

Pengaruh Limbah Polimer PET dan EVA sebagai Substitusi Pasir Silika dan Semen terhadap Peningkatan Kuat Lentur, Sifat Fisis dan Karakterisasi Mortar Polimer

Muhammad Amin

Pusat Riset Teknologi Pertambangan Badan Riset dan Inovasi Nasional
Tanjung Bintang, Indonesia, Email: muha01@brin.go.id

Ariadne Laksmidevi Juwono*

Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia
Email: ariadne.laksmidevi@ui.ac.id

Sudibyo

Pusat Riset Teknologi Pertambangan Badan Riset dan Inovasi Nasional
Tanjung Bintang, Indonesia, Email: sudibyo@brin.go.id

Suprihatin

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung
Bandar Lampung, Indonesia, Email: reip65@yahoo.com

Silvia Putriana

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung
Bandar Lampung, Indonesia, Email: silviaanap77@gmail.com

Abstrak

Dilakukan penelitian pembuatan mortar polimer menggunakan Polyethylene Terephthalate (PET) sebagai substitusi pasir dengan komposisi 0%, 0,2%, 0,5%, 0,8%, 1,1%, 1,4% dan polimer Ethylene Vinyl Acetate (EVA) komposisi 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%. Bahan pasir, semen dan polimer ditimbang dan dicetak berbentuk ukuran $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ dan direndam dalam air selama 7 dan 14 hari. Didapatkan nilai kuat lentur tertinggi waktu perendaman 14 hari sebesar 6,50 MPa, porositas umur 7 hari sebesar 12,20%, nilai absorpsi umur 7 hari sebesar 6,65% dan massa jenis umur 14 hari sebesar $1,89 \text{ g/cm}^3$ dengan komposisi substitusi polimer terhadap pasir sebanyak polimer EVA 10% : PET 1,4%. Dilakukan karakterisasi pada sampel dengan alat X-ray Diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), dan Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). Karakterisasi XRF didapat CaO sebesar 46,95% dan SiO_2 sebesar 24,45%, merupakan hasil pembentukan C-S-H. Karakterisasi XRD didapat fasa calcite, quartz, corundum, hematite. Citra SEM-EDS memperlihatkan morfologi berbentuk seperti kembang kol dan unsur dominan Ca dan Si. Gugus fungsi FTIR yaitu O-H, C=O, C-C, C-H, Si-O-Si, dan Si-O merupakan gugus portlandite. Semakin banyak penambahan polimer EVA dan PET menghasilkan porositas yang tinggi dan kuat lentur yang tinggi.

Kata-kata Kunci: Mortar polimer, EVA, PET, dan karakterisasi.

Abstract

A study was conducted on the manufacture of polymer mortar using Polyethylene Terephthalate (PET) as a substitute for sand with a composition of 0%, 0.2%, 0.5%, 0.8%, 1.1%, 1.4% and Ethylene Vinyl Acetate (EVA) polymer composition of 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%. Sand, cement and polymer materials were weighed and molded into a size of $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ and soaked in water for 7 and 14 days. The highest flexural strength value obtained at 14 days of immersion was 6.50 MPa, porosity at 7 days of 12.20%, absorption value at 7 days of 6.65% and density at 14 days of 1.89 g/cm^3 with a polymer substitution composition for sand of 10% EVA polymer: 1.4% PET. Characterization of the sample was carried out using X-ray Diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). XRF characterization obtained CaO of 46.95% and SiO_2 of 24.45%, which is the result of C-S-H formation. XRD characterization obtained calcite, quartz, corundum, hematite phases. SEM-EDS images show a cauliflower-like morphology and dominant elements of Ca and Si. FTIR functional groups are O-H, C=O, C-C, C-H, Si-O-Si, and Si-O is a portlandite group. The increasing addition of EVA and PET polymers results in high porosity and high flexural strength.

Keywords: Polymer, mortar, EVA, PET, and characterization.

* Penulis Korespondensi: ariadne.laksmidevi@ui.ac.id

1. Pendahuluan

Pembangunan konstruksi di seluruh dunia mengalami perkembangan yang sangat pesat. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan banyaknya pembangunan gedung, perumahan, jalan, maupun konstruksi yang lainnya. Seiring dengan perkembangan tersebut, maka semakin besar juga peningkatan akan kebutuhan mortar sebagai salah satu bahan konstruksinya. Mortar dikenal sebagai material yang banyak digunakan untuk bahan bangunan karena kekuatan dan ketahanannya.

1.1 Mortar

Pengertian mortar adalah adukan yang terdiri dari pasir, bahan perekat dan air. Fungsi utama dari mortar adalah menambah lekatan dan ketahanan ikatan dengan bagian-bagian penyusun suatu konstruksi kekuatan mortar tergantung pada kohesi pasta semen terhadap partikel agregat halus. Sebuah campuran mortar dapat dikatakan baik bila campuran tersebut membentuk Beton atau konstruksi keras yang kuat, tahan lama, kedap air, tahan aus, dan kembang susutnya kecil. (Tjokrodinulyo 1996). Secara umum dalam volume mortar terkandung Agregat $\pm 68\%$, Semen $\pm 11\%$, Air $\pm 17\%$, Udara $\pm 4\%$. Mortar terdiri dari beberapa jenis berdasarkan ASTM C 270-10/SNI 03-1970-1990, mortar diklasifikasikan menjadi 4 tipe berdasarkan sifat mortar, yaitu: Mortar Tipe M kuat tekan 17,2 MPa, Mortar tipe S kuat tekan 12,4 MPa, Mortar Tipe N kuat tekan 5,2 MPa, dan Mortar Tipe O kuat tekan 2,4 MPa

Akan tetapi, mortar memiliki kekurangan seperti pengerasan yang lambat, kuat tarik yang rendah dan kuat lentur yang rendah (Ohama, 1995).

1.2 Agregat halus

Salah satu penyebab kurang baiknya mortar adalah kualitas agregat yang digunakan kurang baik tidak memenuhi standar, sehingga agregat halus atau pasir kwarsa yang digunakan harus dilakukan pemeriksaan terlebih dahulu. Jenis pemeriksaan yang dilakukan meliputi , analisa berat jenis pasir SNI 03-1970-1990, analisa berat volume pasir (ASTM C29/C29M – 91/SNI 03-4804-1998), analisa resapan pasir (ASTM C128 - 93), analisa kelembapan pasir (kadar air) pasir (ASTM C56 – 89/SNI 03-1971-1990), tes kebersihan pasir terhadap lumpur (pencucian)(SNI 03-4141-1996), dan tes kebersihan pasir terhadap bahan organik (SNI 03-1816-1993, Modulus halus butir (SNI 03-1968-1990).

1.3 Polimer

Selain itu upaya dalam memperbaiki kekurangan mortar yaitu dengan penambahan polimer. Adanya penambahan polimer ke dalam pembuatan mortar memiliki fungsi yaitu polimer memiliki sifat *deformable* dan memiliki daya lekat yang baik dan mempengaruhi sifat lentur mortar. Penambahan polimer pada mortar seringkali disebut sebagai mortar polimer modifikasi, penambahan senyawa polimer ke material berpori dapat meningkatkan sifat material

seperti kekuatan lentur, daya tahan, dan ikatan antarmuka antara material yang baru (Min., 2020) (Xijun dkk., 2021). *Polyethylene Terephthalate* (PET) merupakan salah satu jenis polimer yang masuk dalam kategori limbah. Oleh karena itu, untuk mengatasi limbah PET selain dengan cara mendaur ulang, limbah PET dapat digunakan sebagai bahan konstruksi bangunan sebagai agregat, sebab mempunyai sifat lentur (Garcia dkk., 2021) (Todaro dkk., 2023).

