

## Stabilisasi/Solidifikasi Limbah Mengandung Fenol Menggunakan Cangkang Kerang dan Bentonit

**Aura Sita Aulia Ramadhani<sup>1</sup>, Ayu Nindyapuspa<sup>1\*</sup>, dan Luqman Cahyono<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Pengolahan Limbah, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111

\*E-mail: [ayunindyapuspa@ppns.ac.id](mailto:ayunindyapuspa@ppns.ac.id)

### Abstrak

Pengeboran dan pemisahan minyak menghasilkan limbah berbahaya berupa fenol. Menurut PP No. 22 Tahun 2021, limbah B3 perlu diolah agar tidak mencemari lingkungan. Penelitian ini menggunakan metode stabilisasi/solidifikasi (S/S) dengan bentonite dan cangkang kerang darah. Perbandingan bentonit:serbuk cangkang kerang darah dalam persen berat adalah 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, dan 0:100. Limbah artifisial pengeboran dan pemisahan minyak mengandung fenol 3000 ppm. Proses *curing* menggunakan metode perendaman dan penutup basah selama 28 hari. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis efektivitas bentonit dan cangkang kerang darah dalam mengimobilisasi fenol serta membandingkan hasil kuat tekan dengan syarat pada BAPEDAL No. 03 tahun 1995 dan hasil TCLP dengan baku mutu pada PP No. 22 Tahun 2021. Hasil kuat tekan pada benda uji metode perendaman perbandingan 100:0 sebesar 20,3 ton/m<sup>2</sup>; 75:25 sebesar 27,2 ton/m<sup>2</sup>; 50:50 sebesar 13,6 ton/m<sup>2</sup>; 25:75 dan 0:100 sebesar 6,8 ton/m<sup>2</sup>. Sedangkan hasil kuat tekan pada benda uji metode penutup basah perbandingan 100:0 sebesar 33,9 ton/m<sup>2</sup>; 75:25 sebesar 27,2 ton/m<sup>2</sup>; 50:50 sebesar 13,6 ton/m<sup>2</sup>; 25:75 dan 0:100 sebesar 6,8 ton/m<sup>2</sup>. Hasil kuat tekan pada kedua metode *curing* dengan perbandingan 100:0, 75:25, 50:50 melebihi nilai 10 ton/m<sup>2</sup>. Hasil uji TCLP menunjukkan pada benda uji dengan perbandingan 100:0 di kedua metode curing melebihi TCLP B sedangkan pada perbandingan 75:25, 50:50 di kedua metode curing tidak melebihi TCLP B

**Keywords:** Bentonit, Fenol, Serbuk Cangkang Kerang, Stabilisasi/Solidifikasi

### 1. PENDAHULUAN

Langkah-langkah utama dalam pencegahan untuk mengurangi risiko melibatkan pengelolaan limbah, pengurangan, penggunaan kembali, stabilisasi, pemadatan, dan enkapsulasi. Di Amerika Serikat, teknologi Stabilisasi/Solidifikasi (S/S) digunakan di lokasi landfill aman untuk mematuhi persyaratan Amandemen Limbah Padat dan Berbahaya tahun 1984 dalam Undang-Undang Konservasi dan Pemulihan Sumber Daya (RCRA). Meskipun ada beberapa kekurangan dalam metode S/S, seperti waktu pengerasan yang lama, tingkat porositas yang cukup tinggi, dan ketidakcocokan dengan limbah organik, semen portland masih tetap menjadi bahan utama dalam proses solidifikasi. Kontaminan organik dapat mempengaruhi proses pengerasan, stabilitas, dan ketahanan bentuk produk S/S yang menggunakan semen dan material pozzolan dalam teknologi S/S. Untuk mengatasi hal ini, ada potensi untuk memodifikasi pengikat semen dan bahan lainnya agar cocok untuk pemadatan/stabilisasi limbah berbahaya organik yang bersifat tidak mudah menguap (cair dan semi-padat). Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk memenuhi permintaan saat ini dalam pengelolaan limbah berbahaya organik.

