



## Pelindung Dinding Terhadap Hujan Asam Menggunakan Geopolimer Berbasis Nanosilika dan Cellulose Nanocrystals

C. Rahmawati

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Abulyatama, Aceh Besar, Indonesia

Email : [cutrahmawati@abulyatama.ac.id](mailto:cutrahmawati@abulyatama.ac.id)

### ARTICLE INFO

#### Article history :

Artikel masuk : 21-05-2023  
Artikel revisi : 29-05-2023  
Artikel diterima : 24-06-2023

#### Keywords :

Acid Rain, Cellulose Nanocrystals, Durability, Geopolimer, Nano-silica

#### Style IEEE dalam mensitasi artikel ini:

C. Rahmawati, "Pelindung Dinding Terhadap Hujan asam menggunakan Geopolimer Berbasis Nanosilika dan Cellulose Nanocrystals," *Jurmateks*, vol.6, no.1, pp. 1-16, 2023, doi: 10.30737/jurmateks.v6i1.4625

### ABSTRACT

Geopolymers have a weakness in durability against exposure to acid rain. Nano-silica and Cellulose Nanocrystals (CNCs) can be incorporated to enhance the acid rain resistance of geopolymers. This study aims to investigate the durability of geopolymer-based nano-silica and CNCs against exposure to acid rain. This study employed a rain simulation infiltration method. The concentrations of nano-silica and CNCs used were 4% and 1%, respectively. The compressive strength of the geopolymer specimens was tested before and after exposure to assess the effects of acid rain. Additionally, SEM and XRD tests were conducted to analyze microstructural changes. The results revealed a significant reduction in the compressive strength of the geopolymer without nano silica and CNCs (36.14% and 26.73% at pH 4 and 5, respectively). In contrast, the geopolymer paste containing nano-silica and CNCs exhibited lower reductions of 22.93% and 19.77% at pH 4 and 5, respectively. These findings indicate that the addition of nano-silica and CNCs contributes to the preservation of compressive strength. The observed effect is attributed to the ability of nano-silica and CNCs to impede acid attack on the geopolymer paste, thereby preventing the degradation of calcium levels present in the fly ash within the geopolymer. The strength degradation of the geopolymer paste resulted from the breakdown of Al-O, Si-O, and calcium bonds within the system, triggered by the reaction with  $H_2SO_4$  from the acid rain. Nano-silica and CNCs-based geopolymers exhibit positive effects and can be utilized as a coating on the walls of buildings.

### 1. Pendahuluan

Geopolimer pertama kali dikembangkan sebagai material inorganik alumina silikat pada tahun 1940 oleh Purdon dan pada tahun 1950 oleh Glukovsky [1]. Pengembangan geopolimer ini memanfaatkan kalsium, silika dan alumina dari limbah anorganik serta larutan aktivator menjadi bahan pengikat. Geopolimer berpotensi sebagai bahan pengikat karena memiliki sifat mengikat seperti semen *Ordinary Portland Cement* (OPC). Bahan pengikat dibutuhkan dalam dunia konstruksi sebagai perekat material pasir, kerikil dan bahan lainnya

Pelindung Dinding Terhadap Hujan Asam Menggunakan Geopolimer Berbasis Nanosilika dan Cellulose Nanocrystals

<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v6i1.4625>



untuk menjadi mortar atau beton. Bahan pengikat yang terbentuk dari material anorganik dan alkali akan memberikan ketahanan yang baik pada lingkungan yang agresif seperti hujan asam dan air laut. Lebih lanjut potensi dari geopolimer ini dikembangkan sebagai bahan pelapis dan perekat yang disintesis dengan larutan alkalin dan alumina silikat [2]. Bahan dasar (prekursor) geopolimer berasal dari berbagai sumber alumina silikat seperti kaolin, *fly ash*, *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS), bahan vulkanik, lumpur dan lainnya. Prekursor ini kemudian dicampur dengan larutan alkali dan dipanaskan pada suhu tertentu.