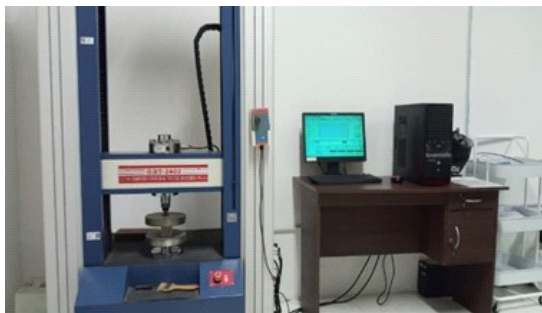
Salah satu cara pemanfaatan limbah botol PET adalah dengan cara digunakan sebagai partikel kecil-kecil, serat atau pelet, sebagai pengganti agregat halus atau kasar (Firgione, 2010). Pemilihan polimer PET sebagai agregat dimaksudkan agar mortar mempunyai sifat fleksibilitas yang baik sehingga mortar pada konstruksi bangunan tidak patah langsung tapi mempunyai jeda waktu untuk runtuh saat terjadi gempa bumi dan masih ada waktu bagi manusia yang ada didalam ruangan berlari keluar (Foti dan Lerna, 2020), selain itu menurut penelitian Kim (2020) ada beberapa jenis polimer yang dapat digunakan pada pencampuran komposisi mortar seperti *Polyvinyl Alcohol* (PVA), *Styrene-Butadiene Rubber* (SBR), *Ethylene-vinyl Acetate* (EVA).

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, penelitian ini dilakukan untuk menghasilkan mortar yang mempunyai sifat lentur yang baik dan mempunyai fleksibilitas yang tinggi dengan mensubstitusi pasir dengan polimer PET yang berasal dari limbah botol minuman mineral yang dipotong kecil-kecil.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian dilakukan dengan cara didahului dengan pengujian kualitas agregat halus atau pasir kwarsa, meliputi pengujian, analisa berat jenis pasir SNI 03-1970-1990, analisa berat volume pasir (ASTM C29/C29M – 91/SNI 03-4804-1998), analisa resapan pasir (ASTM C128 - 93), analisa kelembapan pasir (kadar air) pasir (ASTM C56 – 89/SNI 03-1971-1990), tes kebersihan pasir terhadap lumpur (pencucian)(SNI 03-4141-1996), dan tes kebersihan pasir terhadap bahan organik(SNI 03-1816-1993, Modulus halus butir (SNI 03-1968-1990).

Pada penelitian ini parameter komposisi yang digunakan yaitu dapat ditunjukkan pada **Tabel 1**. terdapat bahan semen jenis Portland Cement Composit (PCC) dari pasaran di Lampung, pasir jenis pasir kali berasal dari Kecamatan Gunung Sugih Lampung Tengah, polimer EVA bubuk jenis teknis berasal dari toko online dan polimer PET berasal dari limbah botol kemasan minum mineral didaur ulang dengan cara dibersihkan, dipotong kecil-kecil ukuran 1 x 1 mm – 1,2 x 1,2 mm seperti ukuran pasir, air bersih berasal dari lab kimia berupa air suling. Semua bahan ditimbang dengan timbangan neraca analitik 2 angka dibelakang koma merk Sartorius dari Jerman, sesuai komposisi yang tertera di **Tabel 1**. Prosedur pembuatan sample uji berdasarkan SNI 03-6825-2002. Selanjutnya, siapkan mesin pengaduk sesuai ASTM C-305, masukan air kedalam mangkuk, masukan juga



Gambar 1. (a) Mesin uji kuat lentur UTM, (b) sample uji kuat lentur

semen, biarkan selama 30 detik, aduk selama 30 detik kecepatan 140 rpm, masukan sedikit demi sedikit pasir kwarsa aduk dengan kecepatan 285 rpm selama 30 detik, masukan juga polimer EVA dan PET secara bergantian, biarkan 75 detik, aduk kembali dengan kecepatan 285 rpm selama 60 detik, adonan cetak ke dalam cetakan berbentuk balok berukuran $160 \times 40 \times 40$ mm, isi 1/2 bagian cetakan, padatkan dengan besi pemadat, isi kembali sampai penuh dan padatkan, ratakan adonan pada cetakan.

Biarkan selama 24 jam pada suhu ruang, lepaskan sample uji dari cetakan dan rendam dalam wadah berisi air selama 7 dan 14 hari. Pada umur 7 hari dan 14 hari masing-masing benda uji dikeluarkan dan ditiriskan diatas wadah pada suhu ruang selama 30 menit. Lakukan uji fisis sample uji dengan cara sample uji dikeringkan dalam oven suhu 110 selama 2 jam, timbang dan ulangi sampai berat tetap. Rendam sample dalam air selama 24 jam, keluarkan dari dalam air dan timbang sample, kemudian timbang sample uji dalam keadaan terendam air. Lakukan perhitungan sesuai dengan rumus yang telah ditetapkan sesuai standar uji absorpsi dan massa jenis sesuai ASTM C 642-06. 2006, uji porositas berdasarkan ASTM C 642-06.

Sample hasil uji fisis digunakan untuk uji mekanis yaitu uji kuat lentur berdasarkan ASTM C348. Alat uji dihidupkan, sample uji ditaruh pada mesin uji UTM pada posisi tengah dan operasikan alat sehingga alat dapat menekan sample uji pada bagian tengah sampai patah secara perlahan, catat tekanan maksimum yang dihasilkan dan rancang retakan ketika sample uji sudah patah, lakukan perhitungan sebagai kuat lentur mortar sesuai dengan rumus kuat lentur. Sample uji dilakukan sebanyak 3 kali perulangan masing-masing komposisi dan diambil rata-rata hasilnya. **Gambar 1.** Memperllihatkan pengujian kuat tekan.

Komposisi bahan baku untuk penelitian pembuatan mortar terlihat pada **Tabel 1**.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil uji kualitas agregat halus

Tabel 2 menunjukkan hasil Analisa atau pengujian agregat halus bahwa agregat termasuk agregat berukuran halus yaitu 2,3 sedangkan standar pasir halus adalah 2,2 – 2,6.

Dari **Tabel 3** hasil pemeriksaan dan analisis perhitungan berat jenis agregat halus kering muka (SSD) didapat sebesar $2,53 \text{ g/cm}^3$. Nilai tersebut menunjukkan agregat termasuk ke dalam jenis agregat normal sesuai pernyataan Hamdi dkk, 2022 yang menyebutkan agregat normal ialah agregat yang berat jenisnya antara 2,5 sampai 2,7. Sehingga dengan berat jenis SSD agregat halus jenis ini dapat digunakan dalam perencanaan campuran mortar. Kadar lumpur hasil pengujian didapat sebesar 4,61% termasuk memenuhi standar yaitu maksimal kadar lumpur 5%, namun masih perlu dicuci kembali agar kadar lumpur agak berkurang. Kadar air hasil pengujian menunjukkan sebesar 2,45% sedangkan standar adalah 0,5-5% sehingga kadar air agregat termasuk kadar air normal atau kering, tidak mengandung air yang berlebihan. Absorpsi pasir hasil pengujian sebesar 3,80% sedangkan standar adalah 0,2-2% maka agregat halus termasuk mempunyai pori yang cukup besar karena banyak menyerap air sehingga bila digunakan sebagai agregat maka air agak dilebihkan atau factor air semen yang diatas normal misal $w/c = 0,5$

Sedangkan hasil pengujian gradasi agregat dihasilkan angka 2,3 yang termasuk agregat halus yaitu antara 2,2 – 2,6.

Dari hasil uji secara keseluruhan agregat halus yang digunakan layak digunakan sebagai campuran pembuatan mortar karena memenuhi standar SNI.

