

STUDI PENAMBAHAN *REDUCED GRAPHENE OXIDE* TERHADAP KONDUKTIVITAS LISTRIK DAN KUAT LENTUR GEOPOLIMER BERBASIS METAKAOLIN

*Study of Reduced Graphene Oxide addition on the Electrical
Conductivity and Flexural Strength of Metakaolin-based Geopolymer*

Elsy Rahimi Chaldun ^{a*)}, Andrie Harmaji^{b*)}, Nindya Kirana Prabaswari^{a*)}

Lina Nur Listiyowati ^{c**)}, Achmad Subhan^{d**)}, Syoni Soepriyanto^{b*)}

^{*)} Kontributor Utama ^{**)} Kontributor Anggota

^a Loka Penelitian Teknologi Bersih, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Bandung, Indonesia

^b Teknik Metalurgi, Institut Teknologi dan Sains Bandung, Cikarang, Indonesia

^c Pusat Penelitian Geoteknologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Bandung, Indonesia

^d Pusat Penelitian Fisika, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Bandung, Indonesia

Naskah masuk: 19 Maret 2020, Revisi: 28 April 2020, Diterima: 31 Mei 2020

ABSTRAK

*K*omposit geopolimer berpenguat *Reduced Graphene Oxide* (rGO) di sintesis melalui metode *Hummers*. Material ini merupakan opsi pengganti Graphene karena sifat rGO lebih mudah diproduksi dalam jumlah besar. Secara teori, rGO diharapkan dapat meningkatkan kuat lentur dan konduktivitas listrik dari geopolimer. Komposisi rGO yang digunakan bervariasi dari 0-1 wt%. Geopolimer beserta penyusunnya dikarakterisasi dengan uji *Three Point Bending*, EIS, SEM, FTIR, XRD, dan XRF. Geopolimer berbasis fly ash memiliki kuat lentur 5,2 MPa pada komposisi 0,5 wt% rGO, sedangkan geopolimer berbasis metakaolin dengan penambahan 0,25% rGO menghasilkan kuat lentur paling tinggi 5,53 MPa. Frekuensi 100.000 Hz cenderung memfasilitasi konduktivitas listrik yang lebih besar, pada geopolimer berbasis fly ash didapati konduktivitas listrik sebesar $5,08 \times 10^{-3}$ S/m, sedangkan untuk geopolimer berbasis metakaolin konduktivitas listriknya lebih tinggi yaitu $1,01 \times 10^{-1}$ S/m.

Kata Kunci: geopolimer, fly ash, metakaolin, rGO, kuat lentur, konduktivitas listrik

ABSTRACT

*G*eopolymer with reduced Graphene Oxide (rGO) composite obtained through *Hummers* method. This material is a substitute option for graphene because the nature of rGO is easier to produce in

large quantities. In theory, it is expected that rGO can increase the flexural strength and electrical conductivity of geopolymer. The rGO composition used varies from 0-1 wt%. Geopolymer and their constituents were characterized by the Three Point Bending, EIS, SEM, FTIR, XRD, and XRF tests. Fly ash-based geopolymers have a flexural strength of 5.2 MPa at a composition of 0.5 wt% rGO, while metakaolin-based geopolymers with an addition of 0.25% rGO produce the highest flexural strength of 5.53 MPa. A frequency of 100,000 Hz tends to facilitate greater electrical conductivity, on fly ash-based geopolymers found electrical conductivity of $5.08 \times 10^{-3} \text{ S / m}$, while for metakaolin-based geopolymers the electrical conductivity is higher ie $1.01 \times 10^{-1} \text{ S / m}$.

Keywords: geopolymer, fly ash, metakaolin, rGO, flexural strength, electrical conductivity

I. PENDAHULUAN

Geopolimer ditemukan oleh Joseph Davidovits pada tahun 1976 sebagai *alkali – activated binder*. Beragam material kaya aluminosilikat dapat dipergunakan sebagai prekursor geopolimer seperti metakaolin, *red mud*, dan *fly ash*. Kaolin adalah bahan dasar pertama yang dipakai dalam sintesis geopolimer. Indonesia memproduksi 15.000 ton kaolin per tahun, khususnya dari Pulau Bangka. Geopolimer berpenguat metakaolin umumnya dimanfaatkan dalam aplikasi konstruksi tahan api. *Fly ash* merupakan produk limbah hasil proses pembakaran batubara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Akumulasi limbah *fly ash* dan *bottom ash* di Indonesia rata – rata sebesar 10.886.400 setiap tahunnya

[1]. Sedangkan setiap harinya, PLTU Suralaya menghasilkan sekitar 1.750 ton *fly ash* [2]. Pada umumnya *fly ash* digunakan sebagai bahan campuran beton, bahan baku refraktori dan adsorben, namun pemanfaatan di Indonesia masih tergolong minim.