Berdasarkan penelitian American Nuclear Society Leach Test (ANSI/ANS-16.1) pada tahun 1986, ditemukan bahwa penggunaan hanya semen dalam metode S/S tidak cocok untuk mengimobilisasi fenol (Heidarzadeh, dkk., 2017). Eksperimen yang dilakukan sebelumnya yang dikutip oleh Heidarzadeh, dkk., (2017), S/S pada tanah yang terkontaminasi dengan konsentrasi fenol yang berbeda menggunakan bentonit dan semen berhasil menurunkan kadar fenol sebanyak 70 persen setelah pelindian dalam sampel selama 180 hari. Bentonit berperan sebagai pemerangkap kandungan organik sehingga kadar fenol dapat berkurang. Namun, penggunaan bentonit murni memiliki kekurangan, yakni menurunnya kekuatan tekan bebas (UCS) dari matriks seiring dengan peningkatan kadar fenol. Oleh karena itu, diperlukan penguat alternatif untuk mengatasi penurunan kekuatan matriks UCS.

Cangkang kerang dipilih sebagai penguat alternatif karena memiliki karakteristik mirip dengan semen Portland. Selain itu, penggunaan cangkang kerang juga merupakan solusi untuk masalah limbah laut di dekat pantai. Saat ini, cangkang kerang sering menumpuk di tepi pantai, karena pemanfaatannya yang masih sangat minim. Namun, cangkang kerang memiliki kandungan kalsium yang tinggi dan juga mengandung alumina dan senyawa kimia silika yang berpotensi sebagai bahan baku beton alternatif (Karimah, dkk., 2020).

Penggunaan cangkang kerang sebagai bahan tambahan dalam metode S/S untuk limbah mengandung fenol menjadi alternatif yang menjanjikan, tidak hanya karena karakteristik mirip semen portland, tetapi juga

dapat mengatasi masalah limbah laut dan memberikan manfaat tambahan dalam pengelolaan limbah organik dan bahan baku alternatif dalam industri beton.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kuat tekan serta menganalisis penurunan konsentrasi fenol pada benda uji. Benda uji yang diuji TCLP merupakan benda uji yang kuat tekannya lebih dari 10 ton/m<sup>2</sup>. Nilai minimum kuat tekan telah diatur pada BAPEDAL No.03 Tahun 1995.

## 2. METODE

### 2.1. Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Grinder (KM-CRH02)
- Oven (Universal Ovens Memmert UN-75)
- Ayakan 100 mesh
- Timbangan (Scale 0.1g - 3000g)
- Pengaduk (Pengaduk kaca 30 cm Herma)
- Cetakan 5cmx5cmx5cm
- Kain burlap 50cmx50cm
- Ember
- Vicat (Standar tes ASTM C187, C191, AASHTO T-129)
- Agitator (Kapasitas Ekstraksi: 6 x 1 liter, Kecepatan Putaran: 30 – 300 rpm)
- Spectrophotometri (Thermo Fischer Orion AquaMate 7100)
- Digital Concrete Compression Machine (Digital Concrete Compression Machine 2000 kN cap, 10 kN readability)

### 2.2. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Fenol
- Aquadest
- Bentonite
- Cangkang kerang
- Media penyaring serat kaca (glass fiber) dengan ukuran pori 0,6 $\mu$ m - 0,8 $\mu$ m
- Air bebas mineral
- Air pereaksi untuk ekstraksi senyawa organik volatile
- Asam klorida (HCl) 1,0 N
- Natrium hidroksida (NaOH) 1,0 N
- Asam asetat glasial (HOAc)
- Udara tekan

### 2.3. Prosedur

Cangkang kerang yang digunakan pada penelitian ini adalah cangkang kerang yang berada di tepi pantai Kenjeran. Cangkang kerang dibersihkan lalu direbus dengan air selama 30 menit. Setelah cangkang kerang direbus, dikeringkan dengan oven bersuhu 105°C selama 2 jam lalu digiling menggunakan grinder. Setelah digiling, serbuk cangkang kerang dioven kembali di suhu 105°C selama 1 jam untuk memastikan kadar air yang terkandung pada serbuk cangkang kerang kecil. Cangkang kerang yang telah dihaluskan diayak menggunakan ayakan 100 mesh. Hasil ayakan didapat digunakan sebagai pozzolan. Bentonit menggunakan jenis Ca-bentonit. Persentase berat bentonit:serbuk cangkang kerang yang digunakan sebesar 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, dan 0:100. Limbah yang digunakan yaitu limbah fenol buatan dengan konsentrasi fenol sebesar 3000 ppm.