3.2 Uji fisis dan uji mekanis

Pada penelitian ini dilakukan uji fisis yang meliputi absorpsi, porositas, massa jenis dan uji mekanis yang digunakan yaitu kuat lentur dengan sample uji berbentuk balok ukuran $40 \times 40 \times 160$ mm (menurut standar ASTM C348). Pada **Gambar 2(a)** dan **Gambar 2(b)** menunjukkan grafik yang memiliki hubungan antara nilai absorpsi dan nilai porositas dengan variasi komposisi yang dipengaruhi oleh waktu perendaman.

Tabel 1. Komposisi bahan pembuatan mortar

Kode Sampel	Komposisi Bahan (%)				
	Semen	EVA	Pasir	PET	Total
EVA/PET	20,0	0,0	80,00	0,00	100
2EVA/0,2PET	19,6	0,4	79,84	0,16	100
4EVA/0,5PET	19,2	0,8	79,60	0,40	100
6EVA/0,8PET	18,8	1,2	79,36	0,64	100
8EVA/1,1PET	18,4	1,6	79,12	0,88	100
10EVA/1,4PET	18,0	2,0	78,88	1,12	100

Tabel 2. Hasil uji gradasi agregat halus

No	Lubang ayakan (mm)	Berat tertinggal gr	%	Berat kumulatif (%)
1	2	0	0	0
2	0,5	43,3	10,99	10,99
3	0,42	47,49	12,05	23,04
4	0,354	90,14	22,88	45,92
5	0,25	57,05	14,48	60,8
6	0,15	117	29,7	90,5
	Sisa	38,93	9,88	
	Total	393,91	99,97	231,25
	MHB			2,3

Penambahan polimer dapat membantu mengurangi pori-pori dan ruang kosong yang tentunya menjadi sedikit celah air untuk masuk sehingga semakin banyak polimer yang ditambahkan ke dalam mortar maka akan semakin sedikit pori yang dihasilkan (Ramli dkk., 2013) dan penambahan polimer EVA pada mortar akan memberikan pengaruh peningkatan kuat lentur (Min, 2020). Namun dengan penggabungan dua polimer akan menghasilkan jumlah porositas yang meningkat seiring semakin banyaknya penambahan polimer PET pada mortar disebabkan ukuran PET yang kurang kecil untuk mengisi pori-pori dari pasir kwarsa atau agregat halus hal ini berlaku juga terhadap penyerapan air yang akan semakin banyak terserap bila jumlah porositas mortar meningkat (Chen, 2013) (Emamian and Naddaf, 2019) selain itu peningkatan porositas juga bisa dipengaruhi oleh kadar air yang berlebihan dari pasir atau agregat halus sehingga saat terjadi reaksi hidrasi maka air yang berlebih akan terperangkap dalam pasta semen/pengikat setelah proses hidrasi selesai, menguap menjadi uap dan akan menimbulkan pori-pori. Air yang berlebihan dalam campuran mortar juga menjadi penyebab terjadinya porositas dalam mortar, rasio w/c juga harus diperhatikan tidak boleh lebih dari 0,40 (Smith, 2018)

Pada **Gambar 2(c)** menunjukkan nilai massa jenis yang semakin meningkatnya seiring dengan semakin lamanya umur perendaman, umur perendaman 14 hari massa jenis lebih tinggi dibandingkan umur perendaman 7 hari. Massa jenis meningkat maka nilai kuat lentur juga semakin tinggi dikarenakan lebih banyak material yang tersusun rapat sehingga, menghasilkan struktur yang lebih padat dan kuat akibat reaksi hidrasi pembentukan gel Calcium silicate hydrate (C-S-H) yang semakin sempurna sehingga ikatan semakin kuat dan padat pada mortar (Liu dkk., 2024) (Novoa dkk., 2004). Pada **Gambar 2(d)** menunjukkan nilai kuat lentur, semakin banyak penambahan polimer EVA dan PET maka akan berpengaruh pada peningkatan nilai kuat lentur pada

mortar (Yeon dkk., 2019) (Prabha dan George, 2017), hal ini disebabkan dengan penambahan polimer EVA pada mortar maka mortar akan mengalami peningkatan modulus elastisitas, kekuatan ikatan, ketangguhan, dan impermeabilitas karena permukaan butiran semen terbungkus oleh polimer EVA dan dapat menahan air eksternal langsung bersentuhan (Qing dkk., 2021). Oleh karena itu, hidrasi semen dibatasi, yang menyebabkan kekuatan tekan yang relatif rendah dan dengan adanya penggabungan dua polimer maka akan menunda reaksi hidrasi pada mortar ini yang menyebabkan kuat lentur yang meningkat. Sedangkan polimer PET mencegah pembentukan ettringite dengan pembentukan kristal kecil di sekitar mortar (Bhavna, 2024).

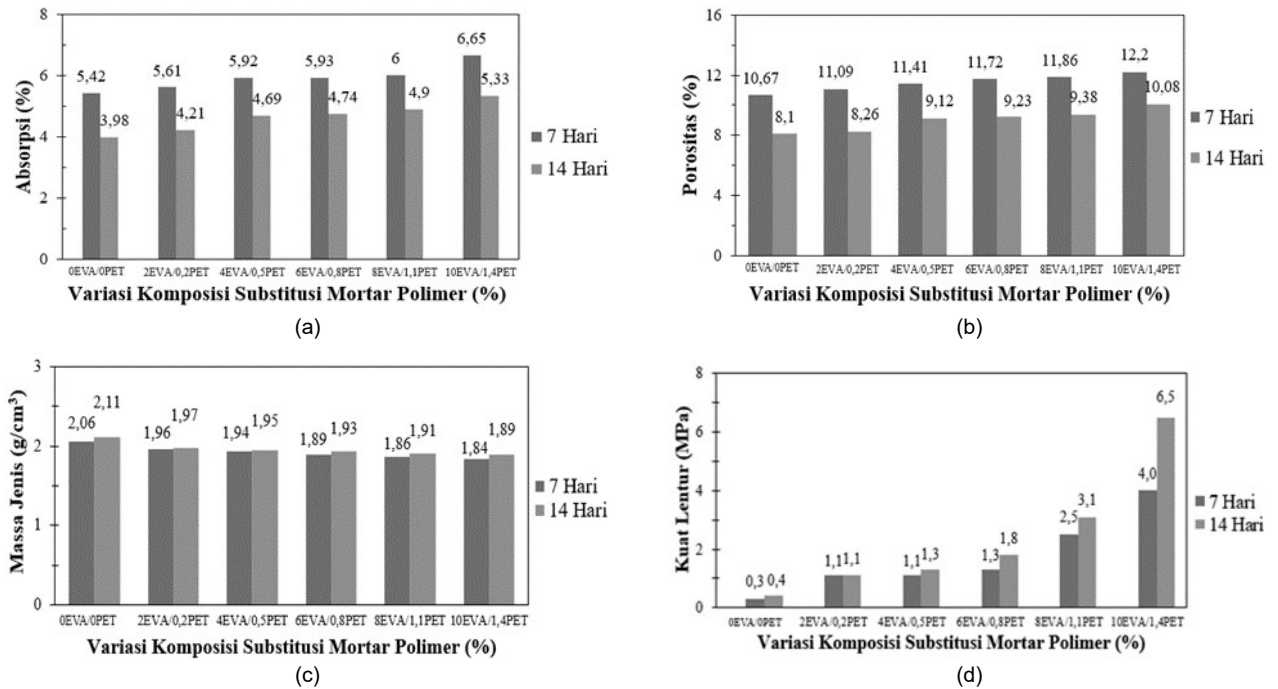
3.3 Analisis XRD

Pada penelitian ini menggunakan karakterisasi XRD yang dilakukan pada bahan baku dan sampel mortar polimer dengan nilai kuat lentur tertinggi dengan komposisi penambahan polimer EVA : PET = 10 % : 1,4 % umur perendaman 14 Hari. Pada **Gambar 3**, menunjukkan fasa yang dominan pada XRD bahan baku semen fasa *calcite* (CaCO_3) hal ini disebabkan bahan baku pembuatan semen adalah 80% batu kapur sehingga untuk pembentukan fasa *Calsite* nantinya pada mortar (Wahab dkk., 2020), bahan baku pasir kwarsa didominasi fasa *quartz* (SiO_2) yang merupakan pembentukan senyawa gel C-S-H pada mortar dan dengan senyawa *quartz* (SiO_2) yang tinggi maka pasir silika dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan mortar semen karena mempunyai butir yang halus, permukaan yang kasar dan massa jenis yang sesuai standar sehingga akan dapat memberikan pengaruh pada ikatan yang baik dan tingkat kepadatan mortar rapat sehingga massa jenis akan tinggi sebab porositas yang dihasilkan juga kecil (Chowdhury dkk., 2018) (Almajeda dkk., 2020), pada polimer EVA fasa yang terbentuk adalah *calcite* (CaCO_3) dan *quartz* (SiO_2) sehingga dapat membungkus matriks dan polimer PET berbentuk amorf tidak padat sehingga memungkinkan polimer PET dapat meningkatkan sifat lentur pada mortar dan tahan terhadap abrasi tapi pemakaian air akan berlebih (Chowdhury dkk., 2018).

