Analisis Kinerja *Cellulose Fiber Coarse* Menggunakan *Permeability Plugging Test*

Faiz Rajasa Dharmawan[1], Starly Jellynek Hartono[2], Pradini Rahalintar[1*]

[1] Teknik Produksi Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas Cepu, Indonesia

[2] PT OBM Drilchem Tbk, Karawang, Indonesia

ABSTRAK

Dalam operasi pemboran, *lost circulation* merupakan salah satu tantangan krusial dan berisiko tinggi yang dapat memicu eskalasi biaya operasional hingga *Non-Productive Time* (NPT) yang signifikan. Untuk menanggulangi permasalahan tersebut, aplikasi *Lost Circulation Material* (LCM) berbasis serat alami menjadi metode penanganan yang sangat diandalkan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif kinerja aditif *Cellulose Fiber Coarse* pada sistem fluida pemboran *Water-Based Mud* (WBM) dalam mengendalikan *lost circulation* sekaligus menjaga stabilitas reologi lumpur. Tahapan pengujian diawali dengan evaluasi sifat reologi, yang kemudian dilanjutkan dengan uji *Permeability Plugging Test* (PPT) menggunakan *Slot Disc* 3 milimeter (mm) dengan variasi tekanan diferensial bertingkat hingga mencapai 2.000 psi. Hasil evaluasi reologi menunjukkan parameter *Plastic Viscosity* (PV), *Yield Point* (YP), dan *Gel Strength* (GS) yang sangat ideal dan memenuhi standar operasional untuk kapasitas pengangkatan *cuttings*. Lebih lanjut, pengujian PPT membuktikan kapabilitas unggul dari *Cellulose Fiber Coarse* dalam menghentikan invasi fluida secara sempurna tanpa adanya filtrat yang lolos (0 mL *loss*) hingga batas tekanan 1.200 psi, serta mencatatkan akumulasi total *loss* sebesar 47 mL pada tekanan maksimum 2.000 psi. Penelitian ini berhasil mengonfirmasi bahwa serat selulosa berukuran *coarse* sangat efektif diaplikasikan sebagai LCM tipe *fibrous* untuk memitigasi risiko *formation damage* pada zona bertekanan tinggi.

Kata Kunci: *Cellulose Fiber Coarse*, Fluida Pemboran, *Formation Damage*, *Sustainable Drilling*, *Wellbore Integrity*

pradini.rahalintar@esdm.go.id

1. Pendahuluan

Operasi pengeboran merupakan tahap paling krusial dan berisiko tinggi dalam rangkaian eksplorasi serta pengembangan sumur minyak dan gas bumi. Seiring dengan makin meningkatnya kompleksitas target reservoir, seperti pemboran pada formasi bertekanan tinggi, zona transisi, hingga sumur *deepwater*, tantangan operasional yang dihadapi di lapangan menjadi semakin dinamis dan rumit. Keberhasilan operasi ini sangat ditentukan oleh efisiensi, keandalan alat, dan keamanan sistem sirkulasi. Untuk menjawab tantangan tersebut, salah satu aditif yang diandalkan adalah *Cellulose Fiber Coarse* (serat selulosa kasar). *Cellulose fiber* merupakan material alami berserat yang ditambahkan ke dalam sistem fluida pemboran, yang dirancang khusus untuk menjalin struktur jaringan (*barrier*) demi menutup rongga atau celah formasi

batuan secara efektif. Material *Cellulose Fiber Coarse* merupakan aditif yang bersumber dari pemanfaatan limbah *sawdust* (serbuk gergaji) dan limbah kayu. Pemanfaatan limbah *sawdust* dan kayu ini tidak hanya mendukung inisiatif *upcycling* limbah industri menjadi material bernilai guna tinggi, tetapi juga memiliki keunggulan teknis karena sifatnya yang *biodegradable* dan tidak beracun. Dalam menjaga stabilitas lubang bor selama operasi berlangsung, lumpur pemboran yang diperkuat oleh material seperti ini bertindak sebagai elemen vital yang menjalankan fungsi multiperan, mulai dari menjaga tekanan hidrostatik, mengangkut serbuk pemboran (*cuttings*), hingga meminimalkan gesekan pada rangkaian pipa bor [1]–[4].

