

TINJAUAN KUAT TEKAN DAN KANDUNGAN B3 TERLARUT DALAM BETON DENGAN AGREGAT BUATAN BERBAHAN DASAR BOTTOM ASH BATU BARA

Abdul Rochman Tohir^{1,*}, Mochamad Solikin¹, Herry Purnama¹

¹) Magister Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. Ahmad Yani, Pabelan, Kartasura, Surakarta, Jawa Tengah, 57162

^{*}) Correspondent Author: doelrochman589@gmail.com

Abstract

Coal is an efficient fuel with stable heat production, so many industries use it as an energy source for the production and generation of electrical energy. Burning coal produces bottom ash waste in the combustion furnace and is categorized as B3 waste according to Government Regulation number 22 of 2021. This research is to create an alternative utilization and processing of coal bottom ash waste that is useful but still safe for the environment, namely by utilizing coal bottom ash in a ratio of 10% to 60% to sand plus cement as a binding material to form artificial aggregates, artificial aggregates are made into concrete mixtures. with a ratio of 1 cement: 2 sand and 3 artificial aggregates in the weight ratio of the materials. In this research, the maximum compressive strength value of concrete was obtained at f_c 13.89 (141.54 kg/cm²) at a ratio of 10% with a soaking time of 28 days, according to the maximum compressive strength value, coal bottom ash can be used as C quality concrete bricks. Leaching tests on 10 (ten) B3 parameters showed that Boron (B) compounds were detected above the quality standard, namely 27.62 mg/L in bottom ash, but the concentration decreased in artificial aggregates and was only 3.281 mg/L in concrete samples, while for other B3 compound parameters, the total concentration is below the specified quality standards.

Keywords: B3 waste, coal bottom ash, artificial aggregates, compressive strength, TCLP, leaching

PENDAHULUAN

Pembakaran batu bara sebagai bahan bakar (sumber energi) menghasilkan limbah berupa abu batu bara berbentuk halus dan melekat pada cerobong asap yang disebut dengan *fly ash* dan abu kasar yang tertinggal di bagian bawah tungku pembakaran yaitu *bottom ash*. Menurut Mulyadi (2011) dalam Nuciferani et al. (2011), pembakaran batu bara dalam tanur/tungku batu bara PLTU Paiton menghasilkan limbah batu bara yang terdiri dari *fly ash*

sebesar 20% dan *bottom ash* sebesar 80%. Sebagai sisa proses pembakaran pada fasilitas *stocker boiler* dan/atau tungku industri maka *bottom ash* batu bara yang dihasilkan dikategorikan sebagai limbah mengandung bahan berbahaya dan beracun (B3) kategori 2 karena di dalamnya terdapat senyawa logam berat sesuai sesuai baku mutu pada tabel 4 lampiran IX Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 tahun 2021 dengan kode B410. Inovasi dalam pengelolaan dan

pemanfaatan *bottom ash* batu bara merupakan salah satu upaya untuk mengurangi jumlah timbunan *bottom ash* batu bara sehingga keberadaannya tidak semakin banyak tertimbun dan mengganggu lingkungan.

Studi pemanfaatan limbah *bottom ash* batu bara dilakukan untuk mengatasi pencemaran lingkungan sebagai dampak penimbunan limbah pembakaran batu bara dilakukan (Darwis et al., 2015) dengan memanfaatkan *bottom ash* batu bara sebagai pengganti agregat halus dalam pembuatan beton. Pemanfaatan secara langsung *bottom ash* batu bara untuk mengurangi porsi agregat halus dalam pembuatan beton dilakukan dengan berbagai variasi perlakuan dan hasilnya yaitu *bottom ash* batu bara langsung digunakan memiliki nilai kuat tekan 18,83 MPa, *bottom ash* yang dilakukan pencucian serta dikeringkan dalam oven selama 24 jam nilai kuat tekannya menjadi 24,84 MPa serta *bottom ash* yang dicuci dan dikeringkan dengan sinar matahari memiliki kuat tekan sebesar 22,79MPa. Hal tersebut membuktikan bahwa pencucian limbah *bottom ash* batu bara dapat menghilangkan kandungan organik dalam material *bottom ash* sehingga dapat meningkatkan daya lekat antar material dan mengurangi dampak penurunan kekuatan produk akhir dari pemanfaatan material *bottom ash*.