Pada **Gambar 3** menunjukkan fasa tertinggi pada mortar polimer waktu perendaman 7 dan 14 hari yaitu terdapat pada fasa *Calcite* atau *Calcium Carbonate* (CaCO_3). Fasa *calcite* merupakan fasa tertinggi yang mengindikasikan adanya pembentukan ikatan C-S-H atau *Calcium Silicate Hydrate* pada mortar karena terjadinya hidrasi pada semen (Zhan dkk., 2018).

Tabel 3. Hasil uji kulaitas agregat halus asal gunung sugih Lampung Tengah

No	Pengujian	Persentase	Standar	Standar	Keterangan
1	Gradasi pasir (MHB)	2,3	1,5 – 3,8	SNI 03-1968-1990	Agregat ukuran sedang
2	Berat jenis SSD	2,53 g/cm ³	1,6 – 3,3	SNI 03-1970-1990	Agregat sedang
3	Kadar lumpur	4,61%	≤ 5%	SNI 03-4141-1996	Memenuhi syarat
4	Kadar air	2,45%	0,5 – 5%	SNI 03-1970-1990	Sesuai kelembaban
5	Absorpsi Pasir	3,80%	0,2 – 2% (Maks)	SNI 03-1970-1990	Tidak memenuhi syarat



Gambar 2. Uji (a) absorpsi, (b) porositas, (c) massa jenis, dan (d) kuat lentur

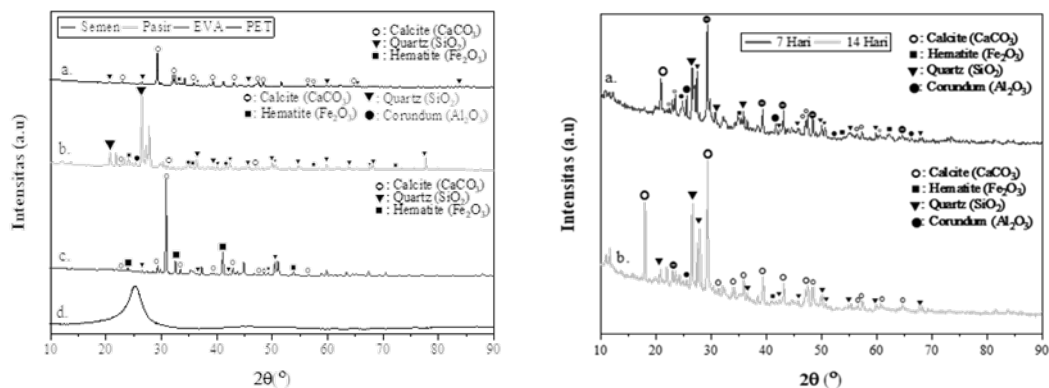
3.4 Analisis XRF

Karakterisasi XRF dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada bahan baku dan mortar polimer. Pada Tabel 2 di bawah ini menunjukkan kandungan senyawa tertinggi semen yaitu CaO sebesar 62,87% sesuai dengan persyaratan SNI 15-7064-2004, hal tersebut didukung oleh penelitian Zhan dkk (2018). Semen yang digunakan akan memberikan pengaruh pada massa jenis mortar yang cukup tinggi hal ini disebabkan semen akan bereaksi dengan pasir melalui penambahan air akan membentuk ikatan yang padat serta hasil uji kuat lentur yang tinggi dan akan terjadi struktur kristal C-S-H (Se-Jin dkk., 2022).

Karakterisasi pasir senyawa tertinggi SiO_2 sebesar 94,40% sesuai hasil penelitian Suharto dkk (2021), dengan hasil tersebut maka pasir yang mempunyai senyawa SiO_2 tinggi akan memberikan pengaruh pada absorpsi air mortar juga akan memberikan peningkatan kuat tekan dan kuat lentur (Vandhiyan dkk., 2021).

Kandungan senyawa dari polimer EVA dan polimer PET. Pada polimer EVA, kandungan senyawa tertingginya terdapat pada Ca yaitu sebesar 74,76%. Hal ini didukung oleh penelitian Ghally dkk (2022) dimana unsur yang mendominasi EVA adalah Ca. Sedangkan untuk bahan baku PET, dapat dilihat bahwa kandungan unsur tertinggi adalah Ca, yaitu sebesar 57,60%. Dengan demikian baik polimer EVA dan PET akan dapat memberikan kontribusi calcite pada mortar, namun PET tidak larut dalam air sehingga tidak dapat bereaksi dengan semen dan pasir.

Senyawa oksida yang mendominasi pada mortar polimer dengan waktu perendaman 7 dan 14 hari yaitu CaO dan SiO_2 . Tingginya jumlah kadar senyawa dari CaO pada mortar polimer dikarenakan pencampuran dari bahan baku seperti semen, EVA dan PET yang kaya akan kandungan Ca yang tinggi (Ghally dkk., 2022). Selain itu, SiO_2 merupakan senyawa tertinggi kedua setelah Ca hal ini tentunya memiliki pengaruh terhadap kekuatan pada mortar semakin tinggi SiO_2



Gambar 3. (a) XRD bahan baku: semen, pasir, EVA, dan PET (b) XRD mortar polimer pada umur 7 hari dan 14 hari

maka semakin baik kekuatan mortar tersebut (Suharto dkk., 2021). Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Yio dkk., 2022 dalam karakterisasi XRF mortar beton didominasi senyawa CaO dan SiO₂ disebabkan campuran diantara semen, pasir dan polimer yang banyak mengandung CaO yang akan beraksi dengan air akan membentuk Ca(OH)₂ sebagai pembentuk gel C-S-H (Gulzar dkk., 2014). CaO pada umur 7 hari lebih rendah sebesar 46,95% dari umur 14 hari yaitu sebesar 55,23%, hal ini disebabkan telah terjadi pembentukan reaksi senyawa C-S-H mulai sempurna atau mulai jenuh pada mortar sehingga senyawa CaO bertambah (Nedeljkovic dkk., 2023)

3.5 Analisis SEM-EDS

Karakterisasi SEM-EDS digunakan untuk mengetahui bentuk morfologi dan unsur pada permukaan mortar.. **Gambar 4** menunjukkan morfologi *raw material* dengan perbesaran 5.000x beserta distribusi unsur kimianya. **Pada Gambar 4(a)** kandungan semen PCC didominasi oleh unsur Ca dan Si. Pada pasir didominasi oleh Si dan Al. **Pada Gambar 4(b)** kandungan unsur pada polimer EVA dan PET didominasi oleh Ca. Hal ini sesuai dengan karakterisasi XRF bahan baku.