Meskipun telah dirancang sedemikian rupa, kinerja sistem fluida pemboran sering kali terancam oleh kemunculan masalah *lost circulation*, yaitu fenomena hilangnya sebagian atau seluruh volume lumpur pemboran ke dalam formasi batuan [5]. Berdasarkan volume dan tingkat keparahannya, *lost circulation* dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu *seepage loss* (rembesan ringan), *partial loss* (kehilangan sebagian), *severe loss* (kehilangan parah), hingga *total loss* (kehilangan seluruh fluida tanpa ada yang kembali ke permukaan) [5]. Masalah operasional ini umumnya dipicu oleh keberadaan retakan alami (*natural fractures*), rongga (*vugular*), maupun lapisan batuan dengan tingkat permeabilitas yang sangat tinggi [6]. Dampak dari terjadinya sirkulasi yang hilang ini sangatlah masif dan berpotensi memicu rentetan kerugian operasional yang fatal, termasuk ketidakstabilan lubang bor dan risiko masuknya fluida formasi (*kick*) [7]. Hal ini pada akhirnya berujung pada peningkatan *Non-Productive Time* (NPT) yang secara drastis menggelembungkan total biaya pengeboran [8]. Mengingat besarnya risiko tersebut, penggunaan *Lost Circulation Material* (LCM) menjadi sangat krusial. Material berserat ini memiliki struktur fisik yang fleksibel namun tangguh, sehingga dirancang mampu menyumbat tekanan ekstrem dan mengatasi masalah hilangnya fluida hingga batas *total loss* [5].

Untuk menanggulangi permasalahan tersebut, industri pengeboran mengandalkan penggunaan aditif khusus yang dikenal sebagai LCM [9]. Secara fundamental, mekanisme kerja LCM untuk menyumbat formasi melibatkan dua fase utama, yaitu *bridging* dan *sealing* [10]. Fase *bridging* terjadi ketika partikel LCM berukuran besar (*coarse*) tersangkut dan saling mengunci di area mulut rekahan batuan, sehingga membentuk fondasi struktural atau jembatan awal. Setelah jembatan ini terbentuk, fase *sealing* akan menyusul, di mana material berukuran lebih halus mulai mengisi rongga-rongga mikro antarpartikel pada jembatan tersebut, menciptakan lapisan penyumbat (*plug*) yang sangat rapat untuk menghentikan laju invasi fluida. Dalam praktiknya di lingkungan bertekanan ekstrem, penggunaan LCM bertipe *fibrous* jauh lebih direkomendasikan karena serat-seratnya mampu saling menganyam dan membentuk jejaring tiga dimensi yang elastis dan tangguh dalam menahan diferensial tekanan formasi [11]–[13].

Untuk mengevaluasi keandalan struktural dan efektivitas mekanisme penyumbatan dari aditif LCM secara presisi, pengujian laboratorium memerlukan instrumen khusus yang diakui oleh standar industri, yakni *Permeability Plugging Test* (PPT) sesuai panduan API RP 13B-1 [14]. Berbeda dari uji filtrasi statis konvensional, aparatus PPT dirancang secara spesifik untuk memodelkan karakteristik fisik rekahan batuan reservoir secara nyata menggunakan media penyaring berupa *slot discs*, yaitu cakram logam dengan celah rekahan buatan yang presisi sehingga volume fluida yang berhasil menerobos *barrier* LCM dapat dikuantifikasi secara akurat di bawah pembebanan tekanan diferensial tinggi [15].