Ketika digunakan sebagai bahan konstruksi, geopolimer memiliki beberapa permasalahan. Salah satunya, ketidaktahanan terhadap lingkungan agresif seperti hujan asam, limbah buangan pabrik, air laut. Pengaruh buruk asam sangat mudah merusak pasta semen dengan merusak kalsium dan ikatan silikat-aluminat yang merupakan ikatan utama geopolimer. Jika serangan ini terjadi terus berlangsung dalam waktu yang lama maka akan mengakibatkan putusnya ikatan Al-O dan Si-O, sehingga menyebabkan penurunan kekuatan. Penelitian daya tahan geopolimer terhadap paparan lingkungan asam [3], [4], lingkungan air laut [5], limbah buangan pabrik [6] telah banyak dilakukan. Penelitian ini menunjukkan sulfat dapat memutuskan ikatan Al-O dan Si-O. Pengaruh buruk asam sulfat dapat menyebabkan pemuaihan, retak dan disintegrasi spesimen beton [7]. Secara umum, ion sulfat banyak terdapat di air hujan, air tanah, dan limbah industri [8], [9].

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk memperlambat pengaruh buruk asam yaitu dengan menambahkan silika. Penambahan nanosilika pada geopolimer terbukti mampu menambah daya tahan geopolimer [10], [11]. Nano silika dapat mempercepat hidrasi semen dan pembentukan gel kalsium silikat (C-S-H) sehingga struktur pori dapat dioptimalkan. Ukuran partikel nanosilika mampu mengisi pori yang berukuran mikron. Hal tersebut membuat geopolimer menjadi padat sehingga membuat ion-ion sulfat tidak dapat masuk untuk merusak jaringan geopolimer [12]. Silika mampu bereaksi menjadi kalsium silikat hidrat dan tidak mudah larut sehingga dapat mempertahankan kekuatan geopolimer. Abu sekam padi mengandung silika sebesar 93,27% [13], [14]. Material yang mengandung silika layak digunakan dalam produk berbasis semen [15]–[17].

Disisi lain, pengaruh buruk asam juga dapat masuk melalui retak-retak yang terjadi pada permukaan hingga ke bagian dalam pasta. Hal ini menyebabkan ion-ion sulfat akan masuk kedalam pori-pori sebagai bagian terlemah dari geopolimer dan merusak struktur geopolimer. Geopolimer perlu dilindungi dengan menambahkan serat yang mampu mencegah perambatan retak. Untuk memperbaiki perambatan retak dan menjadi tulangan mikro, peneliti telah melakukan pengkajian mengenai penambahan serat pada geopolimer [18]. Serat mampu

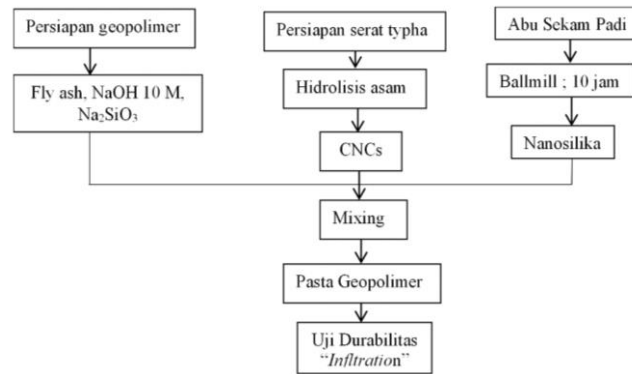
mencegah perambatan retak melalui ikatan selulosa yang ada yang mengikat OH yang ada pada material lainnya dalam matriks [18], [19]. Serat alam tanaman batang typha dapat dijadikan sebagai alternatif karena mengandung selulosa 60,9% [20]. Selulosa merupakan senyawa organik sebagai komponen struktural utama dinding sel tanaman [21]. Serat ini dapat dengan mudah disintesis menjadi Cellulose Nanocrystals (CNCs) dengan metode sederhana yaitu hidrolisis asam.

