenaikan temperatur yang mengakibatkan meningkatnya TTM tersebut dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3 ataupun Gambar 4 dan 5. Untuk Sampel Minyak A, kenaikan temperatur 6°C meningkatkan TTM sebesar 166 psia. Sementara itu untuk Sample Minyak B kenaikan temperatur 6°C meningkatkan TTM sebesar 154 psia. Efek dari kenaikan temperatur terhadap TTM juga telah dilaporkan sebelumnya oleh Yellig dan Metcalfe (1980).

Perkiraan TTM melalui pengukuran tegangan antar muka menggunakan metode *pendant drop* relatif lebih cepat dan sederhana. Seperti terlihat pada Gambar 2, 3, 4, dan Gambar 5, TTM dapat diperkirakan dari plot antara tegangan antar muka antara CO₂ dan minyak terhadap tekanan. Harga TTM dapat ditentukan pada saat IFT sama dengan nol. Penarikan garis ekstrapolasi harus dilakukan pada saat sebelum terjadinya deviasi data (ditunjukkan oleh garis tebal) pada gambar-gambar tersebut. Pada daerah di mana telah terjadi deviasi data (ditunjukkan oleh garis putus-putus) pada gambar-gambar

tersebut tidak dapat digunakan untuk menentukan TTM dari sampel minyak yang digunakan. Plot tegangan antar muka antara CO₂ dan minyak terhadap tekanan yang diperoleh dari eksperimen ini sesuai dengan pola yang pernah dikemukakan oleh Jessen dan Orr Jr (2008). Mereka menyebutkan bahwa jika tekanan meningkat maka pada suatu harga tekanan tertentu plot tegangan antar muka terhadap tekanan akan menyimpang atau mengalami deviasi dari trend data pada harga tekanan yang lebih rendah. Setelah titik data penyimpangan maka penurunan tegangan antar muka selanjutnya menjadi relatif lebih kecil (ditunjukkan oleh perubahan kemiringan kurva menjadi lebih kecil) walaupun tekanan tetap ditingkatkan.

Penurunan tegangan antar muka antara CO₂ dan minyak pada saat awal terjadi secara drastis dan fenomena ini diakibatkan oleh keadaan di mana CO₂ terlarut secara perlahan ke dalam minyak. Ketika tekanan dinaikkan secara kontinyu maka harga densitas gas CO₂ akan mendekati harga densitas minyak. Jika perbedaan densitas antara kedua fluida semakin kecil maka tegangan antar muka kedua fluida tersebut akan semakin kecil pula. Namun demikian, keadaan tercampur (*miscible*) tidak dapat langsung terjadi dalam eksperimen ini. Hal ini disebabkan oleh karena masih ada komponen berat yang tertinggal di dalam minyak. Hal inilah yang menyebabkan nilai tegangan antar muka hasil eksperimen tidak dapat mencapai nol. Agar diperoleh nilai tegangan antar muka sama dengan nol perlu dilakukan teknik ekstrapolasi dari plot yang diperoleh.

V. KESIMPULAN

Kesimpulan dari studi ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Perkiraan TTM melalui pengukuran tegangan antar muka antara CO₂ dan minyak menggunakan metode *pendant drop* telah berhasil dilakukan dalam studi ini.
2. Tegangan antar muka antara CO₂ dan minyak tidak dapat mencapai harga nol atau kondisi tercampur tidak dapat terjadi pada eksperimen dalam studi ini. Namun demikian, perkiraan TTM dapat dilakukan dengan melakukan ekstrapolasi data. Ekstrapolasi tersebut harus dilakukan sebelum terjadi deviasi atau penyimpangan data.

3. Kenaikan tekanan menyebabkan perbedaan densitas antara CO₂ dan minyak menjadi lebih kecil. Oleh karena itu maka nilai tegangan antar muka antara kedua fluida menjadi lebih kecil.
4. Densitas heptana plus dan temperatur sangat berpengaruh terhadap nilai TTM yang diukur pada eksperimen dalam studi ini. Semakin tinggi densitas heptana plus maka semakin tinggi pula nilai TTM yang terukur. Demikian pula, semakin tinggi temperatur maka semakin tinggi pula tekanan yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan tercampur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih dan menyampaikan penghargaan yang tinggi kepada EOR Laboratory, Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University, Korea, atas pemakaian peralatan dan material eksperimen untuk keperluan studi ini.