Geopolimer merupakan bahan alternatif *Portland Cement* dalam bidang struktural dilihat dari sifatnya yang lebih stabil, tahan korosi, penyusutan rendah, dan lebih ekonomis. Dibandingkan dengan *Portland Cement*, proses manufaktur geopolimer dapat mengurangi emisi karbon dioksida sebesar 45%, juga mengkonsumsi energi lebih rendah [3]. Geopolimer bersifat getas, dan kuat lenturnya dapat ditingkatkan melalui penggunaan filler, salah satunya adalah *Graphene Oxide* (GO)

yang memiliki struktur monolayer yang terdiri atas struktur grafit dengan gugus fungsi yang mengandung oksigen, seperti: karbonil, karboksil, dan hidroksil. Awalnya, *Graphene Oxide* diharapkan dapat menjadi prekursor sintesis graphene (material dengan resistansi mendekati nol) [4]. Bila direduksikan, sifat kelistrikan *Graphene Oxide* berubah dari isolator menjadi konduktor. Melalui penambahan *Reduced Graphene Oxide* (rGO) pada geopolimer, diprediksikan konduktivitas geopolimer naik agar dapat dimanfaatkan sebagai material untuk sensor, *electrical grounding*, proteksi katodik pada beton, perisai elektromagnetik pada pembangkit listrik atau menara telekomunikasi [5]. Geopolimer berpenguat rGO berpotensi digunakan sebagai pengganti beton pada struktur – struktur vital yang membutuhkan pemantauan sifat mekanik secara terus menerus seperti bendungan, struktur tambang, terowongan bawah tanah, dan *pipelines* [6]. Fungsi lain dari material ini adalah sebagai sensor mekanik internal (*self – sensing*) yang otomatis mengukur perubahan regangan struktur melalui resistansi listrik (piezoresistivitas).

Bila material ini berfungsi dengan baik, tidak diperlukan lagi pemasangan sensor eksternal pada titik – titik tertentu bangunan. Sehingga, keseluruhan area struktur dapat terpantau dengan baik.

Penelitian yang sudah dilakukan menggunakan lembaran rGO sebagai *filler* (dengan konsentrasi 0; 0,1; dan 0,35 wt%) pada geopolimer menghasilkan kuat lentur tertinggi didapat pada komposit dengan rGO 0,35 wt% [7]. Konduktivitas elektrik berbanding lurus dengan peningkatan konsentrasi rGO. *Gauge factor* saat pembebanan tarik dan tekan juga meningkat, hal ini dipengaruhi oleh kontak antara lembaran rGO di dalam matrika. *Filler* 2 dimensi seperti lembaran rGO, memiliki daerah kontak yang lebih besar dibandingkan *filler* 1 dimensi seperti serat karbon atau *carbon nanotubes*, sehingga sifat kelistrikan yang diakibatkan oleh *strain sensitivity* juga lebih baik [8]. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh dari serbuk rGO terhadap karakteristik mekanik dan kelistrikan geopolimer. Geopolimer yang umumnya getas dan bersifat sebagai isolator, dapat dimanfaatkan sebagai material struktural yang konduktif. Diharapkan

dari hasil yang diperoleh, penerapan rGO – geopolimer sebagai sensor mekanik dapat diteliti lebih lanjut.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Prosedur penelitian ini terbagi menjadi dua, yakni sintesis *Graphene Oxide* dan pembuatan geopolimer. Sintesis *Graphene Oxide* menggunakan metode *Hummers*. Tabel 1 mendeskripsikan ketentuan desain campuran sampel FA – Geopolimer dan MK – Geopolimer. Untuk FA – Geopolimer rasio prekursor berbanding aktivator adalah 2:1, sedangkan untuk MK – Geopolimer rasionya adalah 1:1,7. Larutan *Graphene Oxide* disonikasi dengan NaOH selama 1 jam untuk memperoleh rGO (*reduced Graphene Oxide*). Selanjutnya, campuran tersebut diaduk dengan prekursor dan aktivator lalu dicor ke dalam cetakan untuk membuat sampel geopolimer. Kandungan oksida *fly ash* dan metakaolin didapatkan melalui metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) ditunjukkan pada Tabel 2.

Pengujian sampel geopolimer mengacu pada ukuran uji *Three Point Bending* menurut ASTM C293M -16.

Tabel 1 Desain campuran sampel geopolimer

Kode Sampel	Prekursor (%)	Aktivator (%)	rGO (%)
FA Control	67,00	33,00	0
FA 0,25rGO	67,00	33,00	0,113
FA 0,50rGO	67,00	33,00	0,225
FA 0,75rGO	67,00	33,00	0,338
FA 1rGO	67,00	33,00	0,450
MK Control	37,00	73,00	0
MK 0,25rGO	37,00	73,00	0,055
MK 0,50rGO	37,00	73,00	0,113
MK 0,75rGO	37,00	73,00	0,225
MK 1rGO	37,00	73,00	0,338

Tabel 2 Kandungan oksida *fly ash* dan metakaolin

Komponen Kimia	Fly ash (%)	Metakaolin (%)
Al ₂ O ₃	26,57	33,00
SiO ₂	52,30	65,00
Fe ₂ O ₃	7,28	0,56
SO ₃	0,70	-
Na ₂ O	1,41	0,06
CaO	6,00	0,08
TiO ₂	3,13	0,65
K ₂ O	2,58	0,65

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Visual Sampel

Gambar 1 menunjukkan hasil sampel yang disintesis. Sampel FA – Geopolimer berwarna kehitaman,

sedangkan sampel MK - Geopolimer berwarna putih yang cenderung bertambah kehitaman seiring dengan meningkatnya penambahan rGO.

Komposisi Fe_2O_3 pada *fly ash* menurut uji XRF mencapai 7,28 %wt, sedangkan Fe_2O_3 pada Metakaolin sekitar 0,56 wt%. FA – Geopolimer dan MK – Geopolimer memiliki perbedaan warna yang signifikan. Bidang atas sampel FA – Geopolimer juga memiliki corak hitam gelap pada bagian tengah, corak tersebut merupakan sisa batubara yang tidak terbakar.

