



# Analisis Gugus Fungsi Pada Senyawa Mikrostruktur Mortar Geopolimer Abu Sawit Dengan Penambahan *Portland Composite Cement (PCC)*

**Harriad Akbar Syarif**

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pasir Pengaraian, Jl. Tuanku Tambusai Kumu Rambah Hilir, Rokan Hulu, Provinsi Riau.

Program Doktor Teknis Sipil, Universitas Islam Sultan Agung, Jl. Kaligawe Raya, Terboyo Kulon, Kota Semarang, Provinsi Jawa Tengah.

Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Riau, Kampus Bina Widya, Simpang Baru, Tampan, Kota Pekanbaru, Provinsi Riau.

## INFO ARTIKEL

Histori artikel:  
Tersedia Online: 24 Juni 2023

## ABSTRAK

Penggunaan abu sawit (POFA) sebagai material konstruksi meningkat setiap tahunnya, mengarah ke pembangunan yang berbasis lingkungan [1]. Teknologi Geopolimer menjadi alternatif pemanfaatan abu sawit menjadikan mortar sebagai bahan baku tersebut. Sisa abu sawit memiliki potensi untuk mengganti semen *portland* misalnya pada pembuatan mortar dan beton geopolimer. Disamping itu, kondisi lingkungan di Provinsi Riau yang banyak memiliki industri kelapa sawit yang menjadi sumber potensial untuk teknologi geopolimer [2]. Dengan melihat fenomena itu dan dihubungkan dengan penelitian peneliti sebelumnya, maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisis senyawa yang terkandung dalam material mortar geopolimer abu sawit dengan penambahan PCC. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Pasir Pengaraian, dengan bahan campuran terdiri dari POFA, NaOH 16M, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> Be 52, air, 30% PCC dari berat POFA dan Pasir. Pengujian sampel berasal dari serpihan mortar untuk melihat ikatan gugus fungsi senyawa menggunakan *Fourier Transform Infra Red*. Hasil pengujian terdapat ikatan (O-C-O) merupakan bentuk senyawa natrium karbonat yang bereaksi antara unsur Na serta pada grafik terjadi peningkatan secara bertahap apabila rasio SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> semakin besar dengan menghasilkan struktur *zeolite*. Dari hasil tersebut, reaksi geopolimer yang terjadi terdapat gugus fungsi senyawa yang sama seperti hidrasi pada pasta semen, sehingga menjadikan geopolimer abu sawit dapat menjadi bahan potensial pengganti semen.

**Kata kunci:** Mortar; Geopolimer ; Abu Sawit ; Mikrostruktur, Gugus Fungsi

## E – MAIL

[harriadakbarsyarif@upp.ac.id](mailto:harriadakbarsyarif@upp.ac.id)

## ABSTRACT

The use of palm oil fuel ash (POFA) as a construction material is increasing every year, leading to environmentally based development [1]. Geopolymer technology is an alternative to using palm oil fuel ash to make mortar as the raw material. Palm oil fuel ash residue has the potential to replace portland cement, for example in the manufacture of mortar and geopolymer concrete. Besides that, environmental conditions in Riau Province which have many palm oil fuel industries are a potential source for geopolymer technology [2]. By looking at this phenomenon and related to the research of previous researchers, this study aims to analyze the compounds contained in the palm ash geopolymer mortar material with the addition of PCC. This research was conducted at the Civil Engineering Laboratory of Pasir Pengaraian University, with mixed ingredients consisting of POFA, NaOH 16M, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> Be 52, water, 30% PCC by weight of POFA and sand. Testing samples from mortar chips to see the bonding of functional groups in compounds using the *Fourier Transform Infra Red*. The test results show that the bond (O-C-O) is a form of sodium carbonate compound that reacts between Na elements and on the graph there is a gradual increase if the

*ratio of  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  is greater to produce a zeolite structure. From these results, the geopolymer reaction that occurs contains the same compound functional groups as hydration in cement paste, so that palm oil fuel ash geopolymer can be a potential cement substitute material.*

