



## ARTIKEL PENELITIAN

# Peningkatan kualitas air buangan ke laut dengan metode FLOCOM untuk lapangan *offshore* produksi minyak dan gas bumi

Adji Swandito<sup>1</sup>, Herman Amrullah<sup>1</sup>, Sutrisno<sup>1</sup>, Dendy Andalas Putra<sup>1</sup>, Cesaria Riza Asyifa<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Fungsi Production Engineering, Pertamina Hulu Kalimantan Timur, Pertamina Subholding Upstream Region 3 Zona 10, Pasir Ridge, Telaga Sari, Balikpapan Selatan, Kota Balikpapan 76111, Indonesia

<sup>2</sup>M-I Production Chemicals Indonesia, Jalan Jababeka XVIIIE Kav.No. 27A, Cikarang Utara 17530, Jawa Barat, Indonesia

Disubmit 28 September 2021; direvisi 8 November 2021; diterima 19 November 2021



**OBJECTIVES** Wastewater disposal to the sea in oil and gas production is an important and critical part to ensure the continuity of production process and environment. Quality enhancement to reduce oil content in wastewater disposal to the sea could be achieved by injecting chemical in oil and water separation process. Chemical reverse demulsifier base flocculant is generally used for chemical treatment of wastewater disposal. However, excessive injection of flocculant forms flock particle that causes deadlock on operation tools. The purpose of this research was to study the effect of innovative FLOCOM method application in wastewater to the sea quality. **METHODS** The experiment was conducted in offshore Attaka field that had flock problem with FLOCOM method. **RESULTS** FLOCOM method application results showed reduction of oil content in wastewater to sea from 20 mg/L to 10 mg/L and reduction of chemical consumption in offshore Attaka field from 4.6 gallons per thousand barrel oil equivalent to 3.2 gallons per thousand barrel oil equivalent. **CONCLUSIONS** The oil content in the wastewater is getting lower after the application of the FLOCOM method in the Attaka offshore field.

**KEYWORDS** flocculant; FLOCOM method; offshore oil and gas field; reverse demulsifier; wastewater to sea

**TUJUAN** Air buangan ke laut dalam proses produksi minyak dan gas bumi merupakan hal yang penting dan krusial untuk menjamin kesinambungan proses produksi dan lingkungan. Peningkatan kualitas air buangan ke laut dalam rangka menurunkan jumlah minyak terkandung dalam air buangan da-

pat dilakukan dengan cara injeksi bahan kimia dalam proses pemisahan minyak dan air. Bahan kimia yang umumnya digunakan adalah *reverse demulsifier* berbasis flokulan. Namun penggunaan flokulan dalam jumlah banyak dapat menimbulkan permasalahan operasi dengan timbulnya partikel *flock* yang dapat menyebabkan kebuntuan pada alat operasi. Tujuan penelitian ini adalah mempelajari pengaruh aplikasi metode inovasi FLOCOM dalam kualitas air buangan ke laut. **METODE** Penelitian dilakukan di lapangan *offshore* Attaka yang terdapat permasalahan *flock* dengan metode FLOCOM. **HASIL** Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode FLOCOM dapat menurunkan kandungan minyak dalam air buangan ke laut dari 20 mg/L menjadi 10 mg/L serta dapat menurunkan konsumsi injeksi bahan kimia pada lapangan *offshore* Attaka dari 4,6 *gallons per thousand barrel oil equivalent* menjadi 3,2 *gallons per thousand barrel oil equivalent*. **KE-SIMPULAN** Kandungan minyak dalam air buangan semakin rendah setelah pengaplikasian metode FLOCOM di lapangan *offshore* Attaka.

