

PENGUNAAN *FRACSEAL* DAN CaCO_3 PADA HPWBM UNTUK MENEGAH *TOTAL LOST CIRCULATION* PADA SUMUR XY1

Guis Pangeran Lemuyaq^{1*}, Muhammad Rizqie Fathan Rahman¹, Baiq Maulinda Ulfah¹

¹Teknik Perminyakan, Sekolah Tinggi Teknologi Migas Balikpapan

*E-mail: Guispangeranl@gmail.com

ABSTRACT

Drilling mud is a crucial element factor in the drilling process, serving to clean cuttings also resolve downhole issues. High-Performance Water-Based Mud (HPWBM) is a significant advancement, utilizing polyamine to inhibit water absorption in shale and clay formations while offering ecological and economic benefits. A major challenge in drilling is lost circulation, where mud flows into formation gaps due to pressure differentials or formation characteristics. This study focuses on an HPWBM innovation using Calcium Carbonate CaCO_3 and Fracseal as Lost Circulation Materials (LCM) to treat total lost circulation. CaCO_3 and Fracseal act as effective plugging agents for fractures and pores. The objective is to analyze the performance of this system by evaluating the changes in rheological properties and the effectiveness of Fracseal dosages across different well sections, specifically the 17-1/2", 12-1/4", and 8-1/2" holes. The results demonstrate that this innovative mud system effectively restores wellbore stability and prevents severe mud loss, offering a viable solution that enhances safety, efficiency, and provides potential cost savings in oil and gas drilling operations.

Keywords: *Lost Circulation, HPWBM, LCM, FRACSEAL, CaCO_3 , Filtrate*

ABSTRAK

Operasi pemboran pada sumur xy1 menghadapi masalah yang cukup signifikan berupa *lost circulation* (hilang sirkulasi) dan *reactive shale* pada formasi Intermediate hingga zona Produksi. Masalah ini berakar pada kondisi litologi yang didominasi oleh serpih reaktif dan formasi yang berpotensi memiliki rekahan, sehingga lumpur pemboran hilang ke dalam formasi. Sebagai solusi, dirancang sebuah sistem lumpur inovatif berbasis *High-Performance Water-Based Mud* (HPWBM). Tujuan dari metode ini adalah memanfaatkan sistem HPWBM dengan polyamine untuk menghambat interaksi air dengan lempung dan serpihan-serpihan reaktif, sehingga mencegah *swelling clay*, sementara untuk *Lost Circulation Material* (LCM) berupa *Fracseal* dan Kalsium Karbonat CaCO_3 bertujuan untuk menyumbat pori-pori atau celah dan rekahan secara efektif guna menghentikan kehilangan lumpur. Berdasarkan hal tersebut penelitian ini menunjukkan bahwa dalam pengaplikasian sistem HPWBM yang dioptimalkan dengan kombinasi *Fracseal*, CaCO_3 dan Nilai API *Filtrate* yang diperoleh selama pengujian adalah 3,8 mL/30 menit pada trayek 17-1/2", 4,0 mL/30 menit pada trayek 12-1/4", dan 2,4 mL/30 menit pada trayek 8-1/2". Berdasarkan data hasil pengujian tersebut maka akan mampu mengatasi masalah *Lost circulation* dan ketidakstabilan lubang sumur secara efektif, sehingga menghasilkan operasi pemboran yang lebih aman, efisien, dan stabil.

Kata kunci: *Lost circulation, HPWBM, LCM, FRACSEAL, CaCO_3 , Filtrate*

PENDAHULUAN

Pemboran pada sumur *High Pressure High Temperature* (HPHT) merupakan salah satu tantangan utama dalam operasi pemboran yang cukup kompleks. Adanya pengaruh formasi seperti formasi reaktif dapat menyebabkan swelling clay dan differential sticking, di sisi lain dapat memperparah potensi *loss circulation* jika berada pada formasi karbonat (Ali et al., 2020) (Geri et al., 2024). Kondisi HPHT tidak hanya mempercepat degradasi thermal pada lumpur water-based, tetapi juga dapat menurunkan efektivitas *Loss Circulation Material* (LCM), di mana penelitian terkini dari (Lin et al., 2024) menunjukkan bahwa pada temperatur di atas 260°F, efektivitas sealing LCM konvensional dapat menurun hingga 40%. Studi oleh (Elkatatny et al., 2020) lebih lanjut mengkonfirmasi bahwa lebih dari 90% kasus *loss circulation* pada sumur HPHT terjadi di formasi dengan karakteristik reaktif dan zona lemah, menciptakan degradasi bagi lumpur memicu *loss circulation* yang kemudian memperparah ketidakstabilan formasi.