**Keywords:** Mortar; Geopolymer; Palm Oil Fuel Ash; Microstructure; Chemical Bonding

## I. PENDAHULUAN

Berdasarkan SNI-03-6825-2002, mortar adalah campuran antara agregat halus, air dan semen *portland* dengan komposisi tertentu. Mortar adalah campuran yang terdiri dari pasir, bahan perekat serta air, dan diaduk sampai homogen. sifat-sifat mortar yang baik adalah murah, tahan lama (awet), mudah dikerjakan (diaduk, diangkut, dipasang, dan diratakan), merekat dengan baik dengan bata merah, bata beton pejal, batu dan sebagainya, cepat mengering atau mengeras, tahan terhadap rembesan air, dan tidak timbul retak-retak setelah mengeras.

Spesifikasi sifat mortar harus memenuhi ketentuan persyaratan bahan dan pengujian terhadap mortar yang telah disiapkan di laboratorium, dimana bahan tersebut terdiri dari suatu campuran bahan pengikat bersifat semen, agregat dan air yang telah memenuhi persyaratan mortar sesuai metode pengujian yang telah ditetapkan.

Penggunaan bahan pengganti semen dengan komposisi campuran yang inovatif akan mengurangi jumlah semen yang digunakan sehingga secara ekologis dapat mengurangi emisi gas-gas rumah kaca dan penggunaan konsumsi energi fosil bumi pada industry semen. Sebagai contoh berkembangnya material maju geopolimer, yang menjadikan abu sawit dapat dijadikan alternatif pengganti semen [3]. Abu sawit yang mengandung unsur Si dan Al merupakan unsur penting untuk mengaktifkan reaksi geopolimer yang akan membentuk ikatan kimia seperti layaknya semen. Dengan berkembangnya material maju geopolimer abu sawit, perlu diteliti senyawa mikrostruktur yang terkandung didalam mortar. Dengan mengetahui senyawa mikrostruktur, maka diharapkan dapat memperluas penelitian untuk

penerapan mortar geopolimer abu sawit dikegiatan konstruksi.

## II. MATERIAL DAN METODE

### 2.1 Material Penyusun Mortar Geopolimer

#### 2.1.1 Abu Sawit

*Palm Oil Fuel Ash* (POFA) adalah hasil pembakaran tandan buah kelapa sawit. POFA ini merupakan produk yang berpotensi besar untuk dimanfaatkan sebagai konstruksi bahan bangunan. Kandungan silika yang tinggi menjadikan sawit sebagai sumber potensi bahan untuk menghasilkan geopolimer [4].

Tabel 1. Kandungan Abu Sawit

No.	Parameter	Hasil (%)	Metode Analisis
1.	$\text{SiO}_2$	46,41	SNI 2049-2015, butir 7.1.3.2
2.	$\text{Al}_2\text{O}_3$	6,58	SNI 2049-2015, butir 7.1.3.8
3.	$\text{FeO}_3$	1,05	SNI 2049-2015, butir 7.1.3.4
4.	CaO	6,3	SNI 2049-2015, butir 7.1.3.9
5.	$\text{K}_2\text{O}$	2,72	SNI 2049-2015, butir 7.1.3.13
6.	$\text{P}_2\text{O}_5$	0,34	SNI 2049-2015, butir 7.1.3.5
7.	Kadar air	28,1	SNI 02-2804-2005, butir 6.4

#### 2.1.2 Larutan Aktivator

Larutan alkali yang digunakan adalah kombinasi dari natrium hidroksida (NaOH) dengan sodium silikat  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  [5]. Dari beberapa penelitian geopolimer sebelumnya, diketahui bahwa penggunaan campuran NaOH 16M dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  Be 52 sebagai larutan alkali aktivator menghasilkan kekuatan yang terbaik.