Penguatan geopolimer oleh partikel mineral dan serat dapat meningkatkan kekuatan tekan dan ketahanan serangan sulfat [22]. Karakteristik daya tahan beton geopolimer berbasis *fly ash* dengan 0%, 0,25%, 0,5%, 0,75%, dan 1% serat baja juga telah dipelajari dan hasilnya menunjukkan bahwa geopolimer yang diperkuat serat memiliki sifat daya tahan yang jauh lebih baik daripada beton konvensional dengan kualitas yang sama [23]. Serat sebesar 1% yang ditambahkan pada geopolimer, terbukti mampu menahan perambatan retak serta meningkatkan durabilitas geopolimer berbasis *fly ash* [24]. Sementara itu, penambahan serat *polypropylene* sebesar 0,6% pada geopolimer terbukti mampu menahan penetrasi klorida dan menahan penurunan kuat tekan [25]. Namun, belum ada yang melaporkan tentang daya tahan geopolimer yang mengandung nanosilika dan CNCs terutama pada paparan hujan asam. Penyelidikan daya tahan geopolimer komposit terhadap lingkungan agresif berupa hujan asam sangat diperlukan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis daya tahan dari geopolimer berbasis nanosilika dan CNCs pada paparan hujan asam. Daya tahan dianalisis dengan metode infiltration pada pH 4 dan 5. Pengujian mekanis yang dilakukan adalah kuat tekan dan pengujian mikrostruktur berupa SEM dan XRD. Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu memperlihatkan bagaimana nanosilika dan CNCs memberikan pengaruh positif pada peningkatan daya tahan geopolimer terhadap hujan asam.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan persiapan bahan berupa nanosilika dari abu sekam padi dan CNCs dari serat tanaman typha. Kegiatan yang dilakukan meliputi persiapan geopolimer, persiapan serat typha menjadi CNCs dan persiapan abu sekam padi menjadi nanosilika. Hasil campuran bahan ini menghasilkan pasta geopolimer berbasis nanosilika dan CNCs yang kemudian dilakukan pengujian daya tahan.



Sumber: Peneliti (2023).

**Gambar 1.** Proses Pelaksanaan Penelitian.

## 2.1 Bahan

Bahan yang digunakan adalah *fly ash* yang berasal dari PLTU Nagan Raya, Aceh. Larutan alkali dibuat dari NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Abu sekam padi berwarna putih diambil dari kilang padi yang kemudian di *ballmill* selama 10 jam untuk mendapatkan ukuran partikel 339,09 nm sesuai dengan penelitian sebelumnya [26]. Tanaman typha diambil di lahan terbuka yang di kawasan permukiman yang selanjutnya diproses menjadi CNCs dengan metode hidrolisis asam sesuai dengan penelitian sebelumnya [20]. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> merek merck® 99% digunakan untuk membuat larutan dengan pH 4 dan 5.

## 2.2 Metode

### 2.2.1 Pembuatan Geopolimer

Geopolimer dibuat dengan mencampurkan *fly ash* dengan larutan alkali NaOH dicampurkan dengan aquades sehingga membentuk larutan 10 Molar. Larutan alkali dibuat dengan mencampurkan larutan NaOH 10 M dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dengan perbandingan 1:1. Larutan alkali dicampurkan dalam *fly ash* dengan rasio 26% : 74%. Nanosilika dan CNCs dicampurkan ke dalam pasta geopolimer dengan persentase masing-masing sebesar 4% dan 1%. Pasta semen geopolimer ini kemudian dimasukkan kedalam cetakan. Setelah berumur 28 hari dilakukan pengujian durabilitas. Rancangan benda uji adalah dengan membuat benda uji kontrol dan benda uji yang ditambahkan nanosilika 4% dan CNC 1%.

