

# PEMBUATAN MORTAR GEOPOLIMER BERBASIS *PALM OIL FLY ASH*-GRAFENA (POFA-GRAFENA) DENGAN VARIASI RASIO POFA/PASIR DAN BERAT GRAFENA

Yola Bertilsya Hendri<sup>1</sup>, Amun Amri<sup>2</sup>, Rozanna Sri Irianty<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Kimia, <sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Kimia

Laboratorium Dasar Proses dan Operasi Pabrik

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya Jl. HR. Soebrantas KM 12,5 Simpang Baru, Panam, Pekanbaru, 28293

E-mail: [Yola.bertilsya4147@student.unri.ac.id](mailto:Yola.bertilsya4147@student.unri.ac.id)

## ABSTRACT

*Geopolymer mortar is a mortar produced by reacting a high concentrated alkaline solution with precursors containing high alumina and silica contents. The use of geopolymer mortar can replace the use of ordinary portland cement (OPC) in the construction industry. This research aims to synthesize palm oil fly ash (POFA) based geopolymer mortar with the addition of graphene nanosheets, to determine the effect of POFA-to-sand composition ratio, and variations of graphene to mechanical properties and morphology of geopolymer mortar. The research was conducted by varying the ratio of POFA-to-sand (1:0, 1:1, 1:2, and 2:1 by mass ratio), variations of graphene (0, 0,1, 0,35, and 0,5% by weight), curing time (24 h) and curing temperature (60°C). Scanning Electron Microscope (SEM) analysis showed that the addition of sand and graphene reduced the porosity of geopolymer mortar. The compressive strength test results showed that the highest compressive strength (16,4 MPa) was obtained at POFA-to-sand ratio of 2:1 and 0,5% wt graphene content. While the lowest compressive strength (5,4 MPa) was obtained at the POFA-to-sand ratio of 1:2 and 0% wt graphene content.*

**Keywords:** *alumina, silica, alkaline activator, crystalline, geopolymerization*

## 2.1 Pendahuluan

Dalam beberapa tahun terakhir, banyak penelitian yang dilakukan untuk mengembangkan geopolimer berbasis *fly ash*. Hal ini dilakukan untuk mengurangi dan melengkapi penggunaan *ordinary portland cement* (OPC) dalam industri konstruksi. OPC merupakan salah satu kontributor utama penghasil gas rumah kaca (CO<sub>2</sub>) bila dibandingkan dengan geopolimer. Geopolimer pada umumnya melepaskan lebih sedikit gas CO<sub>2</sub> dikarenakan kandungan kalsium karbonat pada bahan baku dan suhu produksinya yang rendah (Saafi dkk., 2015)

Geopolimer merupakan polimer anorganik yang disintesis melalui reaksi kimia dari alumina-silikat oksida (Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) yang ada pada *fly ash* dengan alkali polisilikat yang menghasilkan ikatan 3-D polimer Si-O-Al dengan formula

$Mn((SiO_2)_z-AlO_2)_n \cdot wH_2O$  dimana “z” adalah bilangan 1, 2, atau 3, sampai dengan 32; M adalah kation monovalen seperti kalium atau natrium; “n” adalah derajat polikondensasi; dan w adalah tingkat hidrasi yang merupakan fungsi dari jenis dan jumlah larutan alkali polisilikat yang digunakan. Larutan alkali polisilikat yang paling umum digunakan adalah campuran sodium silikat dan natrium hidroksida (NaOH) dengan rasio sodium silikat/NaOH antara 1,5 dan 3 (Saafi dkk., 2015).

Geopolimer berbahan dasar *fly ash* menunjukkan sifat mekanik yang sama dengan OPC namun dengan kinerja yang lebih baik dalam kondisi lingkungan yang ekstrim. Sebagai contoh, telah dilaporkan bahwa geopolimer menunjukkan ketahanan yang sangat baik terhadap serangan asam dan sulfat bila dibandingkan dengan OPC

karena kandungan kalsium yang rendah dari *fly ash* (Saafi dkk., 2015). Selain itu, geopolimer memiliki keunggulan lain seperti tahan reaksi alkali-silika, mengurangi polusi udara, dan tahan terhadap api. Sifat geopolimer yang tahan terhadap api dikarenakan ikatan 3-D polimer Si-O-Al (Saafi dkk., 2015).

*Fly ash* (abu terbang) merupakan limbah padat yang dihasilkan dari sisa pembakaran batubara dan sisa pengolahan industri kelapa sawit (*palm oil fuel ash*, POFA). *Palm oil fuel ash* (POFA) memiliki potensi besar untuk dijadikan sumber silika dan alumina pada geopolimer, hal ini dikarenakan ketersediaan POFA yang melimpah di wilayah Asia Tenggara termasuk Indonesia (Ranjbar dkk., 2014).

Namun geopolimer POFA memiliki kelemahan diantaranya bersifat rapuh ditandai dengan rendahnya kekuatan tekan dan ketangguhan retak (Ranjbar dkk., 2014). Untuk mengatasi hal ini, maka geopolimer POFA dapat diperkuat dengan menggunakan material grafena. Penambahan material grafena dapat meningkatkan sifat mekanik dari geopolimer, seperti mengendalikan perambatan retak dan meningkatkan kekuatan lentur, kuat tekan, dan energi keretakan geopolimer. Hal ini dikarenakan grafena memiliki sifat-sifat yang sangat unggul seperti luas permukaan yang sangat besar, densitas yang rendah, sifat termal, optik, elektrik, dan mekanik yang unik (Saafi dkk., 2015).

Oleh sebab itu, pada penelitian ini akan disintesa mortar geopolimer berbahan baku *palm oil fuel ash* (POFA) dengan variasi rasio POFA/pasir dan berat grafena.

## 2.2 Metode Penelitian

### 2.1 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *Palm Oil Fly Ash* (POFA), pasir cor putih, Sodium Silikat, dan NaOH, grafit dari batang pensil, cairan pencuci piring dengan komposisi surfaktan anioik 18,9% (*Sodium Lauryl Sulfate*), dan aquadest.

### 2.2 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu neraca analitik, blender, wadah es, *furnace*, gelas piala 500 ml, gelas ukur 1000 ml, saringan 200 mesh, saringan 12 mesh, wadah pencampuran pembuatan geopolimer, aluminium foil, cetakan ukuran (5 x 5 x 5) cm<sup>3</sup>. Peralatan atau instrumen untuk karakterisasi antara lain penguji kuat tekan, porositas, *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *X-Ray Diffraction* (XRD), *Ultraviolet-visible Spectroscopy* (UV-Vis), dan *Raman Spectroscopy*.

### 2.3 Variabel Penelitian

Variabel penelitian ini meliputi variabel tetap dan variabel berubah. Variabel tetap penelitian ini adalah komposisi dari geopolimer terdiri atas 72-wt% padatan (POFA+pasir), dan 28-wt.% cairan (sodium silikat + NaOH + grafena 20 mg/ml) dengan konsentrasi NaOH 10 M, rasio berat (sodium silikat/NaOH) adalah 2,5, dan waktu curing selama 24 jam pada suhu 60°C (Saafi dkk., 2015). Sedangkan variabel berubah adalah variasi rasio berat POFA : pasir (1:0, 1:1, 1:2, 2:1) dan variasi penambahan grafena (0 ; 0,1; 0,35; dan 0,5 % wt).

## 2.4 Prosedur Penelitian

### 2.4.1. Pembuatan Grafena

Pada penelitian ini pembuatan grafena dilakukan dengan menggunakan metode *turbulence-assisted shear exfoliation* (TASE). Pada metode ini grafena disintesis dari grafit batang pensil menggunakan blender dan cairan pencuci piring dengan komposisi surfaktan anioik 18,9% (*sodium lauryl sulfate*). dimana, sepuluh gram grafit batang pensil dihaluskan dan disaring hingga lolos saringan 200 mesh. Kemudian 10 gram grafit (lolos saringan 200 mesh), cairan pencuci piring sebanyak 1,227 ml, dan aquades dimasukkan kedalam blender hingga diperoleh total larutan sebanyak 500 ml, blender dioperasikan pada kecepatan 1500 rpm (power angka 2) dalam waktu 1 jam (1 menit hidup/1 menit mati). Selama blender tidak beroperasi blender harus

dinginkan dengan memberikan jaket pendingin, setelah proses selesai maka akan dihasilkan larutan grafena dengan konsentrasi 20 mg/ml. Selanjutnya grafena yang dihasilkan diidentifikasi dengan menggunakan analisa *ultraviolet-visible spectroscopy* (UV-Vis), dan *raman spectroscopy* (Varrla, 2014)

### 2.4.2. Pembuatan Mortar Geopolimer

Pembuatan mortar geopolimer dilakukan dengan mencampurkan semua bahan-bahan yang akan digunakan, dimana kedalam larutan alkali aktivator dengan rasio (sodium silikat/NaOH) adalah 2,5 ditambahkan dengan grafena (0; 0,1; 0,35; dan 0,5 wt%) kemudian diaduk dan disonikater selama 1 jam. Setelah itu larutan tersebut di campur dengan campuran POFA : pasir dengan rasio POFA : pasir (1:0; 1:1; 1:2; 2:1). kemudian diaduk sampai merata hingga di dapat *workability*, setelah selesai dicampur material tersebut kemudian dimasukkan kedalam cetakan logam yang berbentuk balok dengan ukuran (5 x 5 x 5) cm<sup>3</sup> dan dipadatkan dengan memberikan tekanan kedalam cetakan. Adonan dipadatkan agar campuran mengisi seluruh cetakan dengan ditekan disetiap sisi cetakan, setelah tercetak kemudian adonan dioven dengan suhu 60°C selama 24 jam. Setelah 24 jam adonan mengeras dibuka dan dibiarkan dalam suhu kamar selama 28 hari, setelah 28 hari kemudian mortar geopolimer tersebut diuji morfologi dan kuat tekannya.