Tabel 2. Spesifikasi Sodium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

No	Parameter	Unit	Analisis	Metode
1.	Baume	Degree	52	Hydrometer
2.	Mol Ratio	-	2,2-2,3	Calculated
3.	$\text{SiO}_2$	%ww	31,45-31,93	Titrimetric
4.	$\text{Na}_2\text{O}$	%ww	14,34-14,78	Titrimetric
5.	Total solid	%ww	46,20-46,34	Calculated
6.	Density	gr/mL	1,55-1,57	Pycnometer

#### 2.1.3 Agregat Halus

Agregat halus adalah agregat yang semua butirannya menembus ayakan berlubang 4,75 mm sesuai dengan SNI.

Tabel 3. Karakteristik Agregat Halus

No	Jenis pengujian	Hasil	Standar acuan
1	Kadar Lumpur (%)	0,97%	ASTM C 142-97
2	Berat Jenis (gr/cm <sup>3</sup> )		
	a. <i>Apparent specific gravity</i>	2,7	SNI 03-1970-1990
	b. <i>Bulk specific gravity on dry</i>	2,7	SNI 03-1970-1990
	c. <i>Bulk specipy gravity on SSD</i>	2,64	SNI 03-1970-1990
	d. <i>Absorption (%)</i>	2,66	SNI 03-1970-1990
3	Kadar air (%)	4,56	SNI 03-1971-1990
4	Berat Volume (gr/cm <sup>3</sup> )		
	Kondisi gembur	1,71	SNI 03-4804-1998
5	Kadar Organik	No. 2	SNI 03-2816-1992

#### 2.1.4 Air

Air dalam campuran mortar geopolimer abu sawit lebih sedikit penggunaannya dibandingkan dengan mortar semen dikarenakan pada NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> sudah mengandung air. Pemakaian jumlah air berdampak pada rendahnya tingkat *workability* yang berakibat sulitnya proses pengadukan dan pencetakan [6].

Tabel 4. Kandungan Air yang digunakan

No	Parameter	Satuan	Hasil	Metode
1.	pH	-	7,9	SNI 6989.11-2019
2.	Mangan (Mn)	mg/L	0,01	SNI 06-6989.5-2009
3.	Besi (Fe)	mg/L	0,03	SNI 06-6989.4-2009
4.	Seng (Zn)	mg/L	0,002	SNI 06-6989.7-2009
5.	Kekeruhan	NTU	0,27	SNI 06-6989.25-2005

#### 2.2 Pengujian Gugus Fungsi Senyawa Geopolimer

Dengan bahan campuran mortar geopolimer tersebut dilakukan pengujian gugus fungsi berupa ikatan kimia yang terjadi. Ikatan kimia ini untuk melihat proses polimerisasi antara abu sawit, semen dan bahan alkali aktivator.

Spektroskopi inframerah adalah metode uji yang tidak merusak yang dapat memberikan informasi tentang komposisi molekul, struktur dan interaksi di dalam suatu benda uji yang juga menyelidiki tentang sifat getaran molekul, yaitu osilasi berupa gerakan atom disekitar posisi kesetimbangan [7]. Sampel akan menyerap cahaya yang diradiasi oleh cahaya polikromatik dan foton, ketika energi dari cahaya yang diserap sesuai dengan energi yang dibutuhkan oleh suatu ikatan tertentu untuk bergetar di dalam suatu molekul.

Agar getaran yang dihasilkan oleh inframerah aktif maka molekul momen dipol harus berubah selama proses penggetaran. Penyerapan Radiasi IR oleh molekul atau mineral sangat bergantung pada massa atom, dan lama durasi penyerapan, kekuatan dan gaya yang konstan antar ikatan interatomik [8]. Jadi berbagai jenis ikatan akan menyerap radiasi inframerah dengan kekuatan energi atau frekuensi yang berbeda-beda. Getaran dapat menyebabkan baik perubahan pada panjang ikatan (*stretching*) atau pemendekkan ikatan (*bending*) [9].

##### 2.2.1 Pengujian FTIR (*Fourier Transform Infra Red*)

###### a. Tujuan Pengujian

Tujuan dilakukannya pengujian ini yakni untuk mengetahui perubahan gugus fungsi yang terdapat pada komposisi mortar geopolimer.