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan operasi pengeboran yang berkelanjutan (*sustainable drilling*), material serat alami telah dieksplorasi secara ekstensif sebagai alternatif LCM yang sangat efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan [16]. Sejalan dengan kebutuhan akan *additive* yang tangguh terhadap tekanan tinggi, beberapa penelitian terdahulu telah secara ekstensif mengkaji pemanfaatan material organik dan berserat

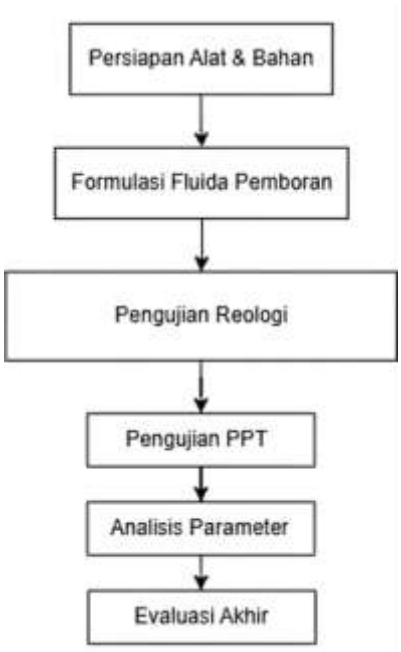
sebagai alternatif LCM yang andal dan berkelanjutan. Amanullah (2016) mengevaluasi penggunaan aditif ramah lingkungan berbasis organik lokal, dan membuktikan bahwa material tersebut memiliki kapabilitas penyumbatan yang sangat efektif sekaligus mampu menekan biaya operasional [8]. Sementara itu, Satiyawira (2020) menginvestigasi serat selulosa alami dan menemukan bahwa fleksibilitas fisik dari strukturnya mampu membentuk *barrier* awal yang solid pada zona *lost circulation* [16]. Studi tersebut membuktikan bahwa jejaring serat memberikan tingkat ketahanan *sealing* yang jauh lebih kuat dalam menahan tekanan formasi dibandingkan dengan penggunaan material *granular* konvensional.

Untuk mengatasi kondisi formasi yang lebih kompleks, penelitian sebelumnya membahas mekanisme penyumbatan pada reservoir karbonat yang memiliki rekahan alami. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material berserat berperan dalam membentuk jembatan pada rongga dan menutup celah rekahan sehingga dapat mengurangi terjadinya kehilangan fluida [9]. Selain itu, LCM bertipe *fibrous* memiliki kemampuan penyumbatan yang baik karena serat dapat saling berikatan dan membentuk struktur tiga dimensi yang mampu mempertahankan integritasnya ketika menerima tekanan [15]. Hal tersebut menunjukkan bahwa penggunaan material berserat dapat menjadi salah satu alternatif yang efektif dalam mengatasi *lost circulation*, khususnya pada formasi batu pasir atau karbonat.

Beberapa studi telah meletakkan landasan teoretis mengenai keunggulan *fiber*, namun evaluasi kuantitatif terhadap kinerja *Cellulose Fiber Coarse* menggunakan PPT masih sangat minim dilakukan. Sebagian besar evaluasi dilakukan dengan filter standar konvensional yang umumnya hanya mampu mengukur ketahanan filtrasi pada tekanan diferensial rendah hingga menengah (150 psi), sehingga kurang merepresentasikan kondisi aktual pada zona formasi bertekanan tinggi. Berangkat dari kesenjangan literatur dan kelemahan pada filter standar tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara mendalam kinerja *Cellulose Fiber Coarse* dalam sistem WBM pada tekanan diferensial ekstrem hingga 2.000 psi. Melalui pengujian ini, diharapkan dapat dikonfirmasi bahwa material selulosa berukuran kasar mampu memberikan efisiensi penyumbatan untuk mencegah *seepage loss* hingga *total loss* pada lingkungan bertekanan tinggi.