**KATA KUNCI** air buangan ke laut; flokulan; lapangan *offshore* minyak dan gas bumi; metode FLOCOM; *reverse demulsifier*

## 1. PENDAHULUAN

Pengolahan air buangan ke laut yang bersumber dari produced water merupakan salah satu bagian yang penting dan krusial dalam menjamin kesinambungan proses produksi minyak dan gas bumi di lapangan *offshore*. Produced water adalah air dari formasi yang terproduksi bersama dengan air dan kondensat (Bakke dkk. 2013). Pengelolaan Produced water umumnya berupa tahapan *deoil*ing dan *demineralizing* sebelum air dibuang atau digunakan kembali, dengan menggunakan *centrifuge*, *air floaters*, *emulsifiers*, *hydrocyclone*, *membrane separator*, *adsorber*, yang dilakukan dengan penambahan bahan kimia (Patel dkk. 2004). Bahan kimia yang umumnya digunakan dalam pengolahan air buangan ke laut di lapangan *offshore* berupareverse *demulsifier* berbasis flokulan untuk mendapatkan kualitas air buangan ke laut yang mengandung konsentrasi minyak terikut rendah sesuai peraturan baku mutu lingkungan yang berlaku. Aturan yang berlaku menurut baku mutu air limbah bagi usaha eksplora-

\*Korespondensi: [adji.swandito@pertamina.com](mailto:adji.swandito@pertamina.com)



GAMBAR 1. Slop tank penuh dengan polimer floc.

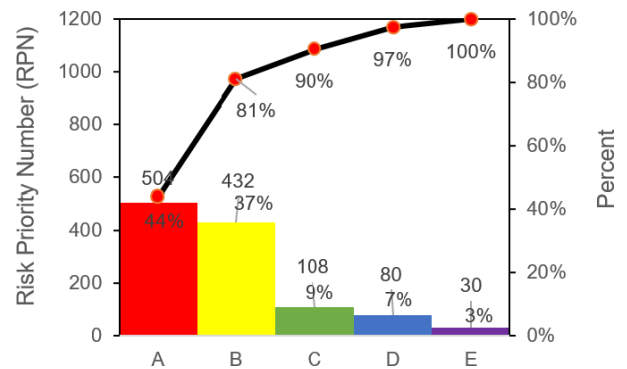
si dan produksi migas lepas pantai pada jenis limbah air terproduksi adalah maksimum 50 mg/L kadar minyak dan lemak (Timur 2011). Produced water memiliki sifat (fisika maupun kimia) dan volume yang bervariasi bergantung pada lokasi geografis area produksi, formasi geologis, tipe hidrokarbon yang diproduksi, dan umur reservoir (Clark and Veil 2009).

Penggunaan flokulan dengan berat molekul tinggi di lapangan offshore banyak menimbulkan permasalahan operasi. Hasil pengikatan butiran minyak dalam air terproduksi oleh flokulan menghasilkan polimer floc yang sangat banyak dan keras. Produksi floc yang berlebih menyebabkan adanya penyumbatan pada peralatan pengolahan air serta dapat mengakibatkan potensi lost production opportunity. Kondisi ini juga membatasi kenaikan dosis flokulan untuk mencapai tingkat konsentrasi kandungan minyak dalam air buangan yang lebih rendah lagi, karena dengan penambahan dosis akan semakin meningkatkan produksi polimer floc. Selain itu, penggunaan bahan kimia yang cukup tinggi juga menambah beban biaya transportasi kapal untuk pengangkutan ke titik injeksi di remote-remote platform offshore.

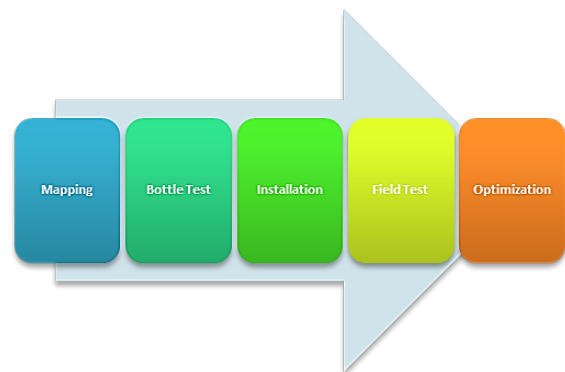
Dalam rangka mencari faktor penyebab masalah terjadinya pembentukan polimer floc di fasilitas produksi, dilakuk-

TABEL 1. Analisis FMEA proses pengolahan air buangan ke laut.