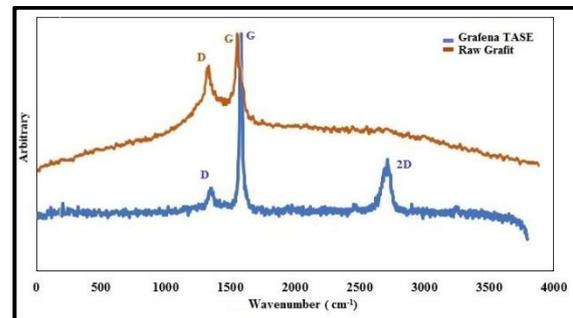
## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Analisa Karakteristik Grafena

#### 3.1.1. Analisa Spektroskopi Raman

Gambar 3.1 menunjukkan spektrum dari sampel grafit (bahan baku) dan sampel grafena yang dihasilkan dari proses *Turbulence-assisted shear exfoliation* (TASE) pada panjang gelombang eksitasi 532 nm. Pada Gambar 3.1 terlihat bahwa pada spektrum sampel grafit muncul puncak utama yaitu puncak band G (1582,4 cm<sup>-1</sup>), puncak band D (1349,85 cm<sup>-1</sup>), dan puncak band 2D yang tidak signifikan. Hal ini bersesuaian dengan penelitian yang

dilakukan oleh Hodkiewicz pada tahun 2010 untuk sampel grafit pada panjang gelombang eksitasi 532 nm (Hodkiewicz & Scientific, 2010).



**Gambar 3.1** Spektroskopi Raman Sampel Grafit dan Grafena yang Dihasilkan dari Proses *Turbulence-assisted Shear Exfoliation* (TASE) pada Panjang Gelombang Eksitasi 532 nm.

Kehadiran puncak band D seharusnya tidak terjadi pada bahan baku grafit, kemunculan puncak band D pada grafit ini mengindikasikan adanya kecacatan pada material grafit mula-mula yang disebabkan oleh adanya modifikasi kimia dari grafit alami (Irfanita dkk., 2015). Sedangkan ketidaksignifikan muncunya puncak band 2D pada grafit memang merupakan karakteristik dari spektrum raman grafit dikarenakan grafit terdiri dari sejumlah besar *layer* sehingga menyebabkan intensitas dari band 2D rendah sebagaimana yang dilaporkan oleh Hodkiewicz pada tahun 2010 (Hodkiewicz dan Scientific, 2010).

Spektrum raman dari sampel grafena yang dihasilkan dari proses TASE ditunjukkan pada Gambar 4.1, dimana pada spektrum sampel grafena terlihat muncul 3 puncak utama yaitu puncak band G (1583,4 cm<sup>-1</sup>), puncak band 2D (2679,55 cm<sup>-1</sup>), dan puncak band D (1355,81 cm<sup>-1</sup>). Secara kualitatif jumlah lapisan pada grafena dapat ditentukan dengan menggunakan rasio posisi band G dan band 2D ( $I_{2D}/I_G$ ) dan dengan menganalisa bentuk puncak band 2D.

Pada Gambar 3.1 terlihat bahwa sampel grafena yang dihasilkan dari proses TASE memiliki spektrum band G yang lebih tinggi dan tajam dari band 2D dengan rasio  $I_{2D}/I_G$  sebesar 0,23 dan memiliki

bentuk puncak band 2D yang terpecah dan tidak simetris, yang hampir sama dengan bentuk puncak band 2D untuk *triple layer* grafena pada penelitian yang dilakukan oleh Li, dkk pada tahun 2015 (Li dkk., 2015). Sehingga dapat diindikasikan bahwa grafena yang dihasilkan merupakan grafena *multi-layer* dan terdiri dari 3 *layer*.

Hal ini bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh Yan dan Barron (2017) dimana grafena *single-layer* dengan kualitas sangat baik, memiliki spektrum band 2D yang lebih tinggi dengan bentuk yang simetris dan tajam dari band G dengan Ratio  $I_{2D}/I_G$  adalah 2, sedangkan grafena *multi-layer* memiliki spektrum band G yang lebih tinggi dan tajam dari band 2D dengan Ratio  $I_{2D}/I_G$  kecil dari 2. Selain itu untuk grafena *single-layer* band 2D diamati memiliki puncak simetris tunggal dengan lebar penuh dan peningkatan jumlah lapisan grafena secara berurutan menyebabkan band 2D terpecah menjadi tidak simetris (Wall, 2011).

Secara empiris posisi band G dapat dihubungkan dengan jumlah layer pada grafena dengan menggunakan persamaan berikut (Wall, 2011):

$$\omega_G = 1581,6 + 11/(1 + n^{1,6}) \dots\dots(3.1)$$

dimana  $\omega_G$  adalah posisi band dalam panjang gelombang, dan  $n$  adalah jumlah *layer* yang terdapat pada sampel. Pada penelitian ini, posisi band G sampel pada spektrum Raman berada pada  $1583,4 \text{ cm}^{-1}$  ( $\omega_G$ ). Apabila dimasukkan ke persamaan 1 didapatkan jumlah lapisan *layer* pada grafena sebanyak  $\sim 3$  *layer*. Dari beberapa ulasan diatas dapat disimpulkan bahwa grafena yang dihasilkan dari proses TASE ini memiliki 3 *layer* atau disebut *few layer grafena* (FLG).

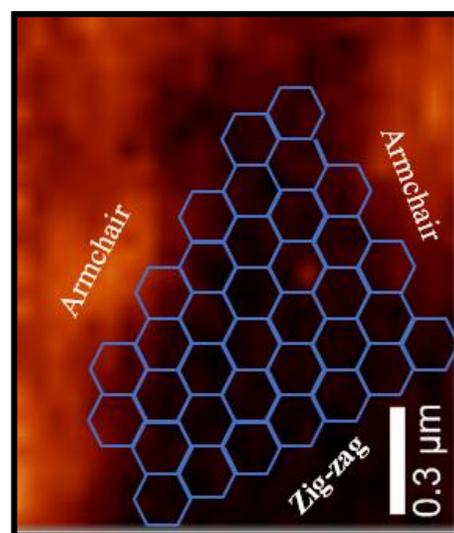
Kualitas grafena yang telah dihasilkan dapat ditentukan juga dengan menghitung rasio dari intensitas puncak  $I_D/I_G$ , dimana  $I_D$  adalah intensitas dari band D dan  $I_G$  adalah intensitas dari band G (Rogalski dkk., 2016). Pada penelitian ini, hasil spektroskopi raman dari sampel grafena yang dihasilkan dari proses TASE

memiliki rasio  $I_D/I_G$  sebesar 0,16. Sehingga dapat disimpulkan bahwa grafena yang telah dihasilkan memiliki kualitas yang baik. Hal ini bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh Wang pada tahun 2017 dimana grafena dengan kualitas baik memiliki Ratio  $I_D/I_G < 0,2$  (Wang dkk., 2016).

Kualitas grafena sangat dipengaruhi oleh kemunculan band D pada spektrum raman grafena, dimana pada grafena dengan struktur yang sempurna (*single-layer* kualitas tinggi) nilai band D sangat lemah bahkan tidak ada. Sedangkan jika nilai band D tinggi atau signifikan dapat diartikan bahwa struktur grafena yang dihasilkan tidak teratur dan adanya gangguan pada  $sp^2$  sistem hibridisasi karbon (Yan dan Barron, 2017). Menurut Wall (2011) dan Childres dkk (2013) apabila tingkat kecacatan grafena sangat tinggi, maka selain puncak band D meningkat, juga akan muncul band D' ( $1620 \text{ cm}^{-1}$ ), dan band D+G ( $2940 \text{ cm}^{-1}$ ).