2. Metodologi

Metode penelitian ini dilaksanakan melalui pengujian di laboratorium untuk mengevaluasi efektivitas *Cellulose Fiber Coarse* dalam mengendalikan terjadinya *lost circulation* pada kondisi tekanan tinggi. Setiap pengujian mengacu pada prosedur dan standar API 13B-1 untuk menjamin ketepatan serta keakuratan hasil yang diperoleh [14]. Gambar 1 menunjukkan tahapan-tahapan penelitian yang dilakukan secara sistematis untuk memperoleh hasil pengujian yang sesuai dengan tujuan penelitian. Proses penelitian ini dimulai dari tahap persiapan alat dan bahan, formulasi sampel fluida pemboran, pengujian reologi, hingga pengujian PPT.



Gambar 1. *Flowchart* Penelitian

2.1 Bahan dan Peralatan

Tahap awal penelitian dimulai dengan persiapan bahan dan peralatan yang dibutuhkan selama eksperimen. Bahan utama yang digunakan meliputi lumpur WBM, serta serat fiber yang akan digunakan. Selain itu, peralatan yang disiapkan meliputi *mixer* untuk pengadukan, *mud balance* digunakan untuk mengukur nilai *mud weight, viscometer* untuk uji reologi, serta alat PPT yang dilengkapi *Slot Discs* 3 mm. Gambar 2 merepresentasikan secara visual material dari Fiber Coarse yang memiliki distribusi ukuran antara 7 hingga 8 mm. Karakteristik inilah yang berperan dalam membentuk *sealing* untuk menutup celah formasi.



Gambar 2. Material *Cellulose Fiber Coarse*

2.2 Formulasi Sampel Fluida Pemboran

Pada tahap ini, formulasi lumpur pemboran dibuat dengan mencampurkan bahan-bahan pembentuk lumpur berbahan dasar air hingga homogen menggunakan *mixer*. Rincian komposisi aditif serta konsentrasi yang digunakan dalam pembuatan sampel fluida pemboran disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 menyajikan rincian komposisi hingga pencampuran (*mixing order*) dari formulasi fluida pemboran WBM konvensional yang dibuat dalam penelitian ini. Proses preparasi dilakukan secara sekuensial dengan total waktu pengadukan 29 menit pada kecepatan konstan (*low speed*). Formulasi ini menggunakan air tawar sebagai fasa kontinu yang dikondisikan alkalinitasnya menggunakan Natrium Hidroksida (NaOH). Sistem fluida ini didukung oleh *Bentonite*, *Polyanionic Cellulose Low Viscosity* (PAC-LV), dan Xanthan Gum (XCD) untuk mengontrol viskositas dan laju filtrasi, serta penambahan Kalium Klorida (KCl) sebagai *shale inhibitor*. Selanjutnya densitas fluida disesuaikan menggunakan *Barite* sebagai *weighting agent*. Pada tahap akhir, material *Cellulose Fiber Coarse* dengan konsentrasi 40 ppb dimasukkan ke dalam lumpur dengan waktu pengadukan 10 menit. Proses pencampuran serat pada tahap akhir ini bertujuan untuk meminimalisasi degradasi mekanis pada strukturnya sebelum dilakukan uji kinerja sebagai material LCM.

Tabel 1. Formulasi Sampel Fluida Pemboran

Additive	***Mixing Order***	***Density* (SG)**	***Concentration* (ppb)**	***Mixing Time* (min)**	***Mixer Speed***
Fresh Water	1	1,00	319,22	-	-
NaOH	2	2,13	0,50	1	LOW
Bentonite	3	2,50	5,00	4	LOW
PAC-LV	4	1,50	5,00	3	LOW
KCl	5	1,99	22,50	3	LOW
XCD-Polymer	6	1,50	3,00	3	LOW
Barite	7	4,20	50,00	5	LOW
Cellulose Fiber Coarse	8	0,90	40,00	10	LOW
Total			**350,00**	**29**	

2.3 Pengujian Reologi

Pengujian sifat reologi dilakukan untuk mengukur parameter reologi dasar seperti densitas (*mud weight*), PV, YP, GS 10 *sec,* dan 10 *min.* Pengukuran ini menganalisis respons gaya geser terhadap laju geser menggunakan alat viskometer pada dial 600, 300, 200, 100, 6, dan 3 RPM. Penentuan nilai reologi ini penting dilakukan untuk memberikan gambaran dasar mengenai kualitas lumpur yang akan dipakai [14].