Bahan-bahan yang telah disiapkan lalu dicampur hingga homogen dan dituang pada cetakan dengan ukuran cetakan 5x5x5cm. Benda uji yang telah memadat lalu di-*curing* selama 28 hari dengan 2 metode berbeda. Metode *curing* yang dilakukan yaitu metode *curing* perendaman dan metode curing penutup basah. Untuk penamaan benda uji seperti pada tabel berikut:

Tabel 2. 1 Penamaan Benda Uji

Persentase bentonit:serbuk cangkang kerang	Metode <i>curing</i>	
	Perendaman	Penutup Basah
100:0	A1	B1
75:25	A2	B2
50:50	A3	B3
25:75	A4	B4
0:100	A5	B5

Setelah masa curing, benda uji diuji kuat tekannya lalu dianalisis. Setelah dianalisis, benda uji yang bernilai lebih dari 10 ton/m<sup>2</sup> sesuai BAPEDAL No.03 Tahun 1995 diuji TCLP untuk dianalisis kemampuan bentonit dan cangkang kerang darah dalam mereduksi konsentrasi fenol. Hasil uji TCLP dianalisis dan dibandingkan dengan PP No. 22 Tahun 2021.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

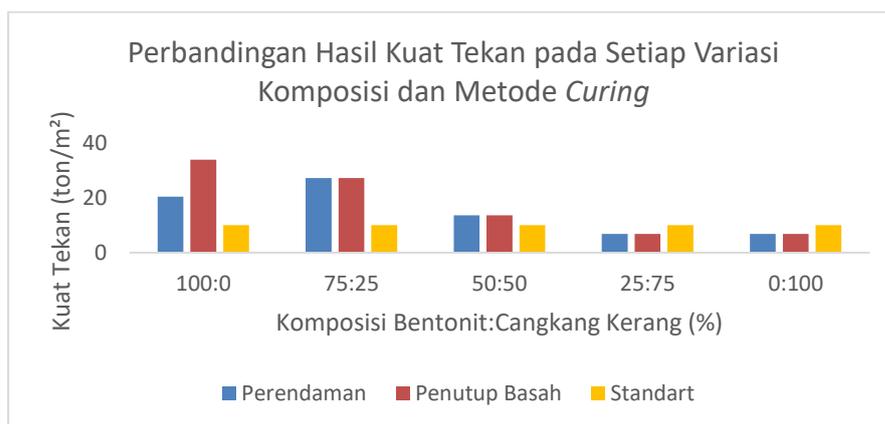
#### 3.1. Uji Kuat Tekan

Setelah benda uji dicetak dan di-curing, benda uji diuji kuat tekan. Didapatkan hasil kuat tekan ditunjukkan pada tabel 3.1. berikut

Tabel 3. 1 Hasil Uji Kuat Tekan

Nama Benda	Nilai Kuat Tekan	
	ton/m <sup>2</sup>	MPa
A1	20,4	0,2
A2	27,2	0,27
A3	13,6	0,13
A4	6,8	0,07
A5	6,8	0,07
B1	33,9	0,33
B2	27,2	0,27
B3	13,6	0,13
B4	6,8	0,06
B5	6,8	0,06

Dari data tabel tersebut dapat dibuat grafik perbandingan hasil kuat tekan pada setiap variasi komposisi dan metode curing yang ditunjukkan pada gambar 3.1



Gambar 3. 4 Grafik Perbandingan Hasil Kuat Tekan pada Setiap Variasi Komposisi dan Metode Curing

Berdasarkan hasil uji kuat tekan yang telah dilakukan, nilai kuat tekan tertinggi dicapai dengan menggunakan metode curing perendaman dan komposisi binder 75:25, mencapai 27,2 ton/m<sup>2</sup>. Sementara itu, nilai kuat tekan tertinggi yang dihasilkan dengan metode curing penutup basah adalah pada komposisi binder 100:0, mencapai 33,9 ton/m<sup>2</sup>. Namun, nilai kuat tekan terendah diperoleh dari komposisi binder

25:75 dan 0:100, baik dengan metode perendaman maupun penutup basah. Pada komposisi 100:0, 75:25, dan 50:50 dengan kedua metode curing perendaman dan penutup basah, nilai kuat tekan telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam BAPEDAL No. 03 tahun 1995 tentang Tata cara kerja stabilisasi/solidifikasi, yaitu memiliki nilai tekanan minimum sebesar 10 ton/m<sup>2</sup>.