Tuntutan performa lumpur pada kondisi ekstrem ini menghadapi keterbatasan sistem konvensional. *Water-Based Mud* (WBM) memiliki keterbatasan karena kecenderungannya mengalami degradasi termal yang menyebabkan efektivitas pengendalian tekanan dan sealing berkurang secara signifikan (Ibrahim et al., 2024). Sementara, penggunaan *Oil-Based Mud* (OBM) yang memiliki ketahanan termal lebih baik dibatasi oleh isu lingkungan dan biaya pengolahan limbah yang tinggi. Oleh karena itu, pengembangan sistem lumpur alternatif yang mampu menggabungkan kestabilan termal OBM dan karakter ramah lingkungan WBM menjadi kebutuhan mendesak. Dalam konteks ini, *High-Performance Water-Based Mud* (HPWBM) menawarkan stabilitas kimia lebih baik dibandingkan *Water-Based Mud* (WBM) konvensional serta dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan *Oil-Based Mud* (OBM) (Goswami & Sulthan, 2025). Namun, pada kondisi HPHT di atas 250°F, HPWBM tetap berpotensi mengalami degradasi termal yang berdampak pada perubahan sifat reologi dan filtrasi akibat menurunnya stabilitas aditif penyusunnya (Affede et al., 2023).

Sumur XY1 merepresentasikan contoh nyata tantangan operasional tersebut dengan total kedalaman mencapai 10.250 ft TVD dan temperatur bottomhole hingga 360°F pada production section. Variasi litologi pada sumur ini yang mencakup formasi lempung reaktif hingga zona karbonat berpori menunjukkan bahwa stabilitas reologi dan filtrasi lumpur merupakan faktor kunci dalam mencegah kehilangan sirkulasi. Oleh karena itu, parameter laboratorium seperti *plastic viscosity* (PV), *yield point* (YP), *gel strength*, dan *API filtrate* digunakan untuk menilai kemampuan sistem lumpur dalam mengontrol reaktivitas shale serta membentuk *filter cake* yang rapat di zona *loss circulation*.

Namun, meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah membahas efektivitas *Lost Circulation Material (LCM)* pada sistem berbasis air, studi yang secara simultan mengevaluasi kestabilan termal *High-Performance Water-Based Mud (HPWBM)* beserta peran kombinasi *LCM* berbasis serat (*Fracseal*) dan granular (CaCO_3) pada beberapa trayek pemboran *High Pressure High Temperature (HPHT)* masih sangat terbatas. Beberapa studi mengonfirmasi bahwa *LCM* granular seperti CaCO_3 secara signifikan meningkatkan tekanan *sealing* dan efektivitas pencegahan *lost circulation* dalam sistem *water-based mud under HPHT conditions* (Klungtvedt & Saasen, 2022), sementara kombinasi dengan material fibrous seperti *Fracseal* dapat mengoptimalkan pembentukan filter cake yang stabil (Fritoli et al., 2021). Namun, hubungan kuantitatif antara perubahan parameter reologi dan laju filtrasi *HPWBM* setelah paparan termal masih belum terjelajahi secara komprehensif.

Fracseal, sebagai material fibrous organik, didesain khusus untuk membentuk jaringan serat yang saling terikat (*matting effect*) dalam lumpur. Mekanisme utamanya adalah dengan menciptakan jembatan (*bridging*) pada celah mikro hingga makro di formasi dan memperkuat struktur *filter cake* yang dibentuk oleh material granular seperti CaCO_3 . Sinergi antara kemampuan pengisian ruang pori oleh partikel dan pembentukan jaringan oleh serat inilah yang dihipotesiskan dapat menghasilkan lapisan penyekat yang lebih tangguh dan stabil secara termal (Guo et al., 2023).

Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan menganalisis hubungan antara perubahan parameter reologi dan laju filtrasi *High-Performance Water-Based Mud (HPWBM)* setelah uji *hot rolling*, sehingga dapat menggambarkan bagaimana degradasi termal memengaruhi efektivitas *Lost Circulation Material (LCM)* dalam mencegah kehilangan sirkulasi total. Pendekatan eksperimental dilakukan dengan memodifikasi *HPWBM* menggunakan kombinasi *Fracseal* dan CaCO_3 , kemudian menguji performanya melalui simulasi kondisi termal yang mewakili trayek *intermediate* hingga *production* pada Sumur XY1.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa sistem *HPWBM* yang dimodifikasi dengan kombinasi *Fracseal* dan CaCO_3 dalam mencegah *total lost circulation* pada Sumur XY1, melalui analisis perubahan parameter reologi dan filtrasi setelah uji *hot rolling* yang merepresentasikan kondisi termal trayek *intermediate* hingga *production*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap kinerja *HPWBM* dan efektivitas *LCM* pada lingkungan pemboran *HPHT*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang secara eksperimental untuk mengevaluasi kinerja sistem High-Performance HPWBM yang dimodifikasi dengan kombinasi LCM berupa *Fracseal* (fibrous) dan CaCO_3 (granular). Simulasi kondisi HPHT dilakukan melalui uji *hot rolling* guna merepresentasikan kondisi trayek intermediate hingga production pada Sumur XY1. Parameter yang diamati meliputi densitas, sifat reologi, dan filtrasi sesuai standar API RP 13B-1 (2021).