2.4 Pengujian PPT (*Permeability Plugging Test*)

PPT merupakan pengujian laboratorium standar yang dirancang khusus untuk mensimulasikan mekanisme penyumbatan dan pembentukan *filter cake* oleh fluida pemboran pada kondisi bertekanan tinggi. Prosedur pengujian PPT ditunjukkan pada Gambar 3. Pengujian diawali dengan persiapan alat PPT, dilanjutkan dengan memasukkan fluida ke dalam alat, pemberian tekanan, dan pengukuran *loss*, kemudian diakhiri dengan analisis data.

Gambar 4 memperlihatkan susunan dari rangkaian alat pengujian *Permeability Plugging Test.* Prinsip kerja pengujian ini berfokus pada pengukuran volume kehilangan fluida secara diferensial dan evaluasi kemampuan LCM dalam membentuk *sealing barrier* guna mencegah invasi filtrat ke dalam formasi. Berbeda dengan uji filtrasi standar, PPT menggunakan media *Slot Disc* 3 mm yang bertujuan untuk merepresentasikan karakteristik fisik batuan formasi secara lebih akurat (Gambar 5). Selama pengujian berlangsung, volume filtrat yang keluar ditampung dan diukur pada selang waktu tertentu. Indikator utama yang dievaluasi dalam pengujian ini adalah *total loss* yang terjadi.



Gambar 3. Diagram alir pengujian PPT



Gambar 4. Rangkaian alat PPT



Gambar 5. *Slot Discs* 3 mm

3. Hasil

3.1 Parameter Reologi

Rincian lengkap hasil pengujian parameter reologi untuk sampel fluida pemboran disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan data pengujian pada Tabel 2, parameter reologi fluida pemboran menunjukkan respons gaya geser terhadap laju geser yang stabil, di mana pembacaan dial viskometer pada 600, 300, 200, 100, 6, dan 3 RPM masing-masing tercatat sebesar 75, 51, 41, 29, 9, dan 3. Densitas lumpur stabil pada angka 9,5 ppg, dengan nilai PV sebesar 24 cP dan YP sebesar 27 lb/100 ft^2. Nilai GS pada 10 detik dan 10 menit masing-masing tercatat sebesar 7 lb/100 ft^2 dan 10 lb/100 ft^2.

Tabel 2. Hasil pengujian parameter reologi

Properties	***Value***	***Unit***
Mud Weight	9,5	ppg
600	75	-
300	51	-
200	41	-
100	29	-
6	9	-
3	3	-
PV	24	cP
YP	27	lb/100 ft^2
GS 10 sec	7	lb/100 ft^2
GS 10 min	10	lb/100 ft^2

3.2 Pengujian PPT

Hasil pengujian PPT disajikan pada Tabel 3. Berdasarkan Tabel 3, fluida pemboran tidak meloloskan filtrat sama sekali (0 mL) pada rentang tekanan 200–1.200 psi. *Filtrate loss* baru terdeteksi saat tekanan dinaikkan ke 1.400 psi sebesar 6 mL, dan terus meningkat secara bertahap hingga mencapai 17 mL pada tekanan puncak 2.000 psi, dengan akumulasi *total loss* sebesar 47 mL.

Tabel 3. Hasil pengujian PPT

***Pressure* (psi)**	***Filtrate Loss* (mL)**
200	0
400	0
600	0
800	0
1.000	0
1.200	0
1.400	6
1.600	11
1.800	13
2.000	17
Total	**47**

4. Analisa & Pembahasan

4.1 Parameter Reologi

Evaluasi sifat reologi fluida pemboran merupakan tahapan yang sangat penting untuk analisis dasar mengenai kualitas lumpur yang akan digunakan. Nilai PV sebesar 24 cP mengindikasikan bahwa penambahan aditif *Cellulose Fiber Coarse* sebanyak 40 ppb bersama komponen padatan lainnya tidak memicu fenomena flokulasi ataupun pengentalan fluida yang berlebihan di dalam sistem WBM.