###### b. Peralatan

- 1) Spektrofotometer FTIR
- 2) Cawan Mortar & *Pestle*

###### c. Benda Uji

Pecahan mortar geopolimer umur 28 hari yang telah diuji kuat tekannya.

###### d. Prosedur Pengujian

- 1) Mengambil pecahan mortar geopolimer yang telah diuji kuat tekannya, lalu menghancurkan menggunakan cawan mortar & *pestle*.
- 2) Uji karakteristik gugus fungsi pada mortar menggunakan mesin spektrofotometer FTIR yang dilaksanakan di Laboratorium Material, Jurusan Kimia, Fakultas MIPA Universitas Riau.
- 3) Menyalakan alat penguji FTIR dan komputer penghubung *software* yang digunakan untuk menganalisis dengan menggunakan *Biorad FTS 165* spektrometer FTIR ditransmisansi pada modus 400-4000 cm<sup>-1</sup> menggunakan standar KBr teknik (0,5 mg sampel dengan 250 mg KBr), kemudian meletakkan sampel yang sudah jadi pada sample *holder* dan menempatkannya pada lintasan sinar alat FTIR. Selanjutnya melakukan pengukuran dengan alat FTIR sehingga dihasilkan spektrum FTIR dari sampel.



(a) (b)

Gambar 1. Spektrofotometri (a) tampak keseluruhan alat, (b) tampak dalam alat pengujian

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

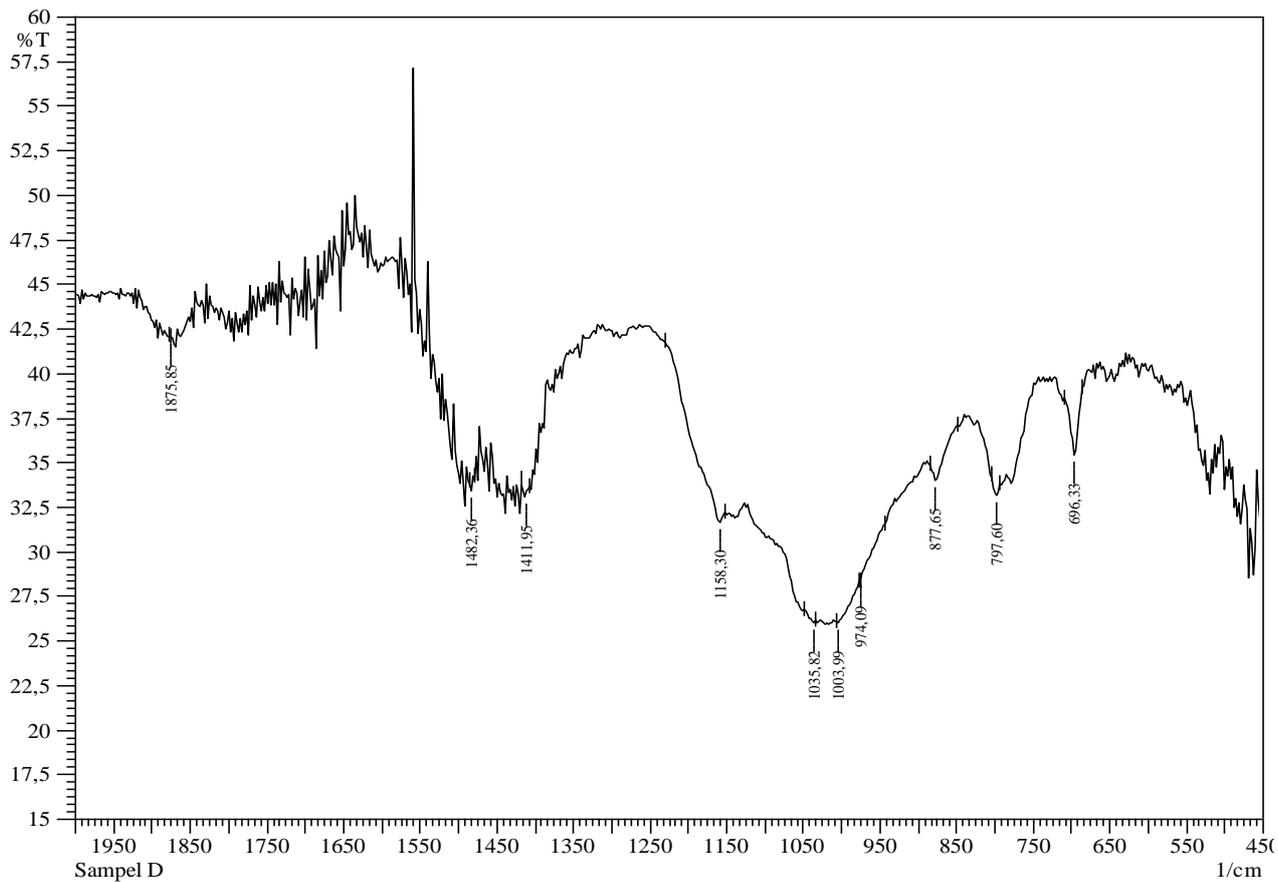
Data inframerah disajikan dalam bentuk spektrum. Spektrum inframerah tersebut adalah plot dari jumlah energi IR yang telah ditransmisikan (% *transmittance*) atau diserap (*absorbance*) oleh sampel, berbanding dengan energi yang biasanya diberikan dalam bentuk *wavenumber* ( $\text{cm}^{-1}$ ) [7]. Spektrum yang dihasilkan oleh sebuah sampel sangatlah unik, seperti sidik jari, dan inframerah spektroskopi digunakan untuk mengidentifikasi, mengkarakterisasi, penjelasan komponen sebuah struktur, pemantauan reaksi dan mengontrol kualitas.