Material dan Formulasi HPWBM

Tabel 1. Komposisi HPWBM tiap trayek

Material	Trayek 17-1/2" Hole		Trayek 12-1/4" Hole		Trayek 8-1/2" Hole	
	Conc.	Volume	Conc.	Volume	Conc.	Volume
	(ppb)	(mL)	(ppb)	(mL)	(ppb)	(mL)
Fresh Water	282.26	282.26	254.96	254.96	223.11	223.11
NaOH	0.90	0.42	1.35	0.63	3.25	1.53
Bentonite	1.25	0.50	2.00	0.80	5.00	2.00
PAC-LV	1.60	1.07	2.50	1.67	7.00	4.67
Starch	3.00	2.00	2.00	1.33	0.00	0.00
Soltex	6.00	4.00	6.00	4.00	6.00	4.00
Resinex	2.00	1.82	3.50	3.18	5.00	4.55
CaCO_3	10.00	3.85	10.00	3.85	10.00	3.85
<i>Fracseal</i>	6.00	6.67	6.00	6.67	6.00	6.67
Barite	110.00	26.19	218.00	51.90	321.00	76.43
KCl	26.50	13.38	26.50	13.38	26.50	13.38
XCD Polymer	1.35	0.84	1.00	0.63	4.50	2.81
Polyamine	7.91	7.00	7.91	7.00	7.91	7.00
Total Volume		350		350		350.00

Formulasi HPWBM disesuaikan secara progresif terhadap kondisi termal dan tekanan yang meningkat dari trayek 17-1/2" hingga 8-1/2". Tabel 1 menunjukkan komposisi bahan yang digunakan untuk setiap trayek. Bahan utama meliputi bentonite sebagai pembentuk viskositas dasar, *PAC-LV* dan *starch* sebagai pengontrol filtrasi, *polyamine* dan *KCl polymer* sebagai inhibitor shale, serta kombinasi LCM berbasis *Fracseal* dan CaCO_3 sebagai pengendali kehilangan sirkulasi.

Formulasi HPWBM disusun untuk menyesuaikan dengan kompleksitas kondisi HPHT di

setiap trayek. Dalam praktik penelitian ini, konsentrasi *Fracseal* divariasikan secara bertahap (2, 4, dan 6 ppb) untuk mengevaluasi korelasi antara peningkatan kandungan serat terhadap performa filtrasi, yang diukur melalui volume API filtrate. Pada ketiga trayek tersebut untuk konsentrasi CaCO_3 ditetapkan sebesar 10 ppb. Strategi ini guna melihat korelasi antara pengaruh penambahan *Fracseal* terhadap nilai API Filtrate, sekaligus mencerminkan pendekatan mitigasi proaktif melalui penggabungan material granular (CaCO_3) dan fibrous (*Fracseal*). Penyesuaian komposisi dilakukan untuk menjaga kestabilan reologi dan kemampuan sealing seiring meningkatnya *Bottom Hole Temperature (BHT)* dari 260°F hingga 360°F.

Metode Pengujian Laboratorium

Sampel HPWBM dicampur secara homogen dan dilakukan proses uji *hot rolling* selama 16 jam pada 260°F, 300°F, dan 360°F untuk mensimulasikan trayek *Intermediate* hingga *Production*. Sifat reologi (*PV*, *YP*, *Gel Strength*) diukur dan uji filtrat dilakukan sesuai dengan *API RP 13B-1 (2021)*. Perubahan reologi dan filtrasi digunakan untuk menilai degradasi termal HPWBM serta efektivitas kombinasi *Fracseal* dan CaCO_3 dalam pembentukan *filter cake* pada rentang suhu 260–360°F. Pendekatan eksperimental ini merepresentasikan simulasi kondisi termal aktual di Sumur XY1, sehingga hasil laboratorium dapat digunakan untuk mengevaluasi kecenderungan degradasi HPWBM dan potensi kehilangan sirkulasi pada lingkungan HPHT.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bagian ini membahas hasil pengujian laboratorium terhadap sistem HPWBM dengan modifikasi LCM berupa *Fracseal* dan CaCO_3 . Analisis hasil difokuskan pada dua aspek utama, yaitu sifat reologi lumpur serta karakteristik filtrasi yang mencerminkan efektivitas sistem LCM dalam menekan kehilangan sirkulasi. Selanjutnya, hubungan antara parameter reologi dan filtrasi dianalisis untuk memahami sejauh mana kombinasi *Fracseal* dan CaCO_3 dapat mempertahankan performa HPWBM pada lingkungan ekstrem. Pembahasan dilakukan secara bertahap mulai dari gambaran umum kinerja lumpur, karakteristik reologi, respon filtrasi, hingga korelasi antar parameter dan implikasinya terhadap desain lumpur HPHT di lapangan.