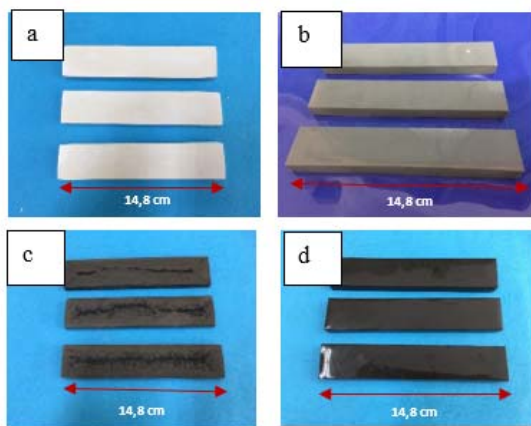
Permukaan sampel yang cenderung mengkilat diakibatkan oleh proses *moist curing*. Pada proses ini, geopolimer kian terhidrasi karena proses curing terjadi pada kontainer tertutup, oleh karena itu kehilangan air dapat dihindari. Beberapa penelitian telah mengkaji pentingnya retensi air dalam proses geopolimerisasi pada geopolimer berbasis *fly ash* dan metakaolin. Air dibutuhkan selama proses penguraian ikatan komponen penyusun saat proses pembentukan geopolimer. Air lalu dihasilkan selama proses hidrolisis, polimerisasi, dan kondensasi [9]. Pada beberapa sampel seperti sampel MK 0,75 rGO dan FA 1 rGO, air berikatan dengan

ion alkali Na^+ melalui kapilerisasi lalu mengangkat Na^+ ke permukaan. Alkali ion tersebut bereaksi dengan CO_2 pada lingkungan lalu membentuk natrium hidrat karbonat ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaHCO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Proses ini dinamakan *efflorescence* dan umumnya terjadi apabila adanya kation natrium yang tidak bereaksi. Pada umumnya *efflorescence* juga meninggalkan ciri porositas yang tinggi pada material.

Senyawa *efflorescence* berwarna putih yakni natrium karbonat heptahidrat ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) terkristalisasi dari dalam porositas tersebut dan tumbuh pada permukaan sampel [10]. Semakin lama proses pencetakan (lebih dari 2 hari), semakin banyak pula senyawa natrium karbonat heptahidrat yang terbentuk.

Bila pertumbuhan natrium karbonat heptahidrat pada kedua jenis prekursor dikomparasikan, MK – Geopolimer menunjukkan sedikit lebih banyak corak $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ pada permukaan sampel dibandingkan dengan FA – Geopolimer. Hasil uji XRF (Tabel 2) merefleksikan nilai senyawa SiO_2 pada metakaolin (65%) yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang terkandung pada *fly ash*

(52,3%). Karena sintesis geopolimer memerlukan Na_2SiO_3 sebagai aktivator, maka yang mungkin terjadi adalah munculnya kelebihan SiO_2 pada campuran MK – Geopolimer sehingga saat proses geopolimerisasi ion Na^+ cenderung tersingkir lalu berikatan dengan CO_2 dari udara untuk membentuk $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ [10].



Gambar 1. Geopolimer yang telah disintesis (a) MK Control; (b) MK 1rGO; (c) FA Control; (d) FA 1rGO

3.2 Analisis Mikrostruktur Geopolimer

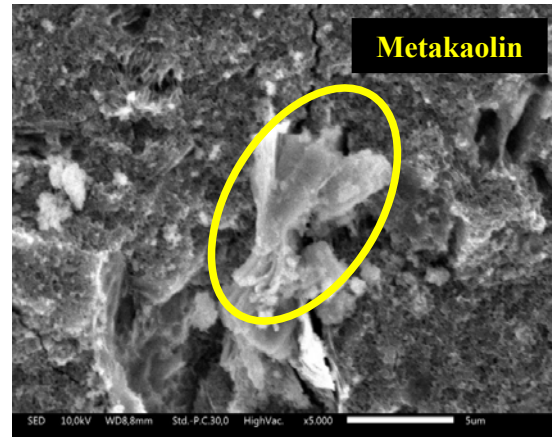
Gambar 2 dan 3 menunjukkan hasil SEM Geopolimer. Hasil SEM komponen penyusun Geopolimer menunjukkan bahwa *fly ash* yang berasal dari PLTU Suralaya memiliki mikrostruktur berbentuk bulat sempurna, sedangkan metakaolin memiliki bentuk serpih (*flakes*). Pada

sampel FA - Geopolimer, *fly ash* yang bereaksi dengan baik akan menyatu dengan komponen lainnya untuk membentuk jaringan matriks Geopolimer $\text{M}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$, sedangkan *fly ash* yang kurang bereaksi dengan baik dapat jelas terlihat dari bentuk bulatnya yang tetap utuh [11].

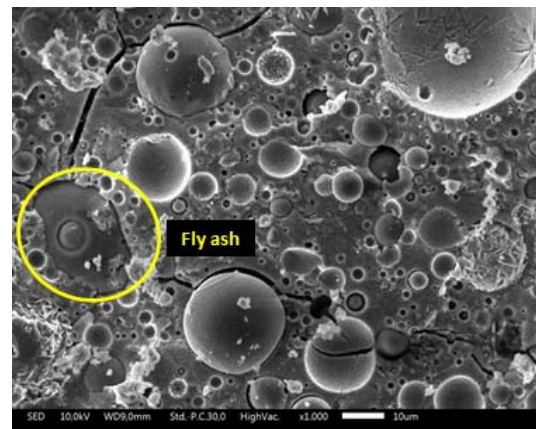
Melalui pencitraan SEM penampang patahan, FA - Geopolimer dipenuhi oleh kawah – kawah berukuran diameter *Fly ash* yang digunakan (300 nm – 7000 nm). Saat proses reorientasi berlangsung, *Fly ash* meninggalkan posisi semula untuk bereaksi dengan aktivator sebelum melalui proses pengerasan, sehingga meninggalkan pola kawah pada permukaan. Beberapa pola retakan juga dapat terlihat melewati kawah – kawah tersebut. Selain porositas, kawah merupakan tempat inisiasi retak. Bila sampel FA Geopolimer + rGO dengan sampel FA Control dibandingkan, sampel FA Control memiliki kawah yang jauh lebih sedikit.

