



Karakterisasi Larutan Polimer KYPAM HPAM untuk Bahan Injeksi dalam *Enhanced Oil Recovery* (EOR)

Harimurti Wicaksono, Sutijan, Ahmad Tawfieurrahman Yuliansyah*
Chemical Engineering Department, Gadjah Mada University, Indonesia
Jln. Grafika, No. 2, Yogyakarta, Indonesia, 55281

*Alamat korespondensi: atawfieq@ugm.ac.id

ABSTRACT

Polymer injection is one method of Enhanced Oil Recovery (EOR), where the polymer is dissolved in water, usually the formation water. Hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) polymer types are most commonly used. This study aims to investigate the effect of KYPAM HPAM polymer concentration and operating conditions upon the water injection in order to determine the optimal injection system. Viscosity of polyacrylamide solution was measured with a Brookfield viscometer. Variation in salinity is carried out by mixing formation water with distilled water, whereas for high salinity of formation water using evaporation method. Shear rate was varied in the range of $1-45 \text{ s}^{-1}$, while solution temperature was varied in the range of $70 - 87^\circ\text{C}$, and the effect of H_2S gas in the solution was conducted by saturating the solution using natural gas which has concentration of H_2S as 100 ppm.

The results show that the effect of salinity solution has the greatest influence on the decrease in viscosity of the solution when compared to the other factors. Decrease in viscosity was due to agglomeration process resulting precipitate of polyacrylamide in the form of vaterite and aragonite morphology. The result also show that an increase in shear rate resulting lower viscosity. The increase in temperature causes the viscosity of the solution decreases. Meanwhile, the presence of H_2S in the solution reduces the viscosity of the solution due to chemical degradation.

Keywords: EOR, formation water, polymer injection, hydrolyzed polyacrylamide, salinity, polymer concentration.

ABSTRAK

Injeksi polimer merupakan salah satu metode dalam *Enhanced Oil Recovery* (EOR). Dalam hal ini, polimer terlebih dulu dilarutkan dalam air, biasanya air formasi. Poliakrilamida terhidrolisis (HPAM) merupakan salah satu jenis polimer yang paling sering digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi polimer KYPAM HPAM dan kondisi operasi pada injeksi air untuk menentukan sistem injeksi yang optimal. Larutan poliakrilamida diukur viskositasnya dengan viskometer Brookfield. Variasi salinitas dilakukan dengan mencampur air formasi dan aquades, sedangkan untuk salinitas tinggi dari air formasi dengan menggunakan metode penguapan. Variasi *shear rate* dilakukan pada kisaran $1-45 \text{ s}^{-1}$, sedangkan suhu larutan divariasikan di kisaran $70-87^\circ\text{C}$. Pengaruh gas H_2S dalam larutan dilakukan dengan menjenuhkan larutan menggunakan gas alam yang memiliki konsentrasi H_2S 100 ppm.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa salinitas memiliki pengaruh terbesar pada penurunan viskositas larutan bila dibandingkan dengan faktor-faktor lain. Penurunan viskositas disebabkan aglomerasi menghasilkan endapan poliakrilamida dalam bentuk vaterite dan morfologi aragonit. Hasil percobaan juga menunjukkan bahwa peningkatan *shear rate*, mengakibatkan viskositas larutan terukur rendah. Peningkatan suhu menyebabkan viskositas larutan turun, sedangkan kehadiran H₂S dalam larutan mengurangi viskositas larutan karena terjadi degradasi kimia pada polimer.

Kata kunci: EOR, air formasi, injeksi polimer, *hydrolyzed polyacrylamide*, salinitas, konsentrasi polimer

1. Pendahuluan

Penurunan produksi minyak bumi di Indonesia merupakan sebuah masalah besar yang terus dibicarakan akhir-akhir ini. Pada era tahun 1970 hingga 1990-an Indonesia merupakan salah satu negara yang mempunyai produksi minyak bumi cukup besar. Penurunan produksi minyak bumi di Indonesia disebabkan oleh umur sumur-sumur pengeboran yang sudah tua dengan *water cut* yang tinggi (>90%) sehingga perlu diupayakan metode produksi untuk meningkatkan produksi sumur-sumur lama.

Peningkatan produksi yang dilakukan diberbagai lapangan, menyebabkan penurunan tekanan reservoir yang pada akhirnya mengurangi produktivitas sumur. Salah satu usaha yang bisa dilakukan untuk meningkatkan produksi minyak bumi adalah dengan optimalisasi lapangan-lapangan yang ada yaitu melalui *tertiary recovery*, salah satunya yaitu *Enhanced Oil Recovery* (EOR).

Metode ini merupakan cara pengambilan minyak bumi untuk ladang minyak yang sudah tidak dapat diambil, yaitu dengan cara menginjeksikan bahan-bahan yang tidak terdapat di dalam reservoir itu sendiri. Dengan EOR jumlah minyak yang berhasil diekstrak dari ladang minyak mencapai 30-60% dibandingkan 20-40% dengan menggunakan *primary* dan *secondary recovery* (Lake, 1989).

Salah satu bahan yang dapat diinjeksikan ke dalam *reservoir* adalah larutan polimer. Hal ini dimaksudkan untuk:

1. memperbaiki sifat fluida pendesak, yaitu viskositasnya sehingga diharapkan dapat meningkatkan perolehan minyak yang lebih besar.

2. mengurangi mobilitas ratio antara air dengan minyak sehingga dapat meningkatkan efisiensi penyapuan minyak didalam reservoir.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh konsentrasi polimer *polyacrylamide* dan kondisi operasi terhadap viskositas air injeksi sehingga dapat mengetahui sistem injeksi yang optimal. Pada penelitian ini dipelajari pengaruh suhu, pengaruh keberadaan gas alam dan juga salinitas yang menyebabkan adanya penurunan viskositas air injeksi.

2. Landasan Teori

EOR mempunyai tujuan utama untuk meningkatkan *overall recovery* minyak bumi, yang dalam prosesnya berupa pendesakan minyak keluar dari dalam *reservoir*. Injeksi dilakukan dalam rangka untuk memperbaiki efektivitas penyapuan didalam reservoir dan menyediakan sarana untuk mengontrol mobilitas air terhadap oil dengan cara menaikkan viskositas air injeksi. Injeksi dari larutan dengan viskositas yang besar dapat dijalankan sendirian ataupun dikombinasikan dengan bahan kimia lain yang bisa menaikkan *recovery* dari minyak didalam *reservoir*.

Polimer digunakan sebagai pengental yang membuat viskositas larutan injeksi besar, polimer di dalam larutan membentuk jaringan antara polimer. Polimer digunakan sebagai pengental yang membuat viskositas larutan injeksi besar, polimer didalam larutan membentuk jaringan antara polimer. Viskositas kemudian didefinisikan sebagai ratio dari *shear stress* (τ) terhadap *shear rate* (dv/dr atau γ), hubungan

antara kedua parameter dituliskan sebagai berikut:

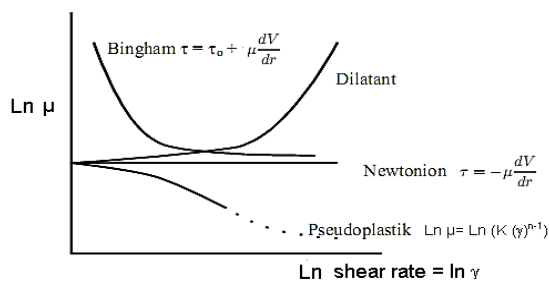
$$\tau = -\mu \frac{dv}{dr} = \mu\gamma \quad (1)$$

Polimer digolongkan sebagai fluida non-Newtonian karena kelakuan alirannya yang sangat kompleks. Fluida non-Newtonian tidak dapat dicirikan dengan viskositas karena perbandingan *shear stress* terhadap *shear rate* tidak konstan. Secara matematis, rumus tersebut dikenal sebagai *Power Law* (Lake, 1989) :

$$\mu = K (\gamma)^{n-1} \quad (2)$$

dengan K adalah indek konsistensi aliran (Pa s^n), dan n adalah index dari karakteristik aliran (-).

Beberapa larutan polimer, mempunyai karakteristik viskositas berbeda-beda sebagaimana ditunjukkan di Gambar 1. Gambar tersebut mengindikasikan bahwa dengan naiknya *shear rate* maka viskositas akan mengalami penurunan.



Gambar 1. Karakteristik viskositas dari berbagai jenis fluida

Jenis polimer yang umum digunakan untuk injeksi guna meningkatkan perolehan minyak adalah *xanthan gum* dan *polyacrylamide*. Keduanya merupakan polimer yang dapat larut dalam air. *Polyacrylamide* merupakan polimer sintetis yang bersifat non-ionik yang disintesis dari monomer acrylamide. *Polyacrylamide* relatif tahan terhadap serangan bakteri yang ada dalam reservoir tapi memiliki kecenderungan menurunkan permeabilitas batuan. KYPAM HPAM adalah nama produk *polyacrylamide* komersial dari China, yang didesain untuk mempunyai toleransi tinggi terhadap salinitas pelarut.

Pelarut yang digunakan berupa air formasi yang mengandung salinitas tinggi, terutama

akibat kation divalen seperti kalsium dan magnesium dengan kadar yang tinggi, penurunan viskositas terjadi karena adanya jembatan ionik yang dapat menyebabkan pengendapan polimer (Moradi-Araghi dan Doe, 1987). Molekul HPAM lebih sensitif terhadap ion divalen dibanding ion monovalen, pengendapan terjadi karena adanya ikatan yang kuat antara ion divalen and *carboxylate group* (COO^-) (Sandvik and Maerker, 1977).

Ikatan koordinasi antara ion-ion logam seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ yang berfungsi sebagai *chelates*, menyebabkan perubahan morfologi karboksil. *Chelates* yang diserap pada permukaan solid-liquid menyebabkan perubahan pembentukan inti kristal yang menyebabkan perubahan bentuk dari molekul *polyacrylamide*. Sebagai contoh pertumbuhan inti dari CaCO_3 . Kristal CaCO_3 mempunyai 3 bentuk kristal, yang diurutkan berdasarkan kestabilannya berturut-turut *calcite* > *aragonite* > *vaterite*. Bentuk umum dari *calcite* adalah *rombohedron* atau prisma *hexagonal*, sedangkan bentuk dari *aragonite* seperti jarum. Bentuk dari morfologi *vaterite* adalah globular. Berdasarkan hasil scanning mikroskop elektron (Guolin *et al.*, 2013), penambahan konsentrasi HPAM akan menyebabkan bentuk kristal kalsium akan semakin besar dan membentuk bentuk *aragonite* dan *vaterite*. Dengan demikian, adanya tambahan HPAM di larutan yang ada ion logam seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ akan dapat menyebabkan pengendapan *polyacrylamide*.

3. Metodologi

3.1. Bahan baku

Bahan baku yang digunakan berupa polimer *polyacrylamide* anionik KYPAM HPAM dari PT Sumber Kimia Palembang dan *produced water* (air formasi) dari sumur produksi lapangan “S”. Semua bahan digunakan secara langsung tanpa ada proses purifikasi.

3.2. Cara penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mencampurkan KYPAM HPAM ke dalam cairan (*aquadest* atau air formasi), kemudian diukur dengan alat

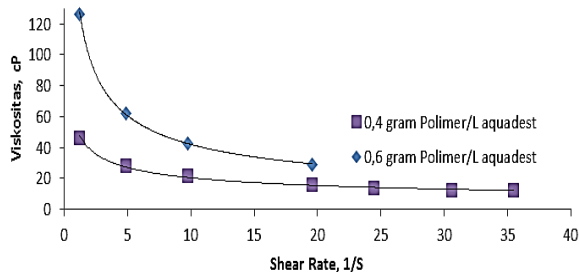
viskosimeter Brookfield. Dalam penelitian ini, beberapa variasi perlakuan dilakukan terhadap pengukuran viskositas larutan polimer yaitu variasi *shear rate*, pengaruh lingkungan (udara terbuka dan keberadaan gas H₂S), pengaruh salinitas pelarut, dan pengaruh suhu pada berbagai konsentrasi polimer.

4. Hasil dan Pembahasan

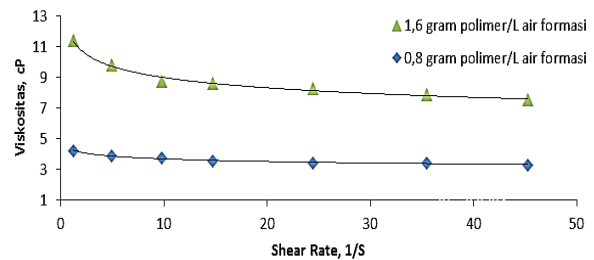
4.1. Variasi *shear rate*

Pertama-tama, pengukuran viskositas dilakukan pada kecepatan putaran viskosimeter 1 rpm, dan secara bertahap kecepatan putaran dinaikkan menjadi 5 rpm, 10 rpm dan seterusnya hingga tercapai kecepatan maksimal, yang ditandai dengan *spindle* viskosimeter menyentuh dinding *cup*. Pada setiap kecepatan putaran viskosimeter, *shear rate* yang timbul dan viskositas larutan terukur dicatat. Pengukuran viskositas dengan variasi *shear rate* penting dilakukan untuk menjadi dasar standar pengukuran viskositas polimer. Variasi *shear rate* dilakukan pada 2 kondisi, yakni menggunakan larutan polimer dengan pelarut *aquadest* dan air formasi.

Untuk larutan polimer dengan pelarut *aquadest*, pada konsentrasi polimer 0,4 g/L, viskositas larutan berkisar di 46 cP pada *shear rate* 1,22 s⁻¹. Jika *shear rate* dinaikkan menjadi 4,89 s⁻¹, viskositas larutan turun menjadi 28,3 cP. Sementara itu, pada konsentrasi 0,6 g/L saat *shear rate* sebesar 1,22 s⁻¹ viskositas larutan mencapai 125,97 cP dan secara drastis menurun ke 62,39 cP pada *shear rate* 4,89 s⁻¹.



Gambar 2. Hubungan viskositas polimer (pelarut *aquadest*) dengan *shear rate*



Gambar 3. Hubungan viskositas polimer (pelarut air formasi) dengan *shear rate*

Hubungan antara viskositas dan *shear rate* pada larutan polimer dengan pelarut *aquadest* disajikan dalam Gambar 2.

Karakteristik yang hampir sama ditunjukkan pada pengukuran menggunakan pelarut air formasi. Pada *shear rate* yang lebih tinggi, viskositas polimer terukur lebih rendah, sebagaimana terlihat pada Gambar 3.

Pada percobaan ini, penurunan viskositas larutan polimer KYPAM HPAM disebabkan karena struktur molekulnya mengalami perubahan bentuk, dari sebelumnya yang berbentuk besar dan tidak beraturan saat *shear rate* rendah, menjadi lebih teratur pada saat *shear rate* yang lebih tinggi.

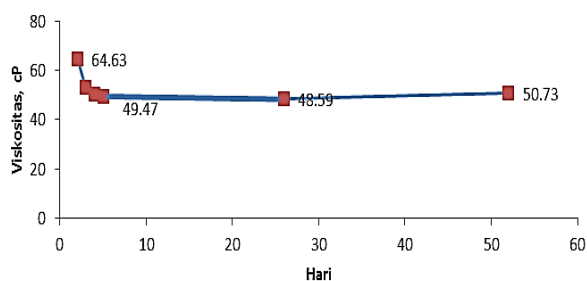
Saat percobaan, dilakukan pengukuran viskositas dari nilai *shear rate* rendah ke tinggi dan kemudian dibandingkan jika dilakukan pengukuran dari nilai *shear rate* tinggi ke rendah. Hasil pengukuran viskositas menghasilkan nilai yang hampir sama. Kondisi turunnya viskositas larutan saat *shear rate* yang besar akan bisa mengurangi efektifitas penyapuan minyak dalam batuan. Dari hasil penelitian diatas kita mendapatkan informasi bahwa semakin besar konsentrasi polimer dapat memberikan penurunan viskositas yang besar pula. Oleh karena itu perlu dicari titik optimal agar bisa digunakan untuk mendapatkan *recovery* minyak sebesar-besarnya.

4.2. Pengaruh gas H₂S

Larutan KYPAM HPAM dilarutkan dengan *aquadest* hingga konsentrasinya 0,6 g/L, kemudian ke dalam botol diinjeksikan gas alam yang mengandung H₂S. Perubahan viskositas larutan kemudian diamati selama beberapa hari. Sebagai pembanding, larutan KYPAM HPAM

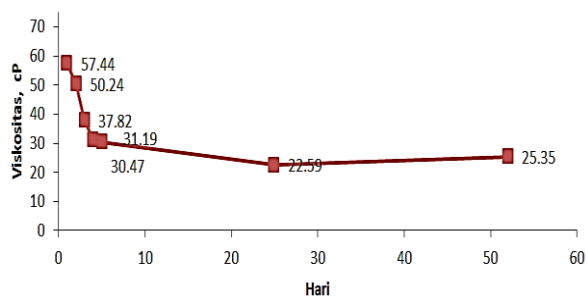
dengan konsentrasi sama dibiarkan berkontak dengan udara, kemudian viskositasnya juga diukur selama beberapa hari. Pengukuran viskositas dilakukan pada suhu 83°C menyesuaikan dengan suhu aktual pada *reservoir*.

Berdasarkan data percobaan, viskositas larutan KYPAM HPAM mengalami penurunan dari waktu ke waktu. Untuk larutan yang berkontak dengan udara terbuka, awal pengukuran menunjukkan viskositas larutan sebesar 64,63 cP. Viskositas larutan terus menurun dan mulai stabil di hari kelima dengan nilai viskositas 49,47 cP. Hasil pengukuran selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Perubahan viskositas larutan polimer yang berkontak dengan udara terbuka.

Hasil pengukuran viskositas larutan polimer yang berkontak dengan gas alam yang mengandung H₂S menunjukkan penurunan yang cukup signifikan. Sebelum berkontak dengan gas alam, viskositas larutan polimer sebesar 57,44 cP. Setelah berkontak selama 5 hari, viskositas turun drastis menjadi 37,82 cP, dan masih turun untuk beberapa hari setelahnya. Sebagaimana terlihat pada Gambar 5, viskositas larutan kemudian stabil pada nilai sekitar 25 cP



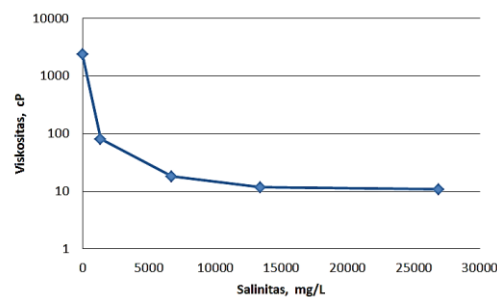
Gambar 5. Perubahan viskositas larutan polimer yang berkontak dengan gas alam

Penurunan viskositas larutan polimer yang berkontak dengan udara tidak terlalu signifikan, jika dibandingkan dengan larutan polimer yang berkontak dengan gas alam. Hal ini dimungkinkan karena oksigen dalam udara hanya mampu mengoksidasi sebagian kecil rantai polimer, sehingga sebagian besar rantai polimer lainnya masih tetap utuh. Akibatnya, viskositas larutan relatif masih tinggi.

Sebaliknya, viskositas larutan polimer yang berkontak dengan gas alam menurun secara drastis karena H₂S yang terdapat dalam gas alam masuk ke dalam larutan menyebabkan kondisi larutan asam, sehingga terbentuk H₃O⁺, yang berlanjut reaksi dengan *polyacrylamide* membentuk hasil akhir senyawa amoniak. Hal ini menyebabkan perubahan gugus di rantai polimer dari sebelumnya NH₂⁻ menjadi OH⁻. Perubahan gugus pada polimer menyebabkan gaya tolak menolak antar rantai cabang polimer, sehingga viskositas larutan turun. Dari literatur, oksigen dan H₂S dapat menyebabkan degradasi dari *polyacrylamide* di dalam larutan (Sorbie, 1991). Dari penurunan nilai viskositas di atas, maka dapat diindikasikan bahwa terjadi degradasi KYPAM HPAM.

4.3. Pengaruh salinitas

Polimer dilarutkan menggunakan *aquadest* dan dicampur dengan air formasi hingga didapatkan larutan polimer yang memiliki salinitas masing-masing sebesar 1344, 6719, 13437, dan 26874 mg/L. Konsentrasi polimer di masing-masing larutan diatur sedemikian agar konsentrasinya sama yakni sebesar 2,33 mg/L. Hasil pengukuran viskositas pada masing-masing larutan terlihat pada Gambar 7.



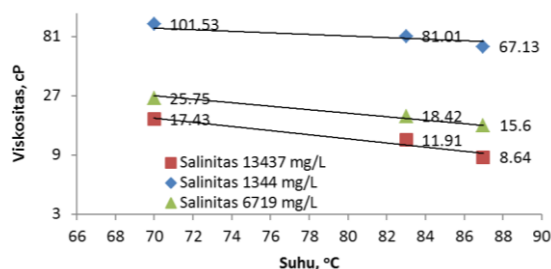
Gambar 7. Hubungan antara Viskositas Polimer dan Salinitas

Berdasarkan data hasil percobaan, salinitas pelarut sangat mempengaruhi viskositas larutan KYPAM HPAM. Keberadaan ion logam yang berbentuk garam, meski dalam konsentrasi yang cukup rendah, menyebabkan penurunan viskositas yang besar. Ini ditandai juga dengan terbentuknya endapan pada sampel larutan KYPAM HPAM yang menggunakan pelarut air formasi, sehingga mengurangi keefektifan polimer yang ada untuk menaikkan viskositas larutan. Adapun pada larutan KYPAM HPAM dengan *aquadest* tidak terjadi endapan.

Penyebab penurunan viskositas larutan KYPAM HPAM adalah adanya ion-ion logam yang menarik cabang dari polimer, menyebabkan bentuk rantai polimer menjadi lebih pendek. Bentuk rantai polimer yang lebih pendek dan cenderung mengumpul, menyebabkan aglomerasi dan penurunan viskositas larutan. O’Gorman dan Kitchener (1974) menjelaskan bahwa divalen ion seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+} , mempunyai kekuatan yang lebih untuk bertindak sebagai pengikat bagian anionik dari HPAM seperti *carboxylate group*. Padatan yang muncul merupakan gumpalan akibat interaksi ion logam seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , dan ion logam lainnya yang dapat membentuk kristal dengan bentuk morfologi *aragonite* dan *vaterite*.

4.4. Pengaruh suhu

Naiknya suhu akan menurunkan viskositas larutan. Hasil percobaan pada konsentrasi HPAM 2,33 g/L ditunjukkan oleh Gambar 8.



Gambar 8. Hubungan viskositas larutan dan suhu

Kenaikan suhu akan menurunkan viskositas larutan, sesuai persamaan (3):

$$\mu = Ae^{\frac{E}{RT}} \quad (3)$$

Dengan T adalah suhu, A adalah koefisien, E adalah energi aktivasi dan R adalah konstanta gas universal.

Dengan menggunakan regresi linier didapat konstanta-konstanta persamaan 3 di atas, sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Nilai konstanta pada persamaan viskositas

| Salinitas, mg/L | Nilai A | Nilai E/R | Viskositas larutan HPAM, cP | | |
|-----------------|-----------|-------------|-----------------------------|-------|-------|
| | | | 70°C | 83°C | 87°C |
| 1343,7 | 0,031 | 2780,8 | 101,53 | 81,01 | 67,13 |
| 6718,5 | 0,0009186 | 3516,7 | 25,75 | 18,42 | 15,6 |
| 13437 | 0,0000194 | 4711,8 | 17,43 | 11,91 | 8,64 |

Berdasarkan data diatas, prosentase penurunan viskositas fungsi suhu yang paling besar adalah di salinitas paling tinggi. Semakin tinggi salinitas, nilai A semakin rendah. Penyebab fenomena di atas adalah semakin tinggi salinitas dan suhu semakin banyak polimer yang ikut terendapkan akibat aglomerasi karena pengaruh ion logam divalent (O’Gorman dan Kitchener, 1974).

Kenaikan suhu mengurangi viskositas, karena pada suhu yang lebih tinggi molekul-molekul memiliki energi termal yang lebih besar. Dengan demikian molekul-molekul lebih mudah untuk bergerak sehingga viskositas larutan berkurang.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, hasil pengukuran viskositas *polyacrylamide* dengan variasi *shear rate* menunjukkan bahwa semakin besar *shear rate* maka viskositas larutan akan semakin kecil. Sedangkan untuk pengukuran viskositas *polyacrylamide* dengan variasi pengaruh udara dan gas H_2S menunjukkan bahwa kontak dengan udara terbuka dapat menurunkan viskositas larutan polimer KYPAM HPAM, akan tetapi penurunan ini tidak sebesar jika dibandingkan dengan kontak terhadap gas alam yang mengandung H_2S . Nilai viskositas akan stabil setelah hari ke-25. Variasi salinitas larutan terhadap viskositas larutan injeksi menunjukkan semakin tinggi salinitas larutan, maka viskositas larutan dengan konsentrasi polimer yang sama akan semakin menurun. Keberadaan ion-ion logam dalam pelarut, meskipun dalam konsentrasi rendah, menurunkan

viskositas secara drastis. Suhu juga mempengaruhi viskositas larutan, yakni semakin tinggi suhu larutan, maka viskositas larutan juga semakin kecil.

6. Daftar Pustaka

- Guolin J., Shan Tang, and Xiaoxiao Li, 2013, Effect Of HPAM on Calcium Carbonate Crystallization, Journal of the Korean Chemical Society, Vol. 57, No. 3
- Lake L.W., 1989, Enhanced Oil Recovery, Prentice Hall, New Jersey.
- Moradi-Araghi A., Doe P.H., 1987, Hydrolysis and Precipitation of Polyacrylamides in Hard Brines at Elevated Temperatures, SPE Reserv. Eng. 2, 2, 189-198, SPE Paper 13033.
- O’Gorman, J.V., Kitchener, J.A., 1974, Flocculation and de-watering of kimberlite clay slimes. Int. J. Miner. Process. 1:33–49
- Sandvik, E.I, Maerker, J.M., 1977, Application of Xanthan Gum for Enhanced Oil Recovery, Extracellular Microbial Polysaccharides, Chapter 19, pp 242–264
- Sorbie K.S., 1991, Polymer-Improved Oil Recovery, CRC Press Inc., Boca Raton, FL
-