Konteks Operasional Sumur XY1

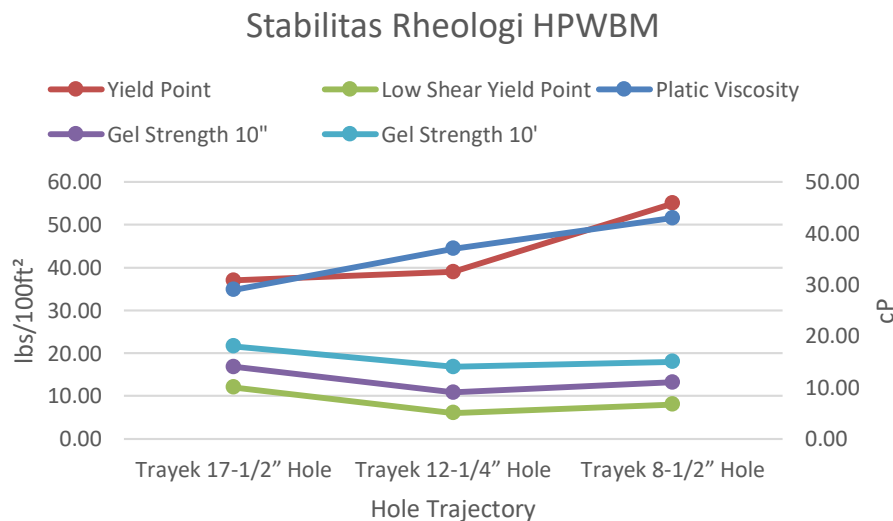
Sumur XY1 memiliki karakteristik HPHT dengan tantangan utama terletak pada tiga section terakhir, yaitu *Intermediate 1* (17-1/2"), *Intermediate 2* (12¼"), dan *Production* (8-1/2"), dengan temperatur bottomhole (BHT) yang meningkat dari 260°F hingga 360°F. Kenaikan

temperatur pada tiap section ini berpotensi menyebabkan degradasi termal pada sistem lumpur sehingga menuntut lumpur pemboran dengan modifikasi termal yang baik.

Dari aspek geologinya, karakteristik formasi pada zona intermediate didominasi oleh batuan reaktif secara kimia dengan kandungan mineral lempung signifikan yang berpotensi menyebabkan *swelling* dan *instability* lubang bor. Sementara itu, zona produksi dicirikan oleh sekuens karbonat dengan porositas dan permeabilitas tinggi, yang membentuk kondisi ideal untuk terjadinya loss circulation akibat ketidakmampuan sistem lumpur dalam membentuk filter cake yang efektif.

Oleh karena itu parameter seperti plastic viscosity (PV), yield point (YP), gel strength, dan API filtrate dianalisis untuk menilai stabilitas termal dan kemampuan sistem lumpur dalam mengontrol filtrasi. Analisis korelasi kuantitatif antara parameter reologi (PV, YP) dengan volume filtrate kemudian dilakukan untuk mengidentifikasi hubungan fungsional antara stabilitas struktur lumpur dan efektivitas sealing filter cake. Korelasi ini menjadi indikator kunci dalam memprediksi potensi total lost circulation, di mana kombinasi PV yang optimal dan filtrate yang rendah menunjukkan kemampuan sistem lumpur dalam membentuk barrier efektif di zona bertekanan rendah.

Stabilitas Termal Rheologi HPWBM



Gambar 1. Tren perubahan reologi HPWBM pada kondisi termal tinggi di Sumur XY1.

Hasil pengujian rheologi pada sistem lumpur HPWBM pada ketiga trayek menunjukkan adanya tren perubahan yang disebabkan oleh adanya kondisi peningkatan temperature dari tiap

trayek. Pada gambar 1 Secara umum, nilai *plastic viscosity* (PV) dan *yield point* (YP) meningkat secara progresif dari trayek 17-1/2" hingga 8-1/2", sedangkan *gel strength* menunjukkan pola fluktuatif yaitu terjadi penurunan pada trayek 12-1/4".