Bottom ash batu bara juga dapat dimanfaatkan secara luas untuk produk beton dan keramik karena sifat dan kandungan bahannya terdapat unsur-unsur utama bahan pengikat yaitu zat

Silika (SiO_2) dan *Alumina* (Al_2O_3). *Bottom ash* batu bara juga dapat difungsikan sebagai aditif dalam pengolahan limbah sebagai *absorbent* (bahan penyerap) karena material ini memiliki porositas yang tinggi dengan penampang permukaan yang luas (Sari et al., 2023). Dengan memanfaatkan sifat-sifat tersebut di atas *bottom ash* batu bara juga dapat dimanfaatkan sebagai stabilisasi tanah dasar plastis seperti dalam penelitian (Cadersa et al., 2014), dalam penelitian ini diperoleh bahwa dengan penambahan *bottom ash* batu bara pada tanah dasar *plastis* dapat memperbaiki kinerja mekanis tanah dasar (*subgrade*).

Sifat fisika dan kimia dari *bottom ash* batu bara yang menyerupai agregat halus (pasir) membuat material ini dapat bereaksi dengan baik terhadap semen. *Bottom ash* juga memiliki kandungan organik yang cukup besar. Marzuki (2000) dalam Kinasti et al. (2018), dimana kandungan organik dalam material *bottom ash* akan menurunkan sifat kelekatan bahan dengan semen dan akan berdampak pada menurunnya nilai kekuatan. Untuk menetralkan kandungan organik dalam *bottom ash* dapat dilakukan dengan perlakuan awal pada *bottom ash* seperti pencucian dan pengeringan atau membentuk dan mencampur *bottom ash* dengan bahan pengikat (kapur/semen) untuk membentuk agregat buatan. (Dewi & Prasetyo, 2021; Zhu et al., 2022)

Penelitian lain dalam pemanfaatan *bottom ash* batu bara dilakukan oleh Nuciferani et. al. (2011) dalam pemanfaatannya sebagai agregat

buatan. Agregat buatan yang diperoleh dengan mencampur beberapa komponen material untuk menghasilkan material baru yang memiliki sifat seperti agregat alami (Nuciferani et al., 2011). Penelitian yang dilakukan dengan mengkomposisikan 2 BA (*bottom ash*) : 1FA (*fly ash*) : 0,5S (semen) pada rasio berat bahan dan dilakukan 1 (satu) kali pencelupan pada larutan pasta semen. Hasil yang diperoleh komposisi optimum pada uji kuat tekan adalah sebesar 2,40 Mpa umur 7 hari. Walaupun kekuatan agregat buatan nilainya tidak sebesar kekuatan agregat alami namun pemakaian agregat buatan dalam pembuatan beton dapat mengurangi eksploitasi agregat alami sehingga dapat dijadikan solusi berkelanjutan secara ekologis terutama pada bidang daur ulang limbah industri (A. Sivakumar, 2012; Azizah, 2018; Komala et al., 2021).

Beton merupakan bahan konstruksi yang terdiri dari campuran agregat kasar (kerikil), agregat halus (pasir), semen sebagai pengikat dan air yang berperan sebagai pengemulsi yang dicampur sehingga membentuk campuran dengan kelecakan tertentu sehingga memudahkan dalam pengerjaan selanjutnya (*workability*). Kuat tekan beton adalah tingkat kekuatan beton dalam menerima gaya tekan per satuan luas permukaan bidang kontak. Pemanfaatan limbah abu atas maupun abu bawah untuk beton merupakan solusi yang praktis dan ekonomis untuk mengurangi mobilisasi senyawa B3 yang terkandung dalam limbah sisa

pembakaran (Czop & Łazniewska-Piekarczyk, 2019). Penelitian ini menguatkan penelitian lainnya bahwa semen dapat mengikat senyawa berbahaya dan beracun dalam limbah serta mengurangi tingkat toksisitasnya (Ekaputri & Bari, 2020).

Semen digunakan sebagai bahan pengikat antar material dalam proses perlakuan awal terhadap *bottom ash* batu bara. Semen juga dapat menetralkan kandungan senyawa B3 dalam *bottom ash* batu bara seperti penelitian yang dilakukan oleh (Kadir et al., 2016) dengan judul *Investigation on Leaching Behaviour of Fly Ash and Bottom ash Replacement in Self-Compacting Concrete*. Menurut SNI (2004) semen portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri dari kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. (Basir, 2020; Opirina et al., 2020; Wang et al., 2021)

Material *bottom ash* memiliki kekuatan di bawah material standar (agregat alami) seperti pada penelitian sebelumnya oleh Darwis et al. (2015) yang nilai kuat tekan maksimumnya hanya mencapai $f'c$ 24,84.