Daerah inframerah dari spektrum elektromagnetik dibagi menjadi tiga bagian, yaitu daerah inframerah dekat, pertengahan dan inframerah jauh [7]. Inframerah jauh (FIR,  $\sim 400\text{-}10\text{ cm}^{-1}$ ) memiliki energi yang terendah dan dapat digunakan untuk rotasi spektroskopi. Wilayah di rentang ini mungkin juga digunakan untuk mengukur getaran yang melibatkan atom berat seperti logam, misalnya dalam mineral dan senyawa anorganik tetapi lebih memerlukan teknik khusus dalam percobaannya. Pada wilayah inframerah pertengahan (MIR,  $\sim 4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ ) wilayah getaran model dasar terlihat, sementara energi yang lebih tinggi inframerah dekat (NIR,  $\sim 14000\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ ) dapat menyelaraskan dan mengkombinasi getaran dengan menggunakan teknik *DRIFT*. Pancaran instrumen IR yang bertipe menyebar dapat dibentuk dengan menggunakan prisma atau grating monokromator yang berfungsi untuk memisahkan frekuensi masing-masing energi yang dipancarkan dari sumber inframerah. Kerugian utamanya adalah sensitivitas lebih rendah dan kecepatan pemindaian lebih lambat daripada di *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) spektrometer sekarang yang telah dikembangkan,