Faktor penyebab	S	O	D	RPN	% relatif	% kumulatif
Cara injeksi bahan kimia belum tepat	9	8	7	504	44	44
Flokulan berbasis polimer	9	8	6	432	37	81
Keterbatasan sumber daya manusia	3	6	6	108	9	90
Keterbatasan peralatan proses	4	5	4	80	7	97
Baku mutu lingkungan offshore	3	5	2	30	3	100
<b>Total Risk Priority Number (RPN)</b>				<b>1154</b>	<b>100</b>	



GAMBAR 2. Analisis diagram Pareto proses pengolahan air buangan ke laut.



GAMBAR 3. Tahapan inovasi FLOCOM pada proses pengolahan air buangan ke laut.

an analisis Failure Modes & Effects Analysis (FMEA) dan diagram Pareto. Pada Tabel 1 dan Gambar 2, analisis FMEA dan diagram Pareto mengambil 5 penyebab permasalahan yang terjadi dan melakukan pemberian skor Risk Priority Number (RPN) pada masing-masing penyebab permasalahan. Hasil menunjukkan penyebab permasalahan dengan RPN tertinggi dalam pembentukan polimer floc yaitu metode injeksi bahan kimia yang tidak tepat dan bahan kimia yang digunakan berupa flokulan berbasis polimer sehingga menghasilkan polimer floc berupa gel dan sangat kental seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Untuk mengatasi permasalahan polimer floc sekaligus meningkatkan kualitas air buangan ke laut di lapangan offshore, inovasi dan inisiatif yang dilakukan adalah mengaplikasikan metode FLOCOM di lapangan offshore yang meliputi:



GAMBAR 4. Sampel lapangan offshore Attaka: (1) tanpa injeksi bahan kimia; (2) injeksi flokulan; (3) injeksi koagulan.

TABEL 2. Skor parameter kandidat pada sampel lapangan *offshore* Attaka.

Skor	Kecepatan <i>water drop</i>	Turbiditas	<i>Oil/water interface</i>
1	<i>Water Drop</i> lebih lambat dari blangko	Turbiditas sampel > Turbiditas Blangko	<i>Raggy Interface</i>
2	<i>Water Drop</i> sama dengan blangko	Turbiditas sampel = Turbiditas Blangko	<i>Slightly Raggy Interface</i>
3	<i>Water Drop</i> lebih cepat dari blangko	Turbiditas sampel < Turbiditas Blangko	<i>Clean Interface</i>

1. Inisiasi penggunaan kombinasi bahan kimia *demulsifier*, flokulan, dan koagulan untuk mengurangi pembentukan polimer *flock* dan meningkatkan kualitas air buangan ke laut (kandungan minyak lebih rendah).

Minyak mentah yang diproduksi memerlukan bahan kimia untuk membantu separasi pada emulsi yang merupakan campuran heterogen dari dua atau lebih cairan yang tidak dapat bercampur (*immiscible*). Pada kondisi normal, minyak mentah terproduksi akan mengandung emulsi air dalam minyak. Pada produksi minyak dengan kandungan air lebih besar dari 70% terdapat *reverse emulsion* yaitu minyak dalam air. Hal tersebut menjadikan proses pemisahan harus bekerja pada dua jenis emulsi yang berbeda yaitu emulsi air dalam minyak dan emulsi minyak dalam air. Proses pemisahan emulsi air dalam minyak dibantu oleh bahan kimia *demulsifier*, sementara proses separasi minyak dalam air dibantu oleh bahan kimia flokulan dan koagulan (*reverse demulsifier*). Koagulan dan flokulan telah digunakan secara luas untuk purifikasi air pada pengelolaan air limbah industri. Metode ini menjadi pilihan pada banyak industri karena kemudahan operasi, efisiensi yang tinggi, biaya yang rendah, dan penggunaan energi yang lebih rendah dibandingkan dengan metode pengelolaan air limbah lainnya (Altaher dkk 2011). Koagulasi mengindikasikan proses destabilisasi partikel koloid dan suspensi partikel yang sangat halus sehingga dapat terjadi aglomerasi. Flokulasi adalah proses destabilisasi partikel untuk membentuk kelompok *flock* yang lebih besar agar dapat terpisah dari air (Farajnezhad dkk. 2012). Penggunaan koagulan untuk menurunkan turbiditas bergantung pada tipe koloid dalam suspensi, suhu, pH, komposisi bahan kimia dalam air, tipe dan dosis koagulan, waktu dan cara pencampuran untuk mendispersikan bahan kimia dan formasi *flock* (Hassan and Mousa 2016). Pada tahap ini, penemuan kombinasi poin injeksi dan laju injeksi masing-masing bahan kimia pada tiap minyak mentah dengan karakter emulsi yang berbeda dari setiap platform di *offshore* telah menunjukkan peningkatan signifikan pada proses separasi emulsi sehingga diperoleh kandungan minyak yang lebih rendah pada air buangan ke laut. Dosis optimal koagulan atau flokulan akan ditetapkan sebagai *value overhead* atau yang lebih rendah, dari dosis di mana tidak ada lagi perubahan yang signifikan pada efisiensi pemisahan kontaminan air buangan dengan ditambahkan dosis koagulan maupun flokulan (Hassan and Mousa 2016).