### Raman Mapping Pada Grafena

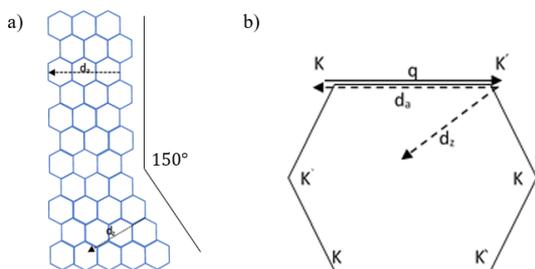
Gambar 3.2 menunjukkan raman mapping dari intensitas band D untuk sampel grafena yang dihasilkan dari proses TASE pada sudut  $60^\circ$  dimana terlihat bahwa grafena yang dihasilkan memiliki bentuk konfigurasi penataan yang terdiri dari bentuk *armchair* dan *zigzag*.



**Gambar 3.2** Raman mapping dari intensitas band D untuk sampel grafena pada sudut  $60^\circ$

Pada Gambar 3.2 terlihat bahwa intensitas band D meningkat pada tepi armchair (terang), dan pada tepi zigzag terlihat band D memiliki intensitas yang lebih rendah (gelap) dibandingkan tepi armchair. Hal ini bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh Malard, dkk pada tahun 2009, dimana bentuk konfigurasi penataan pada bagian tepi grafena yang dihasilkan dapat mempengaruhi intensitas kemunculan band D pada spektrum raman grafena (Malard dkk., 2009).

Gambar 3.3 menunjukkan proses *double resonance* antara titik *nonequivalent* K pada daerah *first brillouin zone* grafena dengan sudut  $150^\circ$  yang memiliki gelombang vektor  $q$ . Jadi untuk mempertahankan momentum, elektron dihamburkan kembali secara elastik dari  $K'$  ke K pada daerah *first brillouin zone* grafena oleh fonon dengan gelombang vektor  $d = -q$ .



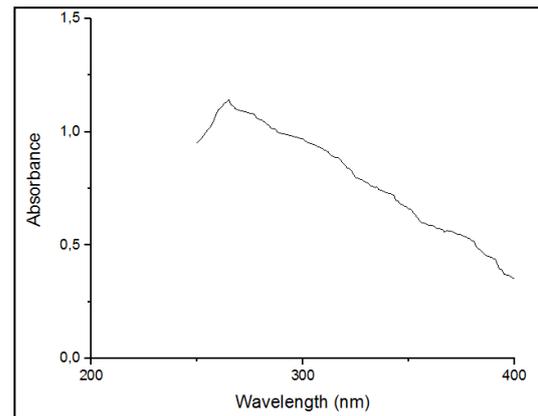
**Gambar 3.3** (a) Struktur atom tepi grafena pada sudut  $150^\circ$  (b) Mekanisme proses *double resonance* pada daerah *first brillouin zone* grafena

Gambar 3.3(a) menunjukkan tepi armchair dan zigzag dengan masing-masing gelombang vektor kecacatan  $d_a$  dan  $d_z$  yang mana tegak lurus terhadap tepi armchair dan zigzag, dimana terlihat bahwa gelombang vektor armchair ( $d_a$ ) mampu untuk berpartisipasi dalam proses *double resonance* antara titik K dan  $K'$ . Sedangkan gelombang vektor kecacatan zigzag ( $d_z$ ) tidak dapat menghubungkan titik K dan  $K'$ , dan dengan demikian sebaran elastis elektron oleh kecacatan tidak memiliki cukup momentum untuk berpartisipasi dalam proses *double resonance* antara titik

K dan  $K'$ . Sehingga hal ini menyebabkan hanya struktur tepi armchair yang mempengaruhi kemunculan band D pada raman spektroskopi (Malard dkk., 2009)

### 3.1.2. Analisa Spektroskopi Ultraviolet-Visible (UV-Vis)

Gambar 3.4 menunjukkan spektrum UV-Vis dari sampel grafena yang dihasilkan dari proses TASE.

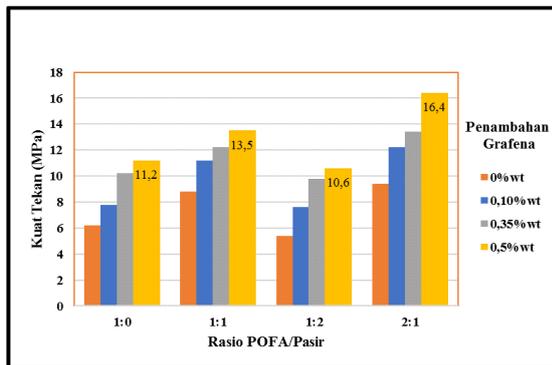


**Gambar 3.4** Spektrum UV-Visible untuk sampel grafena yang dihasilkan dari proses *Turbulence-assisted shear exfoliation* (TASE)

Pada Gambar 3.4 terlihat bahwa puncak serapan tertinggi untuk sampel grafena yang dihasilkan dari proses TASE berada pada panjang gelombang 265 nm, hasil ini bersesuaian dengan penelitian yang dilaporkan sebelumnya untuk grafena. Menurut Varrla, dkk (2014) puncak serapan spesifik ( $\lambda_{max}$ ) untuk grafena berada pada panjang gelombang  $\sim 265$  nm, sedangkan menurut Johra, dkk (2014) grafena melakukan absorpsi pada daerah sinar UV ( $\lambda = 200-400$  nm) dan mempunyai ( $\lambda_{max}$ ) pada 265 nm karena adanya transisi  $\pi \rightarrow \pi^*$  dari cincin aromatik  $C-C$ , transisi ini terjadi karena ketika cahaya dari sumber cahaya diuraikan oleh monokromator kemudian cahaya monokromator dilewatkan pada sampel. Cahaya ini sebagian diserap oleh sampel, besar energi yang diserap tertentu dan menyebabkan elektron tereksitasi dari ground state ke keadaan tereksitasi yang memiliki energi lebih tinggi ( $\pi \rightarrow \pi^*$ ) (Johra dkk., 2014).

### 3.2 Pengaruh Variasi Penambahan Grafena Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Gambar 3.5 menunjukkan grafik pengaruh variasi penambahan grafena terhadap kuat tekan mortar geopolimer, dimana terlihat bahwa kuat tekan tertinggi untuk setiap rasio POFA/Pasir 1:0 ; 1:1; 1:2; dan 2:1 berada pada penambahan 0,5%wt grafena yaitu sebesar 11,2; 13,5; 10,6; dan 16,4 MPa.

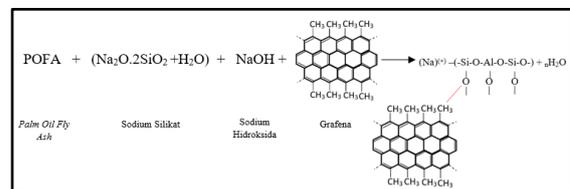


**Gambar 3.5** Pengaruh Variasi Penambahan Grafena Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Berdasarkan Gambar 3.5 secara umum dapat disimpulkan bahwa kuat tekan mortar geopolimer meningkat seiring dengan penambahan jumlah grafena untuk semua variasi rasio komposisi POFA/Pasir. Peningkatan kuat tekan dari mortar geopolimer ketika ditambah grafena disebabkan karena grafena memiliki sifat mekanik yang unggul, dimana kuat tarik rata-rata dan modulus elastisitas grafena sebesar 125 GPa dan 1,1 TPa (Wang dkk., 2016; Widjaja dkk., 2016; Rahman dkk., 2016)). Selain itu, Menurut Shamsaei, dkk (2018) menyatakan bahwa grafena dapat terdispersi dan terdistribusi dengan baik didalam komposit geopolimer (Shamsaei dkk., 2018) dan menurut Ranjbar, dkk (2015) menyatakan bahwa secara teoritis grafena memiliki luas permukaan mencapai 2630 m<sup>2</sup>/g sehingga dapat meningkatkan kontak dan interaksi antara grafena dan matriks geopolimer (Ranjbar dkk., 2015).

Gambar 3.6 menunjukkan perkiraan skema mekanisme reaksi grafena didalam matriks geopolimer dengan asumsi bahwa

grafena yang disintesis dengan menggunakan metode TASE tidak mengalami oksidasi selama proses, dimana pada Gambar 3.6 terlihat bahwa ketika grafena ditambahkan ke dalam larutan alkali aktivator (NaOH + Sodium silikat (Na<sub>2</sub>O.2SiO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O)), maka tidak terjadi reaksi dikarenakan grafena yang bersifat inert (Shamsaei dkk., 2018; Sheka, 2013; Guo dkk., 2017). Namun, ketika terjadi reaksi geopolimerisasi, maka grafena akan terikat secara sekunder dengan atom O pada matriks geopolimer baik atom O pada Si-O-Al ataupun atom O pada Si-O-Si, seperti terlihat pada Gambar 3.6.



