

Analisis Kuat Tekan *Sulfur Polymer Concrete* dari Pemanfaatan Limbah Sulfur Tanpa dan Dengan Proses Pemadatan

Nur Fajar Aprilia Sari¹, Amanda Rosalina², Mar'atus Sholihah³, Ovi Prina Gastriani⁴, Ria Rismawati⁵, Luqman Cahyono⁶, Muhammad Akbar Febianto⁷

^{1,3,5,7}Program Studi Teknik Pengolahan Limbah, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

²Program Studi Teknik Desain dan Manufaktur, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

⁴Program Studi Manajemen Bisnis, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya

⁶Program Studi Teknik Perancangan dan Konstruksi Kapal, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

*Koresponden email: nurfajar@ppns.ac.id

Diterima: 13 Oktober 2025

Disetujui: 18 November 2025

Abstract

The mixture of hydrocarbon compounds in crude oil accounts for 90-95% of the oil's weight, while the remainder consists of non-hydrocarbons such as sulfur, oxygen, nitrogen, and metals. Sulfur in crude oil is removed due to its odor and corrosive properties. If this sulfur waste is not managed properly, it can have negative impacts on the environment. This research aims to analyze the compressive strength behavior of Sulfur Polymer Concrete (SPC) produced without a compaction process and Sulfur Polymer Concrete produced with a compaction process. SPC produced with a compaction process has a higher compressive strength than SPC produced without compaction. This is evident in the A3 variation, where the A3 variation produced with compaction has a compressive strength of 14 MPa, while the A3 variation produced without compaction has a compressive strength of 3.4 MPa. The similarity in the compressive strength of SPC produced without compaction and SPC produced with compaction lies in the pattern where the compressive strength reaches a saturation point. The addition of sulfur increases the compressive strength, and when it reaches its saturation point, the strength decreases with further addition because there is no more aggregate available to be bound, causing the sulfur to solidify.

Keywords: crude oil, sulfur polymer concrete, compressive strength

Abstrak

Campuran senyawa hidrokarbon dalam minyak mentah mencapai 90-95% berat minyak, sementara sisanya adalah non-hidrokarbon seperti sulfur, oksigen, nitrogen, dan logam. Sulfur dalam minyak mentah akan dilakukan pembuangan dikarenakan baunya dan sifatnya yang korosif. Limbah sulfur ini apabila tidak ditangani dengan tepat dapat menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku kuat tekan *Sulfur Polymer Concrete* (SPC) yang dibuat tanpa proses pemadatan dan *Sulfur Polymer Concrete* yang dibuat dengan proses pemadatan. SPC yang dibuat dengan proses pemadatan memiliki kuat tekan yang lebih besar daripada kuat tekan SPC yang dibuat tanpa proses pemadatan. Terlihat pada variasi A3, dimana variasi A3 yang dibuat dengan proses pemadatan memiliki kuat tekan sebesar 14 MPa, sedangkan variasi A3 yang dibuat tanpa proses pemadatan memiliki kuat tekan sebesar 3,4 MPa. Persamaan kuat tekan SPC yang dibuat tanpa proses pemadatan dan SPC yang dibuat dengan proses pemadatan terletak pada pola kuat tekan yang mengalami titik jenuh. Penambahan sulfur meningkatkan kuat tekan dan ketika mencapai titik jenuhnya akan turun seiring penambahannya karena tidak ada lagi agregat yang dapat diikat sehingga sulfur akan memadat.

Kata Kunci: minyak bumi, sulfur, bata beton pejal, kuat tekan

1. Pendahuluan

Adanya peningkatan populasi global mendorong peningkatan kebutuhan energi. Minyak bumi tetap menjadi sumber energi utama dengan 31,6% konsumsi energi dunia pada tahun 2023. Selain sebagai sumber energi, minyak bumi dan senyawa hidrokarbon memiliki peranan penting dalam produksi industri petrokimia. Eksplorasi minyak bumi konvensional hanya mampu memanfaatkan sekitar sepertiga dari total minyak [1]. Hal ini diperlukan pengembangan metode eksplorasi untuk meningkatkan efisiensi.