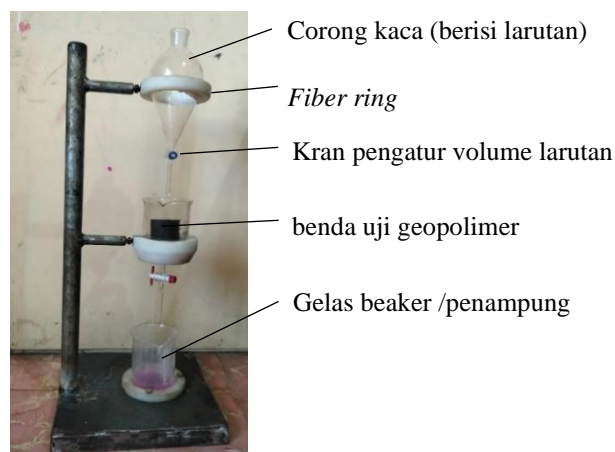
**Tabel 1.** Rancangan Campuran untuk Uji Daya Tahan Pasta Geopolimer

Beda Uji	Derajat Keasaman Simulasi Hujan Asam	
	pH 4	pH 5
Tanpa nanosilika dan CNCs	G0-4	G0-5
Penambahan nanosilika dan CNCs	G1-4	G1-5

Sumber: Hasil Penelitian (2023).

### 2.2.2 Pengujian Daya Tahan

Daya tahan geopolimer berbasis nanosilika dan *cellulose nanocrystals* terhadap hujan asam dilakukan dengan metode *infiltration*. Simulasi *infiltration* hujan asam ditunjukkan pada **Gambar 2** Simulasi dibuat dengan larutan hujan asam mewakili pH 4 dan 5 menggunakan volume larutan 2000 mL dengan kecepatan aliran sebesar 20 mL/jam sesuai dengan yang disarankan oleh penelitian sebelumnya [27]. Benda uji yang digunakan berupa kubus 5x5x5 cm yang telah dilakukan modifikasi penambahan nanosilika dan CNCs masing-masing sebesar 4 dan 1% sesuai dengan penelitian sebelumnya [26]. Perubahan berat sampel sebelum dan sesudah diberi perlakuan dicatat. Pengujian yang dilakukan berupa perubahan visual, perubahan berat dan perubahan kuat tekan. Karakterisasi struktur mikro dilakukan berupa SEM dan XRD.



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

**Gambar 2.** Simulasi Hujan Asam Pada Pasta Geopolimer Berbasis Nanosilika dan CNCs.

Larutan hujan asam volume 2000 mL dengan kecepatan peresapan 20 mL/jam dengan metode peresapan (*infiltration*). Pengujian dilakukan pada pH 4 dan 5 karena pH 4 dan 5 mewakili pH hujan asam yang dapat merusak dinding bangunan. Kehilangan alkalinitas perlu diperhatikan karena penurunan alkalinitas menunjukkan ion-ion sulfat telah masuk kedalam geopolimer dalam membuat pH geopolimer turun. Untuk melihat secara visual kehilangan alkalinitas pasta geopolimer digunakan larutan *phenolphthalein* pada permukaan benda uji yang diberi perlakuan dan tanpa perlakuan

Pengujian kuat tekan dilakukan sesuai standar ASTM C109, 2001 [28].

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dimana,  $f'_c$  adalah kuat tekan (MPa),  $P$  adalah beban maksimum (N) dan  $A$  adalah luas permukaan ( $\text{mm}^2$ ).

Koefisien relatif kuat tekan sisa dihitung sebagai berikut [29]:


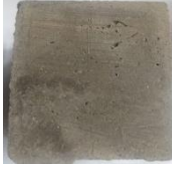



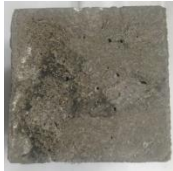
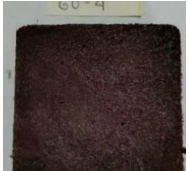



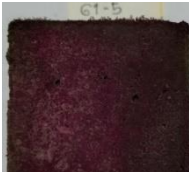





$$K_f = \frac{f_t}{f_c} \quad (2)$$

Dimana  $K_f$  adalah koefisien relatif dari sisa kuat tekan akibat paparan hujan asam,  $f_t$  adalah kuat tekan setelah terpapar hujan asam, dan  $f_c$  adalah kuat tekan dari benda uji kontrol tanpa paparan.