Cacat yang terlihat pada mikrostruktur hanya pola retakan, meskipun porositas tetap terlihat pada makrostruktur. Lain halnya dengan

sampel MK – Geopolimer, penampang sampel MK - Geopolimer tidak dihiasi dengan kawah. Porositas mikro juga cenderung lebih kecil dan beberapa berbentuk sedikit memanjang. Metakaolin yang tidak bereaksi dapat terlihat dari wujud awalnya yang berupa *flakes* diantara matrix Geopolimer. Saafi, Liggat, dan Zhou (2014) menggunakan SEM untuk meneliti efek lembaran rGO pada Geopolimer. Lembaran rGO dapat menutupi lubang – lubang di dalam struktur karena luas penampangnya, kekakuan, dan wujudnya yang berkerut. Kerutan ini dapat meningkatkan transfer beban antara rGO dengan matriks. Di lain pihak, rGO yang dipakai pada penelitian penulis kali ini menggunakan rGO berbentuk serbuk, sehingga dibutuhkannya pengujian dengan *Transmission Electron Microscope* (TEM) untuk melihat secara jelas efek rGO pada mikrostruktur. Perbesaran SEM hingga 30.000x kurang cukup untuk mengidentifikasi rGO di dalam Geopolimer. Dari data yang tersedia, rGO kurang mampu menutupi porositas pada matriks, tidak sebaik pada penelitian Saafi dkk.



Gambar 2 Pencitraan SEM pada MK 0,75rGO 5000x

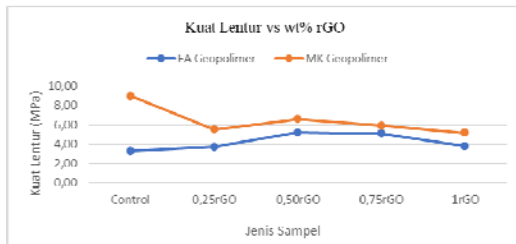


Gambar 3 Pencitraan SEM pada FA 0,50rGO 1000x

3.3 Analisa Kuat Lentur Geopolimer

Hasil dari *Three Point Bending* (Gambar 4) memperlihatkan bahwa untuk FA – Geopolimer, tren kuat lentur naik hingga 5,2 MPa (FA 0,50rGO) lalu turun seiring dengan penambahan rGO. Hingga konsentrasi 0,5 %wt, rGO dapat membantu menghambat propagasi retakan pada struktur. Penurunan kuat

lentur mungkin disebabkan oleh dispersi filler yang kurang merata sehingga memicu timbulnya aglomerasi [12]. Pada konsentrasi rGO yang tinggi, partikel rGO cenderung berikatan satu sama lainnya lalu membentuk aglomerasi yang diakibatkan oleh gaya Van der Waals [13].



Gambar 4. Kuat Lentur vs wt% rGO

Salah satu solusi dari distribusi yang tidak merata adalah dengan melapisi filler. Bi (2017) melapisi filler CNT dengan coating SiO₂ dan menyimpulkan bahwa coating SiO₂ sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik Geopolimer [9]. *Flexural gauge factor* naik hingga 724,6, paling tidak dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan dengan studi lainnya. Coating SiO₂ 0,25% terbukti efektif dalam memastikan dispersi yang lebih baik.

Menurut Zhang dan Lu (2017) mempelajari pengaruh % Graphene terhadap kuat tekan dan kuat lentur MK – Geopolimer, dimana kuat

lentur cenderung naik bersamaan dengan penambahan graphene, dengan nilai tertinggi 5,3 MPa pada 4% graphene [7]. Hal ini bertolak belakang dengan hasil penelitian penulis. Secara umum, penambahan rGO justru menurunkan kuat lentur MK – Geopolimer. Nilai kuat lentur paling besar justru diperoleh dari MK Control (8,98 MPa) pada penelitian penulis. Sedikit anomali terlihat pada MK 0,25 rGO, nilai kuat lenturnya (5,54 MPa) tergolong sedikit melenceng dari tren kuat lentur keseluruhan. Nilai 5,54 MPa merupakan rerata dari sampel jenis triplo, namun salah satu dari sampel tersebut kuat lentur H-28 nya mencapai 7,05 MPa. Bila nilai ini dipakai, maka pola kuat lentur keseluruhan MK – Geopolimer di penelitian ini konsisten turun. Alasan dari diskrepansi kedua penelitian bisa bersumber dari jenis metakaolin yang dipakai. Zhang dan Lu (2017) menggunakan metakaolin yang bersumber dari Provinsi Guangdong, Cina, sedangkan bahan baku kaolin yang digunakan pada penelitian penulis merupakan kaolin lokal [7].