Dari beberapa penelitian tersebut dapat diasumsikan bahwa material *bottom ash* memiliki daya serap yang cukup tinggi selain juga pada kadar tertentu dapat memberikan peningkatan kekuatan. Mengacu pada penelitian tersebut penulis meyakini

bahwa penelitian pemanfaatan *bottom ash* batu bara sebagai salah satu sumber bahan bangunan sangat layak untuk dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk pemanfaatan limbah B3 jenis *bottom ash* batu bara sebagai bahan baku *artificial aggregate* (agregat buatan) dalam pembuatan beton. Pengujian tingkat pelindiannya dilakukan guna menguji karakteristik pelindian B3 terlarut pada setiap tahapan penelitian. Penelitian ini sebagai salah satu bentuk kepedulian untuk melestarikan lingkungan hidup dari akumulasi jumlah timbunan limbah *bottom ash* batu bara.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini bersifat kualitatif *experimental* yang dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil UMS untuk pembuatan benda uji dan uji terhadap kuat tekan beton. Pengujian pelindian dilakukan pada Balai Besar Standardisasi dan Pelayanan Jasa Pencegahan Pencemaran Industri (BBSPJPI).

Agregat buatan diperoleh dengan mencampur *bottom ash* dan pasir. Perbandingan 10%, 20%, 30%, 40%, 50% dan 60% berat *bottom ash* terhadap pasir menggunakan bahan pengikat semen. Perbandingan campuran yang digunakan dalam penelitian yaitu 1 semen : 3 pasir bercampur *bottom ash*. Komposisi bahan material dibuat dalam adukan beton yang dicetak berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Selanjutnya silinder beton dihancurkan dan diayak diambil *grade* lolos ayakan no.8 (ukuran 2,36 cm)

dan tertahan pada ayakan no.30 (ukuran 0,60 cm). Butiran agregat kasar buatan dikomposisikan sebagai campuran beton pada FAS (Faktor Air Semen) rencana sebesar 0,5 mengacu pada campuran beton normal. Perbandingan campuran adalah 1 semen : 2 pasir : 3 agregat buatan berdasarkan rasio berat bahan. Sampel beton dirawat dengan cara direndam dalam air selama 7, 14 dan 28 hari kemudian diuji kuat tekannya.

Pengujian karakteristik pelindian terhadap kandungan senyawa B3 dengan menggunakan metode uji TCLP SW-846 metode 1311. Pelaksanaan uji dilakukan dengan cara mengambil sampel *bottom ash* batu bara dan spesimen dari beberapa bagian sampel uji beton dan dihancurkan sampai berukuran 9,50 mm. Spesimen yang sudah dihaluskan diambil 5 gram berat sampel dan dilarutkan dalam air bebas mineral (air murni/ *aquades*) 96,50 ml. Keasaman larutan sampel harus lebih dari 5. Bilamana pH larutan kurang dari 5 maka ditambahkan dengan larutan *sodium buffer asetat* dengan pH 4,93. namun apabila pH larutan lebih dari 5 maka digunakan larutan asam asetat dengan pH 2,88 (Arbunowo et al., 2019). Ekstraksi larutan sampel dilakukan dengan alat *rotary agitator* pada kecepatan 30 rpm selama 18 jam, selanjutnya sampel uji disaring menggunakan *filter glass fiber*. Larutan yang dihasilkan dari penyaringan diasamkan dengan larutan H NO₃ sampai pH mencapai 2 dan selanjutnya ditentukan kadar logam

dengan metode AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometry*).

Uji pelindian menggunakan metode TCLP terhadap 10 (sepuluh) parameter senyawa B3 sesuai baku

mutu karakteristik beracun limbah tergolong limbah B3 yaitu terhadap senyawa As, Cd, Cu, Ag, Pb, Hg, B, Se, Zn dan Cr⁺⁶ seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Baku mutu limbah B3 menurut US-EPA, WHO dan peraturan pemerintah nomor 22 tahun 2021 (EPA, 2015; Hunt et al., 1998; PP, 2021; WHO, 2011)

| No | Parameter | Baku Mutu (mg/L) | | | |
|-----|--------------------------------------|------------------|----------------|--------|--------|
| | | US-EPA | WHO | TCLP-A | TCLP-B |
| 1. | As (Arsenik) | 5 | 0.01 | 3 | 0,5 |
| 2. | Cd (Kadmium) | Tidak tersedia | Tidak tersedia | 0,9 | 0,15 |
| 3. | Cu (Tembaga) | 100 | 2 | 60 | 10 |
| 4. | Ag (Perak) | Tidak tersedia | Tidak tersedia | 40 | 5 |
| 5. | Pb (Timbal) | 5 | 0.01 | 3 | 0,5 |
| 6. | Hg (Raksa) | Tidak tersedia | Tidak tersedia | 0,3 | 0,05 |
| 7. | B (Boron) | Tidak tersedia | Tidak tersedia | 150 | 25 |
| 8. | Se (Selenium) | Tidak tersedia | Tidak tersedia | 3 | 0,5 |
| 9. | Zn (Zink/Seng) | Tidak tersedia | Tidak tersedia | 300 | 50 |
| 10. | Cr ⁺⁶ (Kromium valensi 6) | 5 | 0.05 | 15 | 2,5 |

