

SUSTAINABLE MATERIALS MELALUI SOLIDIFIKASI-STABILISASI LIMBAH SANDBLASTING MENJADI BETON FEROSEMEN

Luqman Cahyono (Luqmancahyono24@ppns.ac.id)^{1*}

Annisa' Carina (annisacarina@unisda.ac.id)²

Wiwik Dwi Pratiwi (wiwik.pratiwi@ppns.ac.id)³

Firda Fardina (firdafardina10@student.ppns.ac.id)⁴

Dika Rahayu Widiana (dikawidiana@ppns.ac.id)⁵

Agung Prasetyo Utomo (Agungprasetyo@ppns.ac.id)⁶

M. Rizal Fahmi (rizal.fahmi@ppns.ac.id)⁷

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya^{1,3,4,5,6,7}, Universitas Islam Darul 'Ulum Lamongan²,

ABSTRAK

Limbah sandblasting dari proses pembersihan permukaan kapal dengan cara menyemprotkan partikel pasir silica dengan tekanan tinggi. Limbah ini dikategorikan sebagai limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) karena mengandung berbagai jenis polutan, terutama logam berat. Berdasarkan data jumlah timbulan limbah sandblasting digalangan kapal bisa mencapai 12.100 kg/bulan. Limbah sandblasting berpotensi digunakan sebagai bahan pengganti agregat halus dalam pembuatan material konstruksi dengan metode solidifikasi-stabilisasi. Salah satu aplikasi potensial pemanfaatan limbah sandblasting adalah pembuatan beton fero semen. Fero semen merupakan material komposit terdiri mortar semen yang diperkuat tulangan *wiremesh*.

Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi pemanfaatan limbah sandblasting sebagai pengganti agregat halus beton fero semen yang tentunya memenuhi standar mutu teknis dan lingkungan guna menghasilkan material ramah lingkungan dan berkelanjutan. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen kuantitatif, dimana material akan diuji dengan pengujian gradasi, berat jenis, daya serap air, XRF, TCLP, Kuat Tekan dan Kuat Lentur.

Hasil uji karakterisasi bahan yang dipakai hasilnya memenuhi standar gradasi dalam SNI 03 2834 2000, standar berat jenis dan daya serap air dalam SNI 03 1970 2008, serta hasil uji XRF dan TCLP yang menunjukkan bahwa kandungan logam berat B3 berupa Barium, Seng, dan Copper dalam limbah sandblasting nilainya berada kurang dari baku mutu PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran XI. Keseluruhan hasil uji karakteristik tersebut akan digunakan dalam penelitian ini sesuai dengan peraturan sehingga dapat dipakai untuk mix design beton fero semen. Selanjutnya, mix design yang dibuat memiliki komposisi dengan rasio 1 semen : 1,5 limbah sandblasting dan 1 semen : 2 limbah sandblasting. Hasil kuat tekan nilai tertinggi rata-rata sebesar 34,30 MPa pada campuran 1S-2LSB. Hasil uji kuat lentur juga menunjukkan beton fero semen dengan rasio 1 semen : 2 limbah sandblasting memiliki rata-rata kuat lentur tertinggi yaitu 18,87 Mpa. Nilai tertinggi pada uji tekan dan lentur dihasilkan campuran 1S-2LSB. Hal ini menunjukkan penggunaan limbah sandblasting tidak hanya meningkatkan kekuatan material pada campuran tertentu, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan limbah industri, sehingga mendukung upaya konstruksi berkelanjutan.

Kata Kunci: Limbah Sandblasting, Beton Fero semen, Sustainable Materials, Solidifikasi-Stabilisasi

ABSTRACT

Sandblasting waste from the process of cleaning ship surfaces by spraying silica sand particles at high pressure. This waste is categorized as Hazardous and Toxic Waste (B3) because it contains various types of pollutants, especially heavy metals. Based on data, the amount of sandblasting waste generated in shipyards can reach 12,100 kg/month. Sandblasting waste has the potential to be used as a substitute for fine aggregate in making construction materials using the solidification-stabilization method. One potential application for utilizing sandblasting waste is making ferrocement concrete. Ferrocement is a composite material consisting of cement mortar reinforced with wiremesh.

This research aims to explore the use of sandblasting waste as a substitute for fine aggregate in ferrocement concrete which of course meets technical and environmental quality standards in order to produce environmentally friendly and sustainable materials. This research uses a quantitative experimental method, where the material will be tested by testing gradation, specific gravity, water absorption capacity, XRF, TCLP, compressive strength and flexural strength.