Pada **Gambar 4(c)**, merupakan bentuk morfologi dari mortar polimer dengan waktu perendaman selama 7 dan 14 hari dengan perbesaran 5.000x dan resolusi yang digunakan 20µm. Dapat dilihat terdapat pembentukan gel C-S-H atau *Calcium Silicate Hydrate* terjadi pada pencampuran semen dengan air dimana proses ini diketahui sebagai hidrasi. Dalam campuran mortar dengan polimer, menyebabkan terjadinya terhambatnya proses hidrasi pembentukan gel C-S-H sehingga C-S-H yang dihasilkan tidak sebanyak mortar tanpa penambahan polimer (Popova dkk., 2004), hal ini disebabkan polimer berdampak buruk pada hidrasi

semen dengan memperpanjang periode induksi. Penundaan hidrasi dikaitkan dengan kemungkinan beberapa mekanisme yang bekerja, seperti penyerapan polimer pada partikel semen yang tidak terhidrasi dan terhidrasi, keracunan C-H dan C-S-H, kompleksasi alkali, pengendapan senyawa yang tidak larut yang membatasi pergerakan air, pembentukan membran pelindung yang mengelilingi partikel semen sedangkan mortar tanpa penambahan polimer tidak akan mengalami penundaan hidrasi sehingga reaksi pembentukan gel C-S-H berjalan dengan baik sebab tidak adanya polimer (Bhavna., 2024).

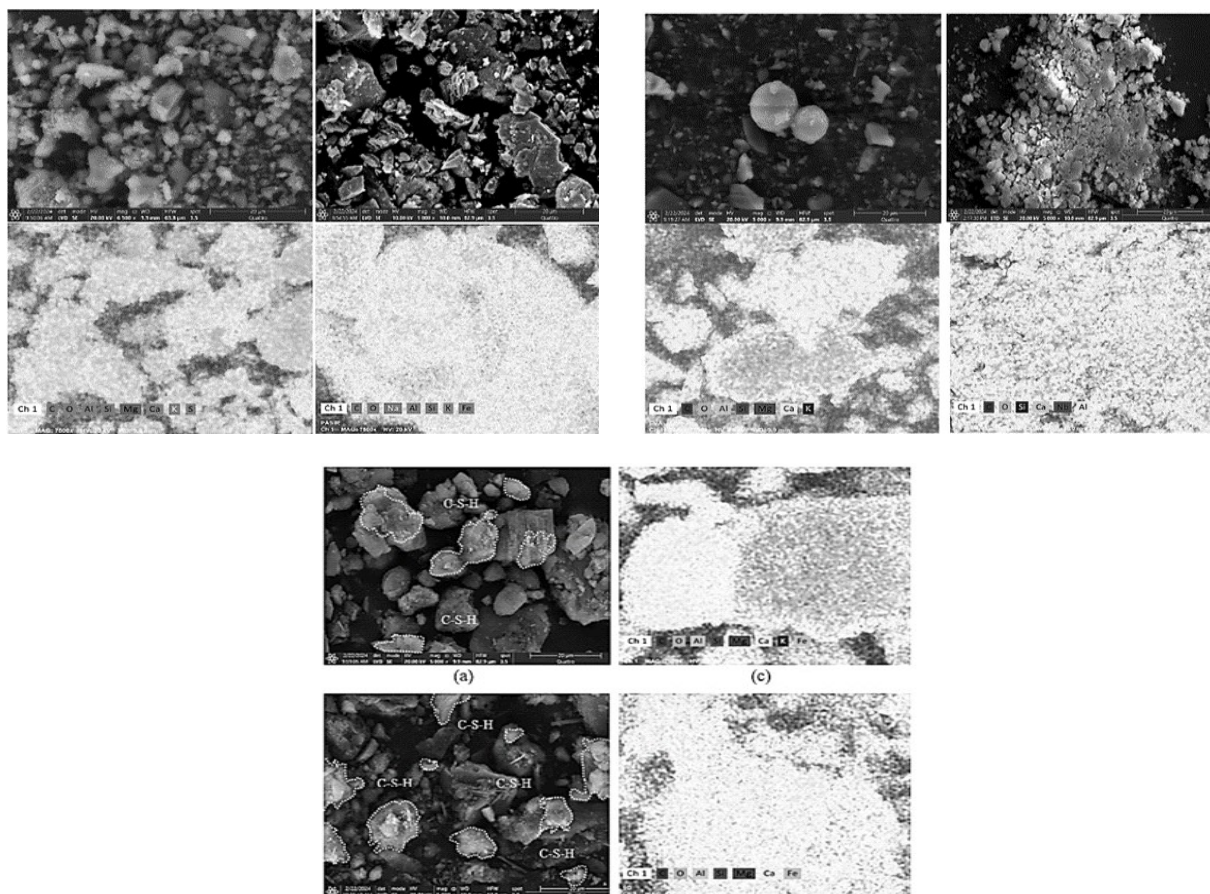
Gel C-S-H merupakan produk utama hidrat semen, menempati sekitar 70% volume dan menentukan kekuatan awal dan daya tahan jangka panjang hidrat (Liang dkk., 2021). Secara teoritis, nanopartikel C-S-H dapat menginisiasi hidrasi semen dalam waktu 24 jam, yang dengan mudah menghasilkan gel C-S-H berukuran besar selama tahap awal (Hu dkk., 2019). Hal ini bermanfaat untuk meningkatkan reaksi hidrasi awal pasta semen dan pembentukan produk hidrasi, untuk meningkatkan kekuatan awal pasta semen. Rasio antara air dan semen juga sangat berpengaruh terhadap reaksi pembentukan gel C-S-H bila air berlebihan akan mengakibatkan kuat ikat awal yang lambat pada pasta semen segar (Dai dkk., 2021). Semakin lama umur perendaman maka akan semakin banyak gel C-S-H yang terdapat pada mortar yang berpengaruh terhadap kekuatan mortar itu sendiri dan akan membentuk senyawa Dy Calsium Silicat (C₂S) dan Try Calsium Silikat (C₃S) (Redondo dkk., 2022)

3.6 Analisis FTIR

Karakterisasi FTIR digunakan untuk melihat gugus fungsi dari bahan baku dan mortar polimer. Pada FTIR bahan baku semen dan pasir dapat ditunjukkan pada **Gambar 5**.

Tabel 4. Hasil Analisa XRF Semen, Pasir, EVA, PET, Mortar 7 Hari dan 14 Hari

No	Oksida / Senyawa	Semen	Pasir	EVA	PET	Mortar	
						7 Hari	14 Hari
1	CaO/ Ca	63,87	0,18	74,76	57,60	46,95	55,23
2	SiO ₂ / Si	20,88	94,40	13,60	-	24,45	19,67
3	Fe ₂ O ₃ / Fe	5,84	0,35	1,63	11,60	10,87	11,32
4	Al ₂ O ₃ / Al	4,45	3,90	0,34	-	10,04	7,13
5	SO ₃	2,07	-	-	-	0,64	1,18
6	K ₂ O/ K	1,29	0,18	-	4,69	5,30	1,74
7	TiO ₂ / Ti	0,42	0,35	1,47	2,10	0,86	1,12
8	SrO	0,29	-	-	-	0,28	0,34
9	P ₂ O ₅	-	0,28	-	-	-	-
10	ZrO ₂	-	0,10	-	-	-	-
11	MgO/Mg	-	-	13,60	-	-	1,64
12	Sb	-	-	-	14,58	-	-
13	Er	-	-	-	8,28	-	-
14	MnO/Mn	-	-	-	0,43	0,18	0,18
15	Sc	-	-	-	0,43	-	-
16	Al	-	-	-	-	-	-
17	Ti	-	-	-	0,29	-	-