Berdasarkan panduan PPSDM, proses pengolahan minyak di kilang melibatkan berbagai alat seperti heat exchanger, evaporator, furnace, kolom distilasi, fraksinasi, stripper, kondensor, cooler, dan separator. Hasil dari proses ini adalah minyak mentah atau *crude oil*.

Crude oil (minyak mentah) adalah campuran senyawa hidrokarbon yang tidak seragam, terbentuk melalui proses organik dan anorganik. Secara organik, *crude oil* dihasilkan dari penguraian senyawa organik organisme laut jutaan tahun lalu yang tertutup lumpur dan kemudian berubah menjadi batuan karena tekanan lapisan di atasnya. Minyak dan gas ini meresap dalam batuan berpori dan dapat bermigrasi melalui lapisan permeabel hingga terkonsentrasi di bawah lapisan kedap [2]. Minyak bumi memiliki peran dalam keberlangsungan hidup manusia sebagai sumber energi untuk bahan bakar seperti bensin, solar, dan avtur. Konsumsi bahan bakar di Indonesia saat ini meningkat seiring dengan banyaknya kendaraan bermotor di pasaran [3]. Minyak mentah (*crude oil*) terdiri dari komponen hidrokarbon dan non-hidrokarbon. Campuran senyawa hidrokarbon dalam minyak mentah mencapai 90-95% berat minyak, sementara sisanya adalah non-hidrokarbon seperti sulfur, oksigen, nitrogen, dan logam [4].

Sulfur dalam minyak mentah biasanya ditemukan dalam bentuk Hidrogen Sulfida (H_2S) yang tidak diinginkan karena baunya yang tidak sedap seperti telur busuk dan sifatnya yang korosif. Sulfur dalam minyak mentah bisa berupa unsur terlarut dengan kadar berkisar antara 0,04–6%. Kandungan sulfur pada minyak bumi di Indonesia kurang dari 1% berat. Saat minyak mentah didestilasi, sulfur akan terdistribusi dengan kandungan lebih tinggi pada fraksi minyak yang lebih berat dan residu sekitar 90% berat dari sulfur dalam umpan [5]. Di dalam kehidupan, sulfur ini penting dan mengandung dua asam amino [6]. Sulfur memiliki kemampuan luar biasa untuk membentuk berbagai modifikasi alotropik karena tingginya kemampuan atomnya untuk berikatan satu sama lain. Kemampuan ini memungkinkan sulfur membentuk molekul cincin atau rantai yang dapat digunakan sebagai bahan pengikat penganti semen dalam beton [7].

Beton adalah bahan konstruksi yang terdiri dari semen sebagai perekat, pasir atau kerikil sebagai agregat, dan kadang-kadang juga ditambahkan bahan non-senyawa tertentu [8]. Untuk mendapatkan kualitas beton tertentu perlu ditambahkan material tertentu dan memperhatikan karakteristik bahan [9]. Namun, beton konvensional dengan perekat semen Portland memiliki kelemahan seperti berat yang relatif tinggi, waktu pengerasan yang lama (sekitar 28 hari untuk mencapai kekuatan maksimal), serta ketahanan rendah terhadap lumut atau kelembaban tinggi yang dapat membuat beton cepat rapuh [10]. Alternatif yang dapat mengatasi kekurangan dari beton konvensional adalah penggunaan *Sulfur Polymer Concrete* (SPC). Beton polimer adalah beton yang dibuat dengan mencampurkan agregat kasar atau halus dengan bahan perekat berupa polimer thermoset [11]. Beton sulfur memiliki komposisi yang relatif sederhana, tetapi menawarkan sifat dan karakteristik yang memperkuat konstruksi [12]. Salah satu keunggulan utamanya adalah kemampuannya untuk mencapai kekuatan optimal dalam waktu hanya 24 jam [13]. Dalam penelitian ini, bertujuan untuk mengetahui perbedaan dan persamaan perilaku kuat tekan dari *Sulfur Polymer Concrete* yang dibuat tanpa proses pemadatan dan *Sulfur Polymer Concrete* yang dibuat dengan proses pemadatan.