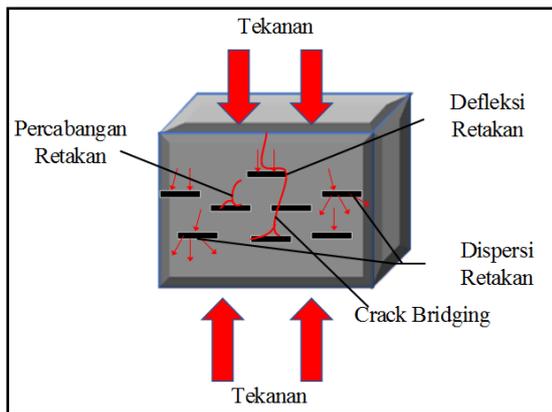
**Gambar 3.6** Perkiraan Skema Mekanisme Reaksi Geopolimerisasi dan Interaksi Grafena dalam Matriks Geopolimer (Zhong dkk., 2017) (Telah diolah kembali)

Interaksi antara grafena dan matriks geopolimer memiliki dampak yang penting terhadap sifat mekanik mortar geopolimer terutama pada kuat tekan mortar geopolimer, peningkatan kuat tekan ini dikarenakan grafena dapat mengoptimalkan mekanisme penjalaran retakan sehingga kekuatan dan ketangguhan mortar geopolimer menjadi lebih besar (Wang dkk., 2016).

Berbagai mekanisme ketangguhan tersebut seperti dispersi tekanan (*stress dispersion*), defleksi retakan (*crack deflection*), penjemabatanan retakan (*crack bridging*), dan pencabangan retakan (*crack branching*). Gambar 3.7 menunjukkan perkiraan mekanisme kerja grafena dalam matriks geopolimer pada saat diberikan beban atau tekanan. Dimana pada Gambar 3.7 terlihat bahwa ketika mortar geopolimer diberikan tekanan, maka tekanan cenderung akan berpusat pada bagian tengah mortar geopolimer dan menimbulkan retakan, penambahan grafena ke dalam mortar geopolimer akan memberikan

penghambatan yang tinggi terhadap penjarangan retakan, dimana ketika retakan mencapai permukaan grafena retakan akan berkembang sepanjang antarmuka antara grafena dan matriks geopolimer. Dengan demikian, kehadiran grafena menyebabkan percabangan, dispersi, penjemabatan ataupun defleksi pada retakan.

Percabangan, dispersi dan defleksi pada retakan dapat meningkatkan kebutuhan energi untuk terjadinya penjarangan retakan, sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik dari mortar geopolimer. Selain itu, mekanisme *crack bridging* dapat menyerap lebih banyak energi secara efektif ketika mortar geopolimer diberikan tekanan atau beban (Wang dkk., 2016).

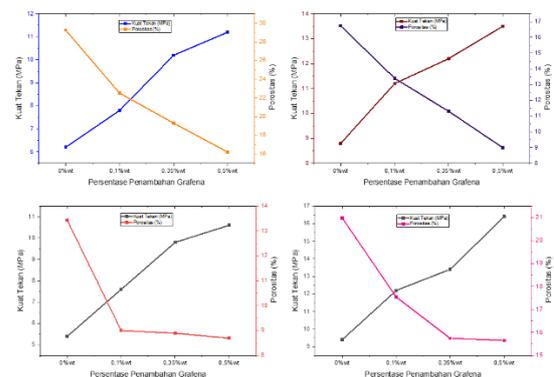


**Gambar 3.7** Perkiraan Mekanisme Kerja Grafena dalam Matriks Geopolimer Saat Diberi Tekanan (diadaptasi dari Wang dkk., 2016)

Sedangkan menurut Ranjbar, dkk (2015) peningkatan sifat mekanik mortar geopolimer ketika ditambah grafena lebih disebabkan karena adanya mekanisme ketangguhan retakan berupa dispersi tekanan (*stress dispersion*) yang disebabkan oleh grafena, dimana ketika grafena ditambahkan kedalam matriks geopolimer, maka modulus elastisitas grafena yang tinggi dapat menyebabkan dispersi tekanan (*stress dispersion*) yaitu dengan mengurangi konsentrasi tegangan pada matriks dan mengalihkan tegangan secara seragam ke bagian matriks lainnya (Ranjbar dkk., 2015). Singkatnya, karena

modulus elastisitas yang tinggi, serta morfologi dua dimensi yang unik dari grafena maka dapat mengurangi konsentrasi tegangan dan mencegah perkembangan retakan sehingga meningkatkan kuat tekan komposit geopolimer.

Gambar 3.8 menunjukkan pengaruh penambahan pengaruh penambahan grafena terhadap kuat tekan dan porositas mortar geopolimer pada variasi POFA/Pasir 1:0; 1:1; 1:2; dan 2:.



**Gambar 3.8** Grafik Pengaruh Penambahan Grafena Terhadap Kuat Tekan dan Porositas Mortar Geopolimer Pada Variasi POFA/Pasir (a) 1:0 (b) 1:1 (c) 1:2 (d) 2:1

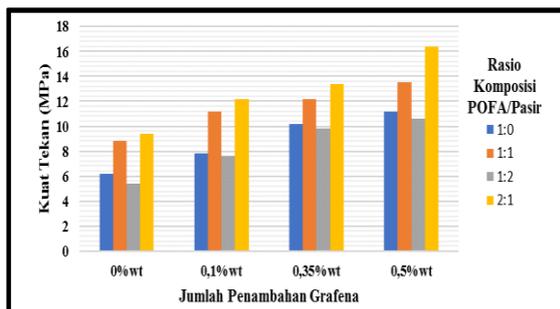
Berdasarkan Gambar 3.8 secara umum dapat disimpulkan bahwa penambahan grafena ke dalam matriks geopolimer untuk semua variasi rasio POFA/Pasir akan menurunkan porositas dan meningkatkan kuat tekan dari mortar geopolimer. Hal ini dikarenakan ukuran nano yang dimiliki oleh grafena yang dapat dengan mudah mengisi pori dari matriks geopolimer. Sehingga selain dapat meningkatkan kuat tekan, penambahan grafena ke dalam matriks geopolimer juga dapat menurunkan porositas dari mortar geopolimer berbasis *palm oil fly ash*-grafena (POFA-Grafena) (Bai dkk., 2018; Ranjbar dkk., 2015; Saafi dkk., 2014; S. Yan dkk., 2015; Wang dkk., 2016).

### 3.3 Pengaruh Variasi Rasio Komposisi POFA/Pasir Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Gambar 3.9 menunjukkan grafik pengaruh rasio komposisi POFA/Pasir terhadap kuat tekan mortar geopolimer.

Berdasarkan Gambar 3.9 terlihat bahwa untuk semua variasi penambahan grafena, peningkatan kuat tekan mortar geopolimer terjadi berturut-turut pada rasio 1:2; 1:0; 1:1; 2:1. Dimana didapatkan kuat tekan tertinggi pada rasio komposisi POFA/Pasir 2:1 pada penambahan 0,5%wt grafena dengan kuat tekan sebesar 16,4 MPa. Sedangkan kuat tekan terendah terjadi pada rasio komposisi POFA/Pasir 1:2 pada penambahan 0%wt grafena dengan kuat tekan sebesar 5,4 MPa.

Hal ini menunjukkan bahwa penambahan pasir ke dalam geopolimer dapat meningkatkan kuat tekan geopolimer, namun jika penambahan pasir terlalu banyak ke dalam matriks geopolimer dapat menyebabkan terjadinya penurunan kuat tekan. Hasil ini bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya (Bhowmick dan Ghosh, 2012; Haque, 2017; Prasanthi dan Sekhar, 2017; Vinay dkk., 2016; Zailani dkk., 2017).