Hasil pengujian (Gambar 1) menunjukkan bahwa nilai PV dan YP meningkat secara konsisten dengan bertambahnya kedalaman dan temperatur lubang. PV meningkat dari 29 cP pada trayek 17-1/2" menjadi 43 cP pada trayek 8-1/2", Nilai PV 43 cP pada trayek produksi mengindikasikan sifat rheologi yang stabil dan sistem fluida yang homogen meskipun pada suhu dan tekanan tinggi. Sedangkan YP meningkat signifikan dari 37 menjadi 55 lb/100 ft². Peningkatan nilai YP menjadi indikator efektivitas sistem Polyamine dan KCl dalam mempertahankan karakteristik *shear-thinning* di zona produksi. Dengan demikian, sistem ini tetap mampu membersihkan *cuttings* secara efisien dan mencegah akumulasinya pada section highly-deviated. Fenomena ini konsisten dengan yang dilaporkan oleh Kong et al. (2022). Temuan ini juga kemudian sejalan dengan studi (Xin et al., 2023) yang menyebutkan bahwa sistem HPWBM berbasis polyamine memiliki kemampuan mempertahankan viskositas akibat ikatan silang (cross-linking) antara polimer dan kation amina yang membentuk jaringan stabil pada suhu tinggi. Kenaikan YP yang signifikan menunjukkan peningkatan kemampuan fluida untuk mentransfer cutting ke permukaan dan menjaga *hole cleaning* pada kondisi high inclination (hingga 60° di trayek produksi) (Allawi & Almahdawi, 2019).

Nilai gel strength 10 detik dan 10 menit mengalami penurunan dari 14/18 lb/100 ft² pada section 17-1/2" menjadi 11/15 lb/100 ft² pada section 8-1/2". Meskipun terjadi penurunan, nilai akhir sebesar 11/15 lb/100 ft² ini tetap berada dalam rentang 10–20 lb/100 ft² yang dianggap ideal untuk menjamin stabilitas lumpur. Rentang ini cukup untuk mencegah fenomena barite sag dan menjaga suspensi cuttings saat sirkulasi terhenti, sehingga meminimalkan risiko stuck pipe (Mohamed et al., 2020).

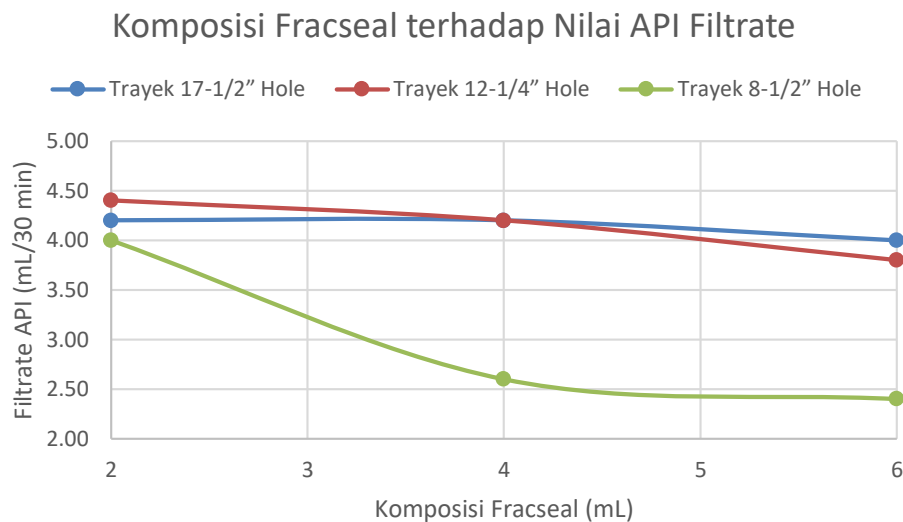
Secara khusus, nilai Gel 10-menit sebesar 15 lb/100 ft² pada section 8-1/2" mengindikasikan kemampuan sistem lumpur dalam membentuk struktur gel yang stabil tanpa berlebihan. Nilai yang moderat dan stabil (flat rheology) ini sangat krusial untuk menghindari gelation-induced pressure spike saat resirkulasi setelah kondisi statis (Mohamed et al., 2021). Dengan demikian, sistem ini berhasil menemukan keseimbangan antara menjaga suspensi yang memadai dan meminimalkan tekanan awal sirkulasi.

Sedangkan nilai *Low Shear Yield Point (LSYP)* menunjukkan pola menurun pada trayek 12-1/4" (6 lb/100 ft²), namun kembali meningkat pada trayek 8-1/2" (8 lb/100 ft²). Hal ini

Artikel diterima 08 Oktober 2025. Online 30 Oktober 2025.

mengindikasikan bahwa sistem HPWBM mampu beradaptasi terhadap perubahan suhu dan tekanan dengan menjaga keseimbangan antara gaya geser rendah dan tinggi. Pola fluktuasi LSYP ini konsisten dengan perilaku sistem lumpur berbasis polimer pada kondisi HPHT, di mana sangat dipengaruhi oleh perubahan suhu dan tekanan di HPHT. Polimer dalam lumpur dapat mengalami reorientasi struktur akibat efek termal, yang menyebabkan fluktuasi nilai LSYP (Gautam et al., 2022).