2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini, material utama yang digunakan dalam pembuatan *Sulfur Polymer Concrete* (SPC) adalah sulfur yang telah dipolimerasi. Sulfur merupakan material komposit yang tahan terhadap korosi, memiliki kekuatan tinggi, permeabilitas rendah, fleksibilitas sedang, dan tahan api. Selain itu, material yang digunakan adalah agregat, bitumen emulsifier, dan bahan pengawet. Jenis dan jumlah pengisi serta aditif pengubah memainkan peran penting dalam menentukan karakteristik ketahanan air dari komposit sulfur. Karakteristik ketahanan air adalah kunci untuk menghasilkan material dengan performa tinggi yang tahan terhadap kondisi lingkungan yang keras [14]. Selain itu, pemberian bitumen membantu memecah monomer menjadi tetesan kecil yang stabil dalam air sehingga memungkinkan polimerisasi terjadi dan menghasilkan partikel polimer dengan ukuran terkendali.

Dari material penyusun *Sulfur Polymer Concrete* (SPC), dilakukan pengujian karakteristik material, yaitu pengujian XRF (*X-Ray Fluorescence*) pada sulfur. Analisis XRF (*X-Ray Fluorescence*) adalah metode analisis instrumental yang digunakan untuk menentukan komposisi unsur kimia dalam suatu sampel. Teknik ini memanfaatkan sinar-X untuk merangsang atom-atom dalam sampel, yang kemudian menghasilkan flouresens atau radiasi sekunder yang dapat diukur untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang ada serta konsentrasi mereka dalam sampel tersebut.

Pencampuran *Sulphur polymer concrete* (SPC) untuk menentukan bahan-bahan yang diperlukan dalam pembuatan benda uji berukuran 50 x 50 x 50 mm, sehingga diperoleh komposisi campuran yang sesuai dengan kombinasi yang telah ditentukan. Pencampuran ini dilakukan pada suhu 130

°C dengan variasi yang diizinkan dari 125 °C hingga 140 °C. Pada table 1 menunjukkan mix design Sulfur Polymer Concrete (SPC) dengan dilakukan penambahan 10% sulfur pada setiap variasi sehingga Bitumen Emulsifier juga bertambah seiring penambahan sulfur karena kebutuhan Bitumen Emulsifier didapatkan dari 2,5% massa total bahan.

Tabel 1. Mix design Sulphur polymer concrete (SPC)

Kode Benda Uji Cetakan Kubus	Agregat (Gram)	Percentase (%)	Sulfur (Gram)	Percentase (%)	Bitumen Emulsifier 2,5% dari Total Massa Bahan (Gram)	Jumlah Benda Uji
A1	136,75	72,6	51,63	27,4	4,71	3
A2	136,75	72,6	56,79	37,4	4,84	3
A3	136,75	72,6	61,95	47,4	4,97	3
A4	136,75	72,6	67,11	57,4	5,10	3
A5	136,75	72,6	72,28	67,4	5,23	3
Total						15

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton untuk menahan gaya tekan per satuan luas. Semakin tinggi kekuatan struktur yang diinginkan, semakin tinggi mutu beton yang dihasilkan. Nilai kuat tekan beton diperoleh melalui metode pengujian standar dengan menggunakan mesin uji yang memberikan beban tekan bertahap pada benda uji berbentuk kubus hingga hancur [15]. Standar pengujian yang digunakan adalah SNI 8640:2018 dan ASTM C 39/C 39M-04a.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Pengujian XRF Sulfur

Pengujian XRF dilakukan dengan tujuan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang mungkin terdapat dalam limbah sulfur. Metode ini digunakan untuk mengetahui komposisi kimia serta konsentrasi masing-masing unsur di dalam limbah dapat diketahui.