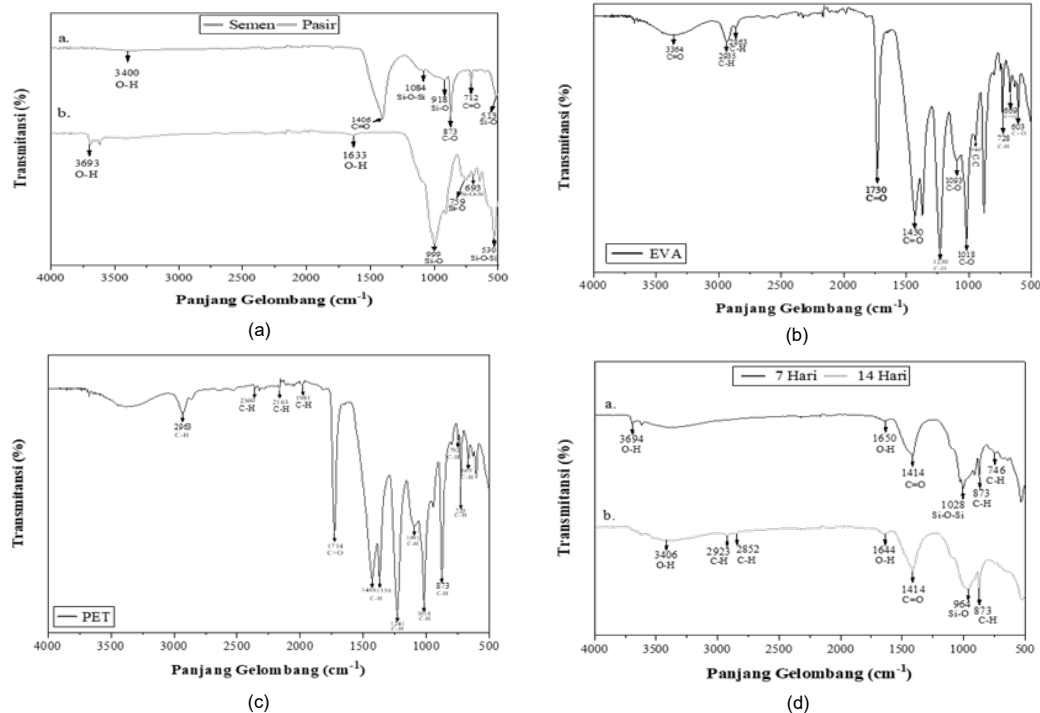
Gambar 4. Hasil SEM-EDS dari bahan baku (a) Semen portland, pasir (b) Polimer EVA, PET (c) Mortar umur perendaman 7 dan 14 hari

Pada **Gambar 5(a)** yaitu bahan baku semen, dapat dianalisa gugus fungsinya yang terbentuk di dalamnya. Gugus fungsi yang pertama yaitu O-H yang terletak pada pita serapan 3400 cm^{-1} , yang mengindikasikan adanya kandungan air di dalam sampel bahan baku semen (Tararushkin, 2020). Gugus fungsi yang kedua yaitu CO_3^{2-} yang terdapat pada rentang pita serapan 1406 cm^{-1} dan 712 cm^{-1} , disebabkan oleh peregangannya $\text{C}=\text{O}$ dalam CO_3^{2-} (Silva dkk., 2002). Gugus fungsi Si-O-Si yang terdapat pada rentang pita serapan 1084 cm^{-1} (Kazielova dkk., 2021), pada gugus fungsi Si-O yang terdapat pada rentang pita serapan 918 cm^{-1} , 873 cm^{-1} , dan 513 cm^{-1} (Silva dkk., 2002; Hughes dkk., 1995), karakterisasi FTIR bahan baku pasir dapat dianalisa gugus fungsinya yang terbentuk di dalamnya. Gugus fungsi yang pertama yaitu O - H pada rentang pita serapan 3693 cm^{-1} dan 1633 cm^{-1} , mengindikasikan adanya kandungan air pada sampel (Kuzielova dkk., 2021). Gugus fungsi Si-O-Si pada rentang pita serapan 693 cm^{-1} (Meftah dan Mahboub, 2020).

Berdasarkan **Gambar 5(b)**, menunjukkan grafik bahan baku polimer EVA, pada gugus fungsi yang pertama yaitu C = O pada rentang serapan 3364 cm^{-1} dan 603 cm^{-1} (Mansur dkk., 2008). Lalu, gugus fungsi selanjutnya yaitu C - H pada rentang pita serapan 2935 cm^{-1} dan 2863 cm^{-1} (Mansur dkk., 2008). Pada gugus fungsi C - O terdapat pada area rentang pita serapan 1230 cm^{-1} , 1018 cm^{-1} , 1093 cm^{-1} (Mansur dkk., 2008; Silva dkk., 2002). Pada gugus fungsi C - C terdapat pada area rentang pita

serapan 946 cm^{-1} (Mansur dkk., 2008). Pada **Gambar 5(c)**, menunjukkan grafik yang berisikan bilangan gelombang pada bahan baku polimer PET, yang dapat dianalisis gugus fungsinya yang terbentuk di dalamnya. Pada gugus fungsi C - H rentang pita serapan terdapat pada bilangan gelombang 2963 cm^{-1} , 1339 cm^{-1} , 1241 cm^{-1} , 1091 cm^{-1} , 1018 cm^{-1} , 873 cm^{-1} , 792 cm^{-1} , 729 cm^{-1} (Ge dkk., 2013; Prasad dkk., 2011). Pada gugus fungsi C = O terdapat pada rentang pita serapan 1714 cm^{-1} (Ge dkk., 2013).

Pada **Gambar 5(d)** mortar polimer dengan waktu perendaman 7 hari dan 14 hari. Terdapat gugus fungsi O - H dengan rentang pita serapan 3694 cm^{-1} , 1650 cm^{-1} yang mengindikasikan terdapat kandungan molekul air di dalam sampel (Varas dkk., 2005; Benosman dkk., 2012). Pada bilangan gelombang 1414 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus fungsi C = O (Meftah dan Mahboub, 2020). Pada gugus fungsi Si-O-Si terdapat pada pita serapan 1028 cm^{-1} (Kazielova dkk., 2021). Pada gugus fungsi C - H terdapat pada pita serapan 873 cm^{-1} dan 746 cm^{-1} (Ge dkk., 2013) (Fan dkk., 2023), waktu perendaman 14 hari. Terdapat gugus fungsi O - H dengan rentang pita serapan 3407 cm^{-1} , 1644 cm^{-1} yang mengindikasikan terdapat kandungan molekul air di dalam sampel (Varas dkk., 2005; Benosman dkk., 2012). Pada gugus fungsi C - H dengan rentang pita serapan 2923 cm^{-1} dan 2852 cm^{-1} (Meftah dan Mahboub, 2020). Pada bilangan gelombang 1414 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus



Gambar 5. Hasil Analisa FTIR (a) semen, pasir, (b) Polimer EVA, (c) polimer PET, (d) mortar umur perendaman 7 dan 14 hari

fungsi $C = O$ (Meftah dan Mahboub, 2020). Pada gugus fungsi $Si-O$ terdapat pada pita serapan 964 cm^{-1} yang menandakan adanya gugus Si sebagai indikasi akan terbentuknya gel $C-S-H$ (Sikandar dkk., 2024) (Tatarushkin, 2020). Pada gugus fungsi $C-H$ terdapat pada pita serapan 873 cm^{-1} dan 746 cm^{-1} (Ge dkk., 2013).