Analisis Filtrasi dan Efektivitas *Fracseal* dan CaCO_3



Gambar 2. Pengaruh Dosis *Fracseal* terhadap Volume Filtrat API pada Berbagai Trayek Pemboran.

Berdasarkan hasil uji filtrasi API, efektivitas kombinasi *Fracseal* dan CaCO_3 dalam mengendalikan laju filtrasi menunjukkan respons yang berbeda pada setiap trayek pemboran. Nilai *API filtrate* menunjukkan tren penurunan seiring peningkatan konsentrasi *Fracseal* dari 2 hingga 6 mL, namun dengan tingkat sensitivitas yang bergantung pada karakteristik zona formasi.

Pada trayek 17-1/2" dan 12¼", peningkatan konsentrasi *Fracseal* dari 2 mL hingga 6 mL hanya memberikan penurunan filtrate yang marginal, di mana masing-masing dari kedua trayek itu yaitu dari 4,2 menjadi 4,0 mL dan 4,4 menjadi 3,8 mL. Hal ini mengindikasikan bahwa pada formasi dengan pori-pori relatif besar di section atas, mekanisme *bridging* telah optimal ditangani oleh CaCO_3 granular sehingga peran *Fracseal* hanya bersifat komplementer, sebagai tambahan untuk memperkuat *filter cake* yang terbentuk.

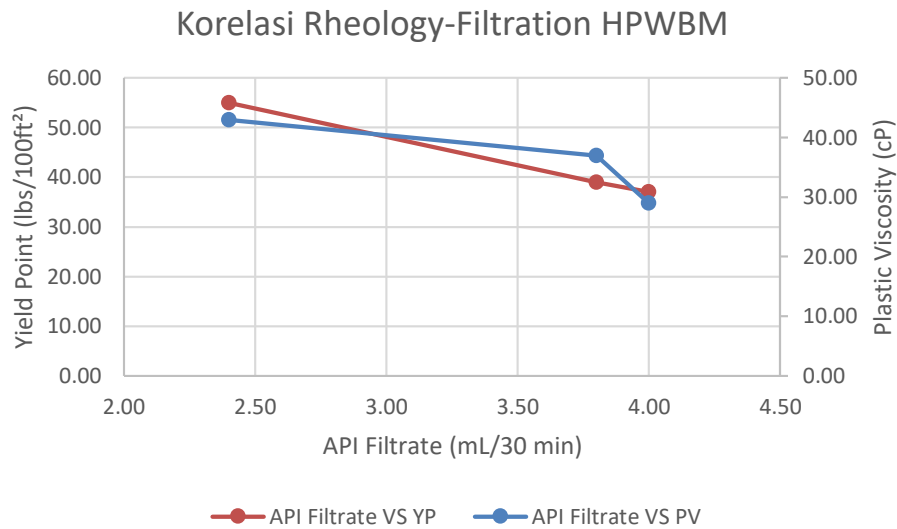
Sebaliknya, pada trayek produksi 8-1/2", terjadi penurunan filtrate yang cukup besar dari

4,0 mL (2 mL *Fracseal*) menjadi 2,6 mL (4 mL *Fracseal*) dan mencapai 2,4 mL (6 mL *Fracseal*), adanya penurunan jumlah filtrate ini merupakan akibat dari terbentuknya *three-dimensional fibrous network* yang menutup mikroretakan (*micro-fractures*) dan memperkuat lapisan *filter cake* yang dibentuk oleh CaCO_3 . Secara fisik, serat *Fracseal* membentuk jaringan serat yang berfungsi menjembatani (*bridging*) dan mengikat partikel-partikel CaCO_3 . Struktur komposit ini mengisi ruang pori secara lebih efektif, sehingga menurunkan permeabilitas lapisan penyekat (*mudcake*) dan secara signifikan memperlambat laju invasi filtrat ke dalam formasi. Mekanisme ini memperoleh dukungan kuat dari penelitian (Guo et al., 2023) yang melaporkan bahwa serat yang berinteraksi dengan CaCO_3 mampu mengurangi konduktivitas hidrolik hingga 86% dengan membentuk jembatan antar-partikel dan mengisi pori-pori. Efek sinergis serat dan material granular dalam meningkatkan efisiensi penyekatan juga telah dilaporkan dalam studi-studi sebelumnya (Zhao et al., 2020).