Tabel 2. Hasil Pengujian XRF Limbah Sulfur

Jenis Unsur	Konsentrasi	Jenis Oksida	Konsentrasi
S	97,8%	SO ₃	99,2%
K	0,08%	K ₂ O	0,03%
Ca	0,72%	CaO	0,27%
Ti	0,0083%	TiO ₂	0,032%
Fe	1,13%	Fe ₂ O ₃	0,441%
Cu	0,11%	CuO	0,035%
Zn	0,02%	ZnO	0,006%

Berdasarkan data hasil analisis XRF limbah sulfur diketahui bahwa nilai S pada limbah sulfur menunjukkan hasil yang tinggi yakni 97,8%. Kekuatan tekan pada Sulphur Polymer Concrete (SPC) dipengaruhi pada kemurnian sulfur. Hal ini menunjukkan bahwa kemungkinan kekuatan SPC yang dibuat tidak akan sekuat sulfur murni.

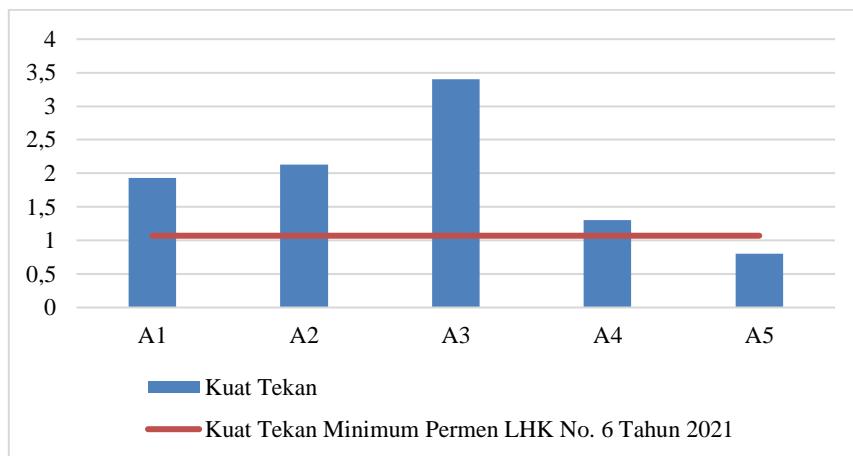
Hasil Uji Kuat Tekan Sampel Uji Tanpa Pemadatan

Tujuan dari uji kuat tekan adalah untuk mendapatkan kualitas hasil penelitian atau benda uji yang telah dibuat. Benda uji yang dilakukan pengujian dibuat tanpa perlakuan khusus dengan cara dituang pada cetakan berbentuk kubus berukuran 50 x 50 x 50 mm. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan memberikan tekanan pada benda uji hingga hancur menggunakan alat bernama *Compression Machine*. Pengujian kuat tekan dilakukan mengacu pada SNI 03-1974-1990 tentang pengujian kuat tekan beton. Pengujian dilakukan pada benda uji dengan umur 14 hari. Dalam waktu 14 hari, beton dapat mencapai keketukan 88% yang dimana itu sudah cukup merepresentasikan hasil dari kekuatan tekan beton maksimal. Penentuan waktu pengujian ini juga didasarkan pada sifat beton sulfur yang dimana pengerasan dalam beton sulfur yang relatif lebih singkat. Dalam pelaksanaannya SPC dapat mengeras dalam waktu kurang dari 24 jam.