2. Inisiasi penanganan bahan kimia pada platform yang terindikasi mengalami proses pemisahan yang tidak bagus.



(a)



(b)



(c)



(d)

GAMBAR 5. Sampel *bottle test* pada platform-platform di Attaka (a) Lima; (b) Bravo; (c) Foxtrot; (d) Attaka Production.

Minyak mentah terproduksi pada area *offshore* umumnya memiliki kandungan *fine solid* yang menjadi surfaktan alami dan dapat menjadi penstabil *steric* yang mencegah molekul air bergabung. Identifikasi pada sumur platform yang memiliki emulsi yang lebih stabil sehingga memerlukan bantuan bahan kimia untuk proses separasi lebih awal. Bahan kimia yang diinjeksi di platform *offshore* membuat reaksi bahan kimia dengan emulsi terjadi lebih lama pada minyak mentah terproduksi yang mengalir dari platform hingga mencapai fasilitas proses di darat. Injeksi bahan kimia pada platform juga dapat membantu mencegah emulsi bertambah stabil akibat agitasi yang diterima minyak mentah saat mengalir dari platform *offshore* menuju fasilitas proses *onshore* (turbulensi dan *shear* dari *choke*, *valve*, pompa, dan *pipeline*). Pada tahap ini, penambahan bahan kimia pada platform *offshore* telah membantu proses separasi minyak terproduksi.

**TABEL 3.** Hasil penskoran kandidat pada sampel lapangan *offshore* Attaka.

No.	Sampel	Rasio mg/L	Settling data (1 menit)		Kecepatan <i>water drop</i>	Turbiditas	O/W interface	Skor final
			Minyak	Air				
1	Sampel + Flokulan	10	5	95	3.0	3.0	2.0	2.7
2	Sampel + Koagulan	10	3	97	2.0	2.0	2.0	2.0

Perencanaan dan desain inovasi FLOCOM meliputi tahapan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, yaitu:

1. *Mapping*, melakukan identifikasi emulsion tendency fluida produksi dari masing-masing platform
2. *Bottle test*, melakukan pengujian laboratorium bahan kimia terhadap fluida produksi.
3. *Installation*, melakukan instalasi fasilitas injeksi bahan kimia.
4. *Field test*, melakukan uji coba bahan kimia di lapangan.
5. *Optimization*, melakukan optimisasi dosis bahan kimia.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Bahan *bottle test*

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *crude oil* dari platform-platform *offshore* Attaka. Bahan kimia *demulsifier* EPT-2604 N2 dan bahan kimia *reverse demulsifier* EPT-4635 berbasis koagulan serta WT-510 berbasis flokulan.

### 2.2 Cara *bottle test*

Sebanyak 100 mL *crude oil* dari platform-platform *offshore* Attaka dimasukkan ke dalam botol sampel kaca 180 mL. Bahan kimia *demulsifier* atau *reverse demulsifier* dimasukkan ke dalam botol sampel sejumlah rasio konsentrasi yang diuji coba. Botol sampel diberikan agitasi yang disesuaikan dengan