### 3. Hasil dan Diskusi

#### 3.1 Tampilan Visual

**Gambar 3** terlihat bahwa terjadi perubahan kondisi benda uji secara visual setelah terpapar dengan larutan hujan asam. Dalam waktu singkat paparan hujan asam menyebabkan kerusakan pada benda uji. Pasta geopolimer mengalami perubahan pada permukaan setelah serangan asam, terutama pada benda uji tanpa penambahan nanosilika dan CNCs. Permukaan terlihat terkelupas dengan struktur internal yang kasar.

Kode	Sebelum Terpapar	Sesudah Terpapar	Larutan <i>phenolphthalein</i>	
			Sebelum Terpapar	Sesudah Terpapar
G0-5				
G0-4				
G1-5				
G1-4				

Sumber: Hasil Penelitian (2023).

**Gambar 3.** Tampilan Visual Penampang Pasta Geopolimer Terpapar Hujan Asam.

Pelindung Dinding Terhadap Hujan Asam Menggunakan Geopolimer Berbasis Nanosilika dan Cellulose Nanocrystals

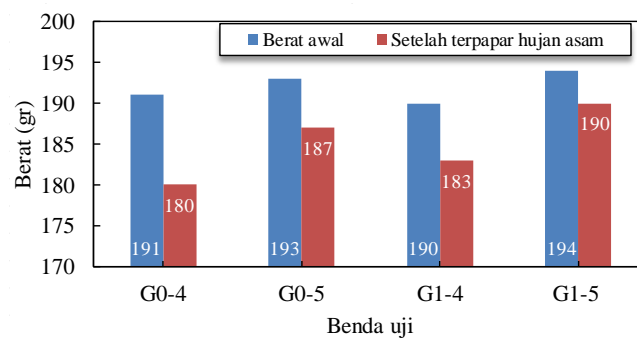
<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v6i1.4625>



Dengan penyemprotan larutan *phenolphthalein* terlihat semua benda uji kehilangan alkalinitas. Kehilangan alkalinitas menunjukkan penurunan pH yang menyebabkan mudah terjadi serangan ion-ion sulfat. Geopolimer memiliki pH > 12,5 hal ini memberi lingkungan yang pasif pada geopolimer sehingga terproteksi dari lingkungan agresif. Penetrasi larutan asam pada pasta geopolimer menyebabkan pH akan turun dan menyerang pori-pori.

### 3.2 Perubahan Berat

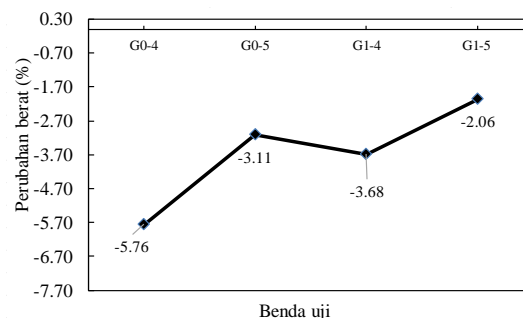
**Gambar 4** menunjukkan bahwa terjadi perubahan berat pasta geopolimer akibat paparan hujan asam. Benda uji mengalami pengurangan berat dari benda uji kontrol (G0) yaitu 191 gr menjadi 180 gram pada pH 4, sementara itu pada pH 5 benda uji kontrol mengalami pengurangan dari 193 gr menjadi 187 gr. Kecenderungan tren yang sama juga terjadi pada pasta geopolimer dengan penambahan nanosilika dan CNCs (G1). Pada benda uji dengan pH 4 terjadi penurunan berat dari 190 gr menjadi 183 gr, sementara itu pada pH 5 terjadi pengurangan dari 194 gr menjadi 190 gr.



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

**Gambar 4.** Perubahan Berat Pasta Geopolimer Sebelum dan Sesudah Terpapar Hujan Asam.

Dari **Gambar 5** terlihat persentase perubahan berat pada benda uji kontrol pada pH 4 dan 5 masing masing sebesar 5,76% dan 3,11%. Sementara itu benda uji dengan penambahan nanosilika dan CNCs pada pH 4 dan 5 mengalami sedikit penurunan masing-masing sebesar 3,68% dan 2,06%.