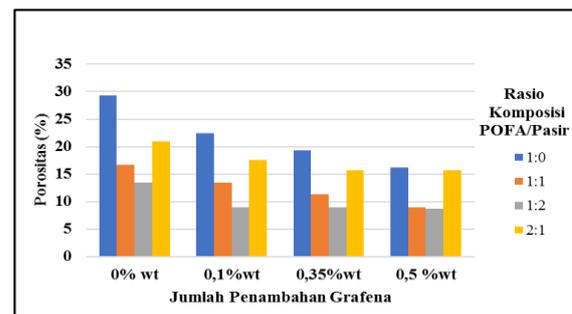


**Gambar 3.9** Pengaruh Rasio Komposisi POFA/Pasir Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Peningkatan kuat tekan ini disebabkan karena pasir bertindak sebagai filler di dalam matriks geopolimer, dimana jika pasir berikatan baik dengan matriks geopolimer maka pasir dapat meningkatkan kuat tekan mortar geopolimer, memberikan durabilitas tinggi pada matriks geopolimer, mengontrol *workability* dari adonan geopolimer serta dapat mengurangi *drying cracking* (Guha dkk., 2016; Zhang, 2014). Dimana durabilitas yang tinggi pada geopolimer diperlukan untuk meningkatkan *interface zone* antara geopolimer dan agregat pasir yang berarti dapat meningkatkan kekasaran permukaan

geopolimer, serta dapat meningkatkan kekerasan dari geopolimer (Aleem dan Arumairaj, 2016; Devi dan Kumar, 2015; He, 2012; X. Li dkk., 2013; Zailani dkk., 2017). Namun jika penambahan pasir terlalu banyak ke dalam matriks geopolimer maka pasir tidak dapat berikatan baik dengan geopolimer dikarenakan gel geopolimer yang dibentuk selama proses geopolimerisasi tidak mencukupi untuk mengikat semua partikel pasir sehingga menyebabkan kuat tekan geopolimer menjadi rendah (Aleem dan Arumairaj, 2016; He, 2012; X. Li dkk., 2013; Zailani dkk., 2017).

Selain itu, penambahan pasir ke dalam geopolimer juga dapat mempengaruhi porositas dari geopolimer. Gambar 3.10 menunjukkan grafik pengaruh rasio POFA/Pasir terhadap porositas dari mortar geopolimer.



**Gambar 3.10** Pengaruh Rasio Komposisi POFA/Pasir Terhadap Porositas Mortar Geopolimer

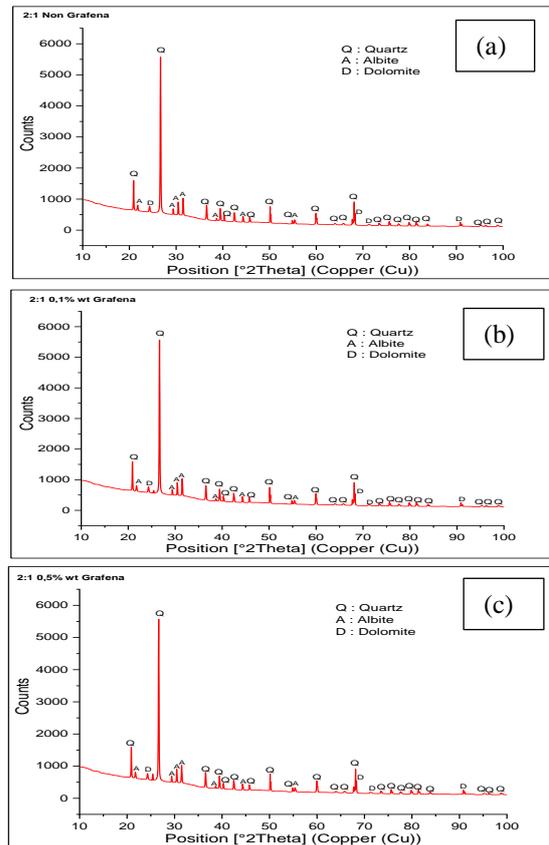
Berdasarkan Gambar 3.10 terlihat bahwa penambahan pasir untuk semua variasi penambahan grafena dapat menurunkan porositas dari geopolimer, salah satunya dapat terlihat pada rasio komposisi POFA/Pasir 1:0; 1:1; 1:2 tanpa penambahan grafena, dimana porositas mortar geopolimer masing-masing sebesar 29,255; 16,740; 13,431%. Hasil ini bersesuaian dengan penelitian yang dilaporkan oleh peneliti sebelumnya, dimana penambahan pasir ke dalam geopolimer berfungsi sebagai *filler* yang dapat menurunkan porositas dari geopolimer yang dihasilkan (Guha dkk., 2016; Mastura dkk., 2014; Prasanthi dan Sekhar, 2017; Rajeswaran dkk., 2016; Vinay dkk., 2016).

### 3.4 Analisa X-Ray Diffraction (XRD)

Gambar 3.11 menunjukkan hasil analisa *X-Ray Diffraction* (XRD) dari sampel mortar geopolimer berbasis *Palm Oil Fly Ash*-grafena (POFA-Grafena) dengan variasi rasio komposisi POFA/Pasir sebesar 2:1 dan variasi penambahan grafena sebesar 0; 0,1; dan 0,5 %wt. Analisa *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan dengan menggunakan alat *XRD XPERT POWDER Panalytical* dengan anoda Copper (Cu) pada arus 30 mA dan tegangan 40kV, data *X-Ray Diffraction* (XRD) diperoleh pada suhu 25°C dengan rentang sudut Bragg ( $2\theta$ ) dari 10 sampai 100°. Pola difraksi yang terbentuk dari sampel penelitian selanjutnya dibandingkan dengan data pada *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) sehingga dapat ditentukan fasa-fasa yang terbentuk pada mortar geopolimer berbasis *Palm Oil Fly Ash*-grafena (POFA-Grafena).

Pada Gambar 3.11 (a) (b) dan (c) terlihat bahwa pada ketiga pola difraksi dari sampel mortar geopolimer berbasis *Palm Oil Fly Ash*-grafena (POFA-Grafena) memberikan pola berbentuk puncak (puncak melebar) pada sudut Bragg ( $2\theta$ ) dari 16 sampai 34°, kehadiran pola difraksi ini menandakan terbentuknya fase amorf pada sampel mortar geopolimer berbasis *Palm Oil Fly Ash*-grafena (POFA-Grafena) (Mudrik, 2012). Selain itu, pada ketiga pola difraksi dari sampel mortar geopolimer berbasis *Palm Oil Fly Ash*-grafena (POFA-Grafena) juga menunjukkan hadirnya fase-fase kristal quartz, albite, dan dolomite. Kehadiran fase-fase kristal ini merupakan hasil reaksi geopolimerisasi dari *Palm Oil Fly Ash* (POFA) dan larutan alkali aktivator (Ranjbar dkk., 2014). Dimana fase kristal quartz merupakan bentuk mineral utama dari *silicon oxide* ( $\text{SiO}_2$ ) yang memiliki sistem kristal heksagonal dengan parameter kisi  $a = b = 4,9180 \text{ \AA}$  dan  $c = 5,4070 \text{ \AA}$  (ICDD # 01-075-8321), fase kristal albite merupakan bentuk mineral utama dari *sodium aluminum silicate* ( $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ ) yang memiliki sistem kristal anorthic dengan parameter kisi  $a = 8,1380 \text{ \AA}$ ,  $b =$

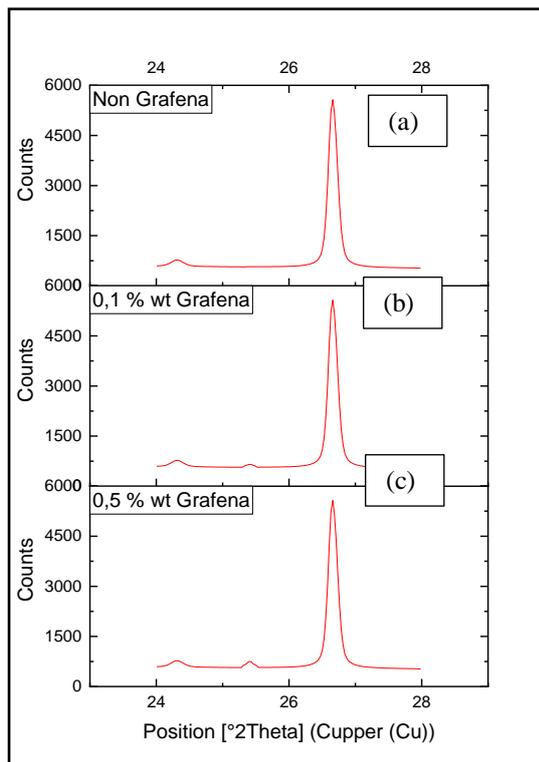
$12,7890 \text{ \AA}$  dan  $c = 7,1560 \text{ \AA}$  (ICDD # 01-076-1819). Sedangkan fase kristal dolomite merupakan bentuk mineral utama dari *calcium magnesium carbonate* ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) yang memiliki sistem kristal rhombohedral dengan parameter kisi  $a = 4,7950 \text{ \AA}$ ,  $b = 4,7950 \text{ \AA}$  dan  $c = 15,8700 \text{ \AA}$  (ICDD # 01-071-4892).