Nilai YP sebesar 27 lb/100 ft^2 dengan rasio YP terhadap PV yang tinggi menunjukkan bahwa fluida memiliki kekuatan struktur jaringan yang baik untuk membawa *cuttings*. Nilai YP ini sangat menguntungkan karena dapat mengoptimalkan efisiensi *hole cleaning* serta menjamin keberhasilan pendistribusian material LCM saat fluida bersirkulasi. Selain itu, nilai GS pada 10 detik dan 10 menit yang masing-masing tercatat sebesar 7 lb/100 ft^2 dan 10 lb/100 ft^2 menunjukkan bahwa fluida pemboran memiliki karakteristik suspensi yang sangat ideal. Rentang nilai ini membuktikan kapabilitas lumpur dalam menjaga par-

tikel berat seperti *Barite* dan aditif serat agar tidak mudah mengendap saat sirkulasi dihentikan. Karakteristik ini juga memastikan bahwa fluida tidak akan memicu lonjakan tekanan berlebih maupun risiko pipa terjepit (*stuck pipe*) ketika pompa pemboran dijalankan kembali.

Berdasarkan evaluasi menyeluruh terhadap parameter reologi yang diperoleh, formulasi fluida pemboran KCl-*Polymer* yang dicampur dengan aditif *Cellulose Fiber Coarse* terbukti memiliki kestabilan aliran, gesekan geser yang optimal, serta daya suspensi yang sangat baik. Seluruh parameter utama yang meliputi densitas lumpur, PV, YP, GS telah memenuhi kriteria teknis operasional pemboran sehingga sampel fluida pemboran ini dinyatakan sangat layak dan memenuhi prasyarat untuk dilanjutkan ke tahap pengujian performa penyumbatan bertekanan tinggi.

4.2 Pengujian PPT

Perolehan filtrat sebesar 0 mL pada rentang tekanan 200–1.200 psi menunjukkan performa penyumbatan yang sempurna. Hal ini membuktikan bahwa pada tekanan awal hingga menengah, ukuran dan fleksibilitas serat mampu membentuk *bridging barrier* awal secara instan pada celah *Disc*. Peningkatan volume filtrat pada tekanan tinggi mengindikasikan bahwa struktur *fiber* mulai mengalami deformasi atau peregangan celah akibat diferensial tekanan ekstrem. Meskipun demikian, material ini tetap terbukti memiliki kapabilitas menahan tekanan hingga rentang 1.200 psi secara *absolut*. Penggunaan *Cellulose Fiber Coarse* disarankan dikombinasikan dengan material berserat ukuran *fine/medium* serta aditif *granular* seperti $CaCO_3$ untuk mengisi rongga mikroserat untuk performa penyumbatan yang maksimal.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang telah dilakukan, penggunaan aditif *Cellulose Fiber Coarse* terbukti efektif dalam menjaga stabilitas reologi dan meningkatkan kinerja penyumbatan sistem fluida WBM pada kondisi tekanan tinggi. Parameter reologi lumpur menunjukkan hasil yang ideal dengan nilai PV sebesar 24 cP dan YP sebesar 27 lb/100 ft^2, yang memastikan kapasitas pengangkatan *cuttings* dan suspensi partikel yang optimal. Selain itu, pengujian PPT membuktikan kapabilitas LCM dalam menghentikan invasi fluida secara sempurna (0 mL *loss*) hingga batas tekanan diferensial 1.200 psi, dengan akumulasi *total loss* sebesar 47 mL pada tekanan maksimum 2.000 psi.