Tabel 3. Hasil Uji Kuat Tekan *Sulphur Polymer Concrete* (SPC)

Kode Sampel	Komposisi (gr)		Berat Densitas (gr/cm ³)	Rata – Rata Berat Densitas (gr/cm ³)	Kuat Tekan (Mpa)	Rata – Rata Uji Kuat Tekan (MPa)
	Aggregat	Sulfur				
A1	136.75	51.63	1,76		2,0	
			1,7	1,7	2,0	1,9
			1,7		1,6	
A2	136.75	56.79	1,6		2,4	
			1,8	1,7	2,4	2,1
			1,7		1,6	
A3	136.75	61.95	1,8		4,0	
			1,9	1,8	4,0	3,4
			1,8		2,4	
A4	136.75	67.11	1,6		1,2	
			1,5	1,6	1,2	1,3
			1,8		1,6	
A5	136.75	72.28	1,3		0,8	
			1,6	1,5	0,8	0,8
			1,6		0,8	

Berdasarkan hasil analisis data yang telah disajikan dalam tabel, diketahui bahwa rentang nilai kuat tekan pada benda uji relatif rendah. Nilai tertinggi tercatat pada *mix design* dengan kode A3 dengan kekuatan tekan yang dimiliki sebesar 3,4 mega pascal (MPa). Hal ini mengindikasikan bahwa benda uji dari penelitian ini tidak memenuhi standar untuk digunakan sebagai beton struktur.

**Gambar 1.** Grafik Uji Kuat Tekan Tanpa Pemadatan

Gambar 1 menyajikan hasil kuat tekan *Sulphur polymer concrete* (SPC). Dapat diketahui bahwasanya setiap penambahan 10% massa sulfur pada komposisi menyebabkan penambahan nilai kuat tekan SPC. Penambahan penggunaan sulfur sebanyak 10% dengan limbah sulfur yang tidak divariasikan menyebabkan pengikatan secara merata oleh sulfur yang dipolimerisasikan secara thermoset dan penambahan emulsifier berupa aspal cair atau bitumen emulsi. Hal tersebut ditunjukkan dengan penambahan kekuatan pada benda uji dengan kode A1 hingga A3. Meskipun terdapat peningkatan, penambahan 40% sulfur mengalami penurunan yang cukup signifikan. Hal ini terjadi karena terdapat kejemuhan terhadap sulfur yang dimodifikasi sehingga kurangnya agregat yang dapat diikat yang menyebabkan penurunan kuat tekan pada SPC.

Hasil Kuat Tekan Benda Uji dengan Pemadatan

Perlakuan dalam pembuatan benda uji dilakukan dengan pemadatan benda uji dengan menggunakan alat press manual. Komposisi benda uji yang digunakan pada proses pemadatan yakni 3 terbaik dari percobaan sebelumnya. Kekuatan tekan yang dihasilkan dari modifikasi beton sulfur, penambahan sulfur yang diberikan pada komposisi tertentu akan memberikan terus memberikan kekuatan tekan hingga mencapai titik puncak dan akan menurun seiring dengan penambahan jumlah sulfur . Hal ini telah sesuai

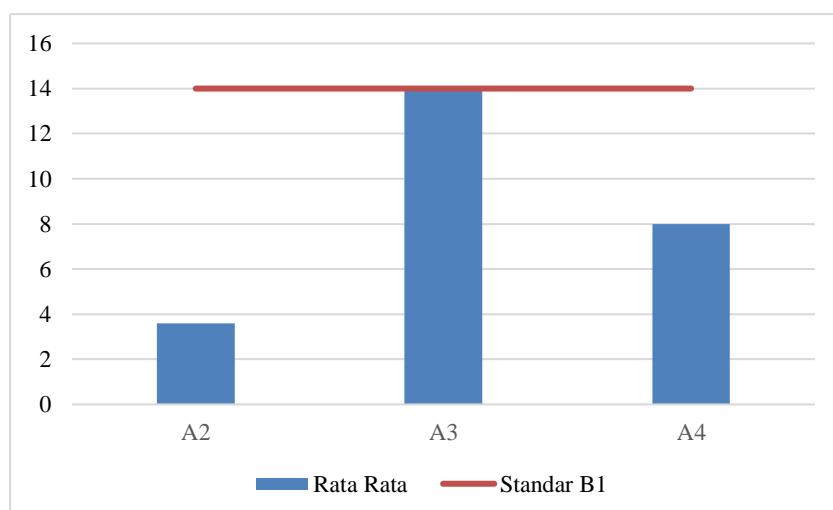
dengan percobaan pertama tanpa pemanfaatan yang dimana seiring dengan penambahan sulfur kuat tekan naik hingga variasi ke-3 dan turun pada variasi ke-4. Oleh karena itu, dalam proses pembuatan SPC dengan proses pemanfaatan secara manual dilakukan pada variasi 2, 3 dan variasi 4. Pengepresan dilakukan dengan terukur sebanyak 9 kali putaran sehingga adukan benda uji dapat memadat sesuai keinginan. Perlakuan ini menghasilkan perubahan hasil pengujian yang signifikan hingga lebih dari 3 kali lipat. Berikut dilampirkan hasil pengujian yang telah dilakukan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Hasil Uji Kuat Tekan *Sulphur Polymer Concrete* (SPC)