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

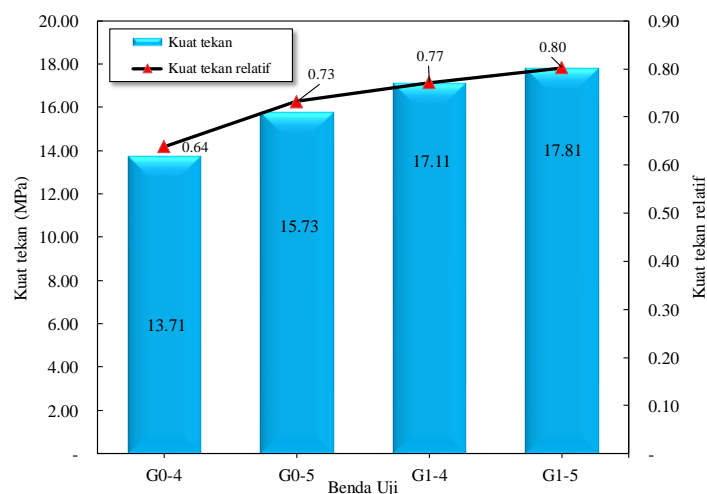
**Gambar 5.** Persentase Perubahan Berat Pasta Geopolimer Akibat Terpapar Hujan Asam

Penurunan menunjukkan adanya serangan sulfat pada geopolimer. Penurunan berat pasta geopolimer disebabkan karena reaksi ion-ion sulfat dari larutan hujan asam bereaksi sehingga mengganggu proses polimerisasi pasta geopolimer. Semakin rendah pH maka semakin besar reaksi ion-ion sulfat yang merusak pasta geopolimer. Penurunan kecil terjadi pada pasta geopolimer dengan nanosilika dan CNCs disebabkan karena peningkatan silika pada pasta geopolimer padat mampu menghambat reaksi ion-ion sulfat [9].

Dari perubahan berat pasta geopolimer pada kondisi paparan hujan asam dapat disimpulkan bahwa berat pasta geopolimer memiliki tren terus menurun. Hasil menunjukkan bahwa penambahan nanosilika memiliki pengaruh positif pada perubahan berat akibat hujan asam. Pasta geopolimer dengan nanosilika dan CNCs tidak memperlihatkan perubahan besar yang signifikan di bawah pengaruh hujan asam dalam jangka pendek [3].

### 3.3 Pengaruh Hujan Asam Terhadap Kuat Tekan

**Gambar 6** dan **7** memperlihatkan perubahan kuat tekan dan persentase perubahannya akibat paparan hujan asam. Kuat tekan pasta geopolimer kontrol G0 (tanpa penambahan nanosilika dan CNCs) adalah 21,47 MPa dan kuat tekan pasta geopolimer berbasis nanosilika dan CNCs (G1) sebelum diberi perlakuan adalah 22,20 MPa.

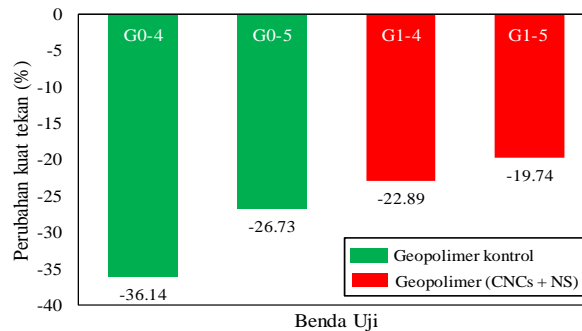


Sumber: Hasil Penelitian (2023).