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Kandungan Senyawa B3 *Bottom Ash* Batu bara

Bottom ash batu bara yang digunakan untuk penelitian memanfaatkan *bottom ash* batu bara hasil pembakaran batu bara pada tungku industri milik PT Sinar Indah Kertas Plant I Pati. Abu dasar atau *bottom ash* batu bara yang diambil dalam bentuk curah

berbentuk bubuk halus (*powder*) dengan ukuran butir halus dan seragam seperti terlihat pada Gambar 1. Untuk mengetahui kandungan B3/ logam berat dalam *bottom ash* batu bara dilakukan uji pelindian dengan metode TCLP, hasil uji pelindian terhadap 10 (sepuluh) parameter senyawa B3 seperti pada Tabel 2.



Gambar 1. *Bottom ash* batu bara

Tabel 2. Hasil uji pelindian B3 *bottom ash* batu bara dengan metode TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*)

| No. | Parameter | Baku Mutu (mg/L) | | |
|-----|------------------|------------------|--------|-------------------|
| | | TCLP-A | TCLP-B | <i>Bottom Ash</i> |
| 1. | As | 3 | 0,5 | < 0,003 |
| 2. | Cd | 0,9 | 0,15 | < 0,001 |
| 3. | Cu | 60 | 10 | 0,001 |
| 4. | Ag | 40 | 5 | < 0,050 |
| 5. | Pb | 3 | 0,5 | < 0,030 |
| 6. | Hg | 0,3 | 0,05 | <0,008 |
| 7. | B | 150 | 25 | 27,62 |
| 8. | Se | 3 | 0,5 | <0.0008 |
| 9. | Zn | 300 | 50 | < 0,009 |
| 10. | Cr ⁺⁶ | 15 | 2,5 | 0,093 |

Berdasarkan hasil uji sampel *bottom ash* batu bara terhadap 10 (sepuluh) parameter senyawa B3 pada tabel 2, dapat dilihat bahwa senyawa B3 pada *bottom ash* tersebut yang tingkat konsentrasinya masih terbaca pada uji TCLP adalah senyawa Cu (Tembaga) sebesar 0,001 mg/L, konsentrasi Boron (B) 27,62 mg/L dan senyawa Kromium valensi 6 (Cr⁺⁶) dengan konsentrasi 0,093 mg/L. Sedangkan untuk 7 (tujuh) parameter senyawa B3 lainnya konsentrasinya sangat kecil dan tidak terbaca oleh alat AAS. Berdasarkan konsentrasi kandungan senyawa Boron maka *bottom ash* batu bara tersebut dimasukkan sebagai limbah mengandung B3 kategori 2 karena kandungan senyawa Boron lebih kecil dari nilai TCLP-A namun lebih besar dari nilai TCLP-B.

Kandungan senyawa Boron dalam *bottom ash* menurut penelitian Kratochvil et al. (2014) berpengaruh mengurangi radiasi dengan memberikan efek redaman. Pada penelitian Rajadesingu (2020) kandungan senyawa Boron dapat

meningkatkan *setting time* beton pada awal dan kemudian terdapat perlambatan.

Kandungan senyawa Boron dalam *bottom ash* sebagai limbah mengandung B3 kategori 2 maka harus dikelola dengan mengikuti peraturan yang berlaku untuk limbah B3 kategori 2. Senyawa Boron dapat berbahaya apabila terpapar dalam jumlah banyak atau jangka panjang. Efek kesehatan yang dapat terjadi yaitu gangguan pencernaan, gangguan pernafasan dan iritasi pada kulit. Jika tidak dikelola dengan benar, maka *bottom ash* dapat mencemari tanah, air, dan udara. (Kratochvil et al., 2014)

2. Analisis Uji Kuat Tekan Agregat Buatan

Agregat buatan dapat dibentuk dari pencampuran berbagai macam material antara lain *fly ash*, *bottom ash*, *silica fume*, *slage* ataupun *sludge waste* dengan pengikat semen untuk membuat beton ringan dengan biaya ekonomis sebagai respon dalam memenuhi permintaan beton ringan

guna diaplikasikan secara massal (A. Sivakumar, 2012). Pada dasarnya agregat buatan juga dapat diperoleh secara proses kimia atau fisika dari beberapa material penyusun yang ada sehingga menghasilkan suatu material baru yang bentuk ataupun sifatnya menyerupai agregat alami (Nuciferani et al., 2011). Hasil uji kuat tekan sampel agregat buatan dapat dilihat pada Tabel 3.