The results of the characterization test for the materials used met the gradation standards in SNI 03 2834 2000, the specific gravity and water absorption standards in SNI 03 1970 2008, as well as the XRF and TCLP test results which showed that the B3 heavy metal content in the form of Barium, Zinc and Copper in sandblasting waste value is less than the quality standard PP No. 22 of 2021 Appendix XI. All characteristic test results will be used in this research in accordance with regulations so that they can be used for ferrocement concrete mix designs. Furthermore, the mix design created has a composition with a ratio of 1 cement : 1.5 sandblasting waste and 1 cement : 2 sandblasting waste. The highest average compressive strength value was 34.30 MPa for the 1S-2LSB mixture. The flexural strength test results also show that ferrocement concrete with a ratio of 1 cement: 2 sandblasting waste has the highest average flexural strength, namely 18.87 Mpa. The highest value in the compression and bending tests was produced by the 1S-2LSB mixture. This shows that the use of sandblasting waste not only increases the strength of materials in certain mixtures, but also contributes to reducing industrial waste, thereby supporting sustainable construction efforts.

Key Words: Sandblasting Waste, Ferrocement Concrete, Sustainable Materials, Solidification-Stabilization

PENDAHULUAN

Sandblasting merupakan metode menghilangkan karat dan biota laut pada peralatan logam dengan cara menyemprotkan pasir silika pada tekanan tinggi (Alifiadi, R. dan Slamet, A., 2022). Limbah sandblasting dapat mengandung unsur logam berat seperti Cr, Cu, Pb, dan Zn (Qi et al., 2021). Dewantara dkk. (2017), jumlah maksimum limbah sandblasting yang dihasilkan per bulan pada suatu perusahaan galangan kapal adalah 12.100 kg. Proses terjadinya pencemaran oleh limbah (khususnya dari industri) dapat terjadi secara langsung maupun tidak langsung. Proses langsung, yaitu polutan mempunyai dampak langsung terhadap keracunan, sehingga dapat mempengaruhi kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan, serta mempengaruhi keseimbangan ekologi air, udara dan tanah, sedangkan proses tidak langsung - Banyak bahan kimia bereaksi dengan air dan tanah, sehingga bahwa dalam hal ini pencemaran menimbulkan pencemaran (Nursabrina, A, Joko, T., dan Septiani, O. 2021).

Berdasarkan PP Nomor 85 Tahun 1999, sisa hasil kegiatan proses sandblasting disebut sebagai limbah B3 dari sumber tertentu. Limbah ini tergolong limbah B3 karena memiliki kandungan logam berat yang sangat tinggi dan dapat menimbulkan ancaman bagi kesehatan dan ekosistem. Dampak lingkungan dari limbah sandblasting yang digunakan dalam penelitian ini ditentukan dengan pengujian spektrometri fluoresensi sinar-X (XRF) dan pengujian prosedur pelindian

karakterisasi toksikologi (TCLP). Pengujian spektrometri fluoresensi sinar-X (XRF) adalah metode analisis untuk menentukan komposisi kimia suatu bahan dalam bentuk padat, bubuk, atau bentuk lainnya. Berdasarkan hasil uji XRF, kandungan logam berat barium (Ba) sebesar 0,06%, seng (Zn) sebesar 0,76%, dan tembaga (Cu) sebesar 1,83%. TCLP kemudian menguji ketiga logam berat tersebut, untuk mengetahui kandungan logam masing-masing logam berat dan membandingkannya dengan standar mutu yang berlaku. Hasilnya, kandungan Ba pada limbah sandblasting sebesar 0,84 mg/L, kandungan Cu sebesar 5,86 mg/L, dan kandungan Zn sebesar 4,95 mg/L. Berdasarkan Lampiran Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021

Solidifikasi-stabilisasi merupakan metode pengolahan limbah yang bertujuan mengubah limbah berwujud cair atau semi-padat menjadi bentuk padat yang stabil. Metode ini umumnya diterapkan pada limbah berbahaya untuk mengurangi mobilitas dan toksisitasnya, sehingga aman bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Dalam konteks limbah sandblasting, metode ini sangat relevan karena limbah ini seringkali mengandung partikel-partikel abrasif yang dapat mencemari lingkungan jika tidak ditangani dengan benar. Proses solidifikasi-stabilisasi melibatkan penambahan bahan pengikat (seperti semen, kapur, atau polimer) ke dalam limbah. Bahan pengikat ini akan bereaksi dengan komponen-komponen dalam limbah, membentuk matriks padat yang mengurung kontaminan.

Beton ferosemen merupakan salah satu jenis konstruksi beton bertulang tipis di mana semen diperkuat dengan lapisan jaring berdiameter kecil yang berkesinambungan (wiremesh). Keunggulan utama dari ferrocement adalah mudah dalam pembuatannya, bahan baku mudah dicari, dan volume bahan yang digunakan relatif sedikit. Beton ferrocement dipilih karena mempunyai tingkat elastisitas dan ketahanan retak yang tinggi. Hal ini telah menghasilkan keberhasilan penerapan ferrocement dalam fabrikasi lambung kapal, konstruksi bangunan (perumahan berbiaya rendah), rehabilitasi struktur yang ada dan fabrikasi struktur laut terapung dan jaringan pipa saluran pembuangan limbah (Cheah, C. B., & Ramli, M. 2013).