Ada kemungkinan bahwa molaritas NaOH (12 M) yang dipakai

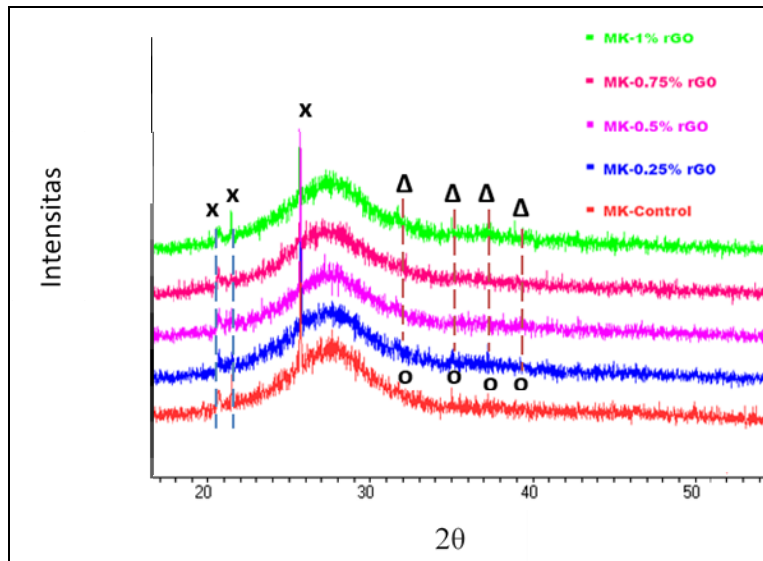
penulis kurang sesuai untuk menjadi aktivator dari metakaolin lokal, akibatnya alih – alih memberikan efek penguatan, rGO justru semakin menghambat proses geopolimerisasi antara prekursor dan aktivator yang berkompatibilitas rendah ini. MK – Geopolimer mempunyai kuat lentur yang secara umum lebih besar dibandingkan dengan FA – Geopolimer. Pada penelitian ini, salah satu sampel MK Control kuat lenturnya mencapai 12.11 MPa, sedangkan nilai kuat lentur maksimum sampel FA – Geopolimer terdapat pada salah satu sampel FA 0,50rGO (5,4 MPa). Hal ini kemungkinan bersumber dari kestabilan jenis senyawa yang terbentuk, seperti yang dikorelasikan oleh hasil uji XRF (Tabel 2).

Metakaolin memiliki kandungan Al_2O_3 (33%) dan SiO_2 (65%) yang lebih tinggi dibandingkan dengan *fly ash* (26,57% dan 52,30%). Metakaolin memiliki wt% CaO lebih rendah (0,08%) dibandingkan dengan *fly ash* (6%). CaO yang tinggi pada *fly ash* memicu perkembangan mineral anortit. Di lain pihak kaolin umumnya bersumber dari mineral albit. Bila mengacu pada reaksi *Bowen*, albit

memiliki kestabilan yang lebih baik. Hal ini yang mungkin mempengaruhi kekuatan mekanik metakaolin. anorthit dan albit merupakan jenis batuan plagioklas, perbedaannya anorthit kaya akan ion kalsium, sedangkan albit plagioklas kaya akan natrium. Menurut reaksi *Bowen* yang menggambarkan alur pembentukan dan pengendapan mineral pada proses pendinginan magma, anortit dan albit termasuk dalam seri kontinyu [13]. Apabila reaksi setimbang, maka kristalisasi akan berjalan terus menerus. Pembentukan plagioklas dimulai dari anorthit yang kurang stabil, sehingga mudah berubah menjadi mineral lain. Albit muncul setelah beberapa transformasi selanjutnya. Dalam bagan reaksi *Bowen*, batuan yang posisinya berada di bawah memiliki kestabilan yang lebih tinggi. Hasil difraktogram pada Gambar 5 dan 6 memperlihatkan perbandingan antar FA – Geopolimer dan MK – Geopolimer dengan/tanpa penambahan rGO. Simbol x menandakan fasa SiO_2 , simbol o merepresentasikan senyawa anorthit (pada FA – Geopolimer) atau Albit (pada MK – Geopolimer), sedangkan simbol Δ mewakili senyawa

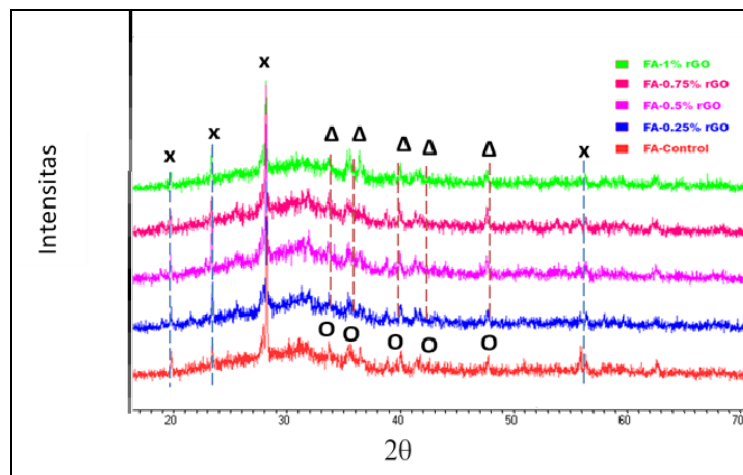
NaAl₂Si₄O₉7 (C8H16). Fasa SiO₂ pada geopolimer yang telah terbentuk adalah fasa tridimit [JCPDS 140260]. Pada proses geopolimerisasi, muncullah puncak-puncak baru yang

merupakan senyawa anortit CaAlSiO [JCPDS 411481]. Spektrum XRD menjadi lebih amorf, karena prekursor telah berikatan dengan aktivator [14].



Gambar 5 Difraktogram MK-Geopolimer

(keterangan : x = SiO₂; o = Anorthite; Δ = NaAl₂Si₄O₉7(C₈H₁₆))



Gambar 6 Difraktogram FA-Geopolimer

(keterangan : x = SiO₂; o = Albite; Δ = NaAl₂Si₄O₉7(C₈H₁₆))

Penambahan rGO fasa albit berubah menjadi senyawa kompleks $\text{NaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_9$ (C_8H_{16}) [JCPDS 460749]. Merujuk dari tabel komposisi senyawa geopolimer hasil XRD, proses geopolimerisasi tergolong sukses dilihat dari komposisi senyawa anorthit dan $\text{NaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_9$ (C_8H_{16}) yang persentasenya jauh lebih tinggi dibandingkan fasa SiO_2 .

