

INJEKSI POLIMER DENGAN MEDIA MICROMODEL DALAM PEROLEHAN MINYAK TAHAP LANJUT



Lembaga Penelitian dan
Pengabdian kepada Masyarakat
Universitas Pembangunan Nasional
"Veteran" Yogyakarta
2020

Penulis:

Dr. Ir. Dedy Kristanto, MT.

Dr. Boni Swadesi, S.T.,M.T.

Indah Widiyaningsih, S.T., M.T.

Sri Wahyu Murni, S.Si.,M.T.

BUKU REFERENSI

**INJEKSI POLIMER DENGAN MEDIA MICROMODEL
DALAM PEROLEHAN MINYAK TAHAP LANJUT**

INJEKSI POLIMER DENGAN MEDIA MICROMODEL DALAM PEROLEHAN MINYAK TAHAP LANJUT

Tim Penulis :

Dr. Ir. Dedy Kristanto, M.T.

Dr. Boni Swadesi, S.T.,M.T.

Indah Widiyaningsih, S.T., M.T.

Sri Wahyu Murni, S.Si., M.T.

ISBN : 978-623-7840-88-6

Editor :

Roiduz Zumar

Sinosa Husenido

Penyunting :

Dian Indri Astuti

Desain Sampul dan Tata Letak :

Roiduz Zumar

Sinosa Husenido

Penerbit

Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat,

Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan
cara apapun tanpa ijin tertulis dari penerbit.

PRAKATA

Puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat-Nya kepada kami untuk menyelesaikan buku ini. Tak lupa kami sampaikan terima kasih kepada :

1. Dr. M. Irhas Effendi selaku Rektor UPN "Veteran" Yogyakarta.
2. Dr. Hendro Widjanarko selaku ketua LPPM UPN "Veteran" Yogyakarta.
3. Kementrian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi.
4. Para dosen dan mahasiswa yang telah mendukung pembuatan buku ini.

Buku ini merupakan buku referensi yang berjudul **"INJEKSI POLIMER DENGAN MEDIA MICROMODEL DALAM PEROLEHAN MINYAK TAHAP LANJUT"**. Buku ini merupakan hasil penelitian klaster pada tahun 2020 dan didukung oleh LPPM UPN "Veteran" Yogyakarta. Buku ini mencakup informasi mulai dari uji *aqueous stability* dan *rheology* polimer sampai aplikasi injeksi polimer pada micromodel.

Buku ini diharapkan dapat bermanfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan khususnya di bidang riset dan teknologi di industri Migas Indonesia. Akhir kata, kami sampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung penelitian dan pembuatan buku ini yang tidak dapat kami sebutkan satu per satu.

Yogyakarta, 31 Agustus 2020

Tim Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	v
BAB I. PENDAHULUAN	1
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1. Polimer	3
2.2. Kestabilan Polimer.....	5
2.2.1. Degradasi Kimia (<i>Chemical Degradation</i>)	5
2.2.1. Degradasi Mekanis (<i>Mechanical Degradation</i>)	8
2.2.1. Degradasi Biologi (<i>Biological Degradation</i>)	10
2.3. <i>Micromodel</i>	11
2.4. Mekanisme Pendesakan pada Injeksi Polimer	14
2.5. Studi Injeksi Polimer pada <i>Micromodel</i> oleh Para Peneliti	15
BAB III. UJI LABORATORIUM	19
3.1. <i>Rehology</i> Polimer	19
3.2. Uji <i>Aqueous Stability</i> Polimer	25
PENUTUP	30
DAFTAR PUSTAKA	32
BIOGRAFI PENULIS	36

DAFTAR TABEL

Tabel II-1	4
Tabel III-1	21

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.....	6
Gambar 2.2.....	7
Gambar 2.3.....	7
Gambar 2.4.....	9
Gambar 2.5.....	9
Gambar 2.6.....	11
Gambar 2.7.....	13
Gambar 2.8.....	13
Gambar 2.9.....	14
Gambar 2.10.....	14
Gambar 3.1.....	20
Gambar 3.2.....	22
Gambar 3.3.....	22
Gambar 3.4.....	23
Gambar 3.5.....	23
Gambar 3.6.....	24
Gambar 3.7.....	24
Gambar 3.8.....	26
Gambar 3.9.....	26
Gambar 3.10.....	27
Gambar 3.11.....	27
Gambar 3.12.....	28
Gambar 3.13.....	28
Gambar 3.14.....	29
Gambar 3.15.....	29

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

σ	: tegangan permukaan minyak-air
λ	: mobilitas fluida
ρ_o	: densitas minyak
ρ_w	: densitas air
μ_o	: viskositas minyak
μ_w	: viskositas air
Bo	: faktor volume formasi minyak
Bopd	: <i>barrel oil per day</i>
Bw	: faktor volume formasi air
Co	: kompresibilitas minyak
Cw	: kompresibilitas air
Cp	: centipoise (satuan)
Cuft	: cubic ft
EOR	: <i>enchanced oil recovery</i>
g	: gravitasi
h	: kedalaman
K_{ro}	: permeabilitas relatif minyak
K_{rw}	: permeabilitas relatif air
lb	: pound (satuan)
M	: mobilitas rasio
mD	: milidarcy (satuan)
P	: tekanan
P_b	: <i>bubble point</i>
P_c	: tekanan kapiler
Ppm	: <i>part per million</i> (konsentrasi)
PV	: <i>pore volume</i>
r	: jari-jari pipa kapiler

RF : recovery factor
Rs : kelarutan gas dalam minyak
Rsb : kelarutan gas dalam minyak pada kondisi *bubble point*
SCF : *standard cubic feet* (satuan)
Sg : saturasi gas
So : saturasi minyak
STB : *stock tank barrel* (satuan)
Sw : saturasi air
T : Temperatur
A : luas

BAB I

PENDAHULUAN

Naiknya permintaan terhadap produk-produk minyak bumi menyebabkan terjadinya peningkatan dalam metode-metode eksploitasi minyak bumi, termasuk di dalamnya penggunaan bahan kimia untuk meningkatkan perolehan minyak. Salah satu contohnya adalah penggunaan injeksi polimer untuk mengurangi produksi air dan terproduksi minyak lebih banyak karena diperbaikinya viskositas air injeksi sehingga pengurasan yang lebih menyebar.

Studi laboratorium adalah prosedur yang sangat penting dilakukan untuk mengetahui kinerja injeksi polimer. *Coreflooding* adalah metode studi laboratoium yang paling sering dilakukan. *Core* adalah sampel batuan yang dapat merepresentasikan kondisi *reservoir* di bawah permukaan. Namun, kekurangan dari metode *coreflooding* adalah tidak dapat merepresentasikan secara visual mekanisme yang terjadi pada injeksi polimer di dalam batuan *reservoir*. Untuk mengatasi kekurangan tersebut, digunakan *micromodel* sebagai metode baru selain *coreflooding* untuk mengetahui secara visual mekanisme yang terjadi pada injeksi polimer di dalam batuan *reservoir* (Danesh et al. 1987). Karena transparansi, seluruh proses dapat secara langsung diobservasi dan direkam dengan menggunakan *digital image analysis* (DIA). Sehingga beberapa foto yang diambil dapat dianalisa lebih lanjut untuk mekanisme skala pori dan dapat juga digunakan untuk memperkirakan *recovery factor* yang terjadi.

Maksud dari penelitian ini adalah untuk melakukan studi mengenai bagaimana performa polimer yang diamati secara visual menggunakan *micromodel*. Performa polimer dapat diperoleh dari 2 jenis uji laboratorium yaitu uji statik dan uji dinamik. Pada uji statik akan diperoleh hasil berupa *rheology* dan *aqueous stability* dari material polimer. Lalu pada uji dinamik akan diperoleh hasil berupa *injectivity test* dan *micromodel flooding*.

Sedangkan tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisa dari semua parameter tersebut sehingga dapat dinilai performa dari polimer di dalam *micromodel* yang dapat meningkatkan perolehan minyak secara efisien.

Penggunaan *micromodel* dalam mengamati performa injeksi polimer dapat memberikan gambaran visual secara nyata bagaimana mekanisme polimer dalam mendesak minyak di dalam media berpori. Hal ini merupakan suatu terobosan terbaru dalam penelitian di bidang perolehan minyak tahap lanjut atau EOR. Penelitian ini akan menjadi suatu pionir dalam mengembangkan inovasi di bidang EOR karena belum pernah dilakukan di Indonesia.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Polimer

Polimer merupakan molekul berukuran besar (makromolekul) berbentuk seperti rantai atau jaringan yang terbentuk dari unit-unit kecil berulang yang disebut dengan monomer (Allcock et al, 2003). Pada umumnya, terdapat dua jenis polimer yang biasa digunakan pada proses *Enhanced Oil Recovery* (EOR), yaitu polimer sintetik (*synthetic polymers*) seperti *hydrolized polyacrylamide* (HPAM) dan biopolimer (*biopolymers*) seperti *xanthan gum*. Perbedaan karakteristik yang dimiliki dari setiap jenis polimer memberikan kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Sintetik polimer memiliki kelebihan seperti; harga yang terjangkau, viskositas tetap sesuai apabila digunakan pada *freshwater* (air tawar), adsorpsi yang terjadi pada permukaan batuan masih dapat diterima (*low adsorption*). Namun jenis polimer ini sensitif terhadap laju aliran (*flow rate*) dan *shear degradation*, selain itu juga memiliki efisiensi yang rendah pada air dengan salinitas tinggi (*high-salinity water*). Sedangkan untuk jenis biopolimer menunjukkan performa yang bagus terhadap kondisi air dengan salinitas yang tinggi dan *shear degradation*, namun jenis polimer ini sensitif terhadap degradasi yang disebabkan oleh bakteri (*bacterial degradation*) pada temperatur reservoir yang rendah. Biopolimer tidak teradsorpsi pada permukaan batuan (Sheng, 2013; Sheng et al, 2015; Buchgraber, 2008; Barati, 2011).

Ketika fluida pendesak (*brine*) ditambahkan dengan polimer, viskositas dari fluida pendesak tersebut akan bertambah. Maka

dari itu, injeksi polimer dapat merubah fraksi aliran (*fractional flow*), *mobility ratio*, dan *fluid diversion effect*.

Tabel II-1

Struktur Polimer dan Karakteristiknya

Struktur	Karakteristik	Sampel Polimer
-O- pada Rantai Utama (<i>Backbone</i>)	Stabilitas <i>thermal</i> rendah, degradasi panas (<i>thermal degradation</i>) terjadi pada temperatur yang tinggi, cocok pada temperatur <80°C	<i>Polyoxyethylene, sodium alginate, sodium carboxymethyl cellulose, HEC, xanthan gum</i>
Rantai Karbon pada <i>Backbone</i>	Stabilitas <i>thermal</i> baik, <i>thermal degradation</i> tidak terlalu parah pada temperatur <110°C	<i>Polyvinyl, sodium polyacrylate, polyacrylamide, HPAM</i>
-COO- pada Gugus Hidrofilik	<i>Good viscosifier</i> , stabilitas terhadap <i>chemical</i> rendah, adsorpsi pada batuan pasir lebih rendah, akan tetapi terjadi pengendapan dengan Ca ²⁺ dan Mg ²⁺	<i>Sodium alginate, sodium carboxymethyl cellulose, HPAM, xanthan gum</i>
-OH or -CONH ₂ pada Gugus Hidrofilik	Tidak terjadi pengendapan dengan Ca ²⁺ dan Mg ²⁺ , stabilitas terhadap <i>chemical</i> baik, adsorpsi terhadap batuan pasir tinggi karena terbentuknya ikatan hidrogen pada batuan pasir	<i>Polyvinyl, HEC, polyacrylamide, HPAM</i>

(Sumber: Zhao, 1991)

Sebagai hasilnya, polimer dapat mengurangi efek *viscous fingering (breakthrough)* dan meningkatkan profil injeksi air, dimana hal tersebut akan meningkatkan *sweep efficiency* (Buchgraber, 2008; Barati, 2011; Sorbie, 1991; Needham and Doe, 1987; Chang, 1978). Namun, terdapat masalah dalam penggunaan polimer tersebut, yaitu mengenai kestabilannya.

2.2. Kestabilan Polimer

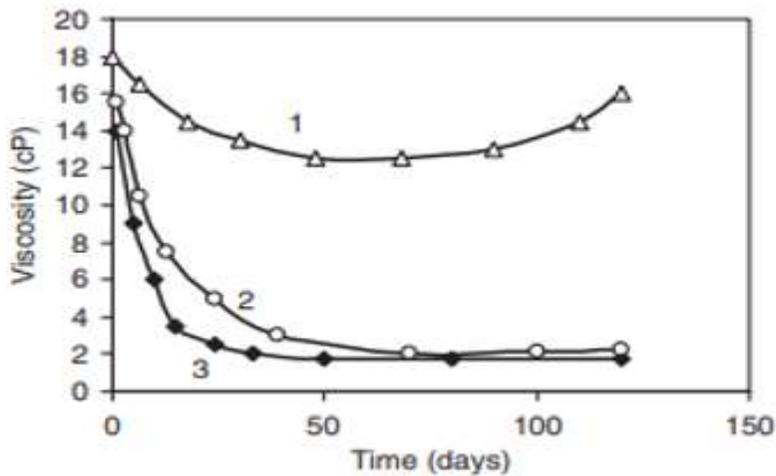
Kestabilan polimer sangat dipengaruhi oleh degradasi polimer. Degradasi polimer merupakan suatu proses rusaknya struktur makromolekul dari polimer. Dalam hal perolehan minyak, proses degradasi polimer yang paling berpengaruh terhadap kestabilan polimer adalah degradasi kimia (*chemical degradation*), degradasi mekanis (*mechanical degradation*), dan degradasi biologi (*biological degradation*).

2.2.1. Degradasi Kimia (*Chemical Degradation*)

Degradasi kimia adalah suatu proses rusaknya molekul polimer yang dapat disebabkan melalui pengaruh jangka pendek oleh kontaminan, seperti oksigen dan besi (*iron*), maupun melalui pengaruh jangka panjang pada rantai utama polimer oleh suatu proses seperti hidrolisis. Ketidakstabilan dari dalam molekul itu sendiri (*intrinsic instability*) juga dapat menjadi penyebab terjadinya degradasi kimia, walaupun tidak ada kontaminasi dari oksigen atau pengaruh dari kontaminan yang lain. Dengan kata lain, kestabilan kimia dari polimer sangat dipengaruhi oleh reaksi oksidasi-reduksi dan hidrolisis.

Keberadaan oksigen sebenarnya akan selalu mengakibatkan terjadinya degradasi molekul polimer *polyacrylamide*. Akan tetapi, pada temperatur yang rendah, pengaruh dari oksigen yang terlarut pada HPAM (*hydrolized polyacrylamide*) terhadap viskositas larutan polimer tidak terlalu signifikan, dan larutan polimer dapat lebih stabil dengan jangka waktu yang lama. Dengan bertambahnya temperatur, bahkan hanya dengan kadar oksigen yang sedikit, viskositas larutan HPAM akan berkurang dengan cepat seiring bertambahnya waktu. Sebagai contohnya, polimer pada temperatur 50°C, 70°C, dan 90°C akan tetap stabil dengan jangka waktu 117 jam, 20 jam, dan 2.6 jam secara berurutan. Seiring meningkatnya konsentrasi oksigen, viskositas larutan polimer akan berkurang lebih cepat (Luo et al, 2006).

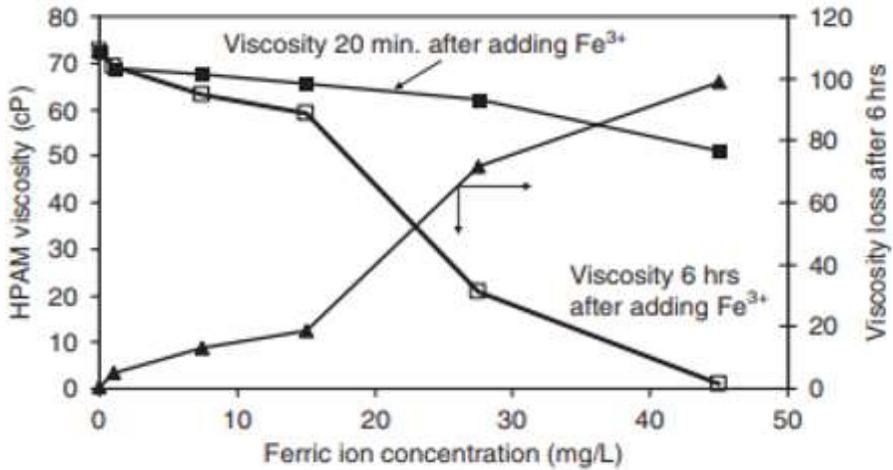
Yang dan Treiber (1985) mempelajari kestabilan kimia (*chemical stability*) dari larutan *polyacrylamide* pada kondisi simulasi lapangan. Mereka melakukan identifikasi terhadap factor-faktor utama yang dapat mempengaruhi larutan polimer di lapangan seperti oksigen, temperatur, *oxygen scavengers*, *metal/metal ions*, hidrogen sulfida (H₂S), pH, salinitas, *chemical additives*, dan *biocide*. Berdasarkan penelitian tersebut, didapatkan hasil bahwa laju dan tingkat degradasi yang terjadi pada polimer sangat tergantung oleh kandungan oksigen pada larutan polimer dan temperatur.



Gambar 2.1

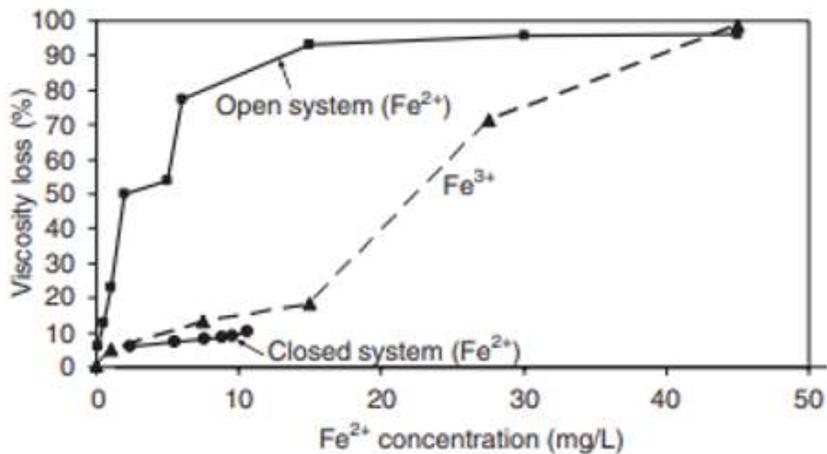
Pengaruh Oksigen terhadap Kestabilan HPAM pada 90°C (1: oksigen dengan level yang rendah, 2: udara, 3: oksigen dengan level yang tinggi)
(Sumber: Luo et al, 2006)

Gambar 2.1 menunjukkan bahwa degradasi polimer terjadi sangat parah ketika terdapat oksigen atau udara pada larutan polimer. Maka dari itu, kadar oksigen pada larutan polimer harus diminimalkan dengan menggunakan *oxygen scavengers*, bersama dengan sejumlah *methanol* atau *thiourea* dapat menjaga polimer dari masuknya oksigen ke dalam larutan (Yang dan Treiber, 1985). Luo et al. (2006) melaporkan hasil penelitiannya bahwa kombinasi dari *thiourea* dan *cobalt salt* dapat menjaga reaksi oksidasi-reduksi dengan efektif. Menggunakan kombinasi tersebut dapat mempertahankan viskositas polimer sebesar 69% setelah 360 jam, sebanyak 20% apabila hanya menggunakan *thiourea* saja, dan 27% apabila hanya menggunakan *cobalt salt*.



Gambar 2.2
 Pengaruh Konsentrasi Fe^{3+} terhadap Viskositas HPAM
 (Sumber: Luo et al, 2006)

Gambar 2.2 menunjukkan pengaruh Fe^{3+} terhadap viskositas HPAM pada temperatur ruang. Viskositas awal adalah 72.9 mPa·s. Berdasarkan **Gambar 2.2** dapat dilihat bahwa ketika konsentrasi Fe^{3+} rendah, penurunan viskositas yang terjadi tidak signifikan pada jangka waktu yang pendek. Dimana pada kasus tersebut kehilangan viskositas disebabkan oleh pengaruh salinitas. Ketika konsentrasi Fe^{3+} cukup tinggi, Fe^{3+} akan berikatan dengan HPAM untuk membentuk gel yang tidak larut, yang akan menyebabkan viskositas HPAM turun secara drastis.



Gambar 2.3

Pengaruh Konsentrasi Fe²⁺ terhadap Viskositas HPAM
(Sumber: Luo et al, 2006)

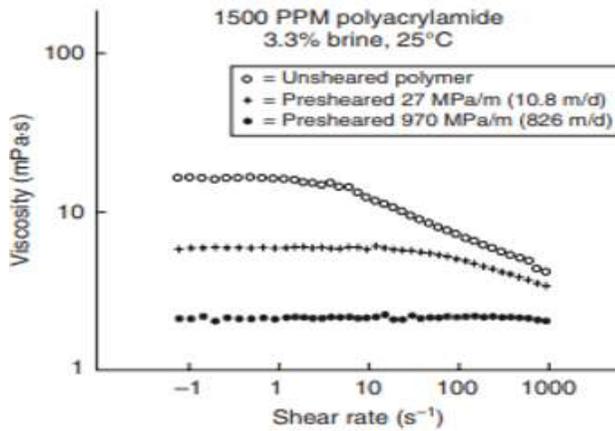
Gambar 2.3. menunjukkan viskositas HPAM dengan konsentrasi 1000 mg/L dalam sistem tertutup tanpa oksigen pada kondisi 30°C dan setelah penambahan Fe³⁺ selama 3 jam. Ketika konsentrasi Fe³⁺ lebih rendah dari 10 mg/L, kehilangan viskositas yang terjadi kurang dari 10% karena efek salinitas. Namun, ketika larutan HPAM ditaruh pada system terbuka, viskositas larutan akan turun secara signifikan seperti yang ditunjukkan oleh **Gambar 2.3**. Pada sistem terbuka, Fe²⁺ akan teroksidasi menjadi Fe³⁺. Untuk perbandingan, penurunan viskositas setelah ditambahkan Fe³⁺ selama 6 jam pada **Gambar 2.2** juga ditunjukkan pada **Gambar 2.3**. Dapat dilihat bahwa penurunan viskositas yang disebabkan oleh Fe³⁺ yang teroksidasi (setelah 3 jam ditambahkan Fe²⁺) jauh lebih tinggi dibandingkan dengan penurunan viskositas yang disebabkan oleh Fe³⁺ saja.

Alasannya adalah ketika Fe^{2+} teroksidasi menjadi Fe^{3+} , dihasilkannya radikal bebas O_2^- . O_2^- akan bereaksi dengan HPAM yang akan menghasilkan peroksida dan menghancurkan rantai utama dari HPAM. Radikal bebas yang dihasilkan dari tersebut lalu akan bereaksi dengan Fe^{3+} yang menghasilkan Fe^{2+} , dimana lebih lanjutnya teroksidasi sehingga menghasilkan Fe^{3+} dan O_2^- lagi. Terjadilah reaksi O_2^- dengan rantai utama HPAM Kembali, dan viskositas polimer akan berkurang dengan signifikan. Pada reaksi ini, Fe^{2+} sebenarnya berperan sebagai katalis. Fe^{2+} merupakan satu-satunya unsur yang ditemukan sejauh ini yang mana dapat menurunkan viskositas polimer sampai hampir sama dengan viskositas air hanya dengan hitungan detik saja. Maka dari itu, konsentrasi Fe^{2+} harus dikontrol dibawah 0.5 mg/L (Luo et al, 2006). Levitt et al. (2010) melaporkan hasil penelitiannya bahwa sodium karbonat dan bikarbonat memiliki peran penting sebagai *iron stabilizer* untuk menstabilkan polimer dari degradasi.

2.2.2. Degradasi Mekanis (*Mechanical Degradation*)

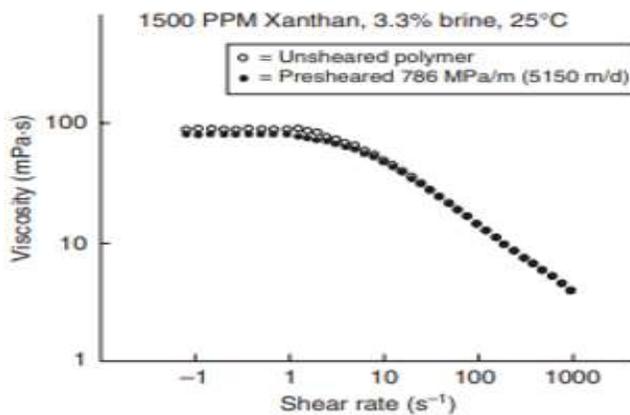
Degradasi mekanis merupakan suatu proses rusaknya molekul polimer yang sering terjadi pada daerah yang memiliki laju alir tinggi sebagai hasil dari tekanan mekanis yang tinggi (*high mechanical stresses*) pada makromolekul.

Pengaruh jangka pendek dari degradasi ini hanya berdampak pada daerah reservoir yang dekat dengan lubang sumur saja (dan juga pada *polymer handling equipment, choke*, dan lain-lain).



Gambar 2.4

Pengaruh *Shear Rate* terhadap Viskositas Larutan HPAM
(Sumber: Seright et al, 1983)



Gambar 2.5

Pengaruh *Shear Rate* terhadap Viskositas Larutan Xanthan
(Sumber: Seright et al, 1983)

Gambar 2.4 membandingkan kurva viskositas HPAM vs *shear rate* pada *core* ketika HPAM pada kondisi *un-sheared* dan *pre-sheared* sebelum dilakukan *core flood*.

Gambar 2.5 menunjukkan viskositas dari larutan *xanthan*. Larutan *pre-sheared* digunakan untuk mengetahui terjadinya degradasi mekanis.

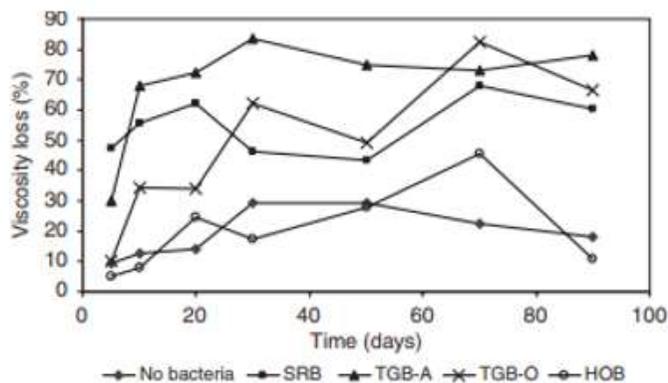
Ketika pengaruh *shearing* terhadap dua polimer yang berbeda dibandingkan, terdapat perbedaan yang kelihatan sekali dimana larutan *xanthan* jauh lebih stabil dibandingkan dengan *polyacrylamide*, hal ini dikarenakan *polyacrylamide* memiliki *coil molecules* yang fleksibel (*not rigid*) sehingga sangat sensitif terhadap *shearing effect*. **Gambar 2.4** menunjukkan kurva viskositas vs *shear rate* dari larutan *polyacrylamide* sebelum dan setelah mengalami *shearing effect* pada tingkatan yang berbeda dalam sampel batu pasir yang kompak (*consolidated*). Pada *shearing level* yang rendah untuk larutan *polyacrylamide* (10.8 m/d), viskositas larutan *polyacrylamide* menurun drastis dan bahkan pada *shearing level* yang ekstrim yaitu pada laju alir yang tinggi, viskositas larutan *polyacrylamide* hampir sama dengan viskositas *brine*. Hasil percobaan dengan menggunakan larutan 1500 ppm *xanthan* pada *brine* yang sama ditunjukkan pada **Gambar 2.5**. Berdasarkan percobaan yang dilakukan, dapat diketahui bahwa larutan *xanthan* jauh lebih stabil terhadap degradasi mekanis dibandingkan dengan larutan *polyacrylamide*, bahkan pada laju alir yang tinggi sekalipun larutan *xanthan* masih lebih stabil.

2.2.3. Degradasi Biologi (*Biological Degradation*)

Degradasi biologi merupakan suatu proses penguraian atau rusaknya makromolekul polimer yang disebabkan oleh bakteri selama di *reservoir* atau di penyimpanan (*storage*).

Meskipun pada umumnya degradasi biologi terjadi pada biopolimer, degradasi biologi juga bisa terjadi pada polimer sintetik. Telah diketahui bahwa HPAM dapat menyediakan nutrisi untuk *sulfate decrease bacteria* (SRB). Seiring bertambahnya SRB, maka viskositas HPAM akan berkurang. Sebagai contoh, ketika harga SRB mencapai 36000/mL, kehilangan viskositas dari 1000 mg/L larutan HPAM adalah sebesar 19.6% (Luo et al, 2006).

Terdapat empat bakteri di dalam *reservoir* dengan urutan konsentrasi sebagai berikut, TGB-O > TGB-A > HOB > SRB. Pengaruh keempat bakteri tersebut terhadap polimer ditunjukkan pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6

Pengaruh Bakteri terhadap Viskositas Larutan Polimer
(Sumber: Niu et al, 2006)

2.3. Micromodel

Studi laboratorium merupakan tahap yang sangat penting dalam melakukan investigasi terhadap injeksi polimer secara *detail*, karena dalam suatu perencanaan injeksi polimer harus dilakukan studi laboratorium terlebih dahulu untuk menguji performa injeksi polimer tersebut dalam skala laboratorium, sehingga didapatkan polimer yang optimum dengan parameter-parameter tertentu yang mana akan dilanjutkan ke tahap *pilot test* lalu apabila dirasa ekonomis, maka akan diimplementasikan pada skala lapangan. *Core flooding* merupakan metode yang sering digunakan dalam studi laboratorium, dimana *core* dapat merepresentasikan keadaan asli dari reservoir, akan tetapi untuk mendapatkan *core* tersebut tidak mudah dan membutuhkan biaya yang mahal. Selain itu, *core flooding* tidak dapat merepresentasikan secara visual *flow behavior* dari polimer yang diinjeksikan untuk mengetahui mekanisme pendesakannya, sedangkan pada studi laboratorium injeksi polimer ini membutuhkan visualisasi yang jelas dan detail terhadap performa injeksi polimer pada media berpori, sehingga dibutuhkan media yang transparan agar mempermudah dalam melakukan pengamatan.

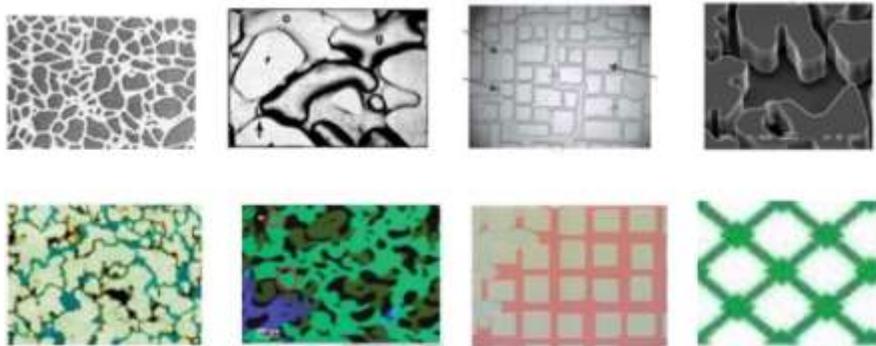
Karena transparansi yang dimiliki oleh *micromodel*, seluruh proses mekanisme pendesakan dapat secara langsung diobservasi dan direkam dengan menggunakan *digital image analysis* (DIA). Sehingga dapat dianalisa lebih lanjut untuk mekanisme injeksi polimer pada skala pori dan dapat juga digunakan untuk memperkirakan perolehan minyak yang didapatkan.

Oleh karena itu, untuk mengatasi masalah tersebut dapat digunakan *micromodel* sebagai media yang dapat merepresentasikan kondisi asli dari reservoir, walaupun memang tidak mudah dalam membuat dan *set up micromodel* yang dapat merepresentasikan reservoir aslinya (Danesh et al, 1987). Biasanya, terdapat dua jenis *micromodel* yang digunakan dalam studi laboratorium yaitu *homogeneous micromodel* dan *heterogeneous micromodel*.

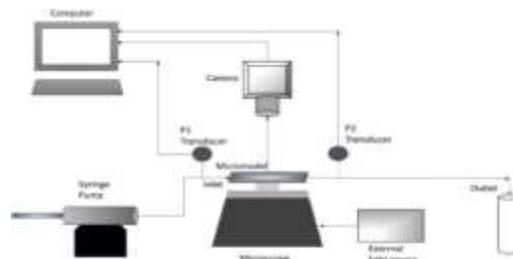
Micromodel merupakan suatu alat buatan yang digunakan untuk memvisualisasikan mekanisme pendorongan minyak oleh suatu fluida yang diinjeksikan pada skala pori. *Micromodel* memberikan visualisasi *flow behavior* dari suatu fluida yang diinjeksikan dengan tujuan untuk mempelajari dan menganalisa profil injeksi fluida tersebut, dimana hal tersebut tidak dapat dilakukan pada metode *core flooding* (Bou-Mikael, 2012). Dalam hal ini fluida yang diinjeksikan adalah polimer. *Micromodel* yang sering digunakan untuk penelitian injeksi polimer adalah *micromodel* dengan desain dua dimensi (*2D Micromodel*) dengan karakteristik homogen (*homogenous micromodel*) dan heterogen (*heterogenous micromodel*).

Para peneliti terdahulu telah membuat *micromodel* dengan menggunakan bahan dan teknik yang berbeda-beda. *Micromodel* yang sering digunakan belakangan ini dibuat dengan teknik *photo-etching* pada material yang berbahan dasar kaca, *silicon*, atau polimer. Pemilihan material yang digunakan untuk membuat *micromodel* tergantung pada tujuan dari penelitian, dimana pada setiap bahan yang digunakan memiliki keuntungan dan kekurangannya masing-masing (Javadpour & Fischer, 2008).

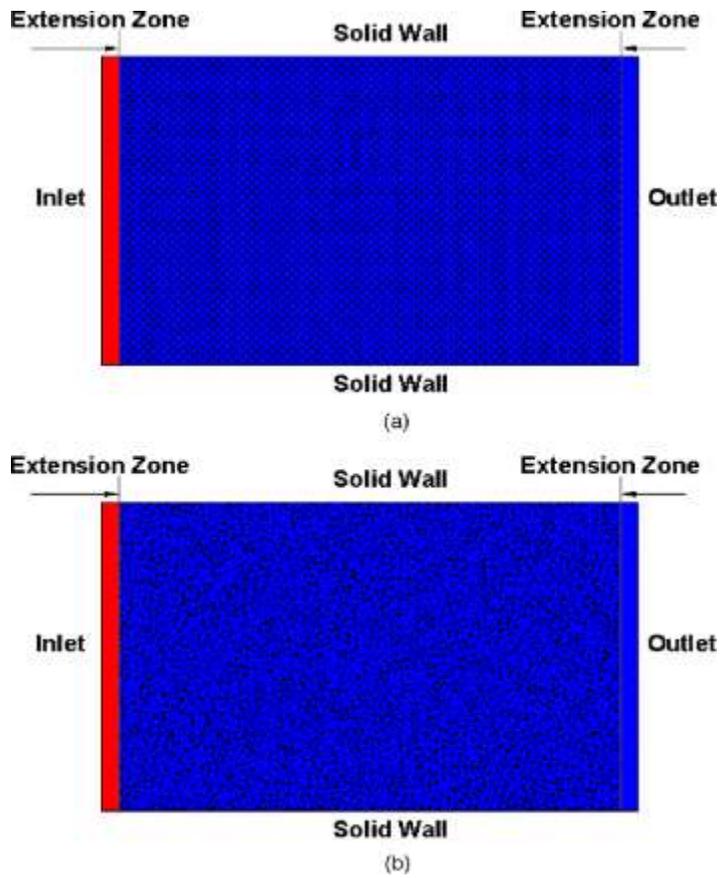
Kesulitan dalam penggunaan *micromodel* terletak pada proses pembuatannya, dimana tidak mudah membuat *micromodel* dengan karakteristik yang dapat merepresentasikan kondisi reservoir aslinya. Sudah banyak *micromodel* yang dibuat dengan pola (*pore pattern*) yang berbeda-beda yang mana setiap *micromodel* yang dibuat akan memiliki keuntungan dan kekurangannya masing-masing. **Gambar 2.7** menunjukkan beberapa tipe *micromodel* yang telah dibuat oleh para peneliti (Danesh et al, 1987; Romero-Zeron dan Kantzas, 2007; Buchgraber et al, 2011; Farzaneh et al, 2012; Hamedi Shokrlu dan Babadagli, 2015; Howe et al, 2015; Bahari Moghaddam dan Rasaei, 2015; Manlowe dan Radke 1990).



Gambar 2.7
Micromodel Pore Pattern
 (Sumber: Hosseini et al, 2019)

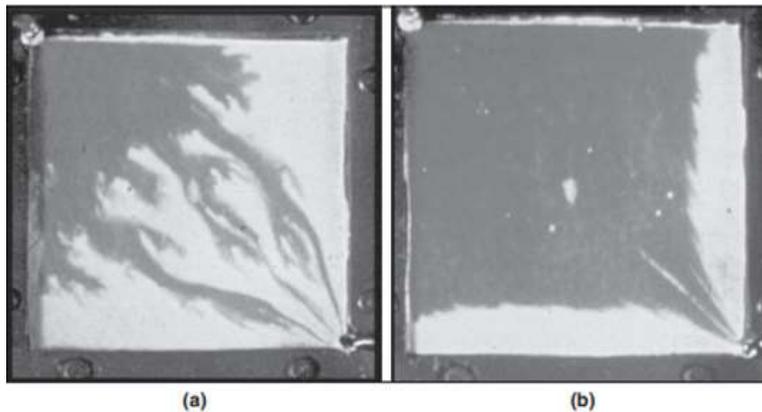


Gambar 2.8
 Skema Umum *Micromodel Set up*
 (Sumber: Gogoi Sekhar et al, 2019)



Gambar 2.9
Skema (a) *Homogenous* dan (b) *Heterogenous*
Micromodel
(Sumber: Liu et al, 2015)

2.4. Mekanisme Pendesakan pada Injeksi Polimer



Gambar 2.10

Skema Peningkatan Efisiensi Pendesakan Makroskopik dengan Injeksi Polimer (b) terhadap Injeksi Air (a)

(Sumber: Sheng, James J, 2011)

Gambar 2.10 menunjukkan perbedaan profil injeksi antara *waterflooding* dengan *polymer flooding* dimana pada proses injeksi air terjadi *viscous fingering* yang sangat parah, lain halnya dengan injeksi polimer dimana pada proses pendesakan minyak yang terjadi lebih merata dan efisiensi pendesakan pada injeksi polimer lebih baik apabila dibandingkan dengan injeksi air. Hal ini dapat terjadi karena mobilitas larutan polimer lebih rendah dibandingkan dengan mobilitas minyak yang didesak sehingga dapat mengurangi efek *viscous fingering*. Ketika efek *viscous fingering* dapat diminimalisir, efisiensi penyapuan (*sweep efficiency*) akan meningkat karena *flood front* yang lebih stabil (*front stability*). Ketika polimer diinjeksikan ke dalam lapisan vertikal yang heterogen, terjadinya *crossflow* antar lapisan akan mengakibatkan aliran polimer secara vertikal lebih merata dan alokasi atau distribusi polimer secara vertikal meningkat sehingga efisiensi penyapuan vertikal menjadi lebih baik.

2.5. Studi Injeksi Polimer pada *Micromodel* oleh Para Peneliti

Sudah banyak peneliti yang melakukan eksperimen menggunakan *micromodel* dengan tujuan untuk mempelajari dan menganalisa performa atau *flow behavior* injeksi polimer pada skala pori.

- **Hosseini et al. (2018)**

Hosseini et al. (2018) melakukan studi laboratorium injeksi polimer pada media berpori yang homogen dan heterogen dengan menggunakan *glass-type micromodel*. Eksperimen yang dilakukan menggunakan *micromodel* dengan posisi horizontal yang tersaturasi oleh minyak berat yaitu *Iranian crude oil*. Perolehan minyak yang dihasilkan oleh injeksi polimer akan dibandingkan dengan perolehan minyak dari injeksi air dengan kondisi awal yang sama, dimana pada percobaan ini digunakan tiga tipe polimer yang berbeda dan dilakukan sensitivitas terhadap konsentrasi larutan polimer dan laju injeksinya untuk mengetahui pengaruh parameter tersebut terhadap perolehan minyak. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa polimer tipe 2 dengan konsentrasi 1500 pm, viskositas 7.14 cp, dan densitas 1.01 gram/ml memberikan performa yang lebih baik dibandingkan dengan kedua tipe polimer yang lainnya. Berdasarkan hasil percobaan juga menunjukkan bahwa pada konsentrasi yang lebih tinggi dan laju injeksi yang lebih rendah, polimer dapat memberikan efisiensi penyapuan yang lebih baik. Visualisasi dari injeksi polimer pada *micromodel* menunjukkan *flood front* yang lebih merata dan stabil dibandingkan dengan hanya menginjeksikan air saja (*water flooding*). Heterogenitas, sebagai parameter lain yang dipelajari pada penelitian ini juga memiliki pengaruh terhadap perolehan minyak.

Micromodel dengan karakteristik yang heterogen juga digunakan pada penelitian ini untuk mensimulasikan kondisi asli reservoir yang heterogen. Hasil dari percobaan tersebut menunjukkan bahwa area penyapuan (*swept area*) sangat dipengaruhi oleh heterogenitas micromodel selama karakteristik tersebut mempengaruhi pergerakan *flood front*. Maka dari itu, *macroscopic heterogeneities* seperti reservoir yang berlapis atau terdapat patahan dan perbedaan permeabilitas (*high- or low-permeable zones*) harus diperhatikan dan menjadi pertimbangan sebelum melakukan proyek injeksi polimer guna untuk didapatkannya performa yang paling optimal (Hosseini et al, 2018).

- **Wonjin Yun (2014)**

Wonjin Yun (2014) menggunakan *micromodel* dua dimensi untuk mempelajari *polymer retention* secara visual dan pengujian secara kuantitatif. Pada penelitian ini dilakukan beberapa skenario yaitu skenario 1 (*base case*), skenario 2 (*high salinity*), skenario 3 (*mechanical degradation with 7 μm filter and 3 μm filter*), skenario 4 (*wettability-crude oil*), dan skenario 5 (*wettability-cetyl trimethylammonium bromide, CTAB*). Setelah dilakukan beberapa skenario tersebut, didapatkan hasil bahwa skenario 2, *high salinity* (5% NaCl) memberikan hasil *polymer retention* yang lebih rendah (6.34%) dibandingkan dengan skenario 1 (*base case*) tanpa NaCl dan filtrasi (7.47%). Wettabilitas dari permukaan *micromodel* diubah dengan cara disaturasi oleh Haradh Saudi Arabia *crude oil* (skenario 4) dan CTAB (skenario 5). Skenario 4 memberikan hasil *polymer retention* 15.04% dan skenario 5 memberikan hasil *polymer retention* 5.04%.

Terakhir, pada skenario 3, untuk 3 μm *filter* memberikan hasil *polymer retention* 7.75% dan untuk 7 μm *filter* memberikan hasil *polymer retention* sebesar 4.26%. Berdasarkan dari hasil percobaan tersebut, dapat ditarik kesimpulan bahwa *mechanical degradation* oleh 7 μm *filter* memberikan pengaruh yang paling signifikan terhadap penurunan *polymer retention* yaitu 4.26% dan *micromodel* yang tersaturasi oleh minyak, *mixed wettability*, memberikan hasil *polymer retention* yang paling tinggi yaitu 15.04% (Wonjin Yun, 2014).

- **Sedaghat et al. (2015)**

Sedaghat et al. (2015) meneliti performa injeksi alkaline-surfactant-polymer (ASP) terhadap perolehan minyak berat (*heavy oil recovery*) menggunakan *fractured five-spot micromodels*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *hydrolyzed polyacrylamide* (HPAM) memberikan performa yang lebih baik jika dibandingkan dengan jenis polimer yang lainnya (Sedaghat et al, 2015).

- **Emami et al. (2008)**

Emami et al. (2008) menggunakan micromodel dengan pola injeksi *five-spot* untuk menguji pengaruh dari *local heterogeneity* dan *global heterogeneity* terhadap perolehan minyak. Hasil dari percobaan tersebut menunjukkan bahwa perolehan minyak akan didapatkan secara maksimal ketika sudut lapisan tegak lurus dengan arah aliran dan kemiringan dari *micromodel* juga sangat mempengaruhi efisiensi dari proses injeksi polimer (Emami et al, 2008).

- **Hematpour et al. (2011)**

Hematpour et al. (2011) mempelajari pengaruh injeksi polimer terhadap minyak dengan viskositas yang rendah (*low-viscosity oil*) dengan menggunakan *micromodel*. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan *hydrolyzed polyacrylamide* (HPAM) memberikan performa yang paling baik pada kondisi uji (Hematpour et al. 2011).

- **Al-Dousary S (2012)**

Al-Dousary S (2012) melakukan penelitian mengenai mekanisme injeksi *alkaline-surfactant-polymer* (ASP) pada skala pori dengan menggunakan *micromodel*. Berdasarkan eksperimen 5 yang telah dilakukan, menunjukkan hasil bahwa polimer memiliki peran yang sangat penting dalam keberhasilan dari proses *Enhance Oil Recovery* (EOR), karena polimer dapat membuat *front displacement* lebih stabil sehingga perolehan minyak meningkat (Al-Dousary S, 2012).

BAB III

UJI LABORATORIUM

3.1. Uji Rheology Polimer

Salah satu data yang dibutuhkan dalam penelitian berupa uji statik yaitu pengujian reologi polimer. Dari data reologi polimer dapat diketahui *properties* dari produk polimer yang akan diuji untuk injeksi *flooding* ke dalam *Micromodel*. Jenis polimer yang digunakan pada penelitian ini adalah FP3630S yang merupakan tipe polimer HPAM (*Partially Hidrolyzed Polyacrilamide*) dan merupakan produk dari SNF. Adapun jenis polimer ini digunakan karena memiliki efektivitas yang baik, dimana parameter tersebut diantaranya tidak memiliki endapan, serta memiliki kestabilan terhadap panas yang baik.

Polimer merupakan fluida Non-Newtonian, artinya bahwa viskositas dari polimer tidak konstan terhadap perubahan *shear stress* dan *shear rate*. Viskositas merupakan parameter yang sangat penting dalam mendesain *mobility ratio*. Sebelum pengujian adsorpsi, dilakukan pengujian reologi polimer menggunakan *Brookfield Viscometer LVDV3T* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.1**. Alat tersebut bekerja dengan memutar sampel polimer menggunakan *spindle* pada laju tertentu, sehingga torsi yang dihasilkan dari pembacaan alat tersebut dapat dikonversi kedalam viskositas. Pengukuran viskositas larutan polimer dilakukan pada berbagai konsentrasi untuk melihat kenaikan viskositas untuk setiap penambahan konsentrasi larutan polimer.



Gambar 3.1
Brookfield Viscometer LVD3T

Adapun alat dan bahan yang digunakan untuk uji statik reologi polimer sebagai berikut:

- a. Polimer FP3630S produk dari SNF
- b. *Brine* sintetik 10.000 ppm
- c. *Brookfield Viscometer LVD3T*
- d. Aqua DM
- e. Pipet berskala
- f. Timbangan digital
- g. Tabung reaksi
- h. *Magnetic Stirrer* (Pengaduk magnet)

Setelah alat dan bahan tersebut dipersiapkan, pengukuran reologi polimer dapat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menghitung terlebih dahulu berat serbuk polimer yang dibutuhkan untuk membuat larutan dengan konsentrasi yang akan digunakan dalam pengujian.

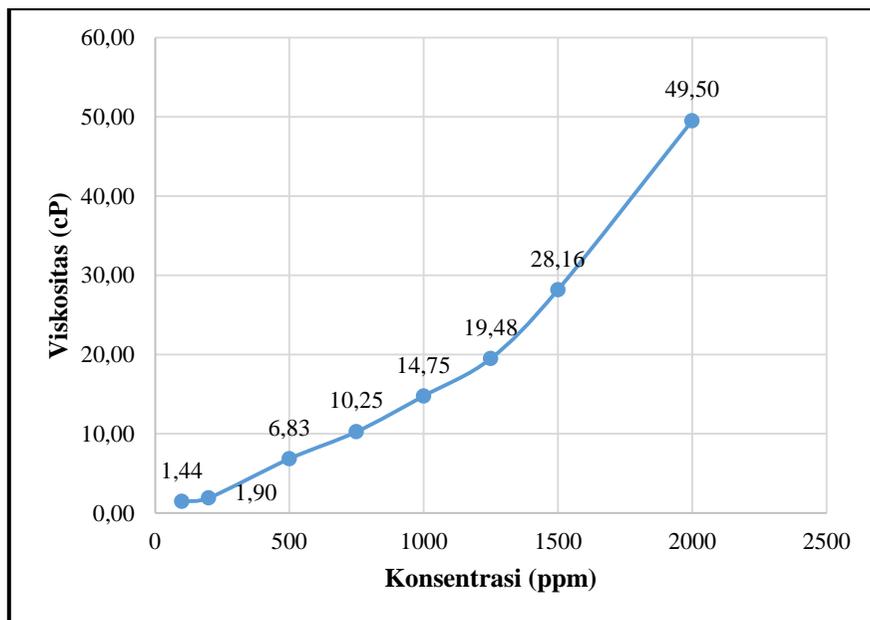
Pada pengujian ini akan digunakan konsentrasi polimer sebesar 2000 ppm, 1500 ppm, 1250 ppm, 1000 ppm, 750 ppm, 500 ppm, 200 ppm dan 100 ppm. Sehingga diperoleh berat dari serbuk polimer FP3630S untuk setiap konsentrasi pada **Tabel III-1**.

2. Menimbang terlebih dahulu serbuk polimer FP3630S dengan menggunakan timbangan digital sesuai dengan berat yang dibutuhkan dari tiap konsentrasi.
3. Membuat larutan polimer dengan mencampurkan serbuk polimer (sesuai berat) dan 100 mL *brine* sintetik dengan menggunakan *magnetic stirrer*.
4. Setelah larutan sudah dibuat, diambil sampel larutan polimer FP3630S sebanyak 0,5 mL untuk dimasukkan ke dalam alat *Brookfield Viscometer LVD3T*.
5. Melakukan *running* pengujian reologi polimer dari sampel yang sudah dimasukkan ke dalam *Brookfield Viscometer LVD3T*.
6. Diperoleh reologi polimer untuk tiap konsentrasi.

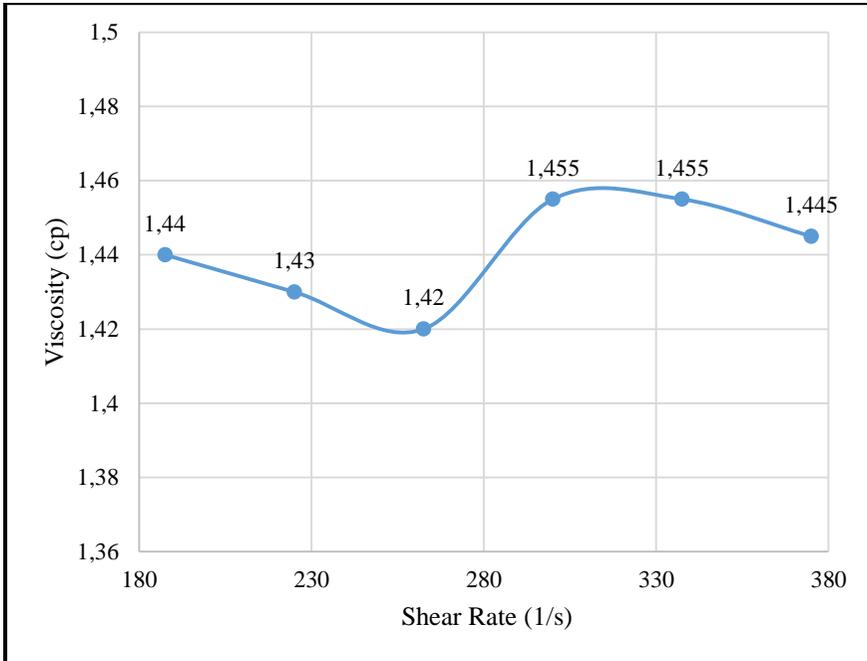
Tabel III-1
Berat Polimer Untuk Setiap Konsentrasi

No	Konsentrasi (ppm)	Volume Larutan (mL)	Berat Polimer (gram)
1	2.000	100	0.2
2	1.500	100	0.15
3	1.250	100	0.125
4	1.000	100	0.1
5	750	100	0.075
6	500	100	0.05
7	200	100	0.02
8	100	100	0.01

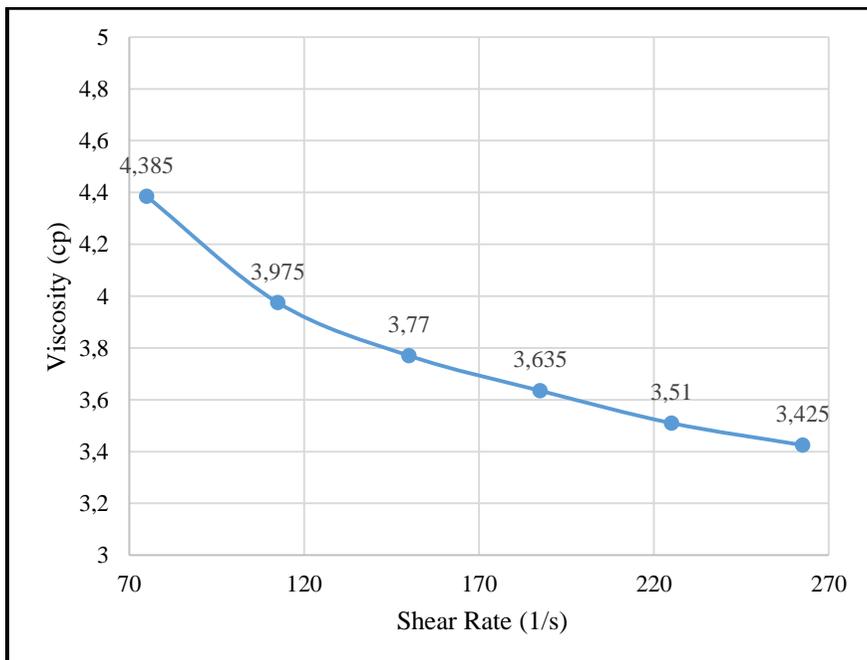
Data yang diperoleh dari pengujian ini berupa reologi untuk setiap konsentrasi larutan polimer. Hasil pengukuran viskositas polimer vs konsentrasi dapat dilihat pada **Gambar 3.2**. Grafik pada **Gambar 3.7** menunjukkan kenaikan viskositas yang tidak linear terhadap konsentrasi polimer. Selanjutnya pengukuran reologi polimer dengan memvariasikan viskositas vs *shear rate* untuk konsentrasi polimer terkecil 100 ppm dan terbesar 2.000 ppm masing-masing ditunjukkan pada **Gambar 3.3** dan **Gambar 3.7**. Detail tabulasi data reologi polimer terdapat pada **Lampiran 5**. Berdasarkan grafik tersebut dapat dibuktikan bahwa polimer merupakan fluida Non-Newtonian yang diperlihatkan dari kelakuan viskositasnya tidak konstan terhadap perubahan *shear rate*.



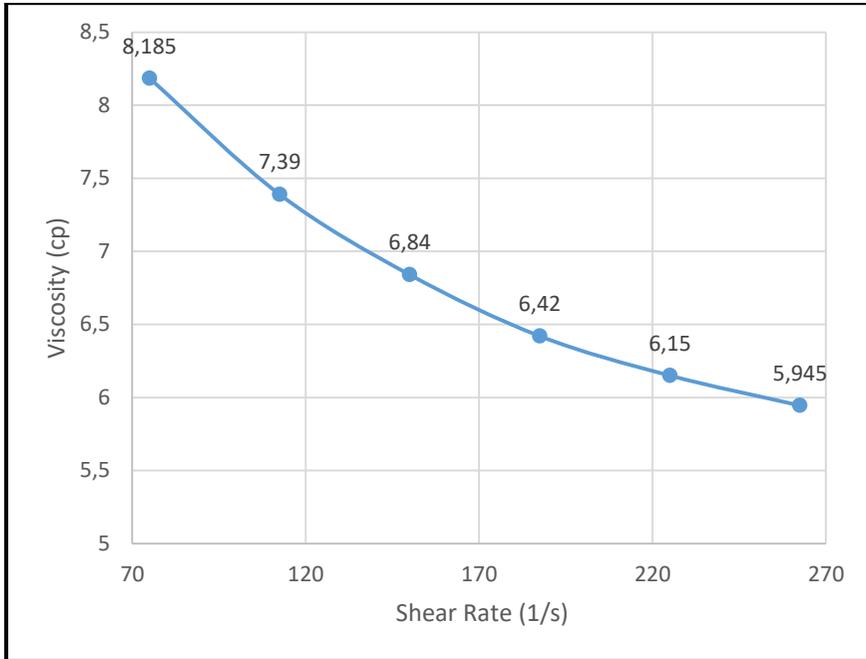
Gambar 3.2
Viskositas vs Konsentrasi



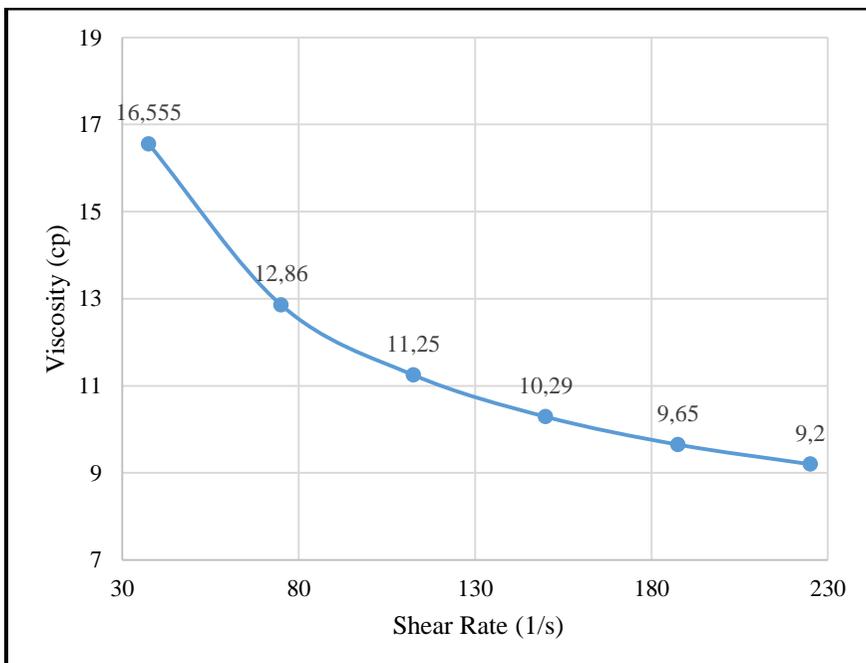
Gambar 3.3
Viskositas vs Shear Rate (100 ppm)



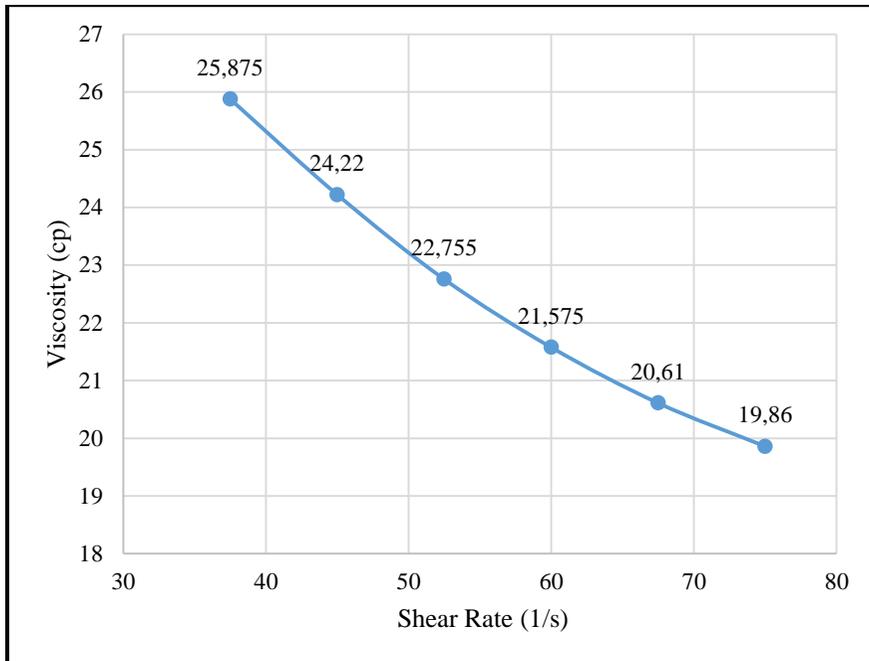
Gambar 3.4
Viskositas vs Shear Rate (500 ppm)



Gambar 3.5
Viskositas vs Shear Rate (1.000 ppm)



Gambar 3.6
Viskositas vs Shear Rate (1.500 ppm)



Gambar 3.7
Viskositas vs Shear Rate (2.000 ppm)

3.2. Uji *Aqueous Stability* Polimer

Aqueous Stability (Stabilitas Cairan) merupakan pengujian yang bertujuan untuk mengamati stabilitas fluida (cairan) polimer terhadap waktu dan temperatur. *Aqueous stability* merupakan salah satu *properties* polimer yang penting untuk dilakukan pengujian, karena dari pengujian ini akan diperoleh seberapa stabil polimer dalam waktu tertentu dan suhu tertentu. Polimer yang dikategorikan stabil adalah polimer yang tidak membentuk endapan selama pengujian. Pengujian dilakukan dalam beberapa hari.

Jenis polimer yang digunakan pada pengujian *aqueous stability* adalah FP3630S, merupakan jenis polimer yang sama dengan polimer pada pengujian *rheology*.

Karena polimer FP3630S akan digunakan dalam injeksi Micromodel sehingga perlu diketahui seberapa stabil polimer tersebut. Konsentrasi polimer yang diuji bervariasi yaitu 100 ppm, 200 ppm, 500 ppm, 750 ppm, 1.000 ppm, 1.250 ppm, 1.500 ppm dan 2.000 ppm. Pengujian ini dilakukan dengan cara mengamati larutan polimer secara visual setiap rentang waktu hari tertentu. Pengamatan ditujukan pada terbentuknya endapan atau tidak pada larutan polimer. Jika terbentuk endapan pada hari tertentu, maka dapat dikategorikan polimer pada konsentrasi tertentu dan hari tertentu sudah tidak stabil. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan jenis polimer sangatlah penting, agar polimer yang di-injeksi-kkan tidak menimbulkan masalah pada hal stabilitas dan dapat mendorong minyak.

Pada pengujian polimer FP3630S ini, dilakukan selama 7 hari pada temperatur 25°C dan 60°C. Dipilih temperatur 25°C dan 60°C karena pada injeksi polimer untuk Micromodel dilakukan pada temperature 25°C. Untuk 60°C merupakan variasi temperatur yang bertujuan untuk mengamati apakah polimer FP3630S stabil pada temperatur yang lebih tinggi dari temperatur normal pengujian. Dilakukan selama 7 hari karena diasumsikan polimer yang di-injeksi-kkan tidak berumur lebih dari 7 hari. Berikut adalah hasil pengujian *Aqueous Stability* untuk sampel polimer FP3630S.

a) Hari Ke-1

Pengujian hari pertama (2 September 2020), diperoleh hasil pengujian seperti pada **Gambar 3.8** dan **Gambar 3.9**. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa sampel polimer pada berbagai konsentrasi tidak mengalami endapan sama sekali.



Gambar 3.8
Aqueous Stability Polimer FP3630S Hari Ke-1 pada 25°C



Gambar 3.9.
Aqueous Stability Polimer FP3630S Hari Ke-1 pada 60°C

b) Hari Ke-2

Pengujian hari kedua (3 September 2020), diperoleh hasil pengujian seperti pada **Gambar 3.10** dan **Gambar 3.11**.

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa sampel polimer pada berbagai konsentrasi maupun berbagai temperatur tidak mengalami endapan.



Gambar 3.10
Aqueous Stability Polimer FP3630S Hari Ke-2 pada 25°C



Gambar 3.11
Aqueous Stability Polimer FP3630S Hari Ke-2 pada 60°C

c) Hari Ke-7

Pengujian hari terakhir yaitu ketujuh (9 September 2020), diperoleh hasil pengujian seperti pada **Gambar 3.12**, **Gambar 3.13**, **Gambar 3.14**, dan **Gambar 3.15**. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa sampel polimer pada berbagai konsentrasi maupun berbagai temperatur tidak mengalami endapan. Hal ini menunjukkan bahwa polimer FP3630S merupakan polimer yang stabil dan layak untuk digunakan dalam injeksi Micromodel.



Gambar 3.12

Aqueous Stability Polimer FP3630S Hari Ke-7 pada 25°C



Gambar 3.13

Aqueous Stability Polimer FP3630S Hari Ke-7 pada 25°C



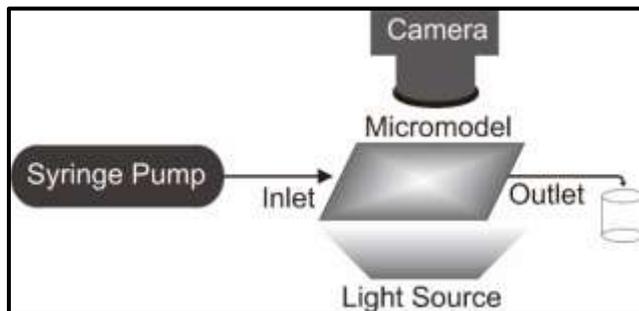
Gambar 3.14
Aqueous Stability Polimer FP3630S Hari Ke-7 pada 60°C



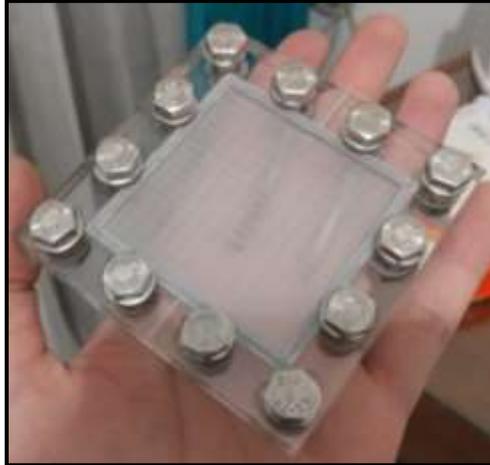
Gambar 3.15
Aqueous Stability Polimer FP3630S Hari Ke-7 pada 60°C

3.3. Uji *Micromodel Flooding*

Micromodel flooding test merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengamati dan menganalisa performa injeksi polimer dalam mendesak minyak pada *micromodel*. Langkah pertama pada pengujian ini adalah menyiapkan *micromodel* sebagai media injeksi polimer beserta alat perekam (*recording equipment*) untuk merekam seluruh proses mekanisme pendesakan selama pengujian ini berlangsung. Alat injeksi yang digunakan meliputi *syringe pump* dan koneksi untuk *inlet* dan *outlet*. Alat perekam yang digunakan terdiri dari dua komponen, yaitu sumber cahaya (*light source*) dan kamera. Skema dari peralatan *micromodel flooding* tersebut dapat dilihat pada **Gambar 3.16** dan *micromodel* yang akan digunakan pada pengujian ini dapat dilihat pada **Gambar 3.17**.



Gambar 3.16
Skema Injeksi Polimer pada *Micromodel*



GAMBAR 3.17
Micromodel yang Digunakan pada Pengujian

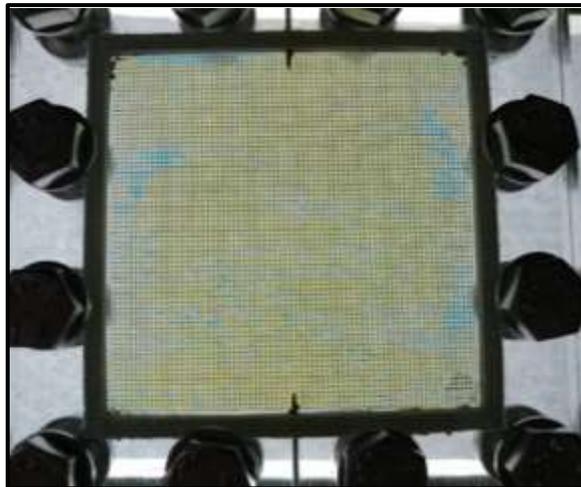
Langkah selanjutnya pada *Micromodel flooding test* adalah penjenuhan (*saturation*) *micromodel*. NaCl *Brine water* dengan konsentrasi sebesar 10,000 ppm diinjeksikan kedalam *micromodel* untuk menggantikan udara yang mengisi pori pada *micromodel*. Oleh karena itu, *micromodel* akan terjenuhi oleh *brine water* secara menyeluruh dan volume pori (*pore volume*) dapat diketahui. Setelah itu, dilakukan injeksi minyak ringan (43.278 °API) sebagai fluida penjenuh lainnya selain *brine water*. Minyak ringan yang diinjeksikan kedalam *micromodel* akan mendesak *brine water* keluar dari *micromodel* dan *brine water* yang masih tersisa pada pori-pori *micromodel* disebut dengan *residual water saturation* atau air yang sudah tidak dapat lagi didesak. Langkah selanjutnya adalah melakukan skenario injeksi air (*waterflooding*) dan injeksi polimer pada *micromodel*.

Skenario injeksi air (*waterflooding*) dilakukan untuk merepresentasikan pengamatan secara visual dari proses injeksi air pada *micromodel* dan juga untuk membandingkan hasil perolehan minyak oleh injeksi polimer dengan hasil perolehan minyak dari injeksi air. Skenario yang terakhir adalah injeksi larutan polimer kedalam *micromodel* dengan konsentrasi yang berbeda yaitu 1,000 ppm dan 2,000 ppm. Setiap skenario yang dilakukan pada *micromodel flooding test* direkam oleh kamera untuk mendapatkan visualisasi (gambar) mekanisme pendesakan minyak dari setiap skenario. Setiap tipe fluida telah diberi warna untuk melakukan pengamatan dengan *digital image analysis*.

a) Penjenuhan *Micromodel*

Micromodel yang akan digunakan untuk *flooding test* disaturasi terlebih dahulu dengan *brine water* sebagai fluida awal yang mengisi pori-pori *micromodel*. Hal tersebut merepresentasikan kondisi awal reservoir dimana fluida yang pertama kali mengisi batuan reservoir adalah air atau *brine water*. Proses penjenuhan *brine water* memberikan hasil bahwa dibutuhkan 0.46 mL *brine water* untuk mengisi penuh volume pori dari *micromodel*. Setelah itu, minyak diinjeksikan kedalam *micromodel* untuk merepresentasikan proses migrasi minyak ke reservoir. **Gambar 3.18** menunjukkan *micromodel* yang telah tersaturasi oleh minyak (inlet berada pada bagian bawah dan outlet berada pada bagian atas, arah aliran adalah dari bawah menuju ke atas). Warna biru merepresentasikan *brine water* dan warna cokelat kekuningan adalah minyak ringan. Pada *micromodel* terdapat saturasi air sisa yang terletak pada bagian tepi dari *micromodel* dengan warna biru.

Berdasarkan *digital image analysis*, didapatkan hasil saturasi minyak ringan sebesar 40.25%, saturasi udara (gas) 40.25% dan saturasi air sisa (*residual water saturation*) sebesar 19.25%. Hal tersebut merepresentasikan kondisi asli reservoir, dimana terdapat tiga jenis fluida yang mengisi reservoir, yaitu minyak, air dan gas.

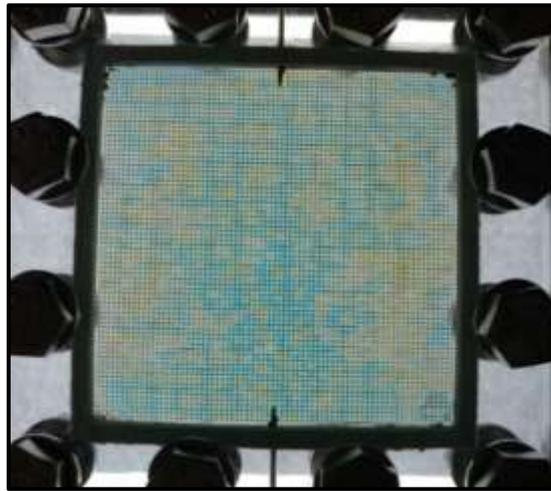


GAMBAR 3.18
Micromodel Setelah Dilakukan Penjenuhan

b) Injeksi Air (*Waterflooding*)

Skenario injeksi air dilakukan untuk mengamati mekanisme pendesakan minyak oleh air pada *micromodel*. **Gambar 3.19** menunjukkan hasil dari skenario injeksi air pada *micromodel* (jalur masuk atau *inlet* berada pada bagian bawah dan jalur keluar atau *outlet* terletak pada bagian atas, dimana arah aliran dari bawah menuju ke atas). *Digital image analysis* menunjukkan hasil untuk saturasi minyak menjadi 13.82%, saturasi air sebesar 50.4% dan saturasi gas sebesar 35.79%. Berdasarkan hasil tersebut, menunjukkan bahwa terjadi penurunan saturasi minyak dan bertambahnya saturasi air, hal tersebut disebabkan oleh terdesaknya minyak oleh air yang diinjeksikan.

Arah aliran dari injeksi air yang telah terekam, mengindikasikan terjadinya *viscous fingering* pada proses injeksi air dalam mendesak minyak. Terjadinya *viscous fingering* pada injeksi air disebabkan oleh distribusi air yang tidak merata dalam mendesak minyak (*unstable flood front*), dimana masih terdapat zona minyak yang belum tersapu (*unswept oil zone*) oleh air yang diinjeksikan pada *micromodel*.

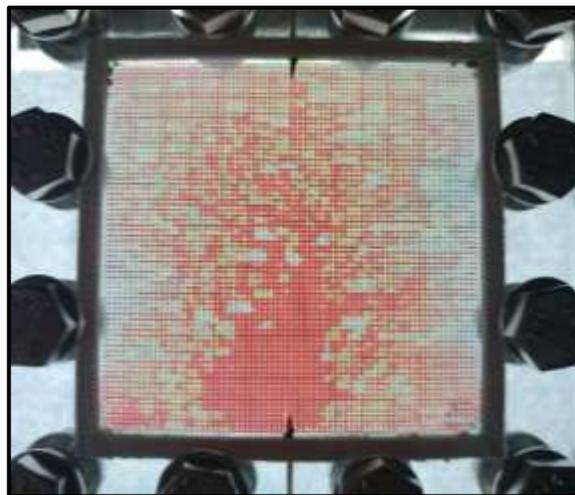


GAMBAR 3.19
Hasil Skenario Injeksi Air pada *Micromodel*

c) Injeksi Polimer (*Polymer Injection*)

Skenario utama pada eksperimen ini adalah injeksi polimer. Skenario awal dilakukan dengan menginjeksikan larutan polimer dengan konsentrasi 1,000 ppm. Setelah itu, dilanjutkan dengan menginjeksikan larutan polimer dengan konsentrasi 2,000 ppm. Dilakukannya injeksi polimer bertujuan untuk mengamati performa dan mekanisme injeksi polimer dalam mendesak minyak sebagai metode perolehan minyak tahap lanjut (*enhanced oil recovery*). Skenario ini akan memberikan hasil bahwa injeksi polimer dapat meningkatkan efisiensi penyapuan minyak untuk mengatasi terjadinya *viscous fingering* pada injeksi air.

Gambar 3.20 menunjukkan hasil dari injeksi polimer dengan konsentrasi 1,000 ppm. Fluida berwarna merah merepresentasikan 1,000 ppm polimer yang telah diinjeksikan kedalam *micromodel*. Gambar yang terekam dianalisa dengan menggunakan *digital image analysis* untuk menghitung saturasi dari setiap fluida. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa *micromodel* tersaturasi oleh minyak sebesar 12.23%, air sebesar 17.22%, gas sebesar 19.97%, dan 1,000 ppm polimer sebesar 49.57%. Berdasarkan hasil tersebut, dapat diketahui bahwa saturasi minyak berkurang dari 13.82% (injeksi air) menjadi 12.23% (injeksi 1,000 ppm polimer). Hal tersebut mengindikasikan bahwa injeksi polimer memberikan kenaikan perolehan minyak (*incremental oil production*) berdasarkan terjadinya pengurangan saturasi minyak pada *micromodel*. Secara kualitatif, dapat dilihat bahwa injeksi polimer dapat mendesak minyak lebih merata dibandingkan dengan injeksi air.



GAMBAR 3.20
Hasil Skenario Injeksi 1,000 ppm Polimer pada *Micromodel*

Gambar 3.21 menunjukkan hasil dari injeksi polimer dengan konsentrasi 2,000 ppm. Fluida berwarna hijau merepresentasikan 2,000 ppm polimer.

Digital image analysis menunjukkan hasil bahwa injeksi polimer dengan konsentrasi 2,000 ppm dapat mendesak minyak sampai saturasi minyak sisa sebesar 7.02%, dimana saturasi air sebesar 9.83%, gas 14.97%, 1,000 ppm polimer 8.91% dan 2,000 ppm polimer sebesar 59.22%. Berdasarkan hasil tersebut, dapat diindikasikan bahwa polimer dengan konsentrasi yang lebih tinggi akan memberikan hasil perolehan minyak yang lebih tinggi juga. Saturasi minyak sisa berkurang dari 12.23% (1,000 ppm polimer) menjadi 7.02% (2,000 ppm polimer). Secara visual, dapat dilihat bahwa polimer dengan konsentrasi 2,000 ppm memiliki efisiensi penyapuan minyak yang lebih baik dibandingkan dengan polimer dengan konsentrasi 1,000 ppm. Meningkatnya efisiensi penyapuan tersebut sangat dipengaruhi oleh kestabilan larutan polimer dalam mendesak minyak (*front stability*) sehingga proses pendesakan minyak akan lebih merata.

Secara keseluruhan, eksperimen ini menggunakan *digital image analysis* dalam melakukan pengamatan dan analisa dari setiap skenario yang dilakukan untuk mengetahui profil injeksi dan perolehan minyak dari setiap skenario injeksi.



GAMBAR 3.21
Hasil Skenario Injeksi 2,000 ppm Polimer pada *Micromodel*

PENUTUP

Kesimpulan

Polimer yang sering digunakan dalam implementasi injeksi polimer adalah polimer sintetik (*synthetic polymer*) seperti *hydrolized polyacrylamide* (HPAM) dan biopolimer (*biopolymers*) seperti *xanthan gum*. Pada penelitian ini menggunakan jenis polimer FP3630S yang merupakan tipe polimer HPAM (*Partially Hidrolyzed Polyacrilamide*) dan merupakan produk dari SNF. Adapun jenis polimer ini digunakan karena memiliki efektivitas yang baik, dimana parameter tersebut diantaranya tidak memiliki endapan, serta memiliki kestabilan terhadap panas yang baik. Sedangkan untuk jenis biopolimer seperti *xanthan gum* sangat sensitif terhadap degradasi yang disebabkan oleh bakteri (*bacterial degradation*) pada temperatur yang rendah. Sebenarnya, perbedaan karakteristik yang dimiliki dari setiap jenis polimer memberikan kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Namun, berdasarkan kebutuhan yang diperlukan pada penelitian ini digunakan lah jenis polimer HPAM.

Kestabilan polimer sangat dipengaruhi oleh degradasi polimer. Dalam hal perolehan minyak, proses degradasi polimer yang paling berpengaruh terhadap kestabilan polimer adalah degradasi kimia (*chemical degradation*), degradasi mekanis (*mechanical degradation*), dan degradasi biologi (*biological degradation*).

Oleh karena itu, perlu dilakukannya studi laboratorium untuk mempelajari performa polimer yang diinjeksikan kedalam media berpori sehingga didapatkan polimer yang optimum dalam memperoleh minyak dengan parameter-parameter dan kondisi tertentu pada skala laboratorium sebagai bahan pertimbangan serta acuan untuk dilakukannya implementasi injeksi polimer pada skala lapangan. Salah satu pengujian yang dilakukan adalah uji *rheology* polimer dan uji *Aqueous Stability* polimer.

Data yang diperoleh dari uji *rheology* polimer berupa sifat reologi untuk setiap konsentrasi larutan polimer. Pada uji *rheology* polimer ini, dilakukan pengujian terhadap polimer dengan konsentrasi yang berbeda-beda yaitu mulai dari 100 ppm, 200 ppm, 500 ppm, 750 ppm, 1.000 ppm, 1.250 ppm, 1.500 ppm, dan 2.000 ppm. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa kenaikan viskositas yang tidak linear terhadap konsentrasi polimer. Untuk mengetahui pengaruh *shear rate* terhadap viskositas larutan, maka dilakukan uji *rheology* polimer dengan memvariasi viskositas vs *shear rate*. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan tersebut dapat dibuktikan bahwa polimer merupakan fluida Non-Newtonian yang diperlihatkan dari kelakuan viskositasnya yang tidak konstan terhadap perubahan *shear rate*.

Aqueous Stability merupakan pengujian yang bertujuan untuk mengamati stabilitas larutan polimer terhadap waktu dan temperatur. Polimer yang dikategorikan stabil adalah polimer yang tidak membentuk endapan selama pengujian. Pengujian ini dilakukan selama tujuh hari pada temperatur 25°C dan 60°C.

Jenis polimer yang digunakan pada pengujian *aqueous stability* merupakan jenis polimer yang sama dengan polimer pada pengujian *rheology* yaitu FP3630S.

Berdasarkan uji *aqueous stability* yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa sampel polimer pada berbagai konsentrasi maupun berbagai temperatur tidak mengalami endapan dari hari pertama sampai hari terakhir pengujian yaitu hari ketujuh. Hal ini menunjukkan bahwa polimer FP3630S merupakan polimer yang stabil dan layak untuk digunakan dalam injeksi *Micromodel*.

Berbagai skenario dilakukan untuk membandingkan dan mengamati perolehan minyak yang didapatkan dari setiap skenario yang dilakukan, yaitu injeksi air (*waterflooding*) dan injeksi polimer dengan konsentrasi yang berbeda. Berdasarkan hasil dari *micromodel flooding test*, menunjukkan bahwa injeksi air dapat mendesak minyak pada micromodel sampai saturasi minyak menjadi 13.82% yang pada awalnya adalah 40.25% (kondisi awal) dan untuk injeksi 1,000 ppm polimer dapat meningkatkan perolehan minyak yang dapat diindikasikan oleh terjadinya pengurangan saturasi minyak dari 13.82 (injeksi air) menjadi 12.23% (injeksi 1,000 ppm polimer). Kenaikan perolehan minyak yang dihasilkan dari injeksi polimer mengindikasikan bahwa injeksi polimer memiliki efisiensi penyapuan minyak yang lebih baik dibandingkan dengan injeksi air, hal ini disebabkan oleh kestabilan *front (front stability)* dan berkurangnya efek *viscous fingering* yang terjadi pada injeksi air, sehingga polimer dapat digunakan untuk mengurangi efek *viscous fingering* yang terjadi pada injeksi air.

Skenario yang terakhir adalah menginjeksi polimer dengan konsentrasi 2,000 ppm, dimana saturasi minyak sisa berkurang dari 12.23% (injeksi 1,000 ppm polimer) menjadi 7.02% (injeksi 2,000 ppm polimer). Hal ini dapat disimpulkan bahwa polimer dengan konsentrasi lebih tinggi akan mendapatkan perolehan minyak yang lebih tinggi juga. Jadi, *front stability* dan distribusi larutan polimer yang merata akan menghasilkan efisiensi penyapuan minyak yang lebih baik, sehingga perolehan minyak akan meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Dousary S (2012) Determining Pore Level Mechanism of Alkaline Surfactant Polymer Flooding Using a Micromodel. Society of Petroleum Engineers Paper: SPE-165572-STU.
- Allcock HR, Lampe FW, Mark JE (2003) Contemporary polymer chemistry, Third edn, Pearson Education, New York.
- Barati N (2011) Study of polymer flooding performance in the presence of nanoparticles. Master Thesis, Petroleum University of Technology.
- Bou-Mikael, Saade Alexis, "Design and optimization of 2.5 dimension porous media micromodel for nanosensor flow experiments" (2012). LSU Master's Theses. 511. https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses/511
- Buchgraber M (2008) An enhanced oil recovery micromodel study with associative and conventional polymers. Diploma Thesis, University of Leoben, Austria.
- Chang HL (1978) Polymer flooding technology yesterday, today, and tomorrow. J Petrol Technol 30: Issue 08.
- Clemens T, Tsikouris K, Buchgraber M, Castainer L, Kovscek A (2013) Pore-scale Evaluation of Polymers Displacing Viscous Oil – Computational Fluid Dynamics – Simulation of Micromodel Experiments. Society of Petroleum Engineers Paper: SPE-154169-PA.
- Danesh A, Peden JM, Krinis D, Henderson GD (1987) Pore level visual investigation of oil recovery by solution gas drive and gas injection. SPE annual technical conference and exhibition, 27–30 September, Dallas, Texas.
- Emami Meybodi H, Kharrat R, Ghazanfari MH (2008) Effect of heterogeneity of layered reservoirs on polymer flooding: an experimental approach using 5—spot glass micromodel. Europec/ EAGE conference and exhibition, 9–12 June 2008, Rome, Italy.
- Hematpour H, Mardi M, Edalatkhah S, Arabjamaloe R (2011) Experimental study of polymer flooding in low-viscosity oil using one-quarter five-spot glass micromodel. Pet Sci Technol 29:1163–1175.

- Herbas JG, Wegner J, Hincaple RE, Fodisch H, Ganzer L, Del Castillo JA, Mugizi HM (2015) Comprehensive Micromodel Study to Evaluate Polymer EOR in Unconsolidated Sand Reservoirs. Society of Petroleum Engineers Paper: SPE-172669-MS.
- H. Liu, Yonghao Zhang, and A. J. Valocchi, “Lattice Boltzmann simulation of immiscible fluid displacement in porous media: Homogeneous versus heterogeneous pore network,” *Physics of Fluids* 27, 052103 (2015); doi: 10.1063/1.4921611.
- Hongxia Li, Raza A, Zhang TJ (2018) Imaging Micro-scale Multiphase Flow in 3D-printed Porous Micromodels. *Society of Exploration Geophysicists Journal*.
- Hosseini SJ, Foroozesh J (2018) Experimental Study of Polymer Injection Enhanced Oil Recovery in Homogeneous and Heterogeneous Porous Media Using Glass-Type Micromodels. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0492-x>
- Javadpour, F., & Fischer, D. (2008). Nanotechnology-Based Micromodels And New Image Analysis to Study Transport in Porous Media. *Journal of Canadian Petroleum Technology* , 30-37.
- Jewett RL, Schurz GF (1970). Polymer flooding—a current appraisal. *JPT* 22:675–68.
- Needham RB, Doe PH (1987) Polymer flooding review. *J Pet Technol*.
- Schumi B, Clemens T, Wegner J, Ganzer L, Kaiser A, Hincaple RE, Leitenmuller V (2019) Alkali / Cosolvent / Polymer Flooding of High-TAN Oil Using Phase Experiments, Micromodels and Corefloods for Injection-Agent Selection.
- Sedaghat M, Mohammadzadeh O, S. Kord, Chatzis I (2015) Pore-Level Experimental Investigation of ASP Flooding Recovery Heavy Oil in Fractured Five-Spot Micromodels. Society of Petroleum Engineers Paper: SPE-174290-MS.
- Sheng JJ (2011) Modern chemical enhanced oil recovery: theory and practice. ISBN 978-1-85617-745-0.
- Sheng JJ (2013) Chapter 3—polymer flooding—fundamentals and field cases. *Enhanc Oil Recov Field Case Stud* 2013:63–82.

- Sheng JJ, Leonhardt B, Azri N (2015) Status of polymer-flooding technology. *J Can Pet Technol* 54: Issue 02.
- Sorbie KS (1991) *Polymer-improved oil recovery*, 1st ed. CRC Press, Inc, Boca Raton.
- Taber JJ, Martin FD, Seright RS (1997b) EOR screening criteria revisited—part 1: introduction to screening criteria and enhanced recovery field projects. *SPE Reserv Eng* 12: Issue 03.
- Wonjun Yun (2014) *Micro-visual Investigation of Polymer Retention in A Micromodel*. Master Thesis. Stanford University.

BIOGRAFI PENULIS

Dr. Ir. Dedi Kristanto, M.T

dedikristanto@upnyk.ac.id



Dedy Kristanto lahir di Cianjur, Jawa Barat pada tanggal 29 Desember 1965. Lulus S-1 (Ir) dari Jurusan Teknik Perminyakan Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta tahun 1991. Pada tahun 1996, memperoleh gelar Magister Teknik (MT) dari Jurusan Teknik Perminyakan Institut Teknologi Bandung. Pada September 2004, memperoleh gelar Doctor of Philosophy (Ph.D) dari Jurusan Teknik Perminyakan Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru - Malaysia. Pada tahun 2017 memperoleh Sertifikasi Profesi sebagai Insinyur Profesional Madya (IPM) dari Persatuan Insinyur Indonesia. Sejak tahun 1990, bekerja sebagai Staf Pengajar di Jurusan Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Mineral, UPN “Veteran” Yogyakarta.

Dr. Boni Swadesi, S.T.,M.T
(boniswadesi@upnyk.ac.id)



Boni Swadesi lahir pada tanggal 7 Desember 1971 di Ampenan, Lombok Barat. Lulus Sarjana pada 1997 di Jurusan Teknik Perminyakan Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta dan Magister Teknik pada tahun 2005 di Jurusan Teknik Perminyakan Institut Teknologi Bandung. Kemudian melanjutkan S3 Teknik Perminyakan Institut Teknologi Bandung dan meraih gelar doktor pada 2018. Sejak tahun 1998 menjadi pengajar di Jurusan Teknik Perminyakan Universitas Pembangunan Nasional “Veteran”Yogyakarta.

Indah Widiyaningsih, ST., MT
(indahwidiyaningsih@upnyk.ac.id)



Indah Widiyaningsih lahir di Klaten pada tanggal 4 Mei 1985 . Lulus Sarjana di Teknik Perminyakan, UPN “Veteran” yogyakarta dan lulus pada tahun 2007. Lalu bekerja sebagai Reservoir Engineer di JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi selama 4,5 tahun. Menempuh pendidikan Magister Teknik Perminyakan di ITB pada tahun 2011 – 2013 dengan konsentrasi Enhanced Oil Recovery (EOR). Bergabung dengan Penelitian di Ogrindo, ITB selama 6 bulan. Setelah lulus dari pendidikan magister di ITB, memilih menjadi dosen di Jurusan Teknik Perminyakan UPN “Veteran” Yogyakarta mulai tahun 2013 hingga sekarang.

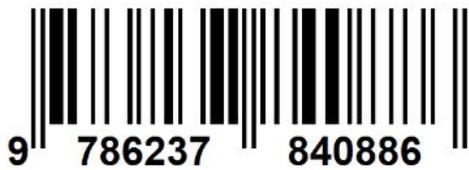
Sri Wahyu Murni, S.Si., MT

sriwahyumurni@upnyk.ac.id



Sri Wahyu Murni lahir pada tanggal 10 Maret 1967. Menempuh pendidikan sarjana di UGM dan memperoleh gelar sarjana Dra. pada tahun 1991 kemudian melanjutkan pendidikan magister di ITB pada tahun 2001 memperoleh gelar MT. Saat ini menjadi dosen tetap di Jurusan Teknik Kimia, UPN “Veteran” Yogyakarta dengan golongan Lektor. Aktif mempublish paper di google scholar mulai tahun 1999 – 2018. Dengan bidang minat Teknik Produk, Rekayasa Biokimia.

ISBN 978-623-7840-88-6



9 786237 840886