Sesuai hasil uji sampel agregat buatan memiliki nilai kuat tekan maksimum sebesar 98,37 kg/cm² (f'c 9,64) pada rasio perbandingan *bottom ash* dan pasir sebesar 10%. Nilai kuat tekan sampel agregat buatan akan menurun secara signifikan dengan bertambahnya kadar *bottom ash* batu

bara dalam campuran. Hal ini bisa disebabkan kandungan organik dalam *bottom ash* batu bara mengikat material tersebut merupakan sisa hasil pembakaran batu bara dalam tungku batu bara. Kandungan zat organik dalam material *bottom ash* batu bara menghambat atau mengurangi kelekatan antar butiran agregat dalam campuran material. Secara umum kekuatan agregat buatan tidak sebanding dengan nilai kekuatan agregat alam (batu pecah), sehingga pemanfaatannya juga terbatas pada pekerjaan ringan non struktur yang tidak mensyaratkan nilai kekuatan material secara mutlak. Kerusakan sampel akibat uji kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 3. Hasil uji kuat tekan agregat buatan

| Parameter | Rasio Perbandingan <i>Bottom Ash</i> Batu bara dan Pasir (%) | | | | | |
|--|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | BA : 10 P : 90 | BA : 20 P : 80 | BA : 30 P : 70 | BA : 40 P : 60 | BA : 50 P : 50 | BA : 60 P : 40 |
| Kuat Tekan Rata-rata (Kg/cm ²) | 98,37 | 79,27 | 81,39 | 65,82 | 58,04 | 49,54 |



Gambar 2. Keruntuhan akibat uji tekan sampel agregat buatan

3. Analisis Uji Pelindian Agregat Buatan

Sampel agregat buatan dilakukan uji pelindian tingkat konsentrasi senyawa B3 dengan metode TCLP, hal ini

dilakukan untuk mengukur seberapa jauh penurunan konsentrasi senyawa B3 yang terjadi setelah dilakukan perlakuan terhadap material *bottom ash* batu bara. Hasil yang diperoleh

dari uji pelindian agregat buatan tercantum pada Tabel 4. dengan metode TCLP seperti

Tabel 4. Hasil uji pelindian B3 agregat buatan dengan metode TCLP

| No. | Parameter | Baku Mutu (mg/L) | | |
|-----|------------------|------------------|-------------------|----------------|
| | | TCLP-B | <i>Bottom Ash</i> | Agregat Buatan |
| 1. | As | 0,5 | < 0,003 | < 0,003 |
| 2. | Cd | 0,15 | < 0,001 | < 0,001 |
| 3. | Cu | 10 | 0,001 | 0,001 |
| 4. | Ag | 5 | < 0,050 | < 0,050 |
| 5. | Pb | 0,5 | < 0,030 | < 0,030 |
| 6. | Hg | 0,05 | <0,008 | <0,008 |
| 7. | B | 25 | 27,62 | 7,586 |
| 8. | Se | 0,5 | <0.0008 | <0.0008 |
| 9. | Zn | 50 | < 0,009 | < 0,009 |
| 10. | Cr ⁺⁶ | 2,5 | 0,093 | 0,005 |

Pada uji pelindian tahap 2 (dua) dengan sampel agregat buatan ini diperoleh hasil konsentrasi Cu (tembaga) sebesar 0,001 mg/liter, Boron (B) sebesar 7,586 mg/liter dan Kromium valensi 6 (Cr⁺⁶) sebesar 0,005 mg/liter. Dibandingkan dengan hasil Uji TCLP terhadap *bottom ash* batu bara maka terjadi penurunan konsentrasi senyawa B3 yang melindi dari yaitu senyawa Boron sebesar 73% dan senyawa Cr⁺⁶ sebesar 46%.

4. Analisis Kuat Tekan Beton dengan Agregat Buatan Berbahan Dasar *Bottom Ash* Batu bara

Benda uji beton yang sudah dicetak dan dilepas dari cetakan seperti pada gambar 3 dilakukan pemeliharaan dengan cara direndam dalam air biasa dengan waktu perendaman selama 7, 14 dan 28 hari dan selanjutnya dilakukan uji kuat tekan. Pada uji kuat tekan ini diperoleh hasil tingkat kuat

tekan beton dengan agregat buatan berbahan dasar *bottom ash* batu bara menunjukkan beton dengan komposisi 10% BA (*bottom ash*) dan 90% pasir memiliki kuat tekan paling tinggi yaitu f'c 9,34 (95,31 kg/cm²) pada umur perendaman 7 hari, f'c 10,17 atau sebesar 103,80 kg/cm² pada umur perendaman 14 hari dan pada umur perendaman 28 hari kuat tekannya sebesar f'c 13,88 atau sebesar 141,54 kg/cm². Penurunan nilai kuat tekan terjadi pada penggunaan agregat buatan dengan rasio prosentase berat *bottom ash* batu bara terhadap pasir yang meningkat. Namun umur perendaman berpengaruh cukup signifikan dimana semakin lama masa perendaman nilai kuat tekannya juga bertambah yaitu pada masa perendaman beton selama 7 hari, 14 hari dan ke 28 hari secara berurutan.