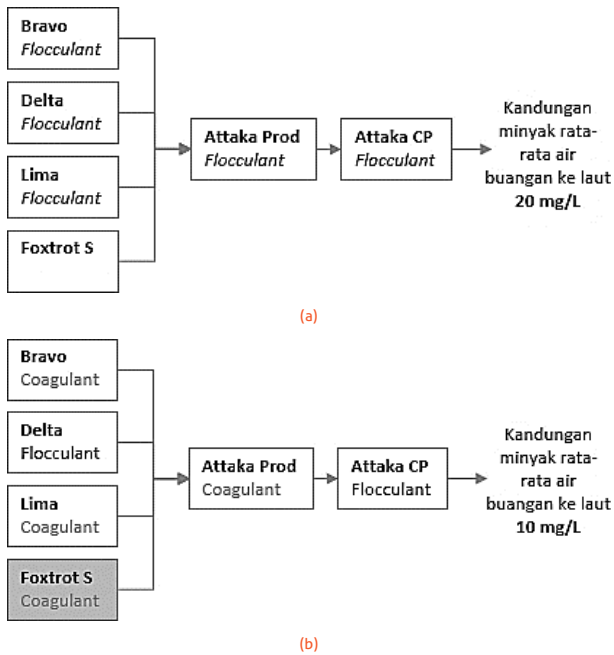
jarak pipa antar lokasi, semakin panjang pipa maka semakin lama frekuensi agitasi yang diberikan pada sampel. Suhu botol sampel disesuaikan dengan suhu pada pipa di *offshore* menggunakan penangas air. Pada percobaan kali ini digunakan suhu 45 °C. Pada akhir proses, dihitung *settling time* selama 1 menit. Kemudian sampel dinilai secara kualitatif berdasarkan parameter kecepatan *water drop*, warna dan kejernihan air, O/W interface, dan kualitas air. Pada setiap percobaan *bottle test* selalu memuat satu sampel sebagai blangko yaitu sampel yang tidak diberikan tambahan bahan kimia ke dalamnya.

### 2.3 Pemberian skor hasil *bottle test* pada FLOCOM

Pada tahapan ini setelah menentukan produk flokulan dan koagulan yang telah dijadikan kandidat untuk diinjeksi pada platform di *offshore*, hasil uji *bottle test* diperoleh dengan memasukkan skor pada tiap parameter penilaian observasi *bottle test*. Parameter penilaian *bottle test* terdiri dari kecepatan *water drop*, turbiditas pada air di tiap sampel, interface atau batas antara minyak dan air. Uji tes turbiditas menggunakan *turbiditymeter* untuk menentukan kualitas air berdasarkan jumlah emulsi dan padatan tersuspensi dalam air sampel *bottle test*. Hasil pengamatan pada tiap sampel kemudian merujuk pada Tabel 2 untuk memudahkan pemilihan bahan kimia flokulan atau koagulan pada suatu titik injeksi pada setiap platform Attaka.

**TABEL 4.** Hasil *bottle test* pada platform-platform di Attaka.

Platform	No.	Demulsifier		Reverse demulsifier		Settling data (1 menit)		Settling quality	
		Bahan Kimia	Rasio mg/L	Bahan Kimia	Rasio mg/L	Minyak	Air	Kualitas Minyak	Kualitas Air
Lima	1	Blangko	0	Blangko	0	2	98	Brown	Milky
	2	Demulsifier	0	Flokulan	10	3	97	Brown	Milky
	3	Demulsifier	5	Flokulan	10	4	96	Black	Hazy
	4	Demulsifier	10	Flokulan	10	5	95	Black	Hazy
	5	Demulsifier	15	Flokulan	10	5	95	Black	Hazy
Bravo	1	Blangko	0	Blangko	0	15	85	Brown	Milky
	2	Demulsifier	0	Flokulan	10	15	85	Brown	Milky
	3	Demulsifier	5	Flokulan	10	15	85	Brown	Milky
	4	Demulsifier	10	Flokulan	10	17	83	Black	Hazy
	5	Demulsifier	15	Flokulan	10	17	83	Black	Hazy
Foxtrot	1	Blangko	0	Blangko	0	4	96	Brown	Milky
	2	Demulsifier	0	Flokulan	10	4	96	Brown	Milky
	3	Demulsifier	5	Flokulan	10	5	96	Black	Hazy
	4	Demulsifier	10	Flokulan	10	5	95	Black	Hazy
	5	Demulsifier	15	Flokulan	10	5	95	Black	Hazy
Attaka Production	1			Blangko	0	4	96	Brown	Milky
	2			Flokulan	10	4	96	Brown	Hazy
	3			Koagulan	10	5	96	Black	Milky



GAMBAR 6. Injeksi bahan kimia (a) sebelum aplikasi metode FLOCOM; (b) sesudah penerapan metode FLOCOM.