**Gambar 3.11** Pola XRD dari Mortar Geopolimer (a) 2:1 - Non Grafena (b) 2:1 - 0,1 %wt Grafena (c) 2:1 - 0,5 %wt Grafena

Gambar 3.11 menunjukkan bahwa secara umum penambahan grafena ke dalam matriks geopolimer tidak menyebabkan terbentuknya fase kristal lain selain fase quartz, albite, dan dolomite di dalam sampel mortar geopolimer berbasis *Palm Oil Fly Ash*-grafena (POFA-Grafena). Hal ini dikarenakan grafena yang bersifat inert sehingga penambahan grafena ke dalam matriks geopolimer tidak mempengaruhi reaksi geopolimerisasi dari *Palm Oil Fly Ash* (POFA) dan larutan alkali aktivator (Shamsaei dkk., 2018; Sheka, 2013; Guo dkk., 2017). Kehadiran grafena didalam matriks geopolimer berbasis *Palm*

*Oil Fly Ash*–grafena (POFA-Grafena) dapat dilihat pada Gambar 3.12.



**Gambar 3.12** Grafik Puncak Grafena pada Sampel Mortar Geopolimer Berbasis POFA-Grafena dengan Variasi Penambahan Grafena (a) 2:1 - Non-G (b) 2:1 - 0,1% wt G (c) 2:1 - 0,5% wt G

Gambar 3.12 menunjukkan grafik puncak grafena pada sampel mortar geopolimer berbasis *Palm Oil Fly Ash*–grafena (POFA-Grafena) dengan variasi rasio komposisi POFA/Pasir sebesar 2:1 dan variasi penambahan grafena sebesar 0; 0,1; dan 0,5 %wt. Pada Gambar 3.12 terlihat bahwa puncak difraksi grafena muncul pada sudut Bragg ( $2\theta$ ) dengan nilai  $25,4101^\circ$ , kemunculan puncak difraksi ini bersesuaian dengan kemunculan puncak difraksi *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk sampel grafena pada penelitian sebelumnya (Liu dkk., 2016). Selain itu, pada Gambar 3.12 juga terlihat bahwa intensitas puncak grafena meningkat dengan meningkatnya penambahan jumlah grafena ke dalam matriks geopolimer. Dimana pada penambahan grafena sebesar 0,1 dan 0,5%wt intensitas puncak grafena sebesar 651,8713 cts dan 751,9524 cts.

Ukuran kristal dari grafena di dalam sampel mortar geopolimer berbasis *Palm Oil Fly Ash*–grafena (POFA-Grafena) dapat dihitung menggunakan persamaan Scherrer sebagai berikut :

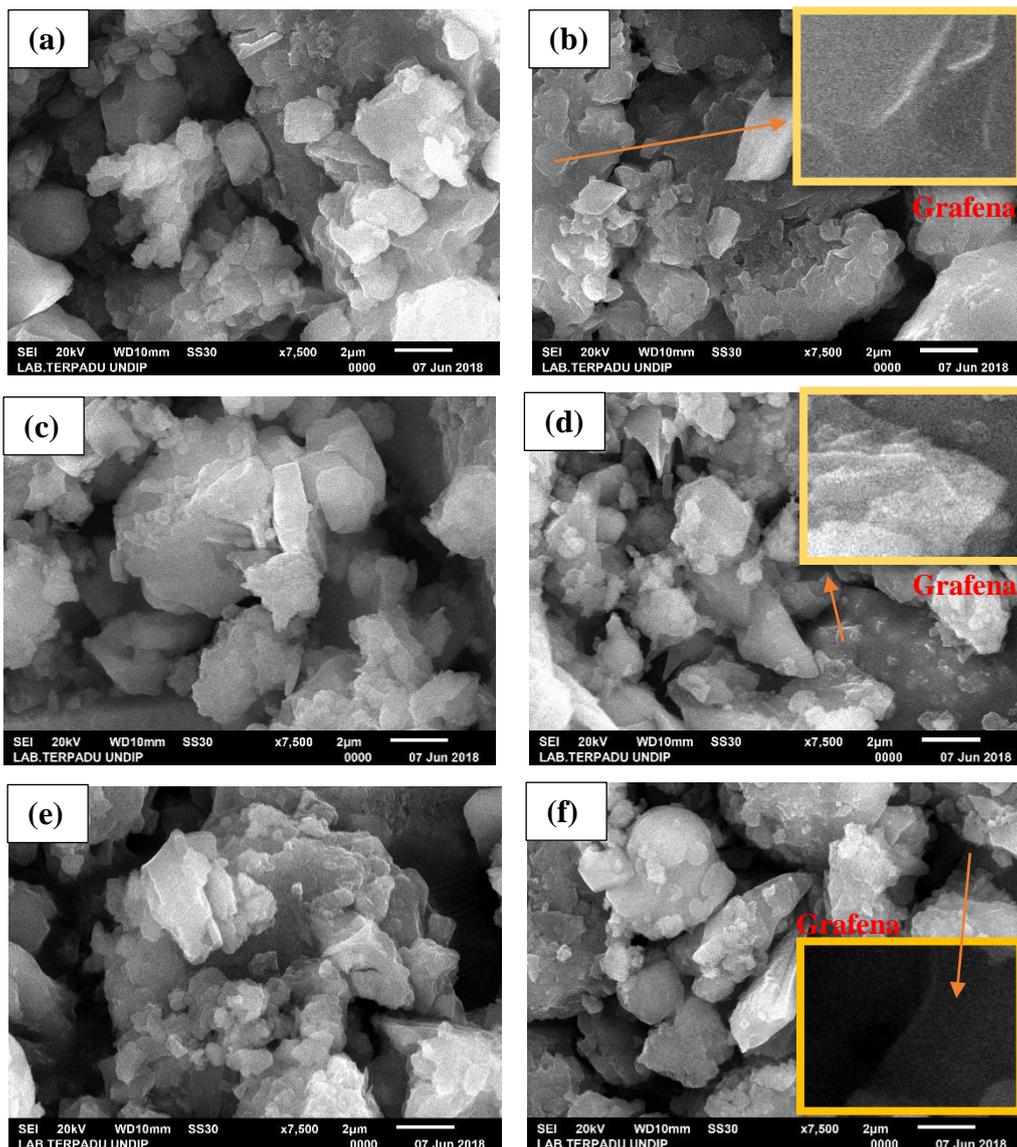
$$D \text{ (nm)} = \frac{K \lambda \text{ (nm)}}{B \text{ (rad)} \cos \theta} \dots\dots\dots (3.2)$$

Dimana ukuran kristal dinotasikan dengan simbol (D), nilai FWHM sebagai garis perluasan pada setengah dari insitas maksimum yang dinotasikan dengan simbol (B), nilai konstanta “shape factor” dinotasikan dengan simbol K (K = 0,9),  $\lambda$  adalah panjang gelombang yang digunakan dalam XRD ( $1,5406 \text{ \AA}$ ) serta sudut difraksi ( $2\theta$ ) dinotasikan dengan symbol ( $\theta$ ). Dari perhitungan menggunakan persamaan Scherrer di atas didapatkan ukuran kristal grafena pada penambahan grafena sebesar 0,1 dan 0,5%wt grafena ke dalam sampel mortar geopolimer berbasis Palm Oil Fly Ash–grafena (POFA-Grafena) adalah sebesar 48,3751 nm dan 50,2578 nm.

### 3.5 Analisa *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Gambar 3.13 menunjukkan bentuk struktur morfologi dari sampel mortar geopolimer berbasis *Palm Oil Fly Ash*–grafena (POFA-Grafena) dengan variasi rasio komposisi POFA/Pasir sebesar 1:0; 1:2; 2:1 dan variasi penambahan grafena sebesar 0 dan 0,5 %wt dengan menggunakan alat *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada perbesaran 7500 kali (INSTRUMENT JSM-6510).