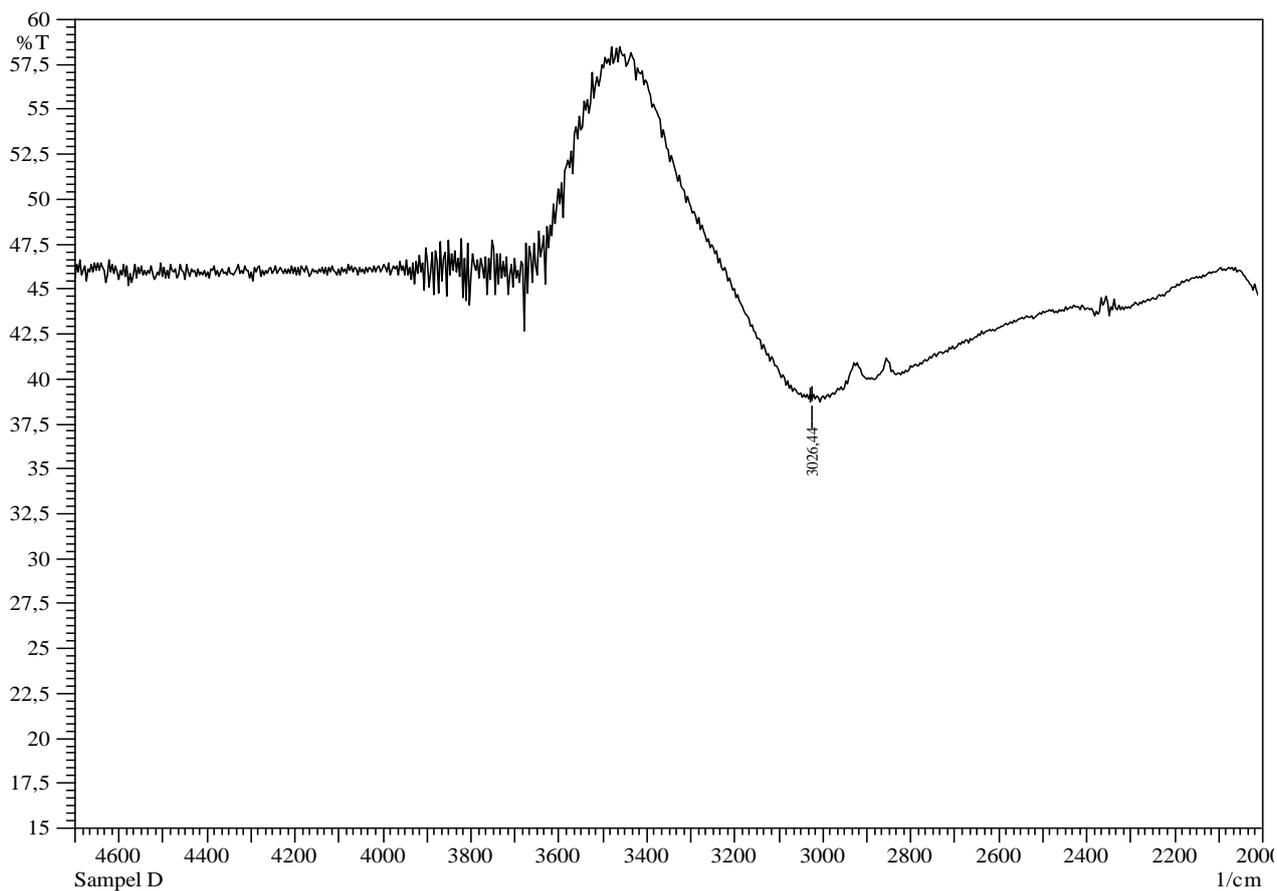
yang didasarkan pada interferometer dan matematika transformasi yang dikembangkan oleh *Fourier*. *Interferometer* akan menghasilkan sampel interferogram dari spektrum yang terserap dan dapat dihitung dengan menggunakan fungsi transformasi *Fourier* dengan cepat.

Hasil pengujian FTIR keseluruhan (Gambar 2 dan Gambar 3) merupakan gambar spektrum inframerah yang dihasilkan dari benda uji mortar geopolimer abu sawit dengan menggunakan NaOH 16M  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  Be 52. Pada nilai *band*  $1450\text{ cm}^{-1}$  mortar geopolimer terjadi intensitas gelombang yang begitu kuat. Nilai *band* tersebut masuk dalam rentang *Wavenumbers*  $1570\text{-}1410\text{ cm}^{-1}$  yang merupakan getaran peregangan dari (O-C-O), dimana nilai tersebut adalah bentuk senyawa Natrium Karbonat yang bereaksi antara unsur Na yang terkandung dalam larutan alkali (NaOH dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dengan  $\text{CO}_2$  (Satya et al., 2015). Unsur Na yang berlebih bereaksi dengan karbon dioksida tersebut membentuk kristal natrium karbonat yang dapat membuat struktur tidak stabil (Rukzon & Chindaprasirt, 2009) [10].