4. Kesimpulan

Dari beberapa pengujian yang dilakukan diperoleh kesimpulan yaitu:

1. Dengan dimanfaatkannya limbah polimer PET dari botol dan EVA dalam jumlah yang cukup sebagai substitusi pasir dan semen maka akan menghasilkan mortar yang mempunyai kuat lentur tinggi dan massa jenis yang rendah juga sehingga mortar dengan penambahan polimer akan memberikan sifat fleksibel dan ringan sehingga apabila terjadi gempa bumi maka konstruksi bangunan akan tidak langsung patah tapi masih ada gaya lentur jadi tidak langsung menimpa manusia yang ada didalam bangunan tersebut, selain itu dapat menanggulangi limbah botol plastik. Mortar ini cocok untuk konstruksi bangunan bertingkat.
2. Waktu perendaman dqlam air akan memberikan pengaruh terhadap ikatan gel $C-S-H$ yang terbentuk, semakin lama waktu perendaman maka akan semakin sempurna reaksi yang terjadi dan akan memberikan dampak pada peningkatan kuat lentur yang semakin baik.
3. Kualitas pasir kwarsa baik secara fisik atau kandungan SiO_2 yang tinggi akan mempengaruhi kualitas mortar yang dihasilkan sebab rekasi antara

CaO dan SiO_2 yang merupakan senyawa pembentuk $C-S-H$, C_2S , dan C_3S .

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dilaksanakan dengan dukungan dari Departemen Fisika FMIPA Universitas Indonesia yang telah mendukung dan memberi bimbingan terhadap kesempurnaan penelitian dan kepada Kepala Pusat Riset Teknologi Pertambangan Organisasin Nanoteknologi dan Material (ORNM) Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah mengizinkan dan memberikan dukungan dan fasilitas penelitian Laboratorium Karakterisasi Mineral Pusat Riset Teknologi Pertambangan Organisasin Nanoteknologi dan Material (ORNM) BRIN. Seluruh Peneliti juga mengucapkan terima kasih kepada Operator Alat Karakterisasi Laboratorium Karakterisasi Mineral yang telah mendukung keberhasilan penelitian ini.

Pernyataan Kontribusi Penulis

MA menyusun dan melakukan percobaan, menyiapkan draf penelitian, gambar, dan tabel. ALJ Mengawasi penelitian, mengkoreksi draf penelitian dan menyusun draf penelitian. S mengawasi penelitian dan menyusun penelitian. BS mengawasi penelitian. S dan SP mengkoreksi dan membantu persiapan sampel untuk karakterisasi penelitian

Daftar Pustaka

ASTM C348 - 19. *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic - Cement Mortars*;

- ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2019
- ASTM C 270-10. *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*
- Abdullah Almajeda,, Kehinde Lemboyea, Mohamed G. Arabb,, Ahmed Alnuaim, 2020. *Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique*. Science Direct Soils and Foundations 60 (2020) 356–371. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.02.011>
- Ali Sikandar. M.A, Zeeshan Khan, Muhammad Haris Javed Muhammad Tariq Bashir, Easa Khan Md. Munir Hayet Khan, Azhar Qazi. 2024. *Comparative study of light-emitting cement and polymer mortars for sustainable building applications: performance evaluation and analysis*. Innovative Infrastructure Solutions (2024) 9:168 <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01491-9>.
- Bartoli, J. A. dan Bartoli, J. J. 1965. *Mortar Compositions*. US Patent. Vol. 2, No. 82, Hal. 93-106.
- Benosman, A. S., Mouli, M., Taibi, H., Belbachir, M., Senhadji, Y., Behloul, I., dan Houivet, D. 2012. *Mineralogical study of polymer-mortar composites with PET polymer by means of spectroscopic analyses*. Vol. 1, No. 3, Hal.139-150. DOI:10.4236/msa.2012.33022
- Bhavna Tripathi. 2024. *Effects of Polymerson Cement Hydration and Propertiesof Concrete: AReview*. ACS Omega2024,9,2014–2021. <https://doi.org/10.1021/acsomega>.
- Chowdhury. A. T.U, Mahmud Amin Mahi, Kazi Azizul Haque, Md. Mostafizur Rahman, 2018. *A Review On The Use Of Polyethylene Terephthalate (Pet) As Aggregates In Concrete*. Malaysia Journal Of Science 37 (2): 118 - 136 (2018). <https://doi.org/10.22452/Mjs.Vol37no2.4>
- Dai J, Qicai Wang, Xuyu Lou, Xueying Bao, Bo Zhang, Jianqiang Wang, Xin Zhang. 2021. *Solution calorimetry to assess effects of water-cement ratio and low temperature on hydration heat of cement*. Construction and Building Materials Volume 269,1 February 2021, 121222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121222>
- Foti, D. dan Lerna, M. 2020. *New mortar mixes with chemically depolymerized waste PET aggregates*. Advances in Materials Science and Engineering. Vol 16, No. 8, Hal.1-9. doi.org/10.1155/2020/8424936
- Fan. Lidan, Feng Xu, Shuren Wang, Yongqiang Yu, Jiyun Zhang, Jiaqi Guo. 2023. *A review on the modification mechanism of polymer on cement-based materials*. 8 journal of materials research and technology 2023;26:5816e5837. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.291>
- Ghally, E. I., Khalil, H. F., dan Bakr, M. F. 2022. *Evaluation the chemical and mechanical properties of EVA modified concrete*. Egyptian Journal of Chemistry. Vol. 65, No. 4, Hal. 403-410. DOI: 10.21608/EJCHEM.2022.117998.5320
- Garcia. M.L, M. Rosário Oliveira, Teresa Neto Silva, Ana C. Meira Castro. 2021. *Performance of mortars with PET*. Journal of Material Cycles and Waste Management <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01160-w>
- Gulzar. S, Muhammad Nawaz Chaudhry, Jean-Pierre Burg, Sohail Anwer Saeed, 2014. *Chemical Weathering of Lime Mortars from the Jahangir Tomb, Lahore-Pakistan*. International Journal of Scientific Research in Chemical Engineering, 1 (7), pp. 106-114, 2014.<http://dx.doi.org/10.12983/ijsrcce-2014-p0106-0114>
- Hughes, T. L., Methven, C. M., Jones, T. G., Pelham, S. E., Fletcher, P., dan Hall, C. 1995. *Determining cement composition by Fourier transform infrared spectroscopy*. Advanced Cement Based Materials. Vol. 2, No. 3, Hal. 91-104. [doi.org/10.1016/1065-7355\(94\)00031-X](https://doi.org/10.1016/1065-7355(94)00031-X)
- Hamdi. F, Franky Edwin Lapian, Miswar Tumpu, Mansyur, Irianto, Didik Suryamiharja S Mabui, Adri Raidyarto, Ardi Azis Sila, Masdiana, Parea Rusan Rangan, Hamkah. *Teknologi Beton*. CV. Tohar Media Cetakan Pertama Maret 2022. ISBN : 978-623-5603-29-2
- Hu C, Yunxing Ruan, Shun Yao, Fazhou Wang, Yongjia He, Yueyi Gao. 2019. *Insight into the evolution of the elastic properties of calcium-silicate-hydrate (C-S-H) gel*. Cement and Concrete Composites Volume 104, November 2019, 103342. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103342>
- Kim, M. O. 2020. *Influence of polymer types on the mechanical properties of polymer-modified cement mortars*. Applied Sciences. Vol. 10, No. 3, Hal. 1061. doi.org/10.3390/app10031061
- Kuzielová, E., Slaný, M., Žemlička, M., Másilko, J., dan Palou, M. T. 2021. *Phase composition of silica fume—portland cement systems formed under hydrothermal curing evaluated by FTIR, XRD, and TGA*. Materials. Vol. 14, No. 11, Hal. 2786. doi.org/10.3390/ma14112786
- Liang G, Dayou Ni, Haoxin Li, Biqin Dong, Zhenghong Yang. 2021. *Synergistic effect of EVA, TEA and C-S-Hs-PCE on the hydration process and mechanical properties of Portland cement paste at early age*. Construction and Building Materials Volume 272,22 February 2021,