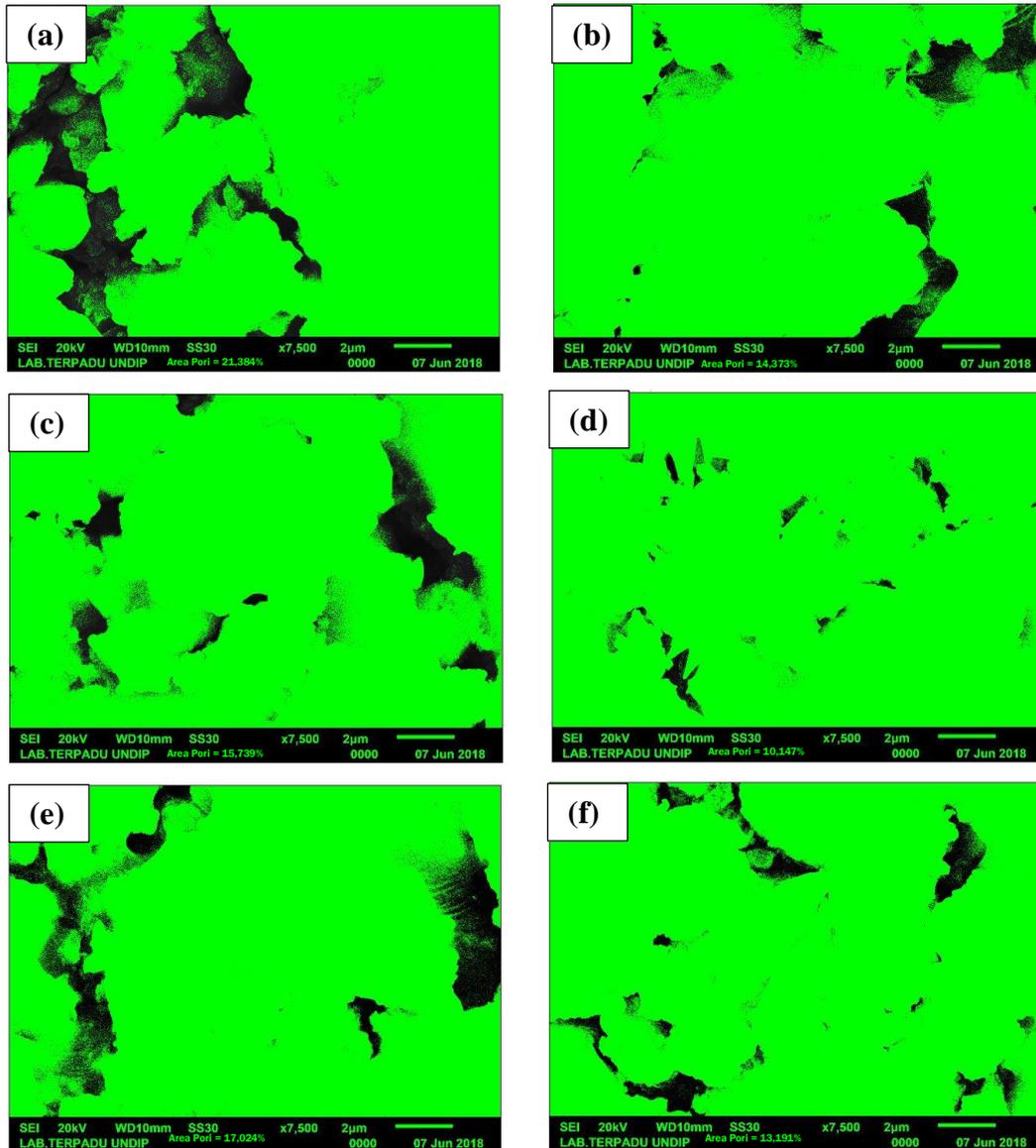
Pada Gambar 3.13 terlihat bahwa secara umum penambahan pasir ke dalam geopolimer dapat memberikan penurunan porositas dan peningkatan kepadatan dari struktur morfologi geopolimer, hal ini terlihat jelas pada Gambar 3.13 (a) (c) dan (e). Selain itu pada gambar 3.13 (b) (d) dan (f) terlihat bahwa penambahan grafena sebesar 0,5%wt untuk setiap variasi POFA/Pasir 1:0; 1:2; dan 2:1 menyebabkan munculnya lembaran-lembaran grafena di dalam matriks geopolimer yang juga dapat membantu menurunkan porositas dari struktur morfologi matriks geopolimer.



**Gambar 3.13** Hasil SEM dari Mortar Geopolimer berbasis POFA-Grafena (a) 1:0 Non-G (b) 1:0 0,5% wt G (c) 1:2 Non-G (d) 1:2 0,5% wt G (e) 2:1 Non-G (f) 2:1 0,5% wt G

Pada Gambar 3.13 yang merupakan hasil *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dari sampel mortar geopolimer hanya dapat memberikan informasi kualitatif tentang struktur morfologi dari sampel mortar geopolimer berbasis *Palm Oil Fly Ash*–grafena (POFA-Grafena). Oleh karena itu, untuk dapat memperoleh data kuantitatif mengenai pengaruh penambahan pasir dan grafena ke dalam matriks geopolimer terhadap porositas dan struktur pori dari

geopolimer pada gambar hasil analisa *Scanning Electron Microscopy* (SEM) di atas, maka digunakan aplikasi *ImageJ* (Versi 1.4.3.67 untuk Windows, 64 bit, *free software*, *National Institutes of Health*, Bethesda, MD, USA). Gambar 3.14 menunjukkan hasil pemetaan distribusi porositas dan struktur pori dari dari sampel mortar geopolimer berbasis *Palm Oil Fly Ash*– grafena (POFA-Grafena) dengan menggunakan bantuan aplikasi *ImageJ*.



**Gambar 3.14** Pemetaan Distribusi Porisitas dan Struktur Pori Hasil SEM dari Mortar Geopolimer berbasis POFA-Grafena (a) 1:0 Non-G (b) 1:0 0,5%wt G (c) 1:2 Non-G (d) 1:2 0,5%wt G (e) 2:1 Non-G (f) 2:1 0,5%wt G Menggunakan Aplikasi *ImageJ*

Pada Gambar 3.14 (a) (c) dan (e) terlihat bahwa terjadi penurunan distribusi porositas dan struktur pori dari sampel geopolimer berbasis POFA-grafena ketika dilakukan penambahan pasir, dimana dari hasil analisa pemetaan pori pada gambar *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dari sampel mortar geopolimer berbasis POFA-grafena dengan menggunakan aplikasi *ImageJ*, diperoleh persentasi area pori untuk sampel dengan variasi rasio POFA/Pasir sebesar 1:0; 1:2; dan 2:1 adalah 21,384%; 15,739%; dan 17,024%. Hasil yang diperoleh ini secara umum

memiliki kesesuaian dengan hasil yang diperoleh pada analisa porositas dari sampel mortar geopolimer berbasis POFA-Grafena dengan menggunakan standar ASTM C642 (2013). Terjadinya penurunan porositas ketika dilakukan penambahan pasir ke dalam geopolimer berbasis POFA-Grafena dikarenakan penambahan pasir berfungsi sebagai *filler* yang dapat mengisi ruang kosong pada geopolimer, mengurangi *drying shrinkage* dan meningkatkan kepadatan dari geopolimer yang dihasilkan (Guha dkk., 2016; Mastura

dkk., 2014; Prasanthi dan Sekhar, 2017; Rajeswaran dkk., 2016; Vinay dkk., 2016).

Sedangkan pengaruh penambahan grafena pada mortar geopolimer berbasis POFA-Grafena dapat terlihat jelas pada Gambar 3.14 (c) (d) dan (f), dimana penambahan grafena ke dalam matriks geopolimer dapat membantu mengurangi struktur pori pada sampel mortar geopolimer berbasis POFA-Grafena. Untuk setiap variasi rasio POFA/Pasir sebesar 1:0; 1:2; dan 2:1 ketika diberikan penambahan grafena sebesar 0,5%wt maka menyebabkan terjadinya penurunan persentase area pori menjadi 14,373%; 10,147%; dan 13,191%. Hasil yang diperoleh ini secara umum memiliki kesesuaian dengan hasil yang diperoleh pada analisa porositas dari sampel mortar geopolimer berbasis POFA-Grafena dengan menggunakan standar ASTM C642 (2013).

Penurunan porositas dari sampel mortar geopolimer berbasis POFA-Grafena ketika dilakukan penambahan grafena ke dalam mortar geopolimer dikarenakan ukuran nano yang dimiliki oleh grafena yang dapat dengan mudah mengisi pori dari matriks geopolimer, sehingga dapat menurunkan porositas dan meningkatkan kepadatan dari geopolimer berbasis POFA-Grafena (Bai dkk., 2018; Ranjbar dkk., 2015; Saafi dkk., 2014; S. Yan dkk., 2015; Wang dkk., 2016).

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kuat tekan tertinggi untuk mortar geopolimer berbahan dasar Palm Oil Fly Ash (POFA)-Grafena dihasilkan pada rasio POFA/Pasir sebesar 2:1 dan penambahan grafena sebesar 0,5%wt yaitu sebesar 16,4 MPa.
2. Peningkatan persentase penambahan berat grafena ke dalam matriks geopolimer akan meningkatkan kuat tekan dan menurunkan porositas dari mortar geopolimer yang dihasilkan.

3. Semakin besar penambahan pasir ke dalam mortar geopolimer akan meningkatkan densitas dan menurunkan porositas dari mortar geopolimer yang dihasilkan. Sedangkan kuat tekan tertinggi untuk mortar geopolimer dihasilkan pada rasio POFA/Pasir sebesar 2:1.
4. Penambahan grafena ke dalam matriks geopolimer tidak mempengaruhi reaksi geopolimerisasi dari *Palm Oil Fly Ash* (POFA) dan larutan alkali aktivator dikarenakan grafena yang bersifat inert.