REFERENSI

- Ahmed, T., 2007. EOS and PVT Analysis. Gulf Publishing Co., Houston, Texas.
- Ayirala, S.C. dan Rao, D.N., 2006. "Comparative evaluation of a new MMP determination technique", Paper SPE-99606-MS presented at the SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, OK, 22-26 April. <http://dx.doi.org/10.2118/99606-MS>.
- Christiansen, R.L. dan Haines, H.K., 1987. "Rapid measurement of minimum miscibility pressure with the rising-bubble apparatus", SPE Reservoir Engineering, Vol. 1, No. 4, pp. 523-527.
- El Sharkawy, A.M., 1996. "Measuring CO₂ MMP: Slim tube or Rising Bubble Method?" Energy and Fuel, 10, 3.
- Farzad, I. dan Amani, M., 2012. "An analysis of reservoir production strategies in miscible and immiscible gas injection projects", Advances in Petroleum Exploration and Development, Vol. 3, No. 1, pp. 18-32.
- Firoozabadi, A. dan Khalid, A., 1986. "Analysis and correlation of nitrogen and lean-gas miscibility pressure", SPE Reservoir Engineering, Vol. 1, No. 6, pp. 575-582.
- Hawthorne, S.B., Miller, D.J., Gorecki, C.D., Sorensen, J.A., Hamling, J., Roen, T.D., Harju, J.A. dan Melzer, L.S., 2014. "A rapid method for determining CO₂/oil MMP and visual observations of CO₂/oil interactions at reservoir conditions", Energy Procedia, Vol. 63, pp. 7724-7731.
- Jarrell, P.M., Fox, C.E., Stein, M.H., dan Webb, S.L., 2002. Practical Aspects of CO₂ Flooding. SPE Monograph Series, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX.
- Jessen, K. dan Orr Jr., F.M., 2008. "On interfacial tension measurements to estimate minimum miscibility pressures", SPE Reservoir Evaluation & Engineering Journal, Vol. 11, No. 5, pp. 933-939.
- Johnson, J.P. dan Pollin, J.S., 1981. "Measurement and Correlation of CO₂ Miscibility Pressures", Paper SPE 9790 presented at the SPE Symposium on EOR, Tulsa, April 5-8.
- Johns, R.T., Sah, P. dan Solano, R., 2000. "Effect of dispersion on local displacement efficiency for multicomponent enriched-gas floods above the MME", Paper SPE-64725-MS presented at the International Oil and Gas Conference and Exhibition, Beijing, China, 7-10 November. <http://dx.doi.org/10.2118/64725-MS>.
- Lee, J.I. dan Reitzel, G.A., 1982. "High pressure, dry gas miscible flood Brazeau River Nisku oil pools", Journal of Petroleum Technology, Vol. 34, No. 11, pp. 2503-2508.
- Metcalf, R.S., 1980. "Effects of Impurities on MMP and MME Levels for CO₂ and Rich Gas Displacements", Paper SPE 9230 presented at the SPE ATCE, Dallas, Sept. 21-24.
- Mungan, N., 1981. "Carbon dioxide flooding fundamental," Journal of Canadian Petroleum Technology, vol. 20, no. 1, pp. 87-92.
- Nobakth, M., Moghadam, S. dan Gu, Y., 2008. "Determination of CO₂ minimum miscibility pressure from measured and predicted equilibrium interfacial tensions," Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 47, No. 22, pp. 8918-8925.
- Rao, D.N., 1997. "A new technique of vanishing interfacial tension for miscibility determination", Fluid Phase Equilibria, Vol. 139, No. 1-2, pp. 311-324.
- Thomas, F.B., Zhou, X.L., Bennion, D.B. dan Bennion, D.W., 1994. "A comparative study of RBA, P-X, multicontact and slim tube results", Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 32, No. 2, pp. 17-26.
- Lake, L.W., 1989. Enhanced Oil Recovery. Prentice Hall, NJ.
- Yellig, W.F. dan Metcalfe, R.S., 1980. "Determination and Prediction of CO₂ Minimum Miscibility Pressure", SPE Journal of Petroleum Technology, 32, 1.

LAMPIRAN

Tabel 1. Sifat fisik sampel minyak dan kondisi reservoir.

Sifat-sifat	Minyak A	Minyak B
API Gravity	41,38	20
Temperatur reservoir (T_r), °C	65	60
Tekanan reservoir (p_r), psia	1134	786
Tekanan gelembung (p_b), psia	1116	740
Viscositas, cp	0,21	4,6

Tabel 2. Komposisi Sampel Minyak A.