Karakteristik dari spektrum ini juga mengindikasikan adanya alkohol (OH) dengan memperhatikan adanya serapan yang melebar pada *wavenumber*  $3500\text{ - }3300\text{ cm}^{-1}$  (dikonfirmasi dengan asam karbosilat) dan diperkuat dengan serapan C - O pada sekitar *wavenumber*  $1300\text{ - }1000\text{ cm}^{-1}$  (Trivana et al., 2015). Dengan adanya karakteristik tersebut dalam setiap variasi membuktikan, senyawa tersebut mengandung -OH yang berasal dari larutan alkali yang akan bereaksi dengan Si dan Al. *Band* yang tajam pada  $3500\text{ - }3300\text{ cm}^{-1}$  terkait dengan peregangan getaran OH dari reaksi hidrasi semen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [11]. Reaksi hidrasi ini yang akan menghasilkan panas sehingga mempercepat reaksi geopolimer yang terjadi.



Gambar 2. Hasil Pengujian FTIR band (1/cm) 1950 – 450



Gambar 3. Hasil Pengujian FTIR band (1/cm) 1950 – 450

Intensitas nilai *band*  $1000\text{ cm}^{-1}$  pada setiap variasi mulai mengalami penurunan secara berangsur-angsur. *Band* sekitar  $1100\text{ cm}^{-1}$  dan  $700\text{ cm}^{-1}$  merupakan *finger print zeolite* yang menunjukkan adanya vibrasi Si-O dan Al-O [12]. Pada struktur *zeolite* terdapat jalinan internal dan jalinan eksternal. Jalinan internal pada *zeolit* produk muncul pada daerah serapan sekitar  $1250\text{--}950\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya vibrasi ulur asimetri dari Si-O dan Al-O dari kerangka alumino silikat. Serapan pada daerah ini di tunjukkan oleh semua *zeolite* hasil sintesis. Vibrasi ulur simetri Si-O dan Al-O muncul pada daerah serapan sekitar  $820\text{--}650\text{ cm}^{-1}$  yang ditunjukkan oleh munculnya puncak serapan pada sampel mortar. Ikatan Si-O dan Al-O dikaitkan dengan kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) membentuk spesimen selama periode perawatan. Kalsium karbonat muncul karena reaksi antara  $\text{CaOH}_2$  di spesimen dan  $\text{CO}_2$  selama perawatan suhu ruang [7].

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan yang dilakukan terhadap *mortar* geopolimer, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Pengujian FTIR bertujuan mengetahui gugus fungsi senyawa yang tersusun dari setiap mortar geopolimer dalam bentuk serpihan sampel.
2. Pengujian FTIR menghasilkan gugus fungsi dengan intensitas *band*  $1450\text{ cm}^{-1}$  yang merupakan getaran peregangan dari (O-C-O), merupakan bentuk senyawa natrium karbonat yang bereaksi antara unsur Na yang terkandung dalam larutan alkali ( $\text{NaOH}$  dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dengan  $\text{CO}_2$ .
3. Pengujian FTIR menghasilkan gugus fungsi dengan intensitas *band*  $2351\text{ cm}^{-1}$  meningkat secara bertahap apabila rasio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  semakin besar, dan struktur tersebut lebih dikenal dengan nama struktur *zeolite*.
4. Pengujian FTIR menghasilkan gugus fungsi dengan intensitas *band*  $1000\text{ cm}^{-1}$  pada setiap variasi mulai mengalami penurunan secara berangsur-angsur merupakan *finger print zeolite* yang menunjukkan adanya vibrasi Si-O dan Al-O.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penelitian ini.