Gambar 3. Benda uji beton

Pada penambahan *bottom ash* 20% nilai hasil uji kuat tekan beton mengalami penurunan sebesar 23% dibandingkan dengan komposisi agregat buatan sebelumnya, serta penurunan kuat tekan mengalami penurunan secara signifikan yaitu sebesar 30%, 32%, 41%, dan 46,67% pada penambahan *bottom ash* 30%, 40%, 50% dan 60%. Perbandingan nilai kuat tekan antara beton normal dengan beton menggunakan agregat buatan dapat dilihat pada Tabel 5.

Pada Tabel 5 terlihat bahwa nilai kuat tekan maksimal beton dengan agregat buatan dibandingkan dengan nilai kuat tekan beton normal adalah sebesar 37% pada umur perendaman 7 hari, 38,59% pada umur perendaman 14 hari, dan kekuatannya mencapai 51,43% terhadap beton normal pada

umur perendaman 28 hari. Hal ini membuktikan bahwa nilai kekuatan dari agregat buatan tidak terlalu besar dibandingkan dengan kekuatan yang dimiliki oleh agregat alami karena pada hasil uji kuat tekan agregat buatan dalam beton terputus. Mengingat agregat buatan tersusun atas material halus dari campuran *bottom ash* batu bara, pasir dengan bahan pengikat semen tidak dapat mereduksi beban yang terlalu besar, hanya mengandalkan kekuatan lekat antar butiran material pada susunan agregat buatan berbeda dengan agregat alami yang memiliki nilai kuat tekan yang besar. Berbagai macam keruntuhan dan kerusakan beton dengan agregat buatan akibat uji kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 4 di bawah.

Tabel 5. Perbandingan kuat tekan terhadap komposisi BA (*bottom ash*) dalam agregat buatan

| Umur (hari) | Beton Normal (Kg/cm ²) | Kuat Tekan | | | | | |
|----------------|--|------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | Prosentase <i>Bottom Ash</i> | | | | | |
| | | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% |
| 7 | 164,19 | 95,31 | 64,36 | 62,47 | 68,88 | 66,05 | 57,56 |
| 14 | 232,13 | 103,80 | 87,76 | 76,43 | 76,43 | 69,83 | 66,05 |
| 28 | 269,87 | 141,54 | 108,51 | 99,08 | 96,25 | 83,98 | 75,49 |



Gambar 4. Keruntuhan akibat uji kuat tekan beton dengan agregat buatan

5. Analisis Uji Pelindian Senyawa B3 dalam Beton dengan Agregat Buatan Berbahan Dasar *Bottom Ash* Batu bara

Sampel beton kemudian dilakukan uji terhadap tingkat pelindian senyawa B3 yang terkandung dengan metode TCLP dan diperbandingkan hasil uji pelindian sebelumnya, dari uji pelindian senyawa B3 pada tahap akhir ini diperoleh hasil seperti tersaji pada Tabel 6.

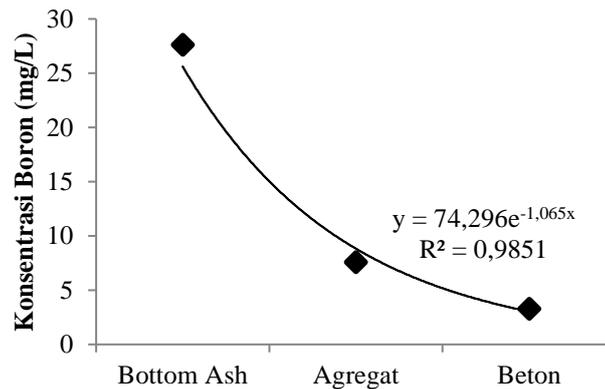
Dari hasil uji pelindian dapat dilihat bahwa penurunan tingkat konsentrasi senyawa B3 yang terjadi dari mulai sampel material dasar *bottom ash* batu bara ke sampel agregat buatan. Pada sampel beton dengan agregat buatan terdapat penurunan yang cukup signifikan.

Tingkat konsentrasi senyawa Tembaga (Cu) dan Kromium valensi 6 (Cr^{+6}) pada sampel beton dengan agregat buatan sudah tidak terbaca melindi. Namun kandungan senyawa Boron (B) masih terbaca dengan konsentrasinya yang sudah jauh menurun yaitu hanya tersisa sebesar 3,281 mg/L atau setara dengan 3,281 ppm (*part per million*). Dalam penelitian ini terjadi penurunan konsentrasi senyawa B3 yang melindi pada setiap tahapan penelitian. Laju penurunan tingkat konsentrasi senyawa B3 yang masih dominan melindi sesuai Tabel 6. Penurunan konsentrasi senyawa Boron dapat dilihat pada Gambar 5 dan senyawa Kromium valensi 6 pada Gambar 6.