Kode Sampel	Komposisi		Massa Benda Uji (Gram)	Rata – Rata Massa Benda Uji (Gram)	Kuat Tekan (MPa)	Rata – Rata Kuat Tekan (MPa)	Mutu Beton
	Agregat	Sulfur					
A2	136.75	56.79S	212,6	209,5	4,4	3,6	-
			206,4		2,8		
A3	136.75	61.95	238	245	15,2	14	K-125
			252		12,8		
A4	136.75	67.11	223,8	229,35	7,2	8	K-75
			234,9		8,8		

Pengujian kuat tekan pada benda uji yang telah dipadatkan dilakukan dengan dua kali pengujian setiap masing – masing variasi. Data yang disajikan pada **Tabel 4** mengindikasikan hal yang sama dengan pengujian sebelumnya. Setiap penambahan sulfur menghasilkan penambahan kuat tekan dan ketika mencapai titik jenuhnya akan turun seiring penambahannya. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Roman Fediuk (2020) yang menyatakan bahwa setiap penambahan sulfur akan menambah kekuatan tekan SPC dan setelah mendapatkan kekuatan yang optimal, kekataan tekan SPC akan turun dikarenakan sulfur yang dimodifikasi telah mencapai titik jenuhnya karena tidak ada lagi agregat yang dapat diikat sehingga sulfur akan memadat menjadi kristal sulfur. Pemanfaatan juga mempengaruhi penambahan kekuatan SPC yang ditunjukkan pada data tanpa dan dengan pemanfaatan yang disajikan. Pemanfaatan ini dimaksudkan untuk meningkatkan kepadatan campuran SPC, mengurangi rongga udara, dan meningkatkan kekuatan serta daya tahan SPC yang dibuat.

Benda uji yang dilakukan pemanfaatan pada variasi A3 dan A4 telah memenuhi beton yakni beton mutu rendah yakni beton mutu K-140 dan K-75. Beton jenis ini umumnya digunakan sebagai beton non struktural seperti bata beton pejal. Bata beton pejal memiliki beberapa mutu, namun yang umum dibuat adalah bata beton pejal mutu B1. Berdasarkan SNI 03 – 0349:1989 nilai kuat tekan minimum untuk pembuatan bata beton pejal yakni dengan mutu K-125. Hal ini berarti SPC variasi A3 telah memenuhi persyaratan untuk dilakukan pembuatan produk berupa bata beton pejal dengan mutu B1.

**Gambar 2.** Kuat Tekan untuk Bata Beton Pejal Mutu B1

4. Kesimpulan

Perbedaan kuat tekan Sulfur Polymer Concrete (SPC) yang dibuat tanpa proses pemadatan dan Sulfur Polymer Concrete yang dibuat dengan proses pemadatan terletak pada setiap variasinya, dimana kuat tekan Sulfur Polymer Concrete (SPC) yang dibuat dengan proses pemadatan lebih besar daripada kuat tekan Sulfur Polymer Concrete (SPC) yang dibuat tanpa proses pemadatan. Hal ini terlihat jelas pada variasi A3, dimana variasi A3 yang dibuat dengan proses pemadatan memiliki kuat tekan sebesar 14 MPa, sedangkan variasi A3 yang dibuat tanpa proses pemadatan memiliki kuat tekan sebesar 3,4 MPa. variasi A3 yang dibuat dengan proses pemadatan telah memenuhi beton yakni beton mutu rendah yakni beton mutu K-140 dan K-75. Beton jenis ini umumnya digunakan sebagai beton non struktural seperti bata beton pejal.