Komponen	Simbol	Persen Mol	Persen berat
Hidrogen sulfida	H ₂ S	0	0
Karbon dioksida	CO ₂	0,12	0,05
Nitrogen	N ₂	0,65	0,17
Metana	C ₁	18,5	2,71
Etana	C ₂	1,79	0,59
Propana	C ₃	1,87	0,75
Iso-Butana	i-C ₄	0,84	0,45
n-Butana	n-C ₄	1,37	0,73
Iso-Pentana	i-C ₅	1,64	1,08
n-Pentana	n-C ₅	0,99	0,65
Heksana	C ₆	2,58	2,03
Heptana plus	C ₇₊	69,65	90,89
		100	100

Sifat heptana plus:

Densitas minyak @ 60/60°F

0,8308

Berat molekul

142,73

Tabel 3. Komposisi Sampel Minyak B.

Komponen	Simbol	Persenmol	Persenberat
Hidrogen sulfide	H ₂ S	0	0
Karbon dioksida	CO ₂	0,38	0,10
Nitrogen	N ₂	0,46	0,08
Metana	C ₁	11,28	1,13
Etana	C ₂	0,16	0,03
Propana	C ₃	0,25	0,07
Iso-Butana	i-C ₄	0,18	0,07
n-Butana	n-C ₄	0,44	0,16
Iso-Pentana	i-C ₅	2,30	1,05
n-Pentana	n-C ₅	2,62	1,19
Heksana	C ₆	13,27	7,17
Heptana plus	C ₇₊	68,62	88,94
		100	100

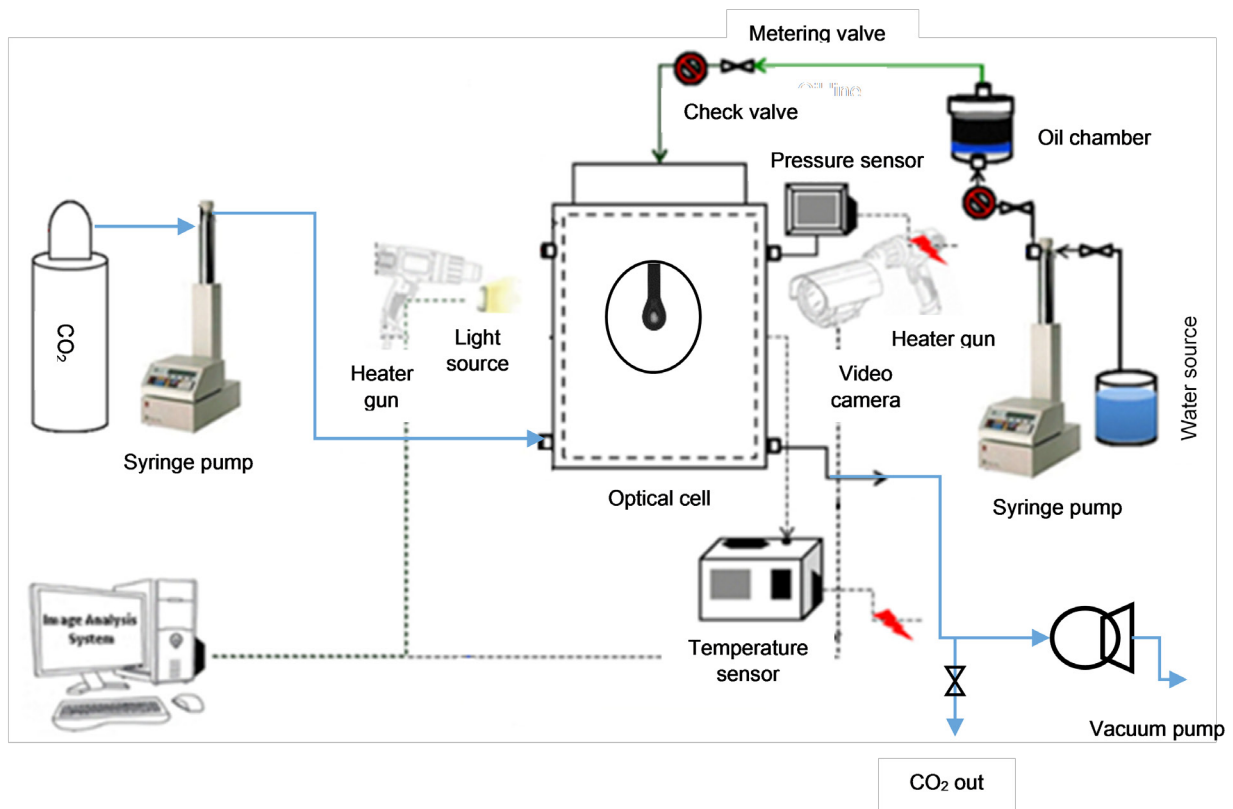
Sifat heptana plus:

Densitas minyak @ 60/60°F

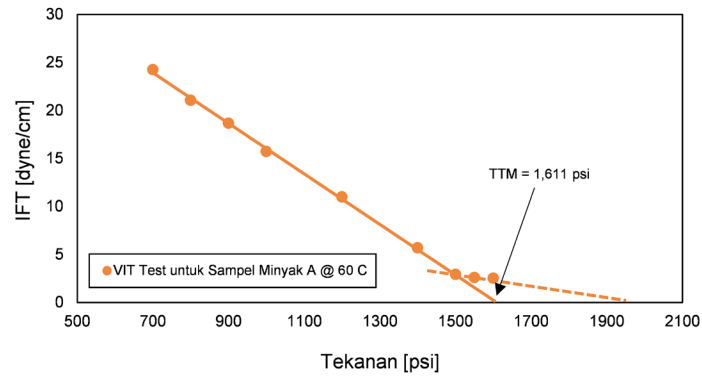
0,9397

Berat molekul

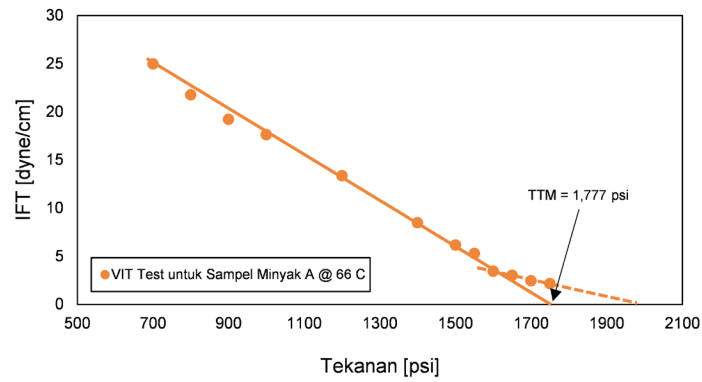
206,66



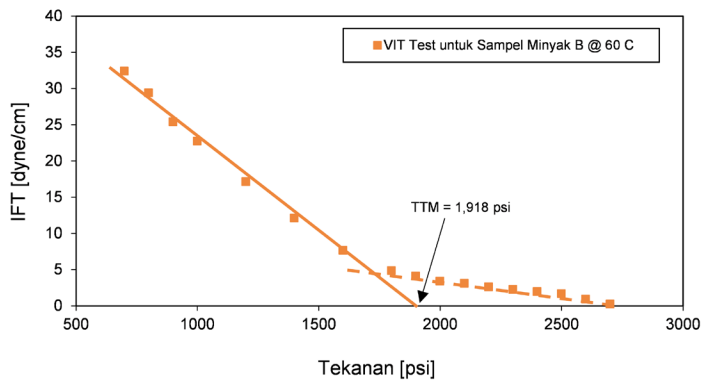
Gambar 1. Peralatan eksperimen untuk penentuan tegangan antar muka CO₂-minyak.



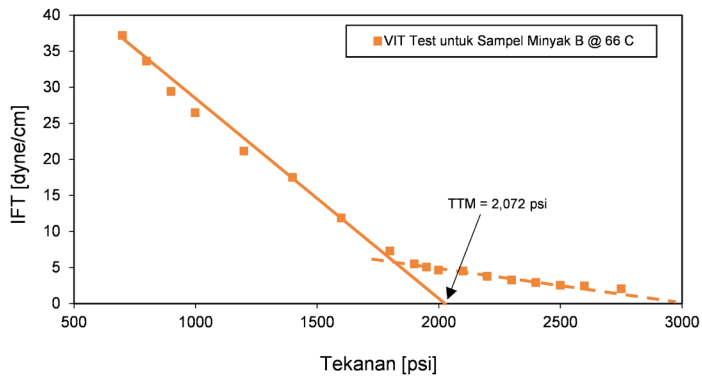
Gambar 2. TTM pada temperatur 60°C untuk Sampel Minyak A.



Gambar 3. TTM pada temperatur 66°C untuk Sampel Minyak A.



Gambar 4. TTM pada temperatur 60°C untuk Sampel Minyak B.



Gambar 5. TTM pada temperatur 66°C untuk Sampel Minyak B.