**Gambar 6.** Perubahan Kuat Tekan Pasta Geopolimer Akibat Paparan Hujan Asam.

Kuat tekan pasta geopolimer kontrol setelah terpapar hujan asam pada pH 4 dan 5 masing-masing sebesar 13,71 MPa dan 15,73 MPa. Sementara itu pasta geopolimer dengan penambahan nanosilika dan CNCs pada pH 4 dan 5 masing-masing sebesar 17,11 dan 17,81 MPa. Kuat tekan relatif juga menunjukkan trend yang sama yaitu penurunan yang berkisar antara 0,64 sampai 0,80.





Sumber: Hasil Penelitian (2023).

**Gambar 7.** Persentase Perubahan Kuat Tekan Pasta Geopolimer Akibat Paparan Hujan Asam.

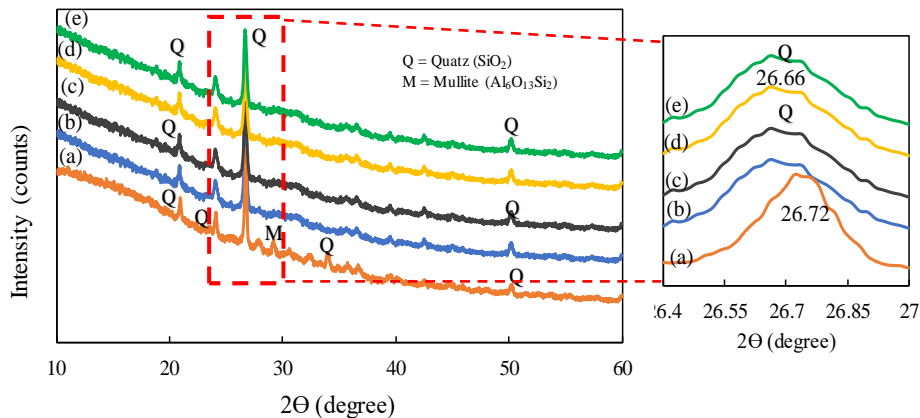
**Gambar 7** menunjukkan persentase perubahan kuat tekan pada pasta geopolimer. Penurunan kuat tekan terjadi pada semua benda uji baik pasta geopolimer kontrol maupun pada penambahan nanosilika dan CNCs. Penurunan masing-masing pasta geopolimer kontrol pada pH 4 dan 5 sebesar 36,14% dan 26,73%. Sedangkan pada pasta geopolimer dengan penambahan nanosilika dan CNCs pH 4 dan 5 masing-masing sebesar 22,93% dan 19,77%. Pada pasta geopolimer dengan penambahan nanosilika dan CNCs menunjukkan penurunan yang lebih sedikit.

Berdasarkan **Gambar 6** dan **7** terlihat kehilangan kuat tekan terbesar ada pada benda uji kontrol dengan perubahan kuat tekan mencapai 36,14%, sementara itu pada pasta dengan nanosilika dan CNCs mengalami kehilangan pada pH 4 sebesar 22,89%. Pada studi ini pH larutan simulasi hujan asam lebih rendah dan bereaksi dengan pasta geopolimer yang memiliki pH lebih tinggi sehingga netralisasi pasta geopolimer akan lebih cepat. Semakin rendah pH larutan maka berpengaruh pada penurunan kuat tekan pasta geopolimer.

Degradasi kekuatan pasta geopolimer disebabkan oleh putusnya ikatan Al-O dan Si-O, selain kalsium dalam sistem yang bereaksi dengan  $H_2SO_4$  membentuk sulfat dan kalsium sulfat ( $CaSO_4$ ) atau disebut *gypsum* serta *calcium sulphoaluminate* atau sering disebut *ettringite* [30]. Hal ini juga terkonfirmasi pada penyelidikan SEM. Serangan asam pada pasta geopolimer merusak kadar Ca pada *fly ash*. Bahan konstruksi yang ditambahkan silika memiliki daya tahan terhadap kuat tekan yang lebih baik, hal serupa juga dilaporkan pada pengamatan perilaku benda uji menggunakan 30%RHA dan 50% silika amorf yang direndam dalam larutan sulfat dan menemukan bahwa terjadi penurunan sebesar 4% sampai 6% [31]. Penambahan *ground granulated blast furnace slag* (GGBS) dengan CaO (30 %–50 %),  $SiO_2$  (28 %–38 %),  $Al_2O_3$  (8%–24 %), dan MgO (1%–18%) dapat meningkatkan kuat tekan terhadap geopolimer pada lingkungan agresif sebesar 10%–14% [32].