Semakin banyak komposisi cangkang kerang yang ditambahkan, nilai kuat tekan cenderung menurun. Hubungan erat antara nilai kuat tekan dan pembentukan C-S-H dapat dijelaskan melalui reaksi berikut:



Kandungan CaO pada serbuk cangkang kerang sangat tinggi, mencapai 67,072%, namun kandungan SiO<sub>2</sub> pada cangkang kerang justru sangat rendah. Akibatnya, pembentukan C-S-H pada benda uji tidak dapat mencapai tingkat maksimal. Pernyataan tersebut juga diperkuat oleh penelitian Asbiartha, dkk, 2022, yang menyatakan bahwa serbuk cangkang kerang tidak dapat sepenuhnya menggantikan bahan binder karena hanya mengandung sekitar 7% zat kimia silica (SiO<sub>2</sub>), yang berfungsi sebagai perekat dan pengeras pada serbuk cangkang kerang.

Hal ini berbanding terbalik dengan kondisi CaO pada bentonite yang terbilang cukup sedikit yaitu sebesar 2,14 hingga 15,4% namun kandungan SiO<sub>2</sub> pada bentonite sebesar 37,88 hingga 64,43%. Sehingga saat bentonit bercampur dengan air, Ca(OH)<sub>2</sub> dapat bereaksi SiO<sub>2</sub> dengan baik. Hasil uji kuat tekan menunjukkan bahwa nilai kuat tekan pada benda uji dengan metode curing penutup basah lebih tinggi dibandingkan dengan metode curing perendaman. Perbedaan ini disebabkan karena pada saat melakukan curing perendaman, benda uji belum sepenuhnya kering. Karena pembentukan C-S-H belum sempurna akibat kelembaban, kualitas kekuatan benda uji menjadi berkurang.

### 3.2. Uji TCLP

Uji TCLP dilakukan pada enam benda uji yang telah memenuhi standar minimal persyaratan BAPEDAL No. 03 tahun 1995 tentang Tata cara kerja stabilisasi/solidifikasi, di mana setiap benda uji memiliki nilai tekanan minimum sebesar 10 ton/m<sup>2</sup>. Enam benda uji tersebut yaitu benda uji A1 dan B1 dengan perbandingan Bentonite:Serbuk cangkang kerang 100:0 dengan metode curing perendaman dan penutup basah, benda uji A2 dan B2 dengan perbandingan Bentonite:Serbuk cangkang kerang 75:25 dengan metode curing perendaman dan penutup basah, benda uji A3 dan B3 dengan perbandingan Bentonite:Serbuk cangkang kerang 50:50 dengan metode curing perendaman dan penutup basah. Hasil dari uji TCLP yang dilakukan ditunjukkan pada tabel 3.2 berikut

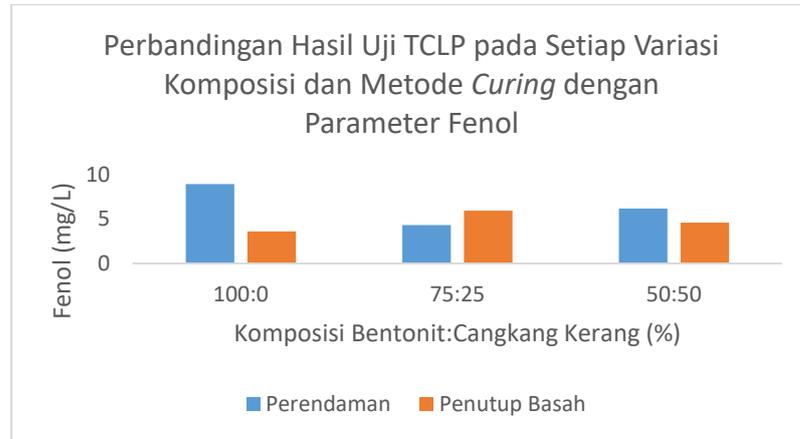
Tabel 3. 2 Hasil Uji TCLP Fenol

Kode Benda Uji	Baku Mutu* (mg/L)			Hasil Uji (mg/L)
	TCLP A	TCLP B	TCLP C	
A1	56,00	7,00	2,80	8,93
A2	56,00	7,00	2,80	4,32
A3	56,00	7,00	2,80	6,18
B1	56,00	7,00	2,80	3,59
B2	56,00	7,00	2,80	5,92
B3	56,00	7,00	2,80	4,57