#### Daftar Pustaka

- Aleem, M. I. A., dan Arumairaj, P. D. (2016). Pollution Free Geopolymer Concrete with M- Sand. *EM International*, (January 2013), 1–7.
- Bai, S., Jiang, L., Xu, N., Jin, M., & Jiang, S. (2018). Enhancement of Mechanical and Electrical Properties of Graphene/Cement Composite Due to Improved Dispersion of Graphene by Addition of Silica Fume. *Construction and Building Materials*, 164, 433–441.
- Bhowmick, A., dan Ghosh, S. (2012). Effect of Synthesizing Parameters on Workability and Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer Mortar. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 3(1), 168–177.
- Childres, I., Jauregui, L. A., Park, W., Cao, H., dan Chen, Y. P. (2013). Raman Spectroscopy of Grafena and Related Materials. edisi 1. halaman 20. Wiley New york.
- Guha, S., Dey, S., Sarkar, P., dan Routh, A. (2016). Effect of Sand to Fly Ash Ratio on The Hardened Properties of Geopolymer Mortar. *International Journal of Computational Research*, 06, 48–56.

- Guo, N., Yam, K. M., dan Zhang, C. (2017). Substrate Engineering of Graphene Reactivity: Towards High- Performance Graphene-Based Catalysts. *Nature*, (August), 1–6.
- Haque, S. (2017). *Behaviour of Fly Ash Geopolymer Containing Fillers and Fibres at Elevated Temperatures and its Application as Fire Resistant Coating for Timber*. halaman 1-182. Tesis. Curtin University.
- He, J. (2012). *Synthesis and Characterization of Geopolymers for Infrastructural Applications*. halaman 1-116. Tesis. Nottingham University.
- Hodkiewicz, J., dan Scientific, T. F. (2010). Characterizing Graphene with Raman Spectroscopy. *Thermo Scientific*, 50(3), 1-5.
- Irfanita, R., Ansar, A., Pratiwi, A. H., Jasruddin, dan Subaer. (2015). Pengaruh Suhu Sintering Terhadap Sintesis Silicon Carbide ( SiC ) Berbahan Dasar Abu Sekam Padi dan Grafit Pensil 2B. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 5(1), 31–38.
- Johra, F. T., Lee, J., dan Jung, W. (2014). Facile and Safe Graphene Preparation on Solution Based Platform *Journal of Industrial and Engineering Chemistry Facile and Safe Graphene Preparation on Solution Based Platform. Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5), 2883–2887.
- Li, Q., Zhang, X., Han, W., Lu, Y., Shi, W., Wu, J., dan Tan, P. (2015). Letter to the Editor Raman Spectroscopy at the Edges of Multilayer Graphene. *Carbon*, 5, 2–5.
- Li, X., Ma, X., Zhang, S., dan Zheng, E. (2013). Mechanical Properties and Microstructure of Class C Fly Ash-Based Geopolymer Paste and Mortar. *Materials*, 06, 1485–1495.
- Liu, H., Dong, M., Huang, W., Gao, J., Dai, K., Guo, J., Guo, Z. (2016). Lightweight Conductive Graphene/Thermoplastic Polyurethane Foams with Ultrahigh Compressibility for Piezoresistive Sensing. *Royal Society of Chemistry*, 10(1039), 1–29.
- Malard, L. M., Pimenta, M. A., Dresselhaus, G., dan Dresselhaus, M. S. (2009). Raman spectroscopy in Graphene. *Physics Reports*, 473(5–6), 51–87.
- Mastura, W., Mustafa, M., Sandu, A. V., Hussin, K., Sandu, I. G., Ismail, K. N., Binhussain, M. (2014). Processing and Characterization of Fly Ash-Based Geopolymer Bricks. *Elsevier*, (11), 1–6.
- Mu, M. N., Zeliæ, J., dan Joziæ, D. (2012). Microstructural Characteristics of Geopolymers Based on Alkali-Activated Fly Ash. *Chemical Engineering*, 26(2), 89–95.
- Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., dan Young, R. J. (2015). Graphene / Elastomer Nanocomposites. *Carbon*, 95, 460–484.
- Prasanthi, C., dan Sekhar, T. R. (2017). Experimental Study on Geopolymer Motor with Marble Powder Under High Temperature. *International Journal of Scientific Research in Science*, 3(3), 249–254.
- Rahman, M. M., Jiang, Z., Yin, C., Chuah, L. S., Lee, H., Amri, A., Dlugogorski, B. Z. (2016). Structural Thermal Stability of Graphene Oxide-Doped Copper – Cobalt Oxide Coatings as a Solar Selective Surface. *Journal of Materials Science & Technology*, 32(11), 1179–1191.
- Rajeswaran, P., Kumutha, D. R., dan Vijal, D. K. (2016). Compressive Strength of Ceramic Waste Based Geopolymeric Binder. *International Journal of Advanced Research*, 4(4), 657–663.
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Mehrali, M., Alengaram, U. J., dan Zamin, M. (2015). Graphene Nanoplatelet- Fly

- Ash Based Geopolymer Composites. *Cement and Concrete Research Journal*, 76, 222–231.
- Rogalski, J., Braun, K., Horneber, A., Berg, M. Van Den, Uihlein, J., Peisert, H., Zhang, D. (2016). STM Tip-Enhanced Raman Spectroscopy and The Investigation of Doped Graphene. *Vibrational Spectroscopy*, 30, 1–8.
- Saafi, M., Tang, L., Fung, J., dan Rahman, M. (2014). Graphene/Fly Ash Geopolymeric Composites as Self-Sensing Structural mMaterials. *Smart Materials and Structures*, 065006, 2–11.
- Shamsaei, E., Basquiroto, F., Souza, D., Yao, X., Benhelal, E., Akbari, A., dan Duan, W. (2018). Graphene-Based Nanosheets for Stronger and More Durable Concrete : A review. *Construction and Building Materials*, 183, 642–660.
- Sheka, E. F. (2013). Molecular Theory of Graphene Chemical Modification. *Cornell University Library*, 20(2014). 1–40.
- Varrla, E., Paton, Keith R., Backes, C., Harvey, A., Smith, R. J., McCauley, J., dan Coleman, J. N. (2014). Turbulence-assisted Shear Exfoliation of Graphene Using Household Detergent and a Kitchen Blender. *Nanoscale*, 10, 1–22.
- Vinay, B., Jain, K., Vijay, J. J., dan Ash, F. (2016). Investigation of the Behaviour of Geopolymer Mortar with Fly-Ash under High Temperature. *International Journal of Science and Research*, 5(9), Wall, M. (2011). The Raman Spectroscopy of Graphene and the Determination of Layer Thickness. *Thermo Scientific*, 50(13), 1-5.
- Wang, B., Jiang, R., dan Wu, Z. (2016). Investigation of The Mechanical Properties and Microstructure of Graphene Nanoplatelet-Cement Composite. *Nanomaterials*, 200, 2–15.
- Widjaja, H., Jiang, Z., Altarawneh, M., Yin, C., Goh, B.-M., Mondinos, N., Amri, A., Dlugogorski, B. Z. (2016). Double-sided F and Cl Adsorptions on Graphene at Various Atomic Ratios : Geometric, Orientation and Electronic Structure Aspects. *Applied Surface Science*, 373, 65–72.
- Yan, S., He, P., Jia, D., Yang, Z., Duan, X., Wang, S., dan Zhou, Y. (2015). In Situ Fabrication and Characterization of Graphene/Geopolymer Composites. *Ceramics Internationals*, 05, 1–28.
- Yan, Z., dan Barron, Andrew R. (2017). Characterization of Graphene by Raman Spectroscopy. *Raman. OpenStax*. 13(23), 1-4
- Zailani, W. W. A., Abdullah, M. M. A. B., Rozainy, M. R., Zainol, M. A., Razak, R. A., Faheem, M., dan Tahir, M. (2017). Compressive and Bonding Strength of Fly Ash Based Geopolymer Mortar. *Green Construction and Engineering Education for Sustainable Future*, 020058, 2–8.
- Zhang, Z. (2014). *The Effects of Physical and Chemical Properties of Fly ash on the Manufacture of Geopolymer Foam Concretes Zuhua Zhang*. halaman 1-243. Tesis. University of Southern Queensland.
- Zhong, J., Zhou, G., He, P., dan Yang, Z. (2017). 3D Printing Strong and Conductive Geo-polymer Nanocomposite Structures Modified by Graphene Oxide. *Carbon*, 117, 421–426.