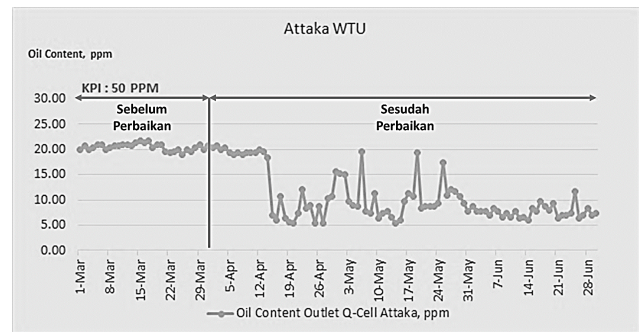
Skor dari seluruh parameter pada tiap sampel kemudian dirata-rata dan sampel yang mengandung produk bahan kimia kandidat dengan *average score* tertinggi kemudian dipilih sebagai hasil *final bottle test* untuk diujikan dalam *field trial*.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

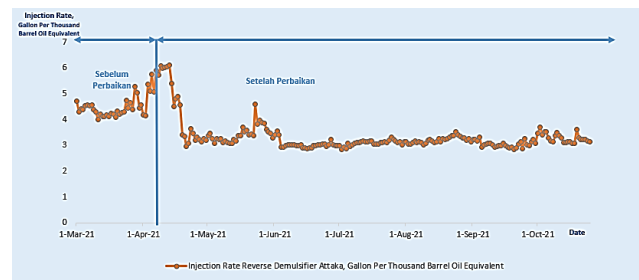
Penerapan Metode FLOCOM ini dilakukan di lapangan offshore Attaka Pertamina Subholding Upstream Region 3 Zona 10 Pertamina Hulu Kalimantan Timur. Dari hasil tahapan mapping dan *bottle test* di lapangan, *offshore* Attaka diperoleh *score average* tertinggi pada penggunaan bahan kimia EPT-4635 berbasis koagulan dan *score average* yang lebih rendah untuk bahan kimia WT-510 berbasis flokulan seperti tertera pada Tabel 2.

Dari Tabel 3, maka dibuat penelitian untuk platform-platform lain di Attaka dengan hasil seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Dari hasil pemberian skor kandidat Tabel 3, Tabel 4 dan Gambar 5 maka diaplikasikan bahan kimia campuran flokulan dan koagulan di lapangan offshore Attaka. Gambar 6 menunjukkan injeksi bahan kimia sebelum dan sesudah penerapan metode FLOCOM.

Di lapangan *offshore* Attaka, air buangan ke laut mengandung minyak sebesar 20 mg/L. Setelah penerapan metode FLOCOM, kandungan minyak dalam air buangan di lapangan offshore Attaka semakin rendah dan mencapai 10 mg/L pada tiga bulan pertama aplikasi metode FLOCOM sesuai Gambar 7. Dengan penerapan metode FLOCOM, proses pemisahan minyak dan air menjadi semakin baik yaitu kandungan minyak pada air buangan semakin rendah. Proses pemisahan yang baik juga membuat dosis pemakaian bahan kimia semakin rendah. Sebelum aplikasi metode FLOCOM, di lapangan *offshore* Attaka menggunakan bahan kimia sebanyak 4,6 *galons per thousand barrel oil equivalent* dan setelah penerapan metode FLOCOM penggunaan bahan kimia turun menjadi 3,2 *galons per thousand barrel oil equivalent* seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



GAMBAR 7. Kandungan minyak (mg/L) dari air buangan ke laut di lapangan Attaka setelah penerapan metode FLOCOM.



GAMBAR 8. Dosis bahan kimia *reverse demulsifier* di lapangan Attaka setelah penerapan metode FLOCOM.