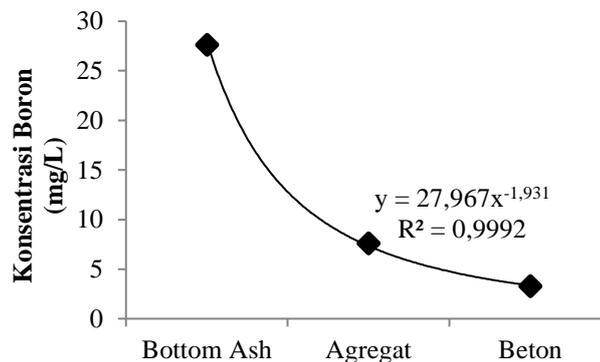
Tabel 6. Hasil uji pelindian sampel beton dengan agregat buatan

| No. | Parameter | Baku Mutu (mg/L) | | | |
|-----|-----------|------------------|-------------------|----------------|---------|
| | | TCLP-B | <i>Bottom Ash</i> | Agregat Buatan | Beton |
| 1. | As | 0,5 | < 0,003 | < 0,003 | < 0,003 |
| 2. | Cd | 0,15 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| 3. | Cu | 10 | 0,001 | 0,001 | < 0,001 |
| 4. | Ag | 5 | < 0,050 | < 0,050 | < 0,050 |
| 5. | Pb | 0,5 | < 0,030 | < 0,030 | < 0,030 |
| 6. | Hg | 0,05 | <0,008 | <0,008 | <0,008 |
| 7. | B | 25 | 27,62 | 7,586 | 3,281 |

| No. | Parameter | Baku Mutu (mg/L) | | | |
|-----|------------------|------------------|-------------------|----------------|---------|
| | | TCLP-B | <i>Bottom Ash</i> | Agregat Buatan | Beton |
| 8. | Se | 0,5 | <0.0008 | <0.0008 | <0.0008 |
| 9. | Zn | 50 | < 0,009 | < 0,009 | < 0,009 |
| 10. | Cr ⁺⁶ | 2,5 | 0,093 | 0,005 | < 0,001 |



Gambar 5. Grafik penurunan konsentrasi Boron (B)



Gambar 6. Grafik penurunan konsentrasi Kromium valensi 6 (Cr⁺⁶)

SIMPULAN

Dari rangkaian hasil penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa nilai kuat tekan maksimal dari beton dengan agregat buatan berbahan dasar *bottom ash* batu bara sebesar $f'c$ 13,88 atau sebesar 141,54 kg/cm² (14,154 MPa) pada rasio 10% *bottom ash* batu bara terhadap pasir. Oleh karena itu material *bottom ash* hanya dapat digunakan untuk pekerjaan non struktur misalnya untuk bata beton

kualitas C, beton rabat atau lantai kerja. *Bottom ash* batu bara dapat dimanfaatkan secara langsung sebagai pengganti sebagian atau keseluruhan agregat halus karena sifat fisika dan kimia yang dimiliki sehingga material *bottom ash* dapat bereaksi secara baik dengan bahan pengikat /semen. Semen dan *bottom ash* terbukti dapat bereaksi dengan baik sehingga semen akan mengikat dan melindungi butiran material *bottom ash* dari proses