\* PP RI No. 22 Tahun 2021

Hasil uji menunjukkan bahwa pada metode curing perendaman, benda uji dengan perbandingan bentonite:serbuk cangkang kerang 100:0 (A1) memiliki kandungan fenol paling tinggi dibandingkan dengan benda uji perbandingan bentonite:serbuk cangkang kerang 75:25 (A2) dan 50:50 (A3). Sementara itu, pada metode curing penutup basah, benda uji perbandingan bentonite:serbuk cangkang kerang 75:25 (B2) memiliki kandungan fenol paling tinggi dibandingkan dengan benda uji perbandingan

bentonite:serbuk cangkang kerang 100:0 (B1) dan 50:50 (B3). Hal ini lebih jelas terlihat pada grafik di gambar 3.2



Gambar 3. 5 Grafik Perbandingan Hasil Uji TCLP pada Setiap Variasi Komposisi dan Metode Curing dengan Parameter Fenol

Pada metode curing perendaman, benda uji perbandingan bentonite:serbuk cangkang kerang 100:0 (A1) telah melebihi baku mutu TCLP B, tetapi masih berada di bawah baku mutu TCLP A. Sedangkan pada benda uji dengan metode curing perendaman perbandingan bentonite:serbuk cangkang kerang 75:25 (A2) dan 50:50 (A3), kandungan fenolnya kurang dari baku mutu TCLP B. Pada metode curing penutup basah, benda uji perbandingan bentonite:serbuk cangkang kerang 100:0 (B1), 75:25 (B2), dan 50:50 (B3), kandungan fenolnya juga kurang dari baku mutu TCLP B.

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. 18 Tahun 2020 tentang Pemanfaatan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, disebutkan beberapa persyaratan untuk pemanfaatan limbah B3. Salah satu di antaranya adalah pemanfaatan limbah B3 untuk pembuatan produk beton, paving block, batako, conblock, bata ringan, dan sejenisnya. Pada persyaratan ini, disebutkan bahwa limbah B3 yang dapat dimanfaatkan harus telah lolos uji *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) B sebagaimana diatur dalam Lampiran V Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014. Parameter-parameter yang diuji dalam TCLP B mencakup Arsen (As), Kadmium (Cd), Krom valensi enam ( $Cr^{6+}$ ), Tembaga (Cu), Timbal (Pb), Merkuri (Hg), Nikel (Ni), Selenium (Se), dan Seng (Zn). Namun, dalam persyaratan tersebut tidak ada kriteria khusus yang menyebutkan parameter fenol sebagai syarat pemanfaatan limbah B3. Sehingga, dalam kasus ini, pemanfaatan limbah B3 yang mengandung fenol tidak dapat ditentukan berdasarkan persyaratan dalam peraturan tersebut. Untuk mengetahui efektifitas bentonit dan cangkang kerang dalam mereduksi konsentrasi fenol, persentase efektifitas dihitung dengan cara konsentrasi awal dikurangi konsentrasi akhir lalu dibagi dengan konsentrasi awal lalu dikali 100. Tabel perhitungan efektifitas ditunjukkan pada tabel 3.3

Tabel 3. 3 Persentase Efektifitas Bentonit dan Cangkang Kerang Mereduksi Konsentrasi Fenol

Kode Benda Uji	Konsentrasi Awal (mg/L)	Hasil Uji TCLP (mg/L)	Persentase Efisiensi
A1	3000	8,93	99,7%
A2	3000	4,32	99,8%
A3	3000	6,18	99,8%
B1	3000	3,59	99,8%
B2	3000	5,92	99,8%
B3	3000	4,57	99,8%

Proses solidifikasi/stabilisasi dengan menggunakan variasi komposisi bentonite:serbuk cangkang kerang 100:0, 75:25, dan 50:50 terbukti efektif dalam mengurangi perlintian fenol. Kehadiran

bentonit telah terbukti mampu mengurangi perlintian zat organik. Hal ini didukung oleh hasil penelitian Heidarzadeh, dkk., 2017, yang menunjukkan bahwa ketika persentase bentonite mencapai 30% dalam campuran, efek penurunan kadar fenolnya lebih efektif dibandingkan dengan persentase bentonite yang lebih rendah.