KAJIAN PUSTAKA

Penelitian ini mengkaji beberapa hal berikut :

1 Limbah Sandblasting

Sandblasting adalah metode peledakan/penyemprotan pasir silika dengan tekanan tinggi untuk menghilangkan karat dan biota laut pada peralatan logam khususnya kapal (Alifiadi, R. dan Slamet, A., 2022). Pasir silika bekas akan jatuh ke tanah dan menumpuk sehingga menyebabkan luas permukaan menjadi besar dan disebut dengan limbah sandblasting. Berdasarkan PP No.85 tahun 1999, sisa hasil kegiatan dari proses sandblasting ditetapkan sebagai limbah B3 dari sumber spesifik. Limbah tersebut dikategorikan sebagai limbah B3 karena kandungan logam berat yang cukup tinggi dan dapat membahayakan kesehatan serta lingkungan.

2 Beton Ferosemen

Ferrocement merupakan material komposit yang terbuat dari campuran pasir dan semen dengan menggunakan tulangan wiremesh. Ferosemen digunakan untuk konstruksi tangki air, kapal, elemen struktural pracetak, lantai, perbaikan struktural/pekerjaan kekuatan perkuatan, dan bekisting permanen.

3 Solidifikasi - Stabilisasi

Solidifikasi dan stabilisasi (S/S) adalah metode pengolahan limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) yang bertujuan untuk mengurangi risiko pencemaran lingkungan dengan cara mengubah sifat fisik dan kimia dari limbah tersebut. Metode ini dilakukan dengan cara mencampurkan limbah dengan bahan pengikat atau aditif, seperti semen, kapur, atau fly ash, sehingga menghasilkan material yang lebih stabil dan aman.

4 Pengujian Gradasi, Berat Jenis dan Daya Serap Sandblasting - Pasir

Pengujian-pengujian ini merupakan karakterisasi sandblasting guna menggantikan pasir sebagai bahan konstruksi. Masing-masing pengujian memberikan informasi spesifik tentang sifat-sifat fisik yang akan mempengaruhi performanya dalam campuran beton. Dikarenakan limbah sandblasting mau menggantikan pasir, maka perlu dilakukan uji karakterisasi diantaranya : uji gradasi, uji berat dan uji daya serap. Berdasarkan pengujian ini akan dipakai dasar dalam penentuan mix desain apakah layak atau tidak

5 Pengujian XRF dan TCLP

Pengujian X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) merupakan metode analitik yang digunakan untuk menentukan komposisi kimia yang terkandung dalam bahan dalam bentuk padat, bubuk, atau bentuk lainnya.

Pengujian Toxicological Characteristic Leaching Procedure (TCLP) merupakan uji pelindian terhadap senyawa yang berbahaya, seperti logam berat, yang dapat mencemari lingkungan perairan dari suatu sampel. Tes ini menentukan sifat toksik sampel

6 Pengujian Tekan dan Lentur

Pengujian Tekan : metode pengujian di mana suatu material dikenai beban tekan sampai material tersebut hancur atau menunjukkan deformasi yang signifikan. Untuk menentukan kekuatan maksimum yang dapat ditahan oleh beton sebelum mengalami kerusakan akibat gaya tekan. Pengujian bertujuan Menentukan kualitas, Mengevaluasi kinerja campuran dan Mengontrol kualitas beton..

Pengujian Lentur : untuk menentukan kekuatan beton dalam menahan beban yang menyebabkan terjadinya lenturan atau momen lentur. Pengujian bertujuan Mengetahui kekuatan lentur/tarik, Pengujian ini penting untuk memahami bagaimana material tersebut bereaksi terhadap pembebanan yang menyebabkan lentur atau pembengkokan, yang sering terjadi pada komponen struktural seperti balok, pelat, atau dinding tipis yang terbuat dari ferrocement.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan pelaksanaan berikut :

1 Pengumpulan dan Karakterisasi Limbah Sandblasting

Limbah sandblasting diperoleh dari industri perkapalan dan dianalisis untuk mengetahui komposisi kimia dan fisiknya. Pengujian kareakteristik diantaranya

- Pengujian Gradasi : pengujian ini mengacu SNI 03 2834 2000 yang bertujuan mengecek gradasi limbah sand blasting hasilnya sesuai atau hampir sama dengan gradasi pasir lumajang yang mau digantikan.
- Pengujian Berat Jenis dan Daya Serap air pengujian ini mengacu SNI 03 1970 2008 yang bertujuan mengecek berat jenis dan daya serap air limbah sand blasting hasilnya sesuai atau hampir sama dengan berat jenis dan daya serap air pasir lumajang yang mau digantikan.
- Pengujian XRF (X-Ray Fluorescence) : Untuk mengetahui kandungan unsur kimia limbah sandblasting, kadar logam berat dan karakteristik partikel abrasif.
- Pengujian TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) : Untuk mengukur potensi suatu limbah untuk mencemari tanah dan air tanah jika dibuang. Parameter yang diuji dalam TCLP meliputi logam berat seperti Ba, Cu, dan Zn dilakukan sesuai dengan US EPA SW 846-1996 Metode 6010 B.