Penerapan metode FLOCOM dapat meningkatkan kualitas proses separasi minyak dan air serta kualitas air buangan ke laut (kandungan minyak lebih rendah) di lapangan *offshore* yang memiliki permasalahan terbentuknya partikel *flock*. Pada awal perbaikan menggunakan metode FLOCOM konsumsi bahan kimia mengalami kenaikan di lapangan Attaka dalam rangka menjaga kestabilan kandungan minyak dalam air buangan tidak melampaui batas maksimum 50 mg/L pada saat perubahan bahan kimia dilakukan pada masing-masing platform di lapangan Attaka.

Penurunan jumlah kandungan minyak pada air buangan di lapangan Attaka dan penurunan konsumsi bahan kimia dapat diperoleh akibat kombinasi dari bahan kimia *reverse demulsifier* jenis flokulan dan koagulan yang mampu bekerja dengan optimal saat dikombinasikan untuk pengelolaan air buangan di lapangan Attaka. Bahan kimia *reverse demulsifier* jenis koagulan dapat melakukan destabilisasi pada molekul minyak dengan menetralkan muatan ion negatif pada permukaan molekul minyak. Koagulan yang digunakan berupa *water soluble polimer* mengandung gugus fungsi (*high charge density*) yang memiliki kation bermuatan positif untuk menetralkan muatan negatif pada permukaan molekul minyak. Sementara untuk menghilangkan partikel minyak secara menyeluruh dari air, molekul minyak yang telah ternetralkan oleh koagulan perlu membentuk aglomerasi *flock* yang distabilkan menggunakan *polymer bridging* oleh flokulan. Flokulan mengandung molekul dengan berat molekul yang tinggi untuk membentuk *flock-flock* yang tetap stabil pada saat diberikan agitasi (M-I SWACO 2014).

### 4. KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat disimpulkan:

1. Kandungan minyak dalam air buangan semakin rendah setelah pengaplikasian metode FLOCOM di lapangan

*offshore* Attaka dari 20 mg/L menjadi 10 mg/L kandungan minyak.

2. Dosis bahan kimia yang digunakan semakin rendah setelah penerapan metode FLOCOM di lapangan *offshore* Attaka dari 4,6 *galons per thousand barrel oil equivalent* menjadi 3,2 *galons per thousand barrel oil equivalent*.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyelesaian penelitian ini, yaitu:

1. Muhammad Luthfi Ferdiansyah, selaku *Manager Production Engineering* yang telah memberikan dukungan selama pelaksanaan penelitian ini.
2. Teman-teman *Field Technician MI* yang telah banyak membantu dalam kegiatan *bottle test* dan pengukuran kandungan minyak pada sampel di lapangan Attaka.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Altaher H, ElQada E, Omar W. 2011. Pretreatment of wastewater streams from petroleum/petrochemical industries using coagulation. *Advances in Chemical Engineering and Science*. 1(4):245–251. doi:10.4236/aces.2011.14035.
- Bakke T, Klungs J, Sanni S. 2013. Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the norwegian offshore petroleum industry. *Marine Environmental Research*. 92:154–169. doi:10.1016/j.marenvres.2013.09.012.
- Clark CE, Veil JA. 2009. Produced water volumes and management practices in the united states. Argonne: Argonne National Laboratory. doi:10.2172/1007397.
- Farajnezhad H, Gharbani P, Branch A. 2012. Coagulation treatment of wastewater in petroleum industry using poly aluminium chloride and ferric chloride. *IJRRAS*. 13(1):306–310.
- Hassan AA, Mousa KM. 2016. Coagulation/flocculation process for produced water treatment. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 6(2):551–555. <http://inpressco.com/category/ijcet>.
- M-I SWACO. 2014. Production chemistry manual. Paris: Schlumberger. <https://www.slb.com/companies/m-i-swaco>.
- Patel C, Barrufet M, Petriciolet B. 2004. Effective resource management of produced water in oil & gas operations. Paper presented at: Canadian International Petroleum Conference; Calgary, Alberta. doi:10.2118/2004-219.
- Timur PDPK. 2011. Pengelolaan kualitas air dan pengendalian pencemaran no. 2 tahun 2011. <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/32978/perda-prov-kalimantan-timur-no-2-tahun-2011>.