Secara teknis dan operasional, aplikasi *Cellulose Fiber Coarse* sebagai LCM mampu membentuk *bridging* dan *sealing barrier* yang presisi sehingga efektif meminimalisasi risiko *formation damage*, menekan durasi NPT, dan menjamin keselamatan dan keekonomian operasi pemboran pada zona bertekanan ekstrem. Sebagai rekomendasi untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengevaluasi performa aditif ini pada variasi temperatur tinggi guna mensimulasikan kondisi termal bawah permukaan, serta penggunaan material pada sistem Reservoir *Drill-In Fluid* (RDIF).

Daftar Pustaka

[1] A. T. Bourgoyne Jr., K. K. Millheim, M. E. Chenevert, and F. S. Young Jr., *Applied Drilling Engineering*. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 1986, doi: 10.2118/9781555630010.

[2] W. Kibikas *et al.*, "Evaluation of lost circulation material sealing for geothermal drilling," *Energies*, vol. 17, no. 11, p. 2703, Jun. 2024, doi: 10.3390/en17112703.

[3] L. Samura *et al.*, "Optimization of alternative CMC sources from rice husk, sawdust in water-based drilling fluids," *Scientific Contributions Oil and Gas (SCOG)*, vol. 48, no. 3, pp. 120–130, Nov. 2025, doi: 10.29017/SCOG.48.3.120.

[4] H. C. H. Darley and G. R. Gray, *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*, 6th ed. Houston, TX: Gulf Professional Publishing, 2011, doi: 10.1016/C2009-0-63973-5.

[5] Q. Fang *et al.*, "Formation-damage mechanism and gel-breaker-free drill-in fluid for carbonate reservoir," *Gels*, vol. 8,

no. 9, p. 565, Sep. 2022, doi: 10.3390/gels8090565.

[6] G. C. Howard and P. P. Scott, "An analysis and the control of lost circulation," *Transactions of the AIME*, vol. 192, pp. 171–182, 1951, doi: 10.2118/951171-G.

[7] K. R. Klungtvedt *et al.*, "The fundamental principles and standard evaluation for fluid loss and possible extensions of test methodology to assess consequences for formation damage," *Energies*, vol. 14, no. 8, p. 2252, Apr. 2021, doi: 10.3390/en14082252.

[8] M. E. Amanullah, "Application of indigenous eco-friendly materials as lost circulation additives," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 146, pp. 385–395, 2016, doi: 10.1016/j.petrol.2016.06.024.

[9] J. A. Ali *et al.*, "Lost circulation in fractured carbonate formations: Mechanisms, materials, and evaluations," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 222, p. 111327, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.petrol.2023.111327.

[10] A. Q. Nayberg, "Laboratory study of lost circulation materials for use in both oil-base and water-base drilling muds," *SPE Drilling Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 229–236, 1987, doi: 10.2118/14723-PA.

[11] A. Abrams, "Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion," *Journal of Petroleum Technology*, vol. 29, no. 5, pp. 586–592, 1977, doi: 10.2118/5713-PA.

[12] G. E. Loeppke, D. A. Glowka, and E. K. Wright, "Design and evaluation of lost-circulation materials for severe environments," *Journal of Petroleum Technology*, vol. 42, no. 3, pp. 328–337, 1990, doi: 10.2118/18022-PA.

[13] S. Savari *et al.*, "Advances in fibrous lost circulation materials for high-pressure high-temperature applications," *SPE Drilling & Completion*, vol. 37, no. 2, pp. 145–158, Jun. 2022, doi: 10.2118/208740-PA.

[14] API, *Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids*, API RP 13B-1, 5th ed. Washington, D.C.: American Petroleum Institute, 2019.

[15] M. Tabatabaei *et al.*, "From particles to networks: A review of shape memory polymer and other fibrous lost circulation materials," *Processes*, vol. 14, no. 6, p. 939, Mar. 2026, doi: 10.3390/pr14060939.

[16] A. Satiyawira *et al.*, "Study of using natural cellulose fibers as lost circulation material," in *Proceedings of the International Petroleum and Geothermal Conference*, Jakarta, Indonesia, Aug. 2020, pp. 45–50, doi: 10.1088/1755-1315/802/1/012015.