### 3.4 Perubahan Mineralogi

**Gambar 8** menunjukkan analisis difraksi sinar-X pada pasta geopolimer yang terpapar hujan asam. Dari analisis XRD terlihat hilangnya unsur utama dalam pasta geopolimer yaitu quartz setelah terpapar hujan asam. Namun demikian puncak utama quartz pada 2 theta yaitu  $26,66^\circ - 26,72^\circ$  terlihat tidak banyak berubah. Mineral yang muncul pada pada benda uji kontrol tanpa perlakuan yaitu *mullite* ( $Al_6O_{13}Si_2$ ) terlihat telah terhidrasi.



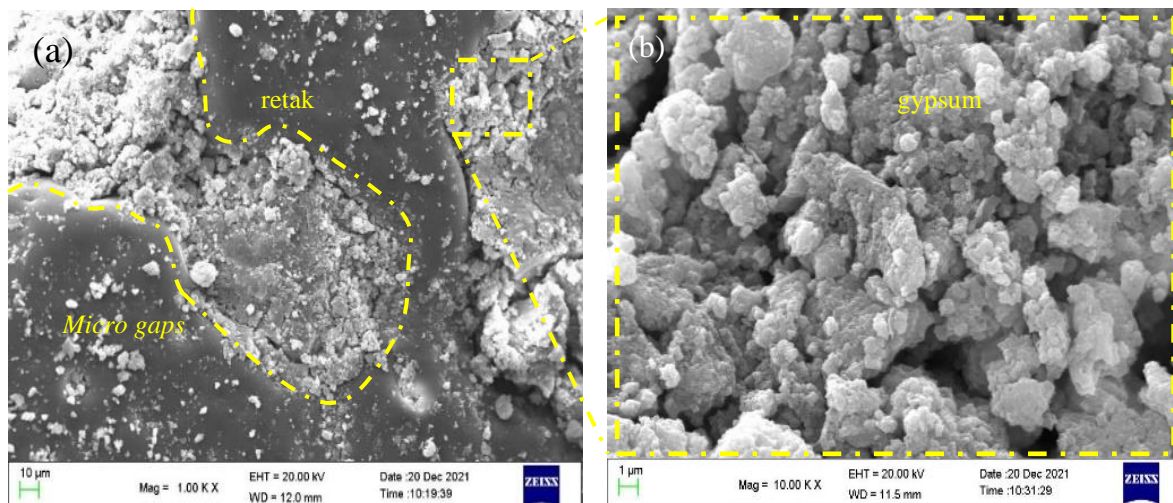
Sumber: Hasil Penelitian (2023).

**Gambar 8.** XRD Analisis Sebelum dan Sesudah Terpapar Hujan Asam, (a) Kontrol, (b) G05, (c) G0-4, (d) G1-5, (e) G1-4.

Melalui analisis XRD menunjukkan tidak ada perubahan mineralogi penting dalam pasta geopolimer berbasis nanosilika dan CNCs pada paparan hujan asam. Kehadiran puncak-puncak kecil *quartz* menunjukkan bahwa pasta geopolimer tidak ada perubahan reaksi yang signifikan. Hal serupa juga dilaporkan oleh studi lainnya yang menyatakan bahwa perubahan mineral pada geopolimer belum terdeteksi pada 30 sampai 180 hari pada lingkungan agresif [33]. *Quartz* adalah salah satu komponen utama pasta geopolimer dan bertanggung jawab atas ketahanan mekanis. Jika agresivitas lingkungan meningkat, kehilangan kuarsa yang lebih tinggi dapat terjadi. Dalam studi ini penurunan quartz terlihat belum begitu tinggi, hal ini menunjukkan pasta geopