

STUDI LABORATORIUM PENGARUH KONSENTRASI *HYDROPHOBIC SILICA NANOPARTICLES* DAN SALINITAS AIR FORMASI TERHADAP STABILITAS SISTEM *FOAM/EMULSI FLUIDA PENDESAK* UNTUK PROSES PENINGKATAN FAKTOR PEROLEHAN MINYAK (EOR)

Yohanes Berchmans Bayuaji Banendro

Mahasiswa Program Sarjana Teknik Perminyakan Institut Teknologi dan Sains Bandung

Pembimbing: David Maurich, S.T., M.T.

Abstrak

Injeksi *foam* atau emulsi oleh suspensi nanopartikel sebagai fluida pendesak merupakan salah satu metode EOR yang bisa meningkatkan efisiensi penyapuan minyak secara makroskopik. Namun demikian keberhasilan suatu metode EOR sangat dipengaruhi oleh sifat fluida dan batuan serta kondisi reservoir minyaknya. Salah satu faktor yang mempengaruhi keberhasilan injeksi *foam* atau emulsi adalah kestabilan *foam* atau emulsi. Kestabilan *foam* atau emulsi sangat dipengaruhi oleh konsentrasi nanopartikel, dan salinitas air formasi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh konsentrasi nanopartikel dan salinitas air formasi terhadap stabilitas *foam* atau emulsi untuk proses peningkatan faktor perolehan minyak (EOR). Dalam penelitian ini, jenis nanopartikel yang digunakan adalah *hydrophobic silica nanoparticles* yang kemudian didispersi dengan *iso-octane* sebagai pengganti CO₂. Konsentrasi nanopartikel yang digunakan adalah 1000 ppm, 5000 ppm, dan 10000 ppm. Sedangkan salinitas air formasi yang digunakan adalah 5000 ppm, 10000 ppm, 20000 ppm, 50000 ppm, 100000 ppm, dan 200000 ppm. Kestabilan *foam* atau emulsi sebagai fungsi waktu akan menunjukkan kualitas dan kuantitas *foam* atau emulsi yang dihasilkan. Hasil pengamatan menunjukkan kestabilan *foam* atau emulsi paling optimal adalah pada salinitas 100000 ppm dengan konsentrasi nanopartikel 10000 ppm, diikuti oleh salinitas 5000 ppm dengan konsentrasi nanopartikel 10000 ppm, dan salinitas 200000 ppm dengan konsentrasi nanopartikel 10000 ppm. Hasil penelitian juga menyimpulkan bahwa peningkatan salinitas air formasi dan konsentrasi *silica nanoparticles* akan meningkatkan viskositas *nanofluid*. Sementara itu, pengaruh salinitas air formasi terhadap kestabilan *foam/emulsi* sangat kompleks tergantung pada *zeta potential* dari sistem emulsi dan *critical salt concentration* (CSC). Secara keseluruhan, peningkatan konsentrasi nanopartikel pada salinitas tertentu akan meningkatkan kuantitas dan kualitas emulsi (*stability of emulsion system*).

Kata Kunci: kestabilan *foam/emulsi*, EOR, nanopartikel, viskositas, salinitas.

Abstract

Injection of foams/emulsions which are generated by nanoparticles and displacing fluid into an oil reservoir is one of the most recent EOR methods that can improve the macroscopic sweep efficiency of oil in microscopic pore spaces of reservoir. However, the effectiveness of an EOR method is very much affected by the fluid and rock's properties and oil reservoirs. One of the most important key factor in designing a success foam or emulsion injection is the stability of the foam or emulsion system. There are two major parameters that significantly influence the stability of foam/emulsion system such as nanoparticles concentration and the salinity of formation water the concentration of nanoparticles, and the salinity of formation water. Therefore, this research aims to study the effect of nanoparticle concentration and salinity of formation water on foam/emulsion stability which will use for displacing fluid in an EOR process. The type of nanoparticles used was hydrophobic silica nanoparticles dispersed with iso-octane as a substitute for CO₂. The concentration of nanoparticles was varied such as 1000 ppm, 5000 ppm, and 10000 ppm. Meanwhile the salinity of formations water

was also varied such as 5000 ppm, 10000 ppm, 20000 ppm, 50000 ppm, 100,000 ppm and 200000 ppm. The stability of the foam/emulsion was observed as a function of time by recording the quality and quantity of foam/emulsion produced for 192 hours long. The results showed the most optimal of foam/emulsion stability was occurred at salinity of 100000 ppm with nanoparticle concentration of 10000 ppm, followed by salinity of 5000 ppm with nanoparticle concentration of 10000 ppm, and salinity of 200000 ppm with nanoparticle concentration of 10000 ppm. The research also concluded that increasing formation water salinity and silica nanoparticle concentration would increase the viscosity of nanofluids. Meanwhile, the effect of formation water salinity on foam/emulsion stability is complicated depend on its zeta potential of emulsion system and critical salt concentration (CSC). Overall, increasing nanoparticle concentration on a specified salinity will increase the quantity and quality of emulsion (stability of emulsion system).

Keywords: foam/emulsion stability, EOR, nanoparticles, viscosity, salinity.

I. PENDAHULUAN

Minyak bumi masih merupakan komoditi yang sangat penting bagi pemenuhan kebutuhan energi manusia yang belum bisa digantikan baik dari segi praktisnya maupun dari segi keintegrasian dengan teknologi dan industri sekarang ini. Namun sebagai sumber daya energi yang tidak terbarukan, permasalahan tentang ketersediaan (*supply*) minyak bumi semakin besar seiring permintaan (*demand*) energi yang terus meningkat tiap tahun.

Enhanced Oil Recovery (EOR) atau metode peningkatan faktor perolehan minyak tahap lanjut menjadi pilihan potensial untuk mengatasi permasalahan produksi minyak dan sebagai upaya untuk meningkatkan perolehan minyak dimana rata-rata hanya sekitar 35%-60% OOIP minyak yang diperoleh dari pengurusan tahap awal (*primary recovery*) dan tahap kedua (*secondary recovery*). Berbagai metode EOR telah berhasil dikembangkan dan diterapkan di lapangan minyak seperti metode *chemical*, metode *thermal*, dan metode gas. Injeksi *foam* atau emulsi oleh suspensi nanopartikel sebagai fluida pendesak merupakan salah satu metode EOR yang bisa meningkatkan efisiensi penyapuan minyak secara makroskopik. Namun demikian keberhasilan suatu metode EOR sangat dipengaruhi oleh sifat fluida dan batuan serta kondisi reservoir minyaknya. Salah satu faktor yang mempengaruhi keberhasilan injeksi *foam*

atau emulsi adalah kestabilan *foam* atau emulsi. Kestabilan *foam* atau emulsi sangat dipengaruhi oleh konsentrasi nanopartikel, dan salinitas air formasi.

Berbagai penelitian telah dilakukan para peneliti untuk mencari bahan yang dapat menghasilkan *foam* yang lebih stabil dengan ukuran yang lebih kecil, tahan temperatur tinggi dan tidak reaktif terhadap batuan reservoir. Binks (2002), melakukan penelitian tentang perilaku partikel *solid* yang dapat digunakan sebagai bahan aktif permukaan menggantikan surfaktan dalam menstabilkan *foam*. Disamping itu, penelitian tentang pembentukan *CO₂ foam* yang stabil juga dilakukan oleh Dickson et al., (2004) dimana *supercritical CO₂-in water foam* dapat dihasilkan dengan menggunakan partikel silika 10 nm dan 40 nm dengan 100% SiOH dan 75% SiOH dan *dimethildichlorosylane* digunakan untuk menurunkan sifat hidrofilitas silika tersebut. Pembentukan *foam* dilakukan dengan *deionized water* pada temperatur ruang melalui *view cell*. Didapatkan bahwa dengan menurunkan sifat hidrofilitas partikel silika akan menaikkan stabilitas *foam* dan kenaikan konsentrasi partikel akan menaikkan stabilitas *foam*. Sementara, Adkins et al., (2007) mengembangkan *water-in supercritical CO₂ foam* dengan partikel silika 7 nm, 14 nm dan 24 nm pada kondisi salinitas dan temperatur yang sama melalui *view cell*. *Triethoxysilane* digunakan untuk menurunkan sifat hidrofilitas partikel silika. Didapatkan bahwa *water-in CO₂ foam* sangat stabil dengan

hidrofobis silika nanopartikel kurang dari 10 nm.

Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa jenis dan stabilitas *foam* yang dibentuk sangat bergantung kepada *wettability* dari partikel silika yang digunakan dimana salinitas dan temperatur sangat mempengaruhi stabilitas *CO₂-foam* yang dibentuk. *Intermediate hydrophobic nanoparticles* menunjukkan stabilitas *foam* yang lebih baik daripada *hydrophilic nanoparticles*, namun stabilitas *foam* yang dibentuk belum diuji pada air formasi yang mengandung salinitas tinggi dengan kombinasi konsentrasi nanopartikel yang berbeda-beda. Oleh karena itu dalam penelitian ini akan dilakukan pengujian stabilitas *silica nanoparticles-foam* pada berbagai salinitas air formasi dan konsentrasi *silica nanoparticles*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Definisi Kestabilan Emulsi

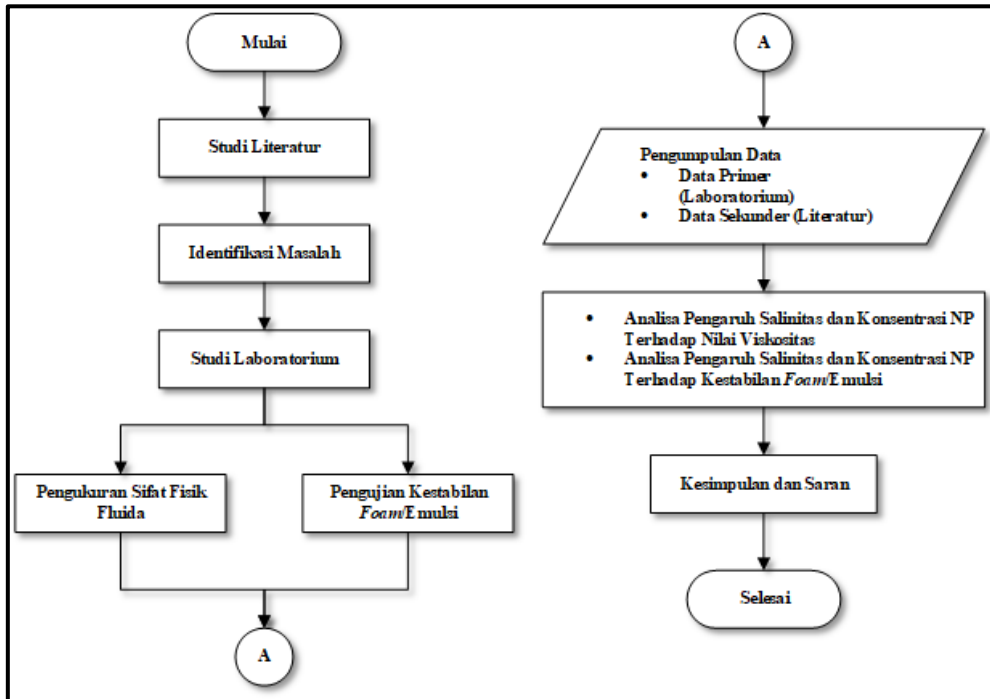
Suatu suspensi nanopartikel dikatakan stabil jika jumlah nanopartikel per satuan volume *foam/emulsi (colloidal)* yang dibentuk tidak berubah seiring waktu (Kissa, 1999). Kestabilan emulsi atau *foam* yang dibentuk dipengaruhi berbagai faktor seperti temperatur, tekanan, ukuran partikel, konsentrasi partikel dan larutan elektrolit serta ion (gaya elektrostatik) atau molekul (gaya *steric*) yang terdapat dalam sistem emulsi/*foam* tersebut (Derjaguin and Landau 1941; Verwey and Overbeek 1948). Emulsi stabil selama *droplet* terpisah satu sama lain. Flokulasi dari suatu emulsi atau dispersi terjadi pada tumbukan *droplet*, yang berhubungan dengan *Brown motion*, pencampuran secara konvektif, atau gaya gravitasi. Sistem dimana pengemulsi membawa muatan akan memberikan karakteristik khusus pada emulsi. *Double layer* akan berada di sekitar *oil droplet* dalam sistem emulsi O/W. Jika pengemulsi bermuatan negatif, maka akan menarik ion positif sambil menolak ion bermuatan negatif dalam fasa air. Perubahan potensial pada permukaan *oil*

droplet akan bergantung pada konsentrasi ion di fasa air sekitarnya. Keadaan stabilitas dalam kondisi ini secara kualitatif dapat digambarkan. Saat dua *oil droplet* saling mendekati, muatan negatif akan meningkatkan efek tolak-menolak. Tolakan akan terjadi disekitar *electrical double-layer* (EDL). Dengan demikian dapat dilihat bahwa besarnya jarak *double-layer* akan berkurang jika konsentrasi ion dalam fasa air meningkat. Ini disebabkan menurunnya ketebalan *electrical double layer*.

Critical Salt Concentration (CSC)

Nilai CSC didefinisikan sebagai salinitas minimum dimana sistem mulai stabil kembali ketika salinitas meningkat akibat bertambahnya energi *barrier*. Nilai diatas CSC menunjukkan dispersi nanopartikel menjadi tidak stabil. Dalam studi yang dilakukan Azadgoleh et al. (2014), kestabilan dispersi nanopartikel tidak dapat dipertahankan melebihi konsentrasi elektrolit tertentu yang disebut sebagai *critical salt concentration* (CSC). CSC sangat dipengaruhi oleh jenis elektrolit, konsentrasi dan ukuran partikel, temperatur, dan penambahan surfaktan. CSC KCl jauh lebih rendah daripada NaCl karena disebabkan oleh *ionic strength* yang tinggi. Selain itu, nilai CSC lebih besar untuk nanopartikel dengan diameter yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan temperatur dapat menyebabkan ketidakstabilan dispersi nanopartikel dan secara signifikan mengurangi jumlah CSC. Metin et al. (2010) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa CSC lebih dipengaruhi oleh jenis elektrolit daripada konsentrasi nanopartikel serta menyimpulkan bahwa peningkatan temperatur dari 25 – 70 °C akan meningkatkan laju agregasi dan menyebabkan nilai CSC menurun. Penurunan CSC lebih signifikan pada Na⁺ (*monovalent cations*) daripada Mg²⁺ dan Ca²⁺ (*divalent cations*). Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh *cation valence* lebih dominan terhadap pengaruh energi panas dalam rentan temperatur yang digunakan.

III. METODOLOGI



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan terdiri dari: *Ostwald viscometer*, *picnometer*, neraca digital, *magnetic stirrer*, *beaker glass*, pipet, tabung reaksi, *hydrophobic silica nanoparticles*, *iso-octane*, *aquadest*, dan NaCl.

Persiapan Brine

Brine yang digunakan memiliki beberapa variasi salinitas sehingga memberikan gambaran perilaku fluida pada berbagai konsentrasi. Salinitas air formasi yang digunakan dalam penelitian ini antara lain 5000 ppm, 10000 ppm, 20000 ppm, 50000 ppm, 100000 ppm, dan 200000 ppm. Salinitas air formasi dibuat dengan cara melarutkan NaCl ke dalam *aquadest*, kemudian diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer*.

Persiapan Larutan Nanopartikel

Setelah persiapan air formasi, selanjutnya dibuat larutan nanopartikel dengan berbagai konsentrasi yang telah ditentukan yaitu 1000

ppm, 5000 ppm, dan 10000 ppm. Pembuatan nanopartikel dilakukan dengan melarutkan nanopartikel ke dalam air formasi yang telah disiapkan, kemudian diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer*.

Pengukuran Sifat Fisik Fluida

Pengukuran sifat fisik fluida meliputi: pengukuran densitas dengan *picnometer*, dan pengukuran viskositas dengan *Ostwald viscometer*. Pengukuran sifat fisik fluida dilakukan pada kondisi temperatur ruangan 25 °C.

Pengujian Kestabilan Foam/Emulsi

Pengujian kestabilan *foam/emulsi* dilakukan dengan nanopartikel jenis *Hydrophobic Silica* dengan berbagai salinitas dan konsentrasi nanopartikel. *Iso-octane* didispersi dengan *brine* yang berisi nanopartikel. *Iso-octane phase volume* yang digunakan 50%. *Iso octane* digunakan sebagai pengganti CO₂ pada kondisi *liquid* atau pada kondisi *supercritical CO₂* dimana diasumsikan di lapangan CO₂ yang

diinjeksikan pada tekanan tinggi (diatas MMP) sehingga CO₂ berubah fasa menjadi *liquid* ataupun *supercritical fluid*. Namun karena ketersediaan alat belum memadai sehingga tidak memungkinkan dilakukan CO₂ *liquid* atau *supercritical* di laboratorium ITSB, maka *iso octane* digunakan untuk membentuk emulsi

antara nanopartikel dan *iso octane* dalam tabung reaksi. Hasil pengujian kestabilan *foam/emulsi* dijabarkan melalui ketinggian *foam/emulsi* dalam persen yaitu perbandingan antara ketinggian foam dengan total ketinggian *foam/emulsi* dan separasi cairan. (Alotaibi et al, 2013).

$$\text{Stable Emulsion, \%} = \frac{\text{Height of Formed Emulsion}}{\text{Height of Formed Emulsion} + \text{Height of Separated phase}} \times 100\%$$

IV. PEMBAHASAN

Tabel 1. Data Sifat Fisik Fluida.

No.	Fluid	Density (gram/cc)	Specific Gravity	Viscosity (cP)
1	Brine 5000 ppm	1.0013	1.0035	0.8704
2	Brine 5000 ppm NaCl + NP Silica 1000 ppm	0.9993	1.0015	0.8962
3	Brine 5000 ppm NaCl + NP Silica 5000 ppm	0.9951	0.9973	0.9029
4	Brine 5000 ppm NaCl + NP Silica 10000 ppm	0.9962	0.9984	0.9438
5	Brine 10000 ppm	1.0048	1.0070	0.8857
6	Brine 10000 ppm NaCl + NP Silica 1000 ppm	1.0056	1.0079	0.8969
7	Brine 10000 ppm NaCl + NP Silica 5000 ppm	1.0021	1.0043	0.9073
8	Brine 10000 ppm NaCl + NP Silica 10000 ppm	0.9976	0.9998	1.0549
9	Brine 20000 ppm	1.0116	1.0139	0.8974
10	Brine 20000 ppm NaCl + NP Silica 1000 ppm	1.0150	1.0173	0.9008
11	Brine 20000 ppm NaCl + NP Silica 5000 ppm	1.0085	1.0107	0.9384
12	Brine 20000 ppm NaCl + NP Silica 10000 ppm	1.0114	1.0137	1.0684
13	Brine 50000 ppm	1.0336	1.0360	0.9111
14	Brine 50000 ppm NaCl + NP Silica 1000 ppm	1.0302	1.0325	0.9350
15	Brine 50000 ppm NaCl + NP Silica 5000 ppm	1.0296	1.0319	0.9423
16	Brine 50000 ppm NaCl + NP Silica 10000 ppm	1.0274	1.0297	1.1363
17	Brine 100000 ppm	1.0695	1.0719	0.9207
18	Brine 100000 ppm NaCl + NP Silica 1000 ppm	1.0684	1.0708	0.9871
19	Brine 100000 ppm NaCl + NP Silica 5000 ppm	1.0610	1.0634	0.9791
20	Brine 100000 ppm NaCl + NP Silica 10000 ppm	1.0574	1.0597	1.1520
21	Brine 200000 ppm	1.1461	1.1487	1.0650
22	Brine 200000 ppm NaCl + NP Silica 1000 ppm	1.1430	1.1455	1.0835
23	Brine 200000 ppm NaCl + NP Silica 5000 ppm	1.1407	1.1432	1.2402
24	Brine 200000 ppm NaCl + NP Silica 10000 ppm	1.1332	1.1358	1.1890

Viskositas

Berdasarkan **Tabel 1.** menunjukkan bahwa salinitas mempengaruhi nilai viskositas. Semakin tinggi salinitas maka nilai viskositas akan meningkat. Sementara itu, pengaruh konsentrasi nanopartikel juga menunjukkan hasil yang signifikan yaitu kecenderungan nilai viskositas meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi nanopartikel. Hal ini disebabkan dengan peningkatan konsentrasi nanopartikel, maka kuantitas emulsi juga semakin meningkat, secara teori semakin banyak emulsi maka viskositas suatu suspensi akan semakin meningkat. Namun pada konsentrasi nanopartikel 5000 ppm dengan salinitas 200000 ppm, menunjukkan nilai viskositas yang paling tinggi daripada konsentrasi nanopartikel 10000 ppm, hal ini diduga bahwa emulsi yang stabil untuk suspensi nanopartikel tersebut terjadi pada salinitas optimum 100000 ppm (*critical salt concentration*). Sehingga pada salinitas di atas 100000 ppm, penambahan konsentrasi nanopartikel akan menyebabkan jarak antar nanopartikel semakin dekat. Dimana semakin dekat jarak antar partikel maka gaya tarik-menarik (gaya *Van der Waals*) akan semakin besar. Namun demikian *energy barrier* yang dihasilkan oleh *electrical repulsion* (gaya tolak elektrostatik antara ion dan muatan partikel) malah makin besar. Hal ini menyebabkan *net interaction energy* makin tinggi, sehingga meningkatkan kestabilan dan mencegah emulsi pecah atau *coalescence*. Hal ini bisa dilihat pada salinitas 200000 ppm dimana peningkatan konsentrasi nanopartikel dari 1000 ppm sampai 5000 ppm akan menyebabkan kualitas dan kuantitas emulsi lebih baik dan stabil serta viskositasnya terus naik. Namun ketika konsentrasi nanopartikel dinaikkan menjadi 10000 ppm, kualitas dan kuantitas emulsi serta viskositasnya menurun. Hal ini disebabkan pada salinitas yang tinggi di atas CSC, maka ketebalan *electrical double layer* yang menghasilkan gaya *electrical repulsion* akan berkurang, sehingga *net energy balance* juga menurun. Sementara itu penambahan konsentrasi nanopartikel yang

sangat tinggi akan menyebabkan jarak antar nanopartikel menjadi sangat dekat sehingga *energy barrier* yang menjaga agar emulsi tidak mengalami *coalescence* akhirnya hilang dan nanopartikel mengalami *energy trap* yang dihasilkan oleh gaya tarik *Van der Waals* yang menyebabkan emulsi untuk bergabung atau menjadi tidak stabil. Itulah sebabnya penambahan konsentrasi nanopartikel menjadi 10000 ppm pada salinity 200000 ppm membuat kualitas dan kuantitas emulsi menjadi menurun begitu juga dengan viskositasnya. Disamping itu pada saat pengujian kestabilan emulsi dilakukan secara statik, sementara pada saat pengukuran viskositas dilakukan secara dinamik, dimana pada konsentrasi nanopartikel yang sangat tinggi, maka jarak antar partikel menjadi sangat dekat ditambah lagi efek *Brown motion* saat suspensi nanopartikel mengalir dalam pipa kapiler *ostwald viscometer* membuat gaya tarik antar partikel dalam emulsi menjadi sangat besar sehingga bisa menyebabkan emulsi mengalami *coalescence* yang mengakibatkan kualitas dan kualitas serta viskositas emulsi menurun dan tidak stabil.

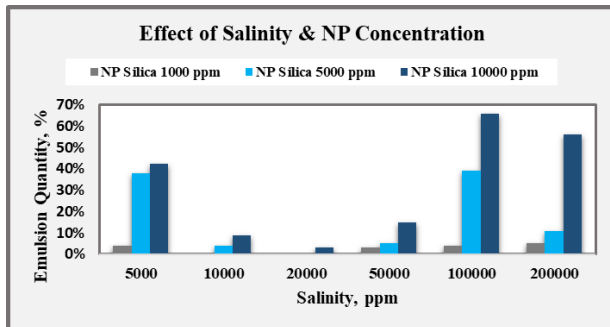
Kestabilan Emulsi

Hasil komparasi yang ditunjukkan **Gambar 2.**, menunjukkan perubahan salinitas akan mempengaruhi pembentukan dan stabilitas emulsi. Pada konsentrasi nanopartikel 1000 ppm dengan salinitas 10000 ppm dan 20000 ppm, tidak menghasilkan emulsi. Namun terdapat fenomena dimana pada salinitas yang tinggi (50000 ppm – 200000 ppm) terjadi pembentukan emulsi kembali. Fenomena ini menunjukkan bahwa proses pembentukan dan kestabilan emulsi sangat kompleks dan dipengaruhi berbagai faktor seperti gaya tarik-menarik antar *silica nanoparticles* (gaya *Van der Waals*), efek kinetik *Brown* partikel, gaya tarik atau tolak antar muatan elektrostatik partikel dan ion dalam larutan. Pada penelitian ini, *silica nanoparticles* memiliki muatan elektrostatik negatif pada permukaan partikelnya, dengan demikian ketika *silica*

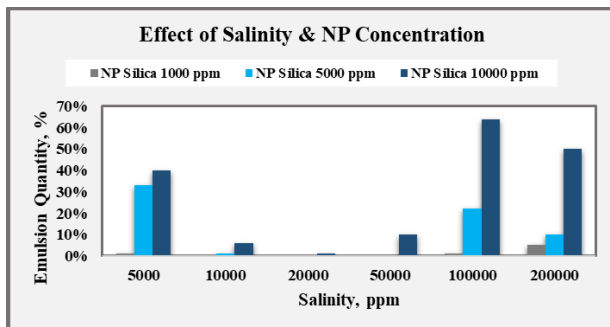
nanoparticles dimasukkan ke dalam larutan NaCl dengan salinitas tertentu, maka ion Na^+ yang dihasilkan dari disosiasi NaCl dalam *aquadest* akan bergerak mendekati permukaan *silica nanoparticles* dan menempel karena gaya tarik elektrostatis dari muatan yang berlawanan. Interaksi ini akan menghasilkan suatu lapisan di sekitar nanopartikel yang disebut *stern layer*. Namun karena gaya tarik elektrostatis dari partikel masih terasa dan pergerakan nanopartikel dalam larutan sebagai efek *Brown*, maka semakin banyak ion Na^+ yang bergerak mendekati permukaan partikel yang bermuatan negatif. Akan tetapi sebagian besar ion Na^+ tersebut akan ditolak oleh lapisan *stern layer* dan ion Na^+ yang berada dalam lapisan *stern layer* yang telah dahulu berkompetisi untuk melekat pada permukaan nanopartikel. Akhirnya ion Na^+ tersebut disertai dengan sebagian ion Cl^- dari larutan yang tertarik dengan konsentrasi ion Na^+ di lapisan *stern layer* akan membentuk lapisan *shear layer* setelah lapisan *stern layer*. Kedua lapisan yang terbentuk inilah yang disebut *double layer*. Potensi listrik pada bagian terluar *double layer* disebut *zeta potential* yang memiliki nilai antara -100 mV sampai +100 mV. Suspensi nanopartikel akan stabil jika memiliki nilai lebih kecil dari -25 mV atau lebih besar dari +25 mV. Sementara itu pengaruh gaya tarik elektrostatis dari permukaan nanopartikel masih terasa, maka ion Na^+ akan terus berkumpul setelah *shear layer* dan membentuk lapisan *diffuse layer* sampai jarak tertentu dimana gaya tarikan elektrostatis dari permukaan nanopartikel tidak terasa lagi (*equilibrium*). Semakin tebal *diffuse layer*, maka semakin kecil daya tarik menarik antar nanopartikel dan mencegah antar partikel yang terdapat dalam permukaan emulsi untuk bergabung atau *coalescence*. Hal ini akan menyebabkan emulsi menjadi lebih stabil. Hal ini bisa dilihat pada salinitas 5000 ppm. Pada kondisi ini *zeta potential* yang dibentuk diperkirakan lebih kecil dari -25 mV, sehingga terbentuk emulsi yang relatif stabil. Tebalnya *diffuse layer* sangat tergantung pada konsentrasi ion elektrolit atau salinitas.

Peningkatan salinitas akan menyebabkan lapisan *diffuse layer* menipis, sehingga gaya tarik-menarik sebagai akibat dari gaya *Van der Waals* antar nanopartikel akan semakin besar, hal ini akan menyebabkan emulsi kurang stabil karena dapat menyebabkan *coalescence* seperti yang terjadi pada salinitas di atas 10000 ppm. Sementara itu elektrostatis negatif yang berasal dari ion Cl^- yang dihasilkan dari disosiasi NaCl dalam larutan *aquadest* akan terus meningkat seiring dengan semakin jauh jaraknya dari muatan negatif permukaan nanopartikel tersebut sampai gaya tolak menolak tidak terasa lagi antar muatan elektrostatis yang sama (*new equilibrium*). Dalam hal ini, peningkatan salinitas di atas 20000 ppm akan menyebabkan ion Cl^- meningkat signifikan sehingga *diffuse layer* kembali akan semakin tebal dan mencapai kondisi kritis (*critical salt concentration-CSC*) pada salinitas 100000 ppm serta *zeta potential* kembali meningkat. Pada kondisi ini besarnya *zeta potential* diperkirakan lebih besar dari +25 mV, sehingga emulsi lebih stabil. Penambahan salinitas di atas kondisi ini akan menyebabkan emulsi menjadi kurang stabil secara kualitas. Hal inilah yang menyebabkan kualitas dan kuantitas emulsi pada salinitas 100000 ppm mencapai kondisi optimum seperti yang ditunjukkan hasil penelitian. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa konsentrasi nanopartikel sangat mempengaruhi kuantitas dan kualitas emulsi yang dihasilkan. Peningkatan konsentrasi nanopartikel akan meningkatkan kuantitas emulsi. Pada konsentrasi nanopartikel 5000 ppm dengan salinitas 20000 ppm, emulsi tidak terbentuk. Sedangkan pada konsentrasi nanopartikel 10000 ppm dengan salinitas yang sama hanya meningkatkan emulsi sebesar 3 %. Secara keseluruhan pada kondisi mula-mula, pengaruh salinitas pada konsentrasi nanopartikel yang rendah tidak menunjukkan hasil emulsi yang signifikan. Sedangkan pada konsentrasi nanopartikel yang tinggi menunjukkan hasil yang sebaliknya dengan jumlah emulsi tertinggi sebesar 66 %. Hal ini menunjukkan bahwa kuantitas emulsi lebih

banyak dipengaruhi oleh konsentrasi nanopartikel daripada salinitas. Pengaruh salinitas dan konsentrasi nanopartikel pada kondisi akhir ($t = 192$ hours) pada **Gambar 3.**, menunjukkan penurunan kuantitas emulsi sebagai fungsi waktu sehingga perilaku emulsi dapat diamati tingkat kestabilannya.

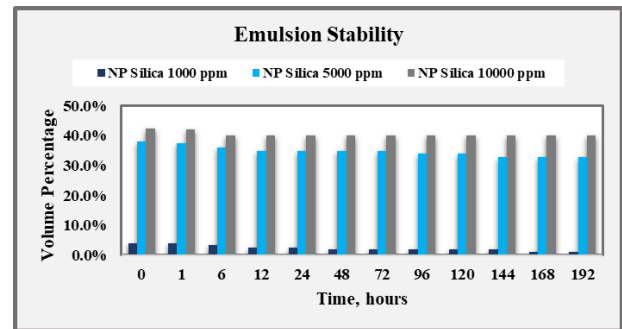


Gambar 2. Komparasi Pembentukan Foam/Emulsi (t = 0 hour).



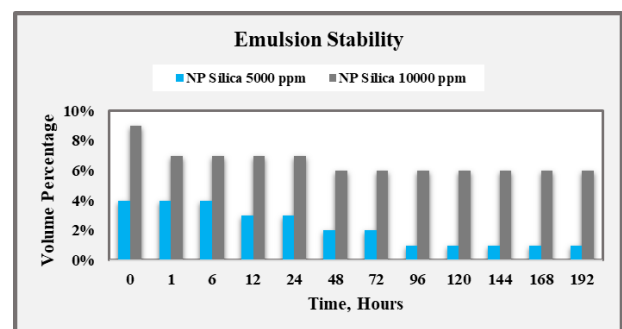
Gambar 3. Komparasi Pembentukan Foam/Emulsi (t = 192 hours).

Static emulsion test dilakukan untuk mengetahui tingkat kestabilan emulsi yang terbentuk sebagai fungsi waktu. **Gambar 4.**, menjelaskan mengenai observasi terhadap tingkat kestabilan emulsi pada salinitas 5000 ppm. Hasil pengujian tersebut menunjukkan kestabilan emulsi yang baik pada masing-masing konsentrasi nanopartikel dimana emulsi masih bertahan selama 192 jam. Hal ini berarti emulsi yang dihasilkan dengan konsentrasi nanopartikel 1000 ppm, 5000 ppm, dan 10000 ppm dapat bekerja pada salinitas 5000 ppm (relatif stabil). Hal ini disebabkan pada salinitas yang rendah, *diffuse layer* akan terbentuk lebih tebal sehingga mengurangi gaya tarik-menarik (*Van der Waals*) dan efek *Brown* sehingga mencegah terbentuknya *coslescences*. Disamping itu pada salinitas yang rendah ini diperkirakan *zeta potential* yang terbentuk sangat kecil sekali yang menyebabkan emulsi menjadi lebih stabil.



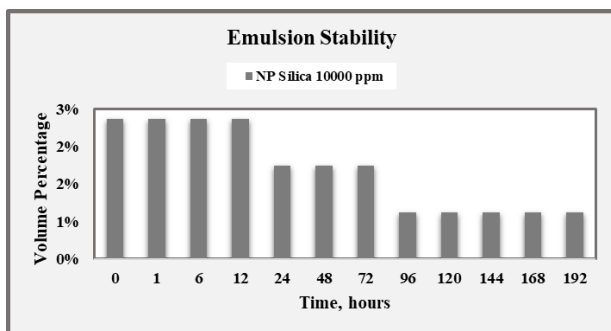
Gambar 4. Grafik Kestabilan Emulsi pada Salinitas 5000 ppm.

Hasil yang berbeda ditunjukkan **Gambar 5.**, yang menjelaskan performa kestabilan emulsi pada salinitas 10000 ppm, dimana pada konsentrasi nanopartikel 1000 ppm, emulsi tidak dapat terbentuk atau tidak stabil yang menunjukkan bahwa kualitas emulsi (*emulsion stability*) sangat dipengaruhi oleh salinitas. Hal ini telah disampaikan Metin et al, (2011) dalam studinya mengenai pengaruh elektrolit yang terdapat dalam air formasi pada dispersi *silica nanoparticles*. Penjelasan mengenai fenomena yang terjadi disebabkan NaCl mencapai konsentrasi kritis atau *critical salt concentration* (CSC) pada konsentrasi 100000 ppm. Karena kuantitas emulsi lebih banyak dipengaruhi oleh konsentrasi nanopartikel, maka dengan menambah konsentrasi *hydrophobic silica nanoparticles* maka emulsi masih dapat terbentuk dan memiliki tingkat kestabilan yang baik pada konsentrasi nanopartikel 5000 ppm dan 10000 ppm. Hal ini telah dijelaskan sebelumnya terkait dengan pengaruh perubahan konsentrasi nanopartikel akan mempengaruhi pembentukan emulsi. Dengan demikian pada konsentrasi nanopartikel 5000 ppm dan 10000 ppm dengan salinitas 10000 ppm, emulsi dapat bekerja.



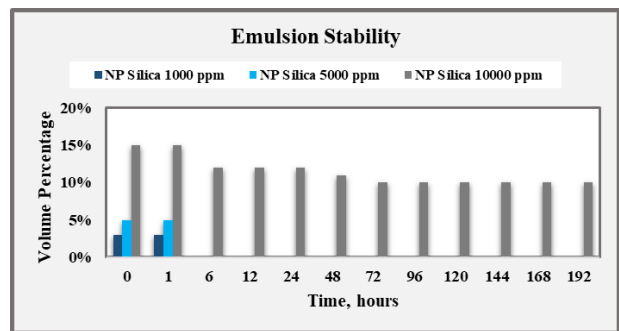
Gambar 5. Grafik Kestabilan Emulsi pada Salinitas 10000 ppm.

Gambar 6., menjelaskan bagaimana performa kestabilan emulsi terjadi pada salinitas 20000 ppm. Grafik tersebut menunjukkan bahwa pada salinitas tersebut emulsi dengan konsentrasi nanopartikel 1000 ppm dan 5000 ppm tidak stabil. Sedangkan pada konsentrasi nanopartikel 10000 ppm emulsi dapat terbentuk dan stabil dengan perolehan jumlah emulsi sebesar 3 %. Hal ini juga menegaskan bahwa kuantitas emulsi sangat dipengaruhi oleh konsentrasi nanopartikel. Semakin besar salinitas (misalnya 20000-50000 ppm) maka *diffuse layer* dan *double layer* juga semakin kecil, akibatnya gaya tarik antar nanopartikel semakin besar yang dapat meningkatkan terjadinya *coalescence* yang menyebabkan emulsi tidak stabil. Dengan meningkatkan konsentrasi nanopartikel, maka jarak antar partikel akan semakin besar, sehingga *energy barrier* menjadi naik untuk mencegah terjadinya *coalescence*. Semakin besar konsentrasi nanopartikel seperti 10000 ppm, maka emulsi akan lebih stabil baik dari segi kuantitas maupun kualitas. Namun konsentrasi nanopartikel yang sangat tinggi dapat menyebabkan *energy barrier* menurun bahkan hilang dan didominasi oleh *energy trap* sebagai akibat dari energi tarik dari gaya *Van der Waals* yang semakin besar yang menyebabkan terjadinya *coalescence* dan ketidakstabilan emulsi.



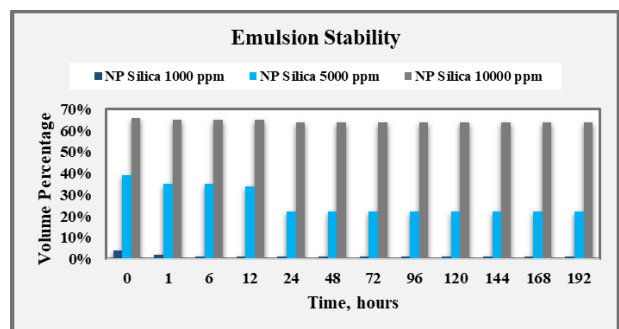
Gambar 6. Grafik Kestabilan Emulsi pada Salinitas 20000 ppm.

Gambar 7., menunjukkan performa kestabilan emulsi dari hasil dispersi antara *iso-octane* dan larutan nanopartikel dengan salinitas 50000 ppm. Hasil emulsi yang tidak stabil ditunjukkan pada konsentrasi nanopartikel 1000 ppm dan 5000 ppm dimana emulsi hanya bertahan hanya selama 1 jam. Pada konsentrasi nanopartikel 10000 ppm, memiliki tingkat kestabilan emulsi yang baik.



Gambar 7. Grafik Kestabilan Emulsi pada Salinitas 50000 ppm.

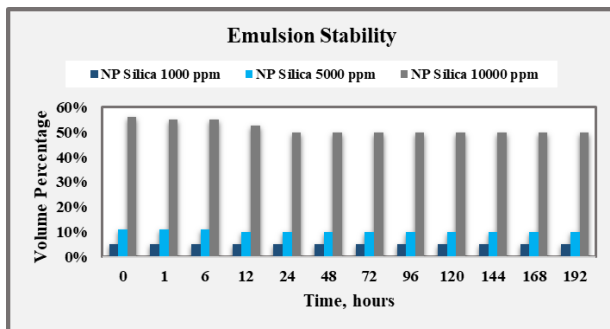
Tingkat kestabilan emulsi yang paling baik ditunjukkan masing-masing konsentrasi nanopartikel pada salinitas 100000 ppm yang bertahan selama 192 jam (**Gambar 8.**). Hal ini menunjukkan bahwa *critical salt concentration* (CSC) terjadi pada 100000 ppm. Berturut-turut jumlah emulsi yang dihasilkan dari hasil dispersi dengan *iso-octane* adalah 4 % pada konsentrasi nanopartikel 1000 ppm, 39 % untuk konsentrasi nanopartikel 5000 ppm, dan 66 % untuk konsentrasi nanopartikel 10000 ppm.



Gambar 8. Grafik Kestabilan Emulsi pada Salinitas 100000 ppm.

Performa kestabilan emulsi setelah 192 jam yang cukup baik juga ditunjukkan pada salinitas 200000 ppm (**Gambar 9.**). Bahkan terjadi peningkatan jumlah emulsi pada konsentrasi nanopartikel yang rendah (1000 ppm) sebesar 1 %. Berturut-turut kuantitas emulsi yang dihasilkan dari hasil dispersi dengan *iso-octane* adalah 5 % pada konsentrasi nanopartikel 1000 ppm, 11 % untuk konsentrasi nanopartikel 5000 ppm dan 56% untuk konsentrasi nanopartikel 10000 ppm. Penambahan konsentrasi nanopartikel akan meningkatkan kuantitas emulsi. Dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kestabilan emulsi secara kualitas sangat dipengaruhi oleh salinitas daripada konsentrasi. Sementara itu pada CSC atau *optimum salinity* disimpulkan

bahwa emulsi lebih stabil secara kualitas dan juga volumenya lebih banyak secara kuantitas. Dimana kualitas dan kuantitas emulsi sangat mempengaruhi viskositas suspensi nanopartikel.



Gambar 9. Grafik Kestabilan Emulsi pada Salinitas 200000 ppm.

V. KESIMPULAN

1. Peningkatan salinitas air formasi dan konsentrasi *hydrophobic silica nanoparticles* akan meningkatkan viskositas suspensi nanopartikel yang akan digunakan sebagai fluida pendesak pada proses EOR. Hal ini disebabkan dengan peningkatan konsentrasi nanopartikel, maka kuantitas emulsi juga semakin meningkat, secara teori semakin banyak emulsi maka viskositas suatu suspensi akan semakin meningkat. Dimana viskositas tertinggi terjadi pada konsentrasi nanopartikel 5000 ppm dengan salinitas 200000 ppm dengan nilai sebesar 1.24 cP.
2. Pengaruh salinitas dan konsentrasi nanopartikel terhadap kestabilan *foam*/emulsi sangat kompleks dan dipengaruhi berbagai faktor seperti gaya tarik-menarik antar *silica nanoparticles* (gaya *Van der Waals*), efek kinetik *Brown* partikel, gaya tarik atau tolak antar muatan elektrostatis partikel dan ion dalam *nanofluid*. Salinitas sangat mempengaruhi kualitas dan proses pembentukan emulsi yang stabil, dimana kualitas emulsi yang stabil tergantung pada kondisi *zeta potential* dari *double layer* sistem emulsi yang dibentuk. Penambahan konsentrasi nanopartikel secara umum akan meningkatkan

kestabilan dan mencegah emulsi pecah atau *coalescence*.

VI. SARAN

1. Dapat dilakukan kajian lebih dalam dengan perbedaan jenis nanopartikel, dan berbagai variasi perbandingan fasa volume (dispersi antara *iso-octane* dengan *nanofluid*).
2. Pengujian secara dinamik atau uji injeksi diperlukan guna mengetahui performa dari *nanofluid* sehingga dapat diketahui perolehan *recovery factor*.
3. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut terkait dengan penelitian ini dengan parameter tambahan yang dapat mempengaruhi tingkat kestabilan emulsi sehingga diperoleh hasil yang lebih optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak David Maurich, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, waktu, dan dukungan serta diskusi yang sangat bermanfaat selama penelitian.

REFERENSI

- Adkins, Stephanie S., Gohil, D., Dickson, Jasper L., Webber, Stephen E., and Johnston, Keith P. 2007. "Water-in-carbon dioxide emulsions stabilized with hydrophobic silica particles," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2007, 9, 6333–6343.
- Al Otaibi, F. M., Kokal, S. L., Chang, Y., Al Qahtani, J. F., & Al Abdulwahab, A. M. (2013). Gelled Emulsion of CO₂-Water-Nanoparticles. SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- Derjaguin, B.V. and Landau, L. (1941) *Acta Physiochim. URSS*, 14, 633.
- Dickson, Jasper L., Binks, Bernard P., Johnston, Keith P. 2004. "Stabilization of Carbon Dioxide-in-Water Emulsions with Silica Nanoparticles," *Langmuir*, Vol. 20, No. 19, 7976-7983.

Kissa E (1999) *Dispersions: characterizations testing, and measurement*. Marcel Dekker, New York.

Metin, C. O., Miranda, C. R., Lake, L.W., and Nguyen, Q. P., *Stability of Aqueous Silica Nanoparticle Dispersions*, Springer, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 13, p. 839–850, 2010.

Metin, C. O., Lake, L. W., Miranda, C. R., Nguyen, Q. P., “Stability of aqueous silica nanoparticle dispersions”, *Journal of Nanoparticle Research*, 2011. 13: p.839-850.

Aveyard, R., Binks, Bernard P., Clint, John H. 2002. “Emulsions stabilized solely by colloidal particles,” *Elsevier, Advances in Colloid and Interface Science*, 503-546.

Jaber Esmaeeli Azadgoleh, Riyaz Kharrat, Nasim Barati, and Ameneh Sobhani, *Stability of Silica Nanoparticle Dispersion in Brine Solution: an Experimental Study*. *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*, Vol. 3 (2014), No. 4, pp. 26-40.

Verway, E.J.W. and Overbeek, J. Th. G. (1948) *Theory of the Stability of Lyophobic Colloids*, Elsevier, Amsterdam.

LAMPIRAN

Tabel 2. Hasil Pengamatan Kestabilan *Foam/Emulsi*.

No.	Brine, ppm	NP Silica Concentration, ppm	Volume, cm ³		Emulsion Stability, %
			t = 0 hour	t = 192 hours	
1		1000	0.4	0.1	25%
2	5000	5000	3.8	3.3	87%
3		10000	4.25	4	94%
4		1000	-	-	-
5	10000	5000	0.4	0.1	25%
6		10000	0.9	0.6	67%
7		1000	-	-	-
8	20000	5000	-	-	-
9		10000	0.3	0.1	33%
10		1000	0.3	0	0%
11	50000	5000	0.5	0	0%
12		10000	1.5	1	67%
13		1000	0.4	0.1	25%
14	100000	5000	3.9	2.2	56%
15		10000	6.6	6.4	97%
16		1000	0.5	0.5	100%
17	200000	5000	1.1	1	91%
18		10000	5.6	5	89%