12189. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121891>
- Xin Liu, Pan Feng , in Chen, Qi Liu, Xiaohan Yu, Yux i Cai, Hong Zhu, Longbang Qing Jinxiang Hong. 2024. *A critical review on the interaction between calcium silicate hydrate (C-S-H) and different ions*. Construction and Building Materials Volume 413, 26 January 2024, 134931. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134931>
- McDonald, L. J., Carballo-Meilan, M. A., Chacartegui, R., dan Afzal, W. 2022. *The physicochemical properties of Portland cement blended with calcium carbonate with different morphologies as a supplementary cementitious material*. Journal of Cleaner Production. Vol. 3, No.338, Hal.130. doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130309
- Meftah, N., dan Mahboub, M. S. 2020. *Spectroscopic characterizations of sand dunes minerals of El-Oued (Northeast Algerian Sahara) by FTIR, XRF and XRD analyses*. Silicon. Vol. 12, No. 1, Hal. 147-153. doi.org/10.1007/s12633-019-00109-5
- M. H. N. Yio Y. W. Ho F. Abdul Wahid H. S. Wong N. R. Buenfeld, 2022. *Analysis of cement paste and aggregate content of concrete using micro X-ray fluorescence*. Magazine of Concrete Research Volume 74 Issue 17, September, 2022, pp. 889-904. <https://doi.org/10.1680/jmacr.21.00094>
- Nóvoa, P. J. R. O., Ribeiro, M. C. S., Ferreira, A. J. M., dan Marques, A. T. 2004. *Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates*. Composites science and technology. Vol. 64, No. 13-14, Hal. 2197-2205. doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.03.006
- Marija Nedeljkovic, Nikola Tos'ic, Patrick Holthuisen, Fernando Franc de Mendonc Filho, . Oguzhan Copuroglu Erik Schlangen, Sonja Fennis. 2023. *Non-destructive screening methodology based on handheld XRF for the classification of concrete: cement type-driven separation*. Materials and Structures (2023) 56:54 <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02147-3>
- Ohama, Y. 1995. *Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars: Properties and Process Technology*. New Jersey: Noyes Publications.
- Popova, A., Geoffroy, G., Renou-Gonnord, M. F., Faucon, P., dan Gartner, E. 2004. *Interactions between polymeric dispersants and calcium silicate hydrates*. Journal of the American Ceramic Society. Vol. 83, No. 10, Hal. 2556-2560. doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01590.x
- Prabha D. V. M., dan George, S. *Shear Behaviour of Reinforced Concrete Using PET Bottle Fibre*. International Journal of New Technology and Research. Vol 3, No. 5, Hal. 263288.
- Prasad, S. G., De, A., dan De, U. 2011. *Structural and optical investigations of radiation damage in transparent PET polymer films*. International Journal of Spectroscopy. Vol. 2011, No. 1, Hal. 1-7. doi:10.1155/2011/810936
- Qing Liu, Renjun Liu, Qiao Wang, Rui Liang, Zongjin Li, Guoxing Sun. 2021. *Cement mortar with enhanced flexural strength and durability-related properties using in situ polymerized interpenetration network*. Front. Struct. Civ. Eng. 2021, 15(1): 99–108 <https://doi.org/10.1007/s11709-021-0721-0>
- Ramli, M., Tabassi, A. A., dan Hoe, K. W. 2013. *Porosity, pore structure and water absorption of polymer-modified mortars: An experimental study under different curing conditions*. Composites Part B: Engineering. Vol. 55, No. 13, Hal. 221-233. doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.022
- Redondo.E.D, Patrick A. Bonnaud Tyne, Hegoi Manzano. 2022. *A comprehensive review of C-S-H empirical and computational models, their applications, and practical aspects*. Cement and Concrete Research 156 (2022) 106784. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106784>
- R. Vandhiyan, T.J. Vijay, Manoj Kumar M. 2021. *Effect of Fine Aggregate Properties on Cement Mortar Strength*. Materials Today: Proceedings 37 (2021) 2019–2026. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.498>
- Silva, D. A. D., Roman, H. R., dan Gleize, P. J. P. 2002. *Evidences of chemical interaction between EVA and hydrating Portland cement*. Cement and concrete research. Vol 32, No. 9, Hal. 1383-1390. doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00805-0
- Seyed Ali Emamian, Hamid Eskandari-Naddaf.2019. *Effect of porosity on predicting compressive and flexural strength of cement mortar containing micro and nano-silica by ANN and GEP*. Construction and Building Materials Volume 218, 10 September 2019, Pages 8-27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.092>
- Se-Jin Choi, Sung-Ho Bae, Dong-Min Ji and Sung-Hoon Kim. 2022. *Effects of Capsule Type on the Characteristics of Cement Mortars Containing Powder Compacted Capsules*. Materials 2022, 15, 6773. <https://doi.org/10.3390/ma15196773>
- SNI 15 7064. 2004. *Semen Portland Komposssit*. Jakarta: Badan Standar Nasional.

- Suharto, S., Amin, M., Al Muttaqii, M., Marjunus, R., Fitri, N., dan Suhartono, S. 2021. *Analysis of fine glass waste addition as a filler material for sand substitution on the properties of mortar products*. Teknik. Vol. 21, No. 1, Hal. 309-315. doi.org/10.14710/teknik.v42i3.32686
- Todaro, F, Andrea Petrella, Giusy Santomasi , Sabino De Gisi and Michele Notarnicola, 2023. *Environmental Sustainable Cement Mortars Based on Polyethylene Terephthalate from Recycling Operations*. Materials 2023, 16, 2111. https://doi.org/10.3390/ma16052111.
- Tjokrodinuljo,k., (1996)., “*Teknologi Beton*”. Nafigiri. Yogyakarta.
- Smith. A. S. 2018. *Mortar Pore Structure and Its Role In Durability*. 10th IMC 10th International Masonry Conference G. Milani, A. Taliercio and S. Garrity (eds.) Milan, Italy, July 9-11, 2018.
- Tararushkin, E. V., Shchelokova, T. N., dan Kudryavtseva, V. D. 2020. *A study of strength fluctuations of Portland cement by FTIR spectroscopy*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 919, No. 2, Hal. 022017. doi.org/10.1088/1757-899X/919/2/022017
- Varas, M. J., De Buergo, M. A., dan Fort, R. 2005. *Natural cement as the precursor of Portland cement: Methodology for its identification*. Cement and Concrete Research. Vol. 35, No. 11, Hal. 2055-2065. doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.045
- Won, J. P., Jang, C. I., Lee, S. W., Lee, S. J. dan Kim, H. Y. 2010. *Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites*. Construction and Building Materials. Vol. 24, No. 5, Hal. 660-665. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.003
- Wahab.S.A.A, Hilal Al-Dhamri, Ganesh Ram & Vishnu P. Chatterjee. , 2020. *An overview of alternative raw materials used in cement and clinker manufacturing*. Taylor & Francis. INTERNATIONAL JOURNAL OF SUSTAINABLE ENGINEERING 2021, VOL. 14, NO. 4, 743–760 https://doi.org/10.1080/19397038.2020.1822949
- Xijun Zhang, Mingrui Du, Hongyuan Fang, Mingshen Shi, Chao Zhang, Fuming Wang. 2021. *Polymer-modified cement mortars: Their enhanced properties, applications, prospects, and challenges*. Construction and Building Materials Volume 299, 13 September 2021, 124290. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat. 2021.124290
- Xudong Chen, Shengxing Wu, Jikai Zhou. 2013. *Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar*. Construction and Building Materials Volume 40, March 2013, Pages 869-874. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072
- Yeon, K. S., Kim, K. K., Yeon, J., dan Lee, H. J. 2019. *Compressive and flexural strengths of EVA-modified mortars for 3D additive construction*. Materials. Vol. 12, No. 16, Hal. 2600. doi.org/10.3390/ma12162600
- Zhan, B. J., Xuan, D. X., Poon, C. S., Shi, C. J., dan Kou, S. C. 2018. *Characterization of C–S–H formed in coupled CO₂–water cured Portland cement pastes*. Materials and Structures. Vol. 51, No. 92, Hal. 1-1.