1. Tim Laboratorium Teknologi Bahan, Fakultas Teknik Universitas Pasir Pengaraian
2. PT. Ara Abadi, Tambusai Utara, Kabupaten Rokan Hulu
3. Dinas Lingkungan Hidup, Kabupaten Rokan Hulu.
4. Balai Riset Industri Padang, Sumatra Barat.
5. Laboratorium Material, Jurusan Kimia, Fakultas MIPA Universitas Riau
6. Civitas Akademika Fakultas Teknik Universitas Pasir Pengaraian.
7. Civitas Akademika Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
8. Civitas Akademika Fakultas Teknik Universitas Riau.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Syarif, H. A., Saputra, D., & Fahmi, K. (2022). Analisis Penerapan Penggunaan *Paving Block* Geopolimer Abu Sawit Dengan Tambahan *Ordinary Portland Cement* (OPC) dan *Portland Composite Cement* (PCC) di Lahan Gambut yang Berbasis *Eco-Green*. *Aptek*, 14(2), 144–151. <https://doi.org/10.30606/aptek.v14i2.1429>
2. Syarif, H. A., Rahmi, A., & Ariyanto, A. (2022). Kuat Tekan dan Absorpsi Mortar Geopolimer Abu Sawit *Portland Composite Cement* dengan Variasi Suhu Tinggi. *Aptek*, 15(1), 34–41.
3. Satya, Y. S. D., Olivia, M., & Saputra, E. (2015). Durabilitas Mortar Geopolimer Campuran Abu Terbang (FA) dan Abu Sawit (POFA) di Lingkungan Gambut. *Jurusan Teknik Sipil Universitas Riau*, 2(2), 1–8.
4. Olivia, M., Mona Tambunan, L., & Saputra, E. (2017). *Properties of Palm Oil Fuel Ash (POFA) Geopolymer Mortar Cured at Ambient Temperature*. *MATEC Web of Conferences*, 97. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701006>

5. Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). *Cement & Concrete Composites Use of OPC to Improve Setting and Early Strength Properties of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete Cured at Room Temperature*. *Cement and Concrete Composite*, 55, 205–214.
6. Adam, A. A. (2014). *The Effect of Temperature and Duration of Curing on The Strength of Fly Ash Based Geopolymer Mortar*. *Procedia Engineering*, 95(Scescm), 410–414.
7. Fale, P. L., Altharawi, A., & Chan, K. L. A. (2015). *Biochimica et Biophysica Acta In situ Fourier Transform Infrared Analysis of Live Cells, response to doxorubicin*. *BBA - Molecular Cell Research*, 1853(10), 2640–2648.
8. Yuniari, A., & Kasmujiastuti, E. (2012). *Spektroskopi FTIR dan Sifat Mekanik Nanokomposit Grafting HDPE dan Nanoprecipitated Calcium Carbonate*. Balai Besar Kulit, Karet Dan Plastik, Yogyakarta, 89–95.
9. Warsito, S., Si, M., Taslimah, D., Si, M., Anorganik, K., Mipa, F., & Diponegoro, U. (2012). *Pengaruh Penambahan Surfaktan Cetyltrimethylammonium Bromide (n-CTMABr) pada Sintesis Zeolit-Y*. *Kimia Anorganik, Jurusan Kimia, Fakultas MIPA Universitas Diponegoro, Semarang*.
10. Trivana, L., Sugiarti, S., & Rohaeti, E. (2015). *Sintesis Dan Karakterisasi Natrium Silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)*. *Jurnal Sains Dan Teknologi Lingkungan*, 7, 90–97.
11. Dung, N. T., Chang, T., & Chen, C. (2014). *Hydration Process and Compressive Strength of Slag-CFBC Fly Ash Materials without Portland Cement*. *Curtin University of Technology*.
12. Li, H., Gao, P., Xu, F., Sun, T., Zhou, Y., Zhu, J., Peng, C., & Lin, J. (2021). *Effect of fine aggregate particle characteristics on mechanical properties of fly ash-based geopolymer mortar*. *Minerals*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/min11080897>