Persamaan kuat tekan Sulfur Polymer Concrete (SPC) yang dibuat tanpa proses pemadatan dan Sulfur Polymer Concrete yang dibuat dengan proses pemadatan terletak pada pola kuat tekan yang mengalami titik jenuh. Hal ini dibuktikan dengan penambahan sulfur menghasilkan penambahan kuat tekan dan ketika mencapai titik jenuhnya akan turun seiring penambahannya karena tidak ada lagi agregat yang dapat diikat sehingga sulfur akan memadat menjadi kristal sulfur.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan dana hibah penelitian DIPA 2025 untuk dukungan akademik dalam penyelesaian penelitian ini.

6. Daftar Pustaka

- [1] V. Alvarado and E. Manrique, "Enhanced oil recovery: An update review," 2010, *MDPI AG*. doi: 10.3390/en3091529.
- [2] P. A. Allen and J. R. Allen, "Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment Third Edition."
- [3] P. K. Prasetyanto, E. Gravitiani, Suryanto, Mulyanto, and A. S. M. Al Ahmad, "The impact of economic growth on energy consumption: An error correction approach in Indonesia," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2025. doi: 10.1088/1755-1315/1438/1/012050.
- [4] J. G. Speight, "The Chemistry and Technology of Petroleum 5th Edition James G. Speight install download," 2014. [Online]. Available: <https://textbookfull.com/product/natural-gas-a-basic-handbook->
- [5] S. Brunet, D. Mey, G. Pérot, C. Bouchy, and F. Diehl, "On the hydrodesulfurization of FCC gasoline: A review," Jan. 10, 2005. doi: 10.1016/j.apcata.2004.10.012.
- [6] G. I. Giles, M. J. Nasim, W. Ali, and C. Jacob, "The reactive sulfur species concept: 15 years on," May 23, 2017, *MDPI*. doi: 10.3390/antiox6020038.
- [7] A. M. O. Mohamed and M. El Gamal, "A Novel Polymerized Sulfur Concrete for Underground Hydrogen Storage in Lined Rock Caverns," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 19, Oct. 2024, doi: 10.3390/su16198595.
- [8] A. . Neville, *Properties of Concrete, Fifth Edition*. Prentice Hall, 2012.
- [9] R. Snellings, G. Mertens, and J. Elsen, "Supplementary cementitious materials," 2012. doi: 10.2138/rmg.2012.74.6.
- [10] J. J. Biernacki *et al.*, "Cements in the 21st century: Challenges, perspectives, and opportunities," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 100, no. 7, pp. 2746–2773, Jul. 2017, doi: 10.1111/jace.14948.
- [11] M. T. Hamza and A. M. Hameed, "Manufacturing Polymer Concrete by Using Reused Aggregates." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/350214000>
- [12] M. P. S. N. Rizwan, M. S. Dhiwagar, M. Jesuraj, M. V. P. Vipin, M. V. Veera Anbuvel, and M. S. Prabhakaran, "Feasibility and Application of Sulfur In Concrete Structures." [Online]. Available: www.ijert.org
- [13] A.-M. Onsy. Mohamed and Maisa. El-Gamal, *Sulfur concrete for the construction industry : a sustainable development approach*. J. Ross Pub., 2010.
- [14] R. Fediuk *et al.*, "A critical review on the properties and applications of sulfur-based concrete," Nov. 01, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ma13214712.
- [15] Ahmed, Mohd, et al. "Development of concrete mixture design process using MCDM approach for sustainable concrete quality management." *Sustainability* 12.19 (2020): 8110.