pelindian, hal ini juga membuktikan bahwa semen dapat mereduksi proses terlepasnya senyawa B3 dari material *bottom ash* sehingga dapat menurunkan konsentrasi senyawa B3 yang melindi dari material limbah *bottom ash* batu bara.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tulisan ini merupakan bagian/diolah dari laporan tesis penulis di Magister Teknik Sipil, Sekolah Pascasarjana, Universitas Muhammadiyah Surakarta tahun 2023.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Sivakumar, 2012, Pelletized Fly Ash Lightweight Aggregate Concrete: A Promising Material. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 3 (2), 42–48.
- Arbunowo, A.A., Purwanto, P.P., & Budihardjo, M.A., 2019, Waste to Product: Bisolum-Bricks, Incorporation of WWTP Sludge of Textile Industry Into Bricks for Wall Pairs. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 10 (2), 29–35.
- Azizah, 2018, Pemanfaatan Limbah Abu Dasar Batu Bara (Bottom Ash) sebagai Adsorben Logam Fe pada Limbah PLTU Teluk Sirih, Sumatera Barat. In *Sekolah Tinggi Teknologi Industri Padang*.
- Basir, M., 2020, Pemanfaatan Limbah Bottom Ash sebagai Bahan Campuran Agregat Halus dengan Penambahan Tetes Tebu pada Pembuatan Beton terhadap Nilai Kuat Tekan Beton. In *Universitas Pancasakti Tegal*. Universitas Pancasakti Tegal.
- Cadersa, A.S., Seeborun, A.K., & Chan Chim Yuk, A., 2014, Use of Coal Bottom Ash as Mechanical Stabiliser in Subgrade Soil. *Journal of Engineering (United Kingdom)*, 2014.
- Czop, M., & Łázniewska-Piekarczyk, B., 2019, Evaluation of the Leachability of Contaminations of Fly Ash and Bottom Ash from the Combustion of Solid Municipal Waste before and after Stabilization Process. *Sustainability (Switzerland)*, 11 (19), 1–16.
- Darwis, Z., Soelarso, & Hidayat, T., 2015, Pemanfaatan Limbah Bottom Ash sebagai Substitusi Agregat Halus dalam Pembuatan Beton. 4 (1), 52–57.
- Dewi, S.U., & Prasetyo, F., 2021, Analisa Penambahan Bottom Ash terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton. *Journal of Infrastructural in Civil Engineering (JICE)*, 02 (02), 31–45.
- Ekaputri, J.J., & Bari, S.M.A., 2020, Perbandingan Regulasi Fly Ash sebagai Limbah B3 di Indonesia dan beberapa Negara. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26 (2), 150–162.
- EPA, 2015, *U.S. Environmental Protection Agency: FY 2013 Annual Performance Report, FY 2015 Annual Plan*.
- Hunt, W.F., Neligan, R.E., Curran, T.C., Faoro, R.B., Frank, N.H., & Mask, E., 1998, National Air

- Quality and Emissions Trends Report, 1996. *United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, (Report) EPA, January*, 1–164.
- Kadir, A.A., Hassan, M.I.H., & Abdullah, M.M.A.B., 2016, Investigation on Leaching Behaviour of Fly Ash and Bottom Ash Replacement in Self-Compacting Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 133 (1).
- Kinasti, R.M.A., Lestari, E., & Mayasari, D., 2018, Potensi Pemanfaatan Limbah Pembakaran Batu Bara (Bottom Ash) Pada PLTU sebagai Media Tanam dalam Upaya Mengurangi Pencemaran Lingkungan. *Jurnal Kilat*, 7 (1), 36–46.
- Komala, R., Hadi, S., & Prasetiawan, J., 2021, Pengaruh Jenis Semen dan Lama Perawatan yang Berbeda terhadap Kuat Tekan Beton Normal. *ANDASAH*, 1 (2), 24–32.
- Kratochvil, J., Opravil, T., & Diviš, P., 2014, The Effect of Boron and its Compounds on Setting of Portland Cement. *Advanced Materials Research*, 1000, 16–19.
- Nuciferani, F.T., Hardjito, D., & Antoni., 2011, Pemanfaatan Bottom Ash sebagai Agregat Buatan. *Jurnal Teknik Sipil*, 3–8.
- Opirina, L., Sari, D.P., & Reskuna, R., 2020, Kuat Tekan Beton dengan Substitusi Limbah Pengolahan Kelapa Sawit. *Jurnal CIVILLA*, 5 (1), 368–375.
- PP, 2021, Peraturan Pemerintah nomor 22 tahun 2021 tentang Pedoman Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. In *Sekretariat Negara Republik Indonesia* (Vol. 1).
- Rajadesingu, S., & Arunachalam, K.D., 2020, Hydration Effect of Boric Acid on the Strength of High-Performance Concrete (HPC). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 912(6).
- Sari, E.K., Putri, Y.E., Lindawati, L., Desromi, F., & Nurmeyliandari, R., 2023, Ash Dan Bottom Ash Hasil Pembakaran Batu Bara PT. Bakti Nugraha Yuda Energy. *Deformasi*, 8 (1), 23–30.
- SNI, 2004, Semen Portland SNI 15-2049-2004. *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*, 1–128.
- Wang, Q., Ko, J.H., Liu, F., & Xu, Q., 2021, Leaching Characteristics of Heavy Metals in MSW and Bottom Ash co-disposal Landfills. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126042.
- WHO, 2011, *Guidelines for Drinking-water Quality*. Gutenberg.
- Zhu, Y., Hu, Y., Guo, Q., Zhao, L., Li, L., Wang, Y., Hu, G., Wibowo, H., & Di Maio, F., 2022, The Effect of Wet Treatment on the Distribution and Leaching of Heavy Metals and Salts of Bottom Ash from Municipal Solid Waste Incineration. *Environmental Engineering Science*, 39 (5), 409–417.