Hasil XRD yang mengulas komposisi senyawa FA – Geopolimer mengindikasikan bahwa FA 0,50rGO memiliki fasa $\text{NaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_9$ (C_8H_{16}) tertinggi dibandingkan variansi FA – Geopolimer lainnya. Hal ini serupa dengan pola kuat lentur FA – Geopolimer pada gambar 4 yang berarti penambahan rGO hingga batas tertentu menghasilkan efek yang positif pada kuat lentur melalui pembentukan senyawa $\text{NaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_9$ (C_8H_{16}). Berbanding terbalik dengan puncak fasa $\text{NaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_9$ (C_8H_{16}) yang menjadi semakin tegas pada komposisi 0,50 wt% rGO, puncak fasa SiO_2 terlihat menurun intensitasnya. Secara umum difraktogram MK – Geopolimer pada Gambar 5 mengarah ke struktur yang lebih amorf dibandingkan dengan difraktogram FA – Geopolimer (Gambar 6). Ada kemungkinan bahwa

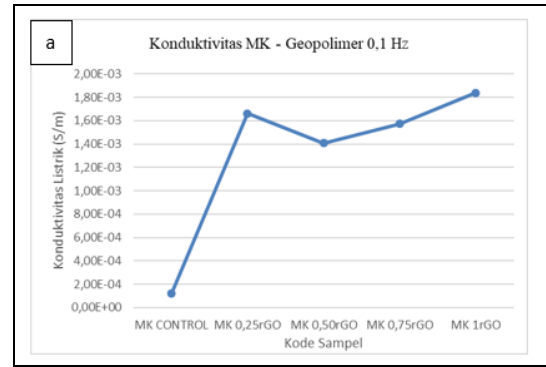
aspek tersebut juga merupakan penyebab mengapa MK – Geopolimer memiliki sifat mekanik yang lebih baik.

3.4 Pengaruh Frekuensi terhadap Konduktivitas Elektrik

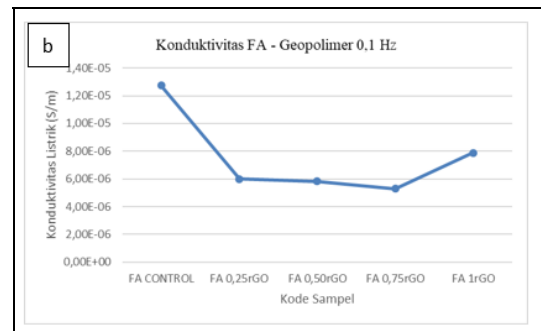
Untuk mempelajari karakter wt% rGO terhadap konduktivitas elektrik, dua frekuensi ekstrim dipilih (0,1 Hz dan 100 kHz). Pengujian pada frekuensi tinggi dapat berguna untuk meneliti potensi geopolimer pada aplikasi sensing seperti pada *smart concrete*, sedangkan frekuensi rendah cocok untuk aplikasi penyimpanan energi [15]. Pengaruh positif rGO pada konduktivitas elektrik FA – Geopolimer lebih terlihat jelas pada frekuensi tinggi. Semakin rendahnya frekuensi, tidak ditemukannya pola konduktivitas yang konsisten dengan meningkatnya konsentrasi rGO [16]. Pola konduktivitas elektrik pada MK-Geopolimer secara keseluruhan memiliki rentang frekuensi terlihat cukup seragam, mengikuti pola pada Gambar 7. Nilai konduktivitas elektrik FA – Geopolimer ($10^{-6} - 10^{-3}$ S/m) dan MK – Geopolimer ($10^{-4} - 10^{-1}$ S/m) pada penelitian ini termasuk pada rentang semikonduktor ($10^{-8} - 10^2$ S/m). Terkadang nilai konduktivitas elektrik memiliki karakter yang

bertolak belakang dengan sifat mekanik. Dalam kasus ini terutama diilustrasikan pada gambar 8 yang mendemonstrasikan konduktivitas elektrik di frekuensi rendah (0,1 Hz). MK – Geopolimer yang mempunyai tren kuat lentur menurun (gambar 4), konduktivitas elektriknya justru meningkat seiring penambahan rGO. Di lain pihak, pada frekuensi rendah pola konduktivitas elektrik FA - Geopolimer turun kemudian kembali naik pada komposisi 1 wt% rGO. Kedua pola konduktivitas elektrik pada prekursor berbeda tersebut berbanding terbalik dengan tren kuat lentur masing – masing material.

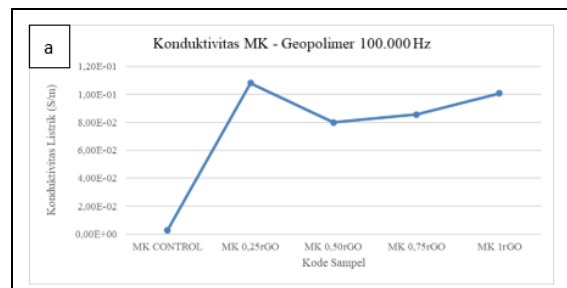
Perlakuan yang bermanfaat untuk meningkatkan kekuatan mekanik material seperti penambahan presipitasi, pemanasan, dan lain lain terkadang berakibat pada perubahan distribusi elektron antar atom pada struktur, sehingga konduktivitas elektrik dapat terkompromisasi oleh proses – proses penguatan tersebut. Berbeda halnya dengan konduktivitas elektrik pada frekuensi tinggi (100.000 Hz). Frekuensi tinggi (Gambar 9 dan 10) cenderung dapat memacu mobilitas elektron yang lebih cepat sehingga mendorong nilai konduktivitas elektrik yang lebih besar seiring dengan penambahan rGO pada FA - Geopolimer ($5,08 \times 10^{-3}$ S/m) dan MK – Geopolimer ($1,01 \times 10^{-1}$ S/m).



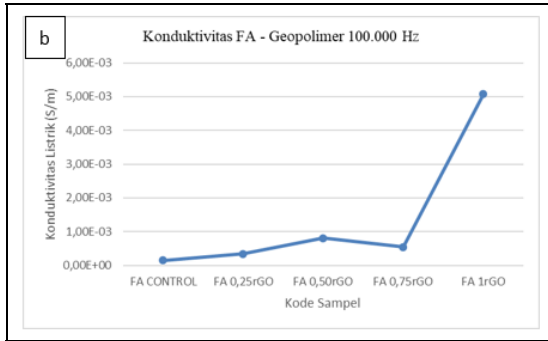
Gambar 7 Konduktivitas elektrik pada frekuensi 0,1 Hz pada MK-Geopolimer



Gambar 8 Konduktivitas elektrik pada frekuensi 0,1 Hz pada FA-Geopolimer



Gambar 9 Konduktivitas elektrik pada frekuensi 100.000 Hz pada MK-Geopolimer



Gambar 10 Konduktivitas elektrik pada frekuensi 100.000 Hz pada FA-Geopolimer

3.5 Pengaruh Tingkat Reduksi GO terhadap Konduktivitas Elektrik

Mekanisme konduktivitas ionik pada geopolimer tanpa penguat adalah perpindahan ion (Na^+) melalui situs kation. Sumber dari ion Na^+ adalah alkali aktivator. Menurut penelitian yang dilakukan Saafi, Piukovics, dan Ye (2016), konduktivitas ionik Geopolimer berbasis *fly ash* tak berpenguat adalah sekitar $1,54 \times 10^{-2}$ S/m). Selain ion *hopping*, salah satu mode konduktivitas adalah perpindahan elektron bebas. Berbeda dengan GO yang merupakan insulator dengan konduktivitas elektrik senilai $4,57 \times 10^{-5}$ S/m [13] bila tereduksi dengan baik struktur rGO mengakomodasi perpindahan elektron karena gugus fungsi seperti hidroksil (O-H) dan karbonil (C=O) yang semula ada pada GO telah dihilangkan/dikurangi. rGO

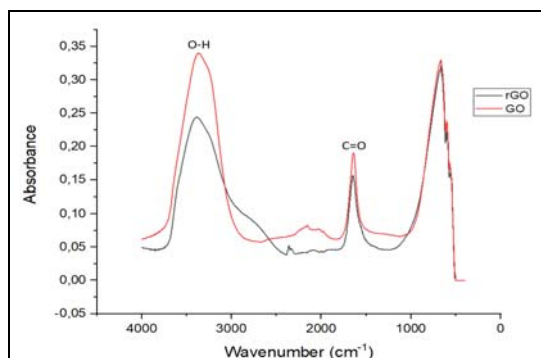
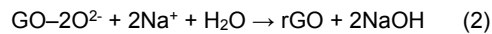
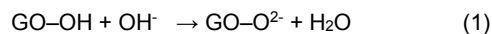
sebagai filler akan membentuk jaringan konduktif 3D di dalam struktur mempermudah mobilitas elektron.

Menurut literatur, konduktivitas elektrik rGO berkisar dari $4,21 \times 10^{-2}$ S/m hingga 666,7 S/m [13]. Efektivitas rGO sebagai konduktor dipengaruhi oleh kesuksesan proses pereduksian GO. Metode pereduksian GO pada penelitian ini mengacu pada penelitian Saafi, Liggat, dan Zhou (2014). Pada penelitian tersebut, terlihat penurunan absorbansi gugus O-H yang semula 0,7 menjadi 0,1 setelah GO disonikasi dengan NaOH 10 M selama 1 jam. Pada penelitian penulis, penurunan puncak absorbansi O-H hanya sedikit, yaitu dari 0,35 menjadi 0,25 (Gambar 11). Selain O-H, puncak lainnya relatif serupa dengan spektrum GO awal. Hal ini mengindikasikan proses pereduksian GO yang kurang efektif. Kemungkinan hal ini disebabkan oleh molaritas NaOH pada penelitian penulis yang terlalu besar (12 M) dibandingkan dengan referensi (10 M) yang berdampak pada larutan yang terlalu basa.

Chen (2014) mengajukan teori simulasi pereduksian GO dengan NaOH sebagai reduktor. Proses yang terjadi sebagai berikut: ion OH^- dari aktivator bereaksi dengan hidroksil

pada GO, kemudian transfer elektron terjadi dari anion OH⁻ ke lembaran GO menjadi bermuatan negatif dan secara bersamaan menghasilkan molekul air (persamaan 1). Proses transfer elektron ini mengurangi energi yang diperlukan untuk membuka ikatan epoksi di permukaan struktur GO. Kation Na⁺ tertarik pada GO yang bermuatan negatif, kemudian dengan bantuan air keduanya mereduksi GO (persamaan 2).

NaOH berperan sebagai katalis, dan reaksi ini biasanya meninggalkan cacat, yang diakibatkan oleh beberapa epoksi yang berdifusi pada lembaran GO.



Gambar 11 Spektrum ATR-FTIR GO dan rGO

IV. KESIMPULAN

Geopolimer berbasis *fly ash* memiliki tren kuat lentur naik hingga

konsentrasi 0,5 wt% rGO (5,2 MPa) kemudian cenderung menurun, sedangkan pada geopolimer berbasis metakaolin, secara umum kuat lentur turun seiring dengan penambahan rGO, kuat lentur paling tinggi dimiliki oleh MK Control (8,98 MPa). Pada frekuensi rendah (0,1 Hz), konduktivitas listrik FA Geopolimer berkurang dengan bertambahnya rGO. Pada frekuensi tinggi (100 kHz) konduktivitas cenderung naik, dengan nilai tertinggi $5,08 \times 10^{-3}$ S/m. Untuk MK Geopolimer, pada frekuensi rendah (0,1 Hz) konduktivitas listrik meningkat dengan penambahan rGO. Tren naik juga terjadi pada frekuensi tinggi (100kHz) dengan konduktivitas tertinggi sebesar $1,01 \times 10^{-1}$. Frekuensi tinggi memicu mobilitas elektron yang lebih cepat sehingga konduktivitas listrik cenderung lebih besar. Nilai konduktivitas listrik FA – Geopolimer ($10^{-6} - 10^{-3}$ S/m) dan MK – Geopolimer ($10^{-4} - 10^{-1}$ S/m) pada penelitian ini terdapat pada rentang semikonduktor ($10^{-8} - 10^2$ S/m). Bila mempertimbangkan hasil kuat lentur dan konduktivitas elektrik (pada 100 kHz), sampel FA 0,50rGO merupakan sampel FA – Geopolimer dengan performa terbaik (kuat lentur tertinggi, konduktivitas elektrik kedua tertinggi). MK – Geopolimer memiliki kuat lentur

dan konduktivitas elektrik berbanding terbalik sehingga sulit untuk berkompromi demi menentukan sampel terbaik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini disponsori oleh Lembaga Ilmu Penelitian Indonesia. Sebagian besar pengujian dan karakterisasi dilaksanakan di Loka Penelitian Teknologi Bersih, LIPI Bandung. Sedangkan uji Electrochemical Impedance Spectroscopy dilakukan di Pusat Penelitian Fisika, LIPI Serpong.

DAFTAR PUSTAKA

1. Payakaniti P, Pinitsoontorn S, Thongbai P, Amornkitbamrung V, and Chindaprasirt P, "Electrical conductivity and compressive strength of carbon fiber reinforced flyash geopolymeric composite", *Construction and Building Materials* 135:164-176 (2017).
2. Niroshkumar K, Sundaraja M, and Marx Ldamage, "Detection in fly-ash based geopolymer concrete using surface bonded Piezoelectric sensors", *International Research Journal of Engineering and Technology* 05: 429 (2018).
3. Kim Y-J, Cha J Y, Ham H, Huh H, So D, and Kang I, "Preparation of piezoresistive nano smart hybrid material based on graphene current", *Appl. Phys.* 11: S350–2 (2011).
4. Lee S, Riessen A, and Chon C," Benefits of Sealed-Curing on Compressive Strength of Fly ash-Based Geopolymers", *Materials* 9(7): 598 (2016).
5. Lach M, Mikula J, and Korniejenko K, "The Effect of Additives on the Properties of Metakaolin and Fly ash Based Geopolymers", *Matec Web of Conferences* 163:06005 (2018).
6. Saafi M, Liggat J, and Zhou X, "Graphene/Flyash Geopolymeric Composites As Self Sensing Structural Materials", *Smart Materials and Structures*, Volume 23, Number 6 , IOP Publishing (2014).
7. Zhang G and Lu J, "Experimental Research on The Mechanical Properties Of Graphene Geopolymer", *AIP Advances* 8(6):065209 (2018).
8. Zhong J, Zhou G, He P, Yang Z, and Jia D, "3D Printing Strong and Conductive Geo-polymer Nanocomposite Structures

- Modified by Graphene Oxide”, Carbon Volume 117, pages 421-426 (2017).
9. Bi S, Liu M, Shen J, Hu X, and Zhang L, “Ultra-high Self-Sensing Performance of Geopolymer Nanocomposites via Unique Interface Engineering”, ACS Appl. Mater. Interfaces. 9 (14): 12851-12858 (2017).
 10. Haldar S, “Introduction to Mineralogy and Petrology”, 1st Ed, Australia, 2014
 11. Nanavati, Sujay,” A Review on Fly ash based Geopolymer Concrete”, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 14: 12-16 (2017).
 12. Saafi M, Piukovics G, and Ye J, “Hybrid graphene/geopolymeric cement as a superionic conductor for structural health monitoring applications”, Smart Materials and Structures. 25: 10 (2016).
 13. Jaafar E, Kashif M, Sahari K, and Ngaini Z, “Study on Morphological, Optical and Electrical Properties of Graphene Oxide (GO) and Reduced Graphene Oxide (rGO)”, Materials Science Forum, 917, 112–116 (2018).
 14. Chen, C., Kong, W., Duan, H.-M., and Zhang, J, “Theoretical simulation of reduction mechanism of graphene oxide in sodium hydroxide solution”, Physical Chemistry Chemical Physics, 16(25), 12858 (2014).
 15. Vaidya S and Allouche E, “Strain sensing of carbon fiber reinforced geopolymer concrete”, Materials and Structures. 44: 1467 – 1475 (2011).
 16. Yan et al, “Crystallization kinetics and microstructure evolution of reduced graphene oxide/geopolymer composites”, Journal of the European Ceramic Society. 36(10): 2601–2609 (2016).