Dengan hasil uji ini, membuktikan bahwa penggunaan LCM tidak dapat digeneralisasi untuk keseluruhan trayek pemboran yang ada. Terutama dalam adanya kombinasi tertentu diantara dua atau lebih jenis LCM, sebagaimana dalam trayek 17-1/2" dan 12¼" pada kasus ini menunjukkan bahwa penggunaan dosis LCM akan menjadi sangat spesifik pada tiap section yang kemudian disesuaikan dengan karakteristik formasi dan kondisi termal masing-masing section agar tercapai performa filtrasi yang maksimal tanpa kehilangan sirkulasi.

Hasil ini juga menegaskan bahwa efektivitas kombinasi antara *Fracseal* dan CaCO_3 dalam menurunkan nilai *API filtrate* menunjukkan terbentuknya lapisan *filter cake* dengan permeabilitas rendah hasil sinergi partikel granular CaCO_3 yang mengisi pori besar dan serat *Fracseal* yang memperkuat jaringan penyekat pada mikroretakan formasi (Guo et al., 2023; Zhao et al., 2020). Dengan kemampuan tersebut, sistem HPWBM yang dimodifikasi ini diharapkan pada praktik di lapangannya mampu menahan laju masuknya fluida ke zona kehilangan sirkulasi dan mempertahankan integritas sumur pada lingkungan HPHT.

Korelasi Rheologi–Filtration



Gambar 3. Korelasi Rheologi (PV & YP) Terhadap API Filtrate Pada Ketiga Trayek.

Tabel 2. Data Rheology-Filtrasi HPWBM per Trayek.

Trayek	API Filtrate (mL/30 mnt)	PV (cP)	YP (lbs/100ft ²)
17-1/2"	4	29	37
12-1/4"	3.8	37	39
8-1/2"	2.4	43	55

Analisis korelasi pada Gambar 3 mengungkap hubungan negatif yang sangat kuat antara parameter reologi dan performa filtrasi. Nilai korelasi $r = -0.88$ untuk PV vs API Filtrate dan $r = -0.99$ untuk YP vs API Filtrate menunjukkan hubungan yang hampir deterministik. Namun, interpretasi ini perlu disikapi dengan hati-hati mengingat keterbatasan jumlah sampel (hanya 3 data point dari tiga trayek yang berbeda) yang dapat mempengaruhi reliabilitas statistik.

Meskipun demikian, pola yang konsisten pada berbagai trayek ini tetap memberikan indikasi kuat mengenai hubungan sistemik antara parameter reologi dan filtrasi, di mana peningkatan PV dan YP berkontribusi pada pembentukan filter cake yang lebih kompak, sebagaimana terlihat pada trayek 8-1/2" dengan PV tertinggi (43 cP) dan YP tertinggi (55 lb/100ft²) yang menghasilkan *filtrate* terendah (2,4 mL), berbanding terbalik dengan trayek 17-1/2" yang memiliki PV terendah (29 cP) dan YP terendah (37 lb/100ft²) dengan *filtrate* tertinggi (4,0 mL). Temuan ini selaras dengan penelitian (Abdullah et al., 2024) dengan adanya penambahan nanocomposite sebagai LCM ini kemudian meningkatkan PV dan YP secara signifikan sehingga mengurangi volume filtrat hingga 67% dengan mekanisme pembentukan filter cake yang lebih

rapat. Hasil ini memperkuat validitas strategi graded LCM concentration pada Sumur XY1, meskipun penelitian lanjutan disarankan untuk memperkuat validasi statistik dengan variasi sampel yang lebih luas.

KESIMPULAN (CONCLUSION)

Berdasarkan hasil penelitian, sistem HPWBM yang dimodifikasi dengan kombinasi Fracseal dan CaCO_3 terbukti efektif mencegah total lost circulation pada Sumur XY1. Hasil yang diperoleh menyatakan kombinasi LCM ini berhasil mempertahankan stabilitas reologi under HPHT conditions (260-360°F) dan menekan volume filtrate hingga 2,4 mL melalui mekanisme sinergis antara bridging granular dan fibrous network. Korelasi negatif kuat antara parameter reologi-filtrasi ($r = -0.88$ hingga -0.99) mengkonfirmasi bahwa peningkatan viskositas berkontribusi pada pembentukan filter cake yang lebih kompak. Sehingga sistem HPWBM termodifikasi ini dapat menjadi solusi feasible pengganti OBM yang menggabungkan keunggulan stabilitas termal dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA (REFERENCES)