2 Mix Desain Campuran Beton Ferosemen

Campuran beton ferosemen terdiri dari semen Portland, air, dan agregat halus pasir digantikan sepenuhnya dengan limbah sandblasting. Limbah sandblasting sebelumnya sudah dilakukan penyaringan pada ayakan 8 dan memisahkan kontaminan sisa lepasan cat dan kotoran logam. Selain itu, jaring kawat baja dengan spesifikasi tertentu digunakan sebagai penguat dalam beton ferosemen.

3 Proses Pembuatan dan Pengujian Sampel

Beton ferosemen dengan bahan yang sudah disiapkan dicampur dan dicetak kedalam cetakan beton kubus serta cetakan beton pelat tipis.

- Pengujian tekan untuk menilai apakah penggunaan limbah sandblasting dalam campuran beton ferrocement dapat mempertahankan atau bahkan meningkatkan kekuatan tekan material tersebut. Pengujian tekan dilakukan pada benda uji ukuran kubus 5x5x5cm dan juga dikonversikan ke ukuran silinder 15x30cm.
- Pengujian lentur untuk mengetahui kekuatan lentur dari beton ferrocement yang menggunakan limbah sandblasting sebagai pengganti pasir. Berikut rumus dan cara pengujian lentur pelat beton ferrosemen.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

Dimana : σ : Kuat Lentur (Mpa), P : Beban Maximal (N), L Jarak Tumpu / panjang bentang (mm), b : Lebar spesimen (mm), dan h : Tebal spesimen pada daerah runtuh (mm)

4 Analisis Data

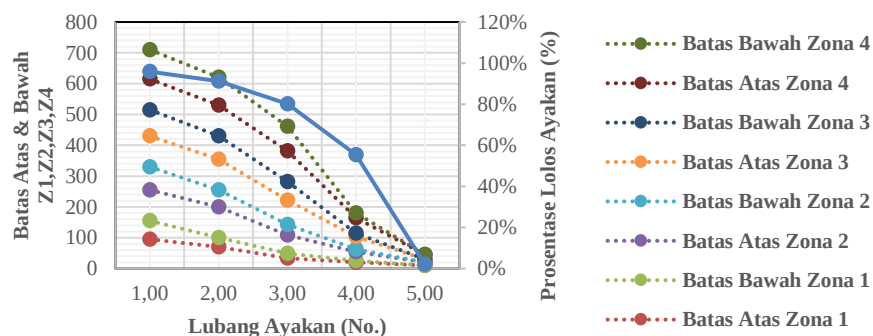
Data hasil pengujian dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh substitusi limbah sandblasting terhadap performa mekanik beton ferosemen. Selain itu, dilakukan analisis lingkungan untuk menilai dampak penggunaan limbah sandblasting terhadap keberlanjutan material.dll.

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan eksperimen berikut :

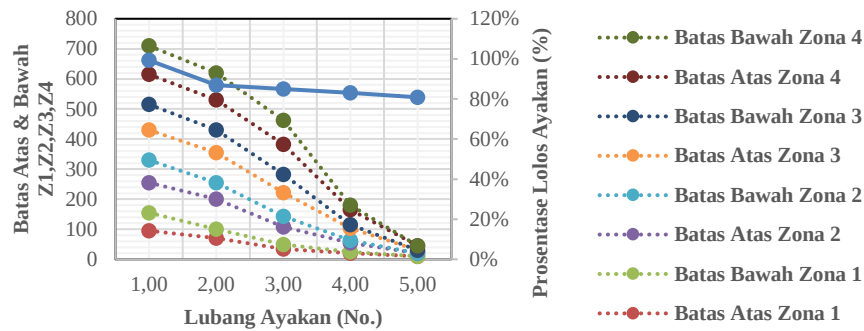
1 Pengujian Gradasi

Limbah *sandblasting* bukanlah bahan yang umum digunakan untuk produksi beton. Namun karena timbulan yang besar, limbah *sandblasting* digunakan sebagai pengganti agregat halus dalam produksi beton *ferrocement*. Asumsikan bahan penggantinya sama dengan pasir. Standar yang digunakan untuk pengujian sama dengan standar untuk pasir. Berikut perbandingan nilai gradasi antara limbah sandblasting dan pasir lumajang.



Gambar 1. Grafik Gradasi Limbah *Sandblasting* terhadap Zona 1,2,3, dan 4

Gambar 1 menunjukkan bahwa proporsi serpihan *sandblast* yang melewati saringan (garis biru tebal) berada di antara batas atas dan bawah zona gradasi No. 4. Dari sini dapat disimpulkan bahwa limbah *sandblasting* yang digunakan berbutir halus. Dalam produksi beton *ferrocement* pada penelitian ini, limbah *sandblasting* yang lolos saringan no. 8 dengan ukuran butiran antara 2,38 – 1,18 mm.