Selain keberadaan bentonit dalam campuran, faktor pH juga mempengaruhi interaksi antara bentonit dan fenol. Pada pH rendah (lingkungan asam), permukaan bentonit memiliki muatan positif yang lebih tinggi karena adanya gugus hidroksil terprotonasi ( $OH^+$ ) pada permukaannya. Fenol sebagai asam lemah, dapat melepaskan proton dan membentuk ion fenolat yang bermuatan negatif pada pH rendah. Ion fenolat yang bermuatan negatif berinteraksi dengan permukaan bentonit yang bermuatan positif melalui gaya tarik elektrostatis. Interaksi ini lebih kuat pada nilai pH yang lebih rendah, ketika permukaan bentonit memiliki muatan positif yang lebih besar. Oleh karena itu, pada pH rendah, pengikatan fenol oleh bentonit cenderung meningkat. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ahmadi & Igwegbe, 2018, yang menemukan bahwa konsentrasi fenol menurun seiring dengan penurunan pH dalam larutan dengan rentang pH 2 hingga 6. Peneliti lain seperti Asnaoui, dkk., 2020, juga telah menganalisis pengaruh pH terhadap kemampuan adsorpsi fenol pada bentonit. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin rendah pH larutan yang diuji, semakin tinggi kemampuan bentonit untuk mengikat fenol.

#### 4. KESIMPULAN

Sepuluh benda uji dengan variasi dan metode *curing* yang berbeda, terdapat 6 benda uji yang lebih dari 10 ton/m<sup>2</sup> yaitu pada metode curing perendaman, benda uji perbandingan bentonite:serbuk cangkang kerang 100:0 (A1), 75:25 (A2), dan 50:50 (A3) serta pada metode curing penutup basah, benda uji perbandingan bentonite:serbuk cangkang kerang 100:0 (B1), 75:25 (B2), dan 50:50 (B3). Keenam benda uji diuji TCLP dianalisis persentase efektifitas bentonit dan cangkang kerang mereduksi konsentrasi fenol. Didapatkan persentase efektifitas bentonit dan cangkang kerang mereduksi konsentrasi fenol terendah sebesar 99,7% pada benda uji perbandingan bentonite:serbuk cangkang kerang 100:0 dengan metode curing perendaman (A1).

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadi, S., & Igwegbe, C. (2018). Adsorptive Removal of Phenol and Aniline by Modified Bentonite: Adsorption Isotherm and Kinetics Study. *Applied Water Science*, 170.
- Asbiartha, P., Alfa, A., M, M., & Sudeska, E. (2022). Pengaruh Serbuk Cangkang Kerang Dara dan Lokan Sebagai Pengganti Sebagian Semen Terhadap Berat Volume, Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton. *Selodang Mayang*, 8 (1), 48-56.
- Asnaoui, H., Dehmani, Y., Khalis, M., & Hachem, E.-K. (2020). Adsorption of Phenol from Aqueous Solutions by Na–Bentonite: Kinetic, Equilibrium and Thermodynamic Studies. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-15.
- BAPEDAL No. 3 Tahun 1995 Tentang Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. (1995). Republik Indonesia
- Heidarzadeh, N. d. (2017). Cement-based Solidification/Stabilization of Phenol-contaminated Soil by Bentonite and Organophobic Clay. *Remediation: The Journal of Environmental Cleanup Coast, Technologies, & Techniques*, 87-96.
- Karimah, R., Rusdianto, Y., & Susanti, D. P. (2020). Pemanfaatan Serbuk Kulit Kerang Sebagai Pengganti Agregat Halus terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Teknik Sipil : Rancang Bangun*, 17-21.
- Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 18 Tahun 2020 Tentang Pemanfaatan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (2010). Indonesia.
- Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (2021). Indonesia.