- Abdullah, A. H., Ridha, S., Mohshim, D. F., & Maoinsar, M. A. (2024). An experimental investigation into the rheological behavior and filtration loss properties of water-based drilling fluid enhanced with a polyethyleneimine-grafted graphene oxide nanocomposite. *RSC Advances*, 14(15), 10431–10444. <https://doi.org/10.1039/D3RA07874D>
- Affede, L., Giubertoni, M., Ciuca, A., Bertoldi, L., Vieira, L. P., & Carpineta, G. (2023). Drilling Offshore Wells with High-Performance Water-Based Mud (HPWBM) in Extreme High-Pressure / High-Temperature (HP/HT) Conditions. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE-214829-MS. <https://doi.org/10.2118/214829-MS>
- Ali, M., Jarni, H. H., Aftab, A., Ismail, A. R., Saady, N. M. C., Sahito, M. F., Keshavarz, A., Iglauer, S., & Sarmadivaleh, M. (2020). Nanomaterial-based drilling fluids for exploitation of unconventional reservoirs: A review. *Energies*, 13(13), 1–31. <https://doi.org/10.3390/en13133417>
- Allawi, R. H., & Almahdawi, F. H. M. (2019). Better Hole Cleaning In Highly Deviated Wellbores. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 579(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/579/1/012007>
- Elkatatny, S., Ahmed, A., Abughaban, M., & Patil, S. (2020). Deep Illustration for Loss of Circulation While Drilling. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(2), 483–499. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04315-6>
- Fritoli, G. de S., De Lai, F. C., & Junqueira, S. L. de M. (2021). Effect of LCM and polymeric additives on mudcake and filtrate rheology parameters. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 108948. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108948>

- Gautam, S., Guria, C., & Rajak, V. K. (2022). A state of the art review on the performance of high-pressure and high-temperature drilling fluids: Towards understanding the structure-property relationship of drilling fluid additives. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 213, 110318. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110318>
- Geri, M. B., Kauffman, D., & Almubarak, T. (2024, February 12). A Sustainable Approach to Drilling in Shale Formations with Fresh Water-Based Mud System. *International Petroleum Technology Conference*. <https://doi.org/10.2523/IPTC-24069-MS>
- Goswami, A., & Sulthan, A. (2025, May 12). Enhancing Fluid-Loss Control in High-Performance Water-Based Muds: The Role of Modified Starch in High Temperature and Pressure. *SPE Conference at Oman Petroleum & Energy Show*. <https://doi.org/10.2118/225214-MS>
- Guo, L., Dai, Q., Lin, X., Jiang, Y., Wang, B., Pan, X., Peng, Y., Zhao, G., Ru, Y., & Zhou, L. (2023). Enhancing fiber–matrix interface permeability resistance of natural fiber-reinforced, bio-cemented sand by CaCO₃ seed pretreatment. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 35, 100481. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2023.100481>
- Ibrahim, Z. Z., Hamidi, H., Afzal, W., & Huseyin, M. (2024). Investigating the effects of nano-Fe₃O₄ and MWCNTs on the filtration and rheological properties of water-based muds at elevated temperature and pressure. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 701, 134912. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134912>
- Klungtvedt, K. R., & Saasen, A. (2022). Comparison of Lost Circulation Material Sealing Effectiveness in Water-Based and Oil-Based Drilling Fluids and Under Conditions of Mechanical Shear and High Differential Pressures. *Journal of Energy Resources Technology*, 144(12). <https://doi.org/10.1115/1.4054653>
- Lin, C., Xu, Q.-C., Han, L.-X., Li, G., He, H., Zhou, H.-L., & She, J.-P. (2024). Fracture sealing performance of granular lost circulation materials at elevated temperature: A theoretical and coupled CFD-DEM simulation study. *Petroleum Science*, 21(1), 567–581. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.10.002>
- Mohamed, A., Al-Afnan, S., Elkatatny, S., & Hussein, I. (2020). Prevention of Barite Sag in Water-Based Drilling Fluids by A Urea-Based Additive for Drilling Deep Formations. *Sustainability*, 12(7), 2719. <https://doi.org/10.3390/su12072719>
- Mohamed, A., Basfar, S., Elkatatny, S., & Al-Majed, A. (2021). Enhancement of Static and Dynamic Sag Performance of Water-Based Mud Using a Synthetic Clay. *ACS Omega*, 6(12), 8179–8188. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c06186>
- Xin, H., Fang, B., Yu, L., Lu, Y., Xu, K., & Li, K. (2023). Rheological Performance of High-Temperature-Resistant, Salt-Resistant Fracturing Fluid Gel Based on Organic-Zirconium-Crosslinked HPAM. *Gels*, 9(2), 151. <https://doi.org/10.3390/gels9020151>
- Zhao, Y., Xiao, Z., Fan, C., Shen, W., Wang, Q., & Liu, P. (2020). Comparative mechanical behaviors of four fiber-reinforced sand cemented by microbially induced carbonate precipitation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(6), 3075–3086. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01756-4>