Gambar 2. Grafik gradasi pasir terhadap zona 1,2,3, dan 4

Gambar 2 menunjukkan prosentase pasir yang lolos ayakan (garis tebal berwarna biru) berada di antara batas atas dan batas bawah pada zona gradasi no. 4, sehingga dapat disimpulkan bahwa pasir yang dipakai juga tergolong butiran halus sama seperti limbah *sandblasting*. Dengan mencermati hal tersebut, maka limbah *sandblasting* dapat digunakan dalam *mix design* beton ferosemen, mengingat hasil gradasinya yang menunjukkan kesamaan dengan pasir.

2 Pengujian berat jenis

Uji berat jenis limbah *sandblasting* dan pasir dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui berat jenis dua agregat halus pada kondisi jenuh air pengeringan permukaan (SSD). Kerapatan permukaan (SSD kering) adalah perbandingan antara berat agregat kering yang jenuh di permukaan dengan berat kandungan distilat, yang pada suhu tertentu sama dengan berat agregat jenuh..

Tabel 1. Hasil uji berat jenis

	Uraian	Berat	Satuan
Limbah Sandblasting	Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh SSD (Bj)	500	gram
	Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	495	gram
	Berat Piknometer Diisi Air (B)	1240	gram
	Berat Piknometer + Benda Uji (ssd) + Air (Bt)	1550	gram
	Berat Jenis SSD ($Bj : (B + Bj - Bt)$)	2,631	g/cm^3
Pasir	Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh SSD (Bj)	500	gram
	Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	490	gram
	Berat Piknometer Diisi Air (B)	1240	gram
	Berat Piknometer + Air + Benda Uji (Bt)	1545	gram
	Berat Jenis SSD ($Bj : (B + Bj - Bt)$)	2,564	g/cm^3

Limbah *sandblasting* merupakan bahan pengganti pasir, maka uji berat jenis ini didasarkan pada standar uji berat jenis pasir yaitu SNI 03 1970 2008, dengan menggunakan sampel yang mengandung 1000 ml air atau hidrometer isi setara. Itu dilakukan dengan menggunakan. 1000cm³. Karena berat jenis agregat halus yang dipersyaratkan SNI 03 1970 2008 adalah antara 1,6 dan 3,2 g/cm³, maka dapat disimpulkan bahwa limbah *sandblasting* dan pasir yang diuji mempunyai nilai yang hampir sama dan memenuhi persyaratan.

3 Pengujian daya serap air

Pengujian ini untuk mengetahui kemampuan *sandblasting* dalam menyerap air. Dengan mengetahui daya serap air *sandblasting*, maka dapat dipilih FAS yang paling sesuai agar kualitas yang optimal.

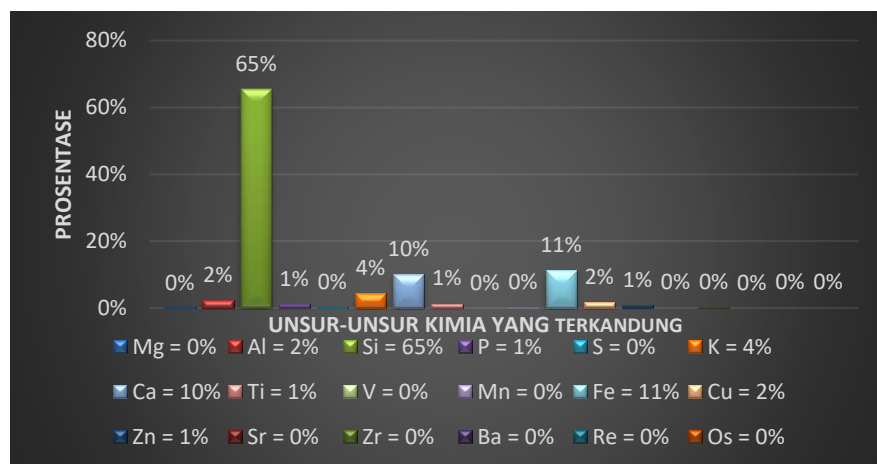
Tabel 2. Hasil uji daya serap air

	Uraian	Nilai	Satuan
Limbah Sandblasting	Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh SSD (BJ)	500	gram
	Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	495	gram
	Daya Serap Air $\frac{Bj-Bk}{Bj} \times 100\%$	1	%
Pasir	Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh SSD (BJ)	500	gram
	Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	495	gram
	Daya Serap Air $\frac{Bj-Bk}{Bj} \times 100\%$	2	%

Berdasarkan pengujian daya serap air yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa kemampuan limbah *sandblasting* dalam menyerap air sebesar 1% dan pasir sebesar 2%. Limbah *sandblasting* dan pasir tersebut sudah memenuhi syarat yang ditetapkan dalam SNI 03 1970 2008, yaitu tidak melebihi 3%. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, didapatkan kemampuan pasir dalam menyerap air sebesar 2%.

4 Pengujian XRF

X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) merupakan cara analitik untuk menentukan komposisi kimia yang terkandung dalam bahan berbentuk padat, bubuk, atau bentuk lainnya. Pengujian XRF dilakukan pada row material limbah *sandblasting* karena dalam pembuatan beton ini hanya limbah *sandblasting* yang tergolong B3 sehingga perlu diuji kandungan melalui uji XRF setelah itu lanjut uji TCLP.



Gambar 3. Grafik Hasil uji XRF

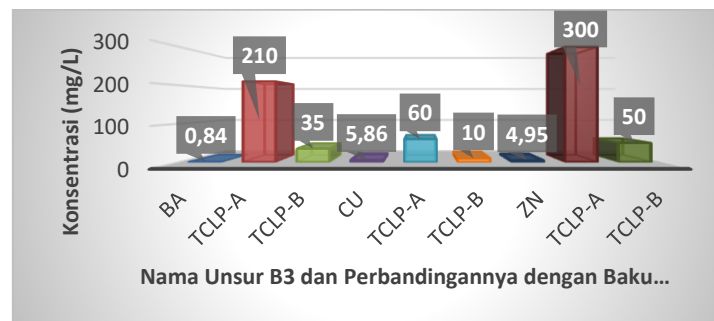
Berdasarkan hasil di atas diketahui unsur-unsur kimia yang tergolong logam berat antara lain:

- Barium (Ba) dengan kandungan sebesar 0,06%
- Seng (Zn) dengan kandungan sebesar 0,76%
- Copper (Cu) dengan kandungan sebesar 1,83%

Ba, Zn, dan Cu tergolong logam berat non esensial yang mempunyai sifat berbahaya dan beracun. Gejala keracunan logam berat mengakibatkan mual, muntah, diare, nyeri perut, hemolisis, kejang, dan kematian (Darmono, 2006). Karena bahaya kandungan logam berat telah dijelaskan, maka diperlukan uji TCLP untuk memastikan apakah kandungannya melebihi baku mutu atau standar kualitas.

5 Pengujian TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)

Uji TCLP merupakan salah satu dari uji sifat toksisitas limbah B3, dengan memastikan konsentrasi pencemar limbah yang diuji berada dalam konsentrasi pencemar. Prosedur ini sangat penting dalam pengelolaan limbah sandblasting yang berpotensi mengandung logam berat.



Gambar 4. Grafik Hasil uji TCLP

Pengujian *Toxic Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) untuk unsur Ba, Cu, dan Zn dilakukan sesuai dengan US EPA SW 846-1996 Metode 6010 B. Hasil pengujian di atas menunjukkan bahwa limbah *sandblasting* mengandung 0,84 mg/L Ba, 5,86 mg/L Cu, dan 4,95 mg/L Zn. Berdasarkan Lampiran PerMen Nomor 22 Tahun 2021, limbah *sandblasting* pada Gambar di atas dapat dikatakan tidak melebihi baku mutu. Nilai konsentrasi baku mutu Cu pada TCLP-A dan TCLP-B masing-masing sebesar 60 mg/L dan 10 mg/L, sehingga nilai konsentrasi Cu pada limbah *sandblasting* tergolong tidak melebihi baku mutu. Nilai konsentrasi baku mutu Zn untuk TCLP-A dan TCLP-B masing-masing adalah 300 mg/L dan 50 mg/L, dan nilai konsentrasi Zn pada limbah *sandblasting* memenuhi baku mutu. Singkatnya, logam berat B3 dalam limbah *sandblasting* secara keseluruhan berada di bawah standar kualitas saat ini dan oleh karena itu layak digunakan dalam produksi pelat beton ferrocement.

6 Mix Design

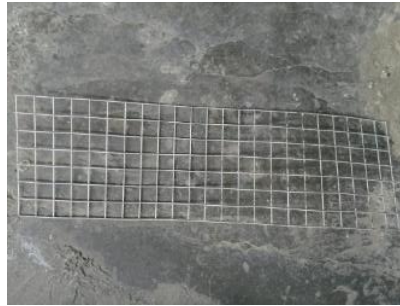
Berdasarkan uraian pengujian karakteristik diatas didapati bahwa material limbah *sandblasting* memenuhi kesamaan karakteristik material pasir dan didapati pula nilai ambang dibawah baku mutu layak aman bagi lingkungan. Selanjutnya rencana campuran *mix design* beton ferrosemen dengan menggantikan pasir dengan material limbah *sandblasting* ditentukan pada tabel berikut.

Tabel 3. *Mix design* beton ferosemen

No.	Nama Variasi	S	Pasir	Limbah Sandblasting	SP	Air
1.	1S : 1.5LSB	600 g	0 g	900 g	12 mL	180 mL
2.	1S : 2LSB	600 g		1200 g		

* S = Semen, LSB = Limbah *sandblasting*, SP = *Superplasticizer*

Mortar ferosemen ditambahkan *admixture* berupa *superplasticizer* (sp) sebanyak 2% dari binder (semen) dan w/c sebesar 0.30 dari binder. Benda uji yang dibuat berbentuk kubus ukuran 5x5x5cm dan berbentuk pelat beton dengan dimensi 30x10x2cm sebanyak total 12 buah (3 spesimen per variasi). Benda uji yang sudah jadi selanjutnya dicuring selama 28 hari dengan ditutupi kain basah. Adapun tulangam *wiremesh* atau kawat jala yang dipakai adalah sebanyak 3 lapis per 1 benda uji dengan jarak antar kawat sebesar 0,5 cm. Kawat jala ini berfungsi sebagai tempat melekatnya mortar dan akan memberi kekuatan lentur pada beton ferosemen. Spesifikasi dari kawat jala yang dipakai memiliki diameter 0.5 cm dengan bukaan 1 x 1 cm² yang ditunjukkan seperti gambar di bawah ini.



Gambar 5. Penulangan Wiremesh

7 Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan pada limbah sandblasting yang telah disolidifikasi sangat penting untuk memastikan bahwa limbah tersebut stabil secara fisik dan aman. Dengan hasil uji kuat tekan yang memadai, risiko pencemaran lingkungan dapat dikurangi, dan limbah dapat dikelola sesuai dengan persyaratan regulasi yang berlaku. Pengujian Kuat Tekan Dilakukan Setelah Benda Uji Dilakukan Perawatan Selama 28 Hari Agar Kekuatan Tekan Beton Fero semen Bisa Maximal. Berikut Data Hasil Pengujian Tekan Disajikan Dalam Tabel Berikut.

Tabel 4. Hasil Uji Tekan

No	Kode Benda Uji	Benda Uji Ke-						Rata-Rata (Mpa)	
		1		2		3		Kubus 5x5x5 cm	Silinder 15x30 cm
		Kubus 5x5x5 cm	Silinder 15x30 cm	Kubus 5x5x5 cm	Silinder 15x30 cm	Kubus 5x5x5 cm	Silinder 15x30 cm		
1	1S-1,5LSB	33,4	29,1	30	26,1	31,1	27,1	31,5	27,4
2	1S-2LSB	29,7	25,8	33,9	29,5	39,3	34,2	34,3	29,8

Berdasarkan hasil tekan didapati nilai rata-rata tertinggi sebesar 34,3 MPa dan 29,8 Mpa, Hal ini menunjukkan bahwa benda kuat tekan beton berbahan limbah sandblasting cukup tinggi dan layak untuk buat beton fero semen, Menurut BAPEDAL No. 03 tahun 1995, nilai kuat tekan minimum untuk material limbah B3 yang telah diolah dengan metode solidifikasi-stabilisasi adalah 3,45 Mpa setelah proses curing selama 28 hari. Nilai ini merupakan standar minimum yang harus dicapai oleh material hasil solidifikasi untuk memastikan bahwa limbah tersebut memiliki stabilitas fisik yang cukup kuat sehingga tidak mudah hancur di lingkungan.

8 Pengujian Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur dilakukan pada beton fero semen berbentuk pelat dengan ukuran 30x10x2 cm yang di dalamnya telah diberi kawat wiremesh sebanyak 3 lapis.



Gambar 6. Uji Lentur

Pengujian ini dilakukan setelah beton berumur 28 hari dengan rincian beberapa data berikut.

Tabel 5. Data Hasil Pengujian Lentur

No.	Kode Benda Uji	Max Force dari data pengujian (N)	Hasil perhitungan (Mpa)	Kuat Lentur Rata-Rata (Mpa)
1	1C-1,5SB	2167,12	20,32	18,41
		1809,37	16,96	
		1913,25	17,94	
2	1C-2SB	1992	18,68	18,87
		1423,12	13,34	
		2266,87	21,25	

Berdasarkan tabel hasil uji kuat lentur diatas, nilai rata-rata benda uji nomor 3 dengan kode 1S-2LSB menunjukkan nilai kuat lentur paling tinggi yaitu sebesar 18,87 Mpa. Kuat lentur ferrocement umumnya lebih tinggi dibandingkan beton biasa karena penggunaan tulangan mesh baja yang menyebar beban tarik secara merata dalam struktur. Nilai kuat lentur ferrocement biasanya berkisar antara 8 MPa hingga 15 MPa, menjadikannya pilihan yang baik untuk aplikasi konstruksi yang memerlukan ketahanan lentur tinggi namun tetap ringan dan ekonomis. Dalam produksi beton ferrocement, partikel limbah *sandblasted* berukuran besar diisi secara padat dan dikompresi menjadi rongga-rongga di dalam kotak atau jaring kawat, sehingga menghasilkan nilai yang lebih tinggi dalam uji kuat lentur. Sejalan dengan hasil penelitian ini terhadap pengaruh limbah *sandblasting* terhadap kuat lentur, Abdillah, Nn dan Muhabbah, Z (2019), dalam penelitiannya tentang pemanfaatan limbah *sandblasting* pasir silika sebagai bahan pengganti agregat halus untuk campuran beton, menyimpulkan pengaruh penggunaan limbah *sandblasting* sebagai bahan ganti agregat halus dalam campuran beton juga dapat meningkatkan kuat tekan beton, bahkan kuat tekan yang didapat lebih tinggi dari yang telah direncanakan. Sifat fisik pada limbah *sandblasting* agak halus sehingga butiran yang halus tersebut dapat mengisi pori-pori pada beton yang dapat membuat kuat tekanya semakin meningkat.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa limbah *sandblasting* dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengganti agregat halus (pasir) dalam pembuatan beton ferosemen dengan melihat hasil uji karaterisasi. Material yang dihasilkan memiliki kekuatan mekanik yang cukup baik dilihat dari pengujian tekan dengan nilai 34,2 Mpa dan kuat lentur dengan nilai 18,87 Mpa serta aman dari sisi lingkungan dibuktikan uji XRF dan TCLP dengan nilai berada dibawah ambang baku mutu PP Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran XI. Untuk itu dapat dipertimbangkan sebagai alternatif material konstruksi yang berkelanjutan. Penggunaan limbah *sandblasting* tidak hanya berkontribusi dalam pengurangan limbah industri, tetapi juga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan dengan mengurangi konsumsi bahan baku alam.

Daftar Pustaka

- Abdillah. N dan Muhabbah. Z, (2019), Pemanfaatan Limbah Sandblasting Pasir Silika Sebagai Bahan Pengganti Agregat Halus Untuk Campuran Beton, UNITEK Vol 12 No.1 Januari - Juni 2019.
- Alifiadi, R., & Slamet, A. (2022). Utilization of Sandblasting Waste as an Alternative Material for Paving Blocks. Jurnal Multidisiplin Madani, 2(12), 4399-4407.

- ASA Ramadhani, A Nindyapuspa, L Cahyono. 2023. Stabilisasi/Solidifikasi Limbah Mengandung Fenol Menggunakan Cangkang Kerang dan Bentonit. Conference Proceeding on Waste Treatment Technology Vol 6 No. 1, Agustus 2023
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus (SNI 03 1970 2008).
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). Metode Pengujian Waktu Ikat Awal Semen Portland dengan Menggunakan Alat Vicat untuk Pekerjaan Sipil (SNI 03 6827 2002).
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal (SNI 03 2834 2000).
- BAPEDAL No. 3 Tahun 1995 Tentang Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. (1995). Republik Indonesia
- Cahyono, L. et al. 2023. Pemanfaatan Limbah Abu Cangkang Kemiri Industri Makanan Sebagai Substitusi Agregat Halus Paving Block. Jurnal Mitra Teknik Sipil. Vol 6, No.3, Hal 667-684
- Cheah, C. B., & Ramli, M. (2013). The structural behaviour of HCWA ferrocement–reinforced concrete composite slabs. Composites Part B: Engineering, 51, 68-78.
- Darmono. 2006. Lingkungan Hidup dan Pencemaran Hubungannya dengan Toksikologi Senyawa Logam. UI Pres. Jakarta. Institut Pertanian Bogor.
- Dewantara, F.A., Setiani, V., dan Rizal, M.C. 2017. Perancangan Tempat Penyimpanan Sementara (TPS) Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) Pada Perusahaan Galangan Kapal. Proceeding the 1st Conference on Safety Engineering and Its Application.
- Nursabrina, A., Joko, T., & Septiani, O. (2021). Kondisi Pengelolaan Limbah B3 Industri Di Indonesia Dan Potensi Dampaknya: Studi Literatur. Jurnal Riset Kesehatan Poltekkes Depkes Bandung, 13(1), 80-90.
- Prasetyo, Y. E., & Widodo, S. (2015). Pengaruh Cara Perawatan Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lentur High Early Strength Fiber Reinforced Concrete. INERSIA Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur, 11(1), 46-52.
- Rahmadona, E., Amalia, KR, Ulfah, L., & Praditya, N. (2024). Analisis Kuat Tekan Beton Menggunakan Silica Fume dan Fly Ash Sebagai Pengganti Parsial Semen. Jurnal Bakat Sipil, 7 (1), 217-223.
- Rao, P. (2020). "Sustainable Construction Materials: Utilization of Waste in Building Materials." Journal of Civil Engineering.
- Singh, R., et al. (2021). "Green Concrete Technology: Recycled Industrial Waste in Construction." Journal of Sustainable Construction.
- Qi, C., Weinell, C.E., Dam-Johansen, K. & Wu, H. 2021. Journal of Environmental Management. Vol. 300. Hal. 1-13.
- Zhang, Y., et al. (2019). "Mechanical Properties and Durability of Ferrocement Structures Reinforced with Wire Mesh." Journal of Composite Materials.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh DIPA Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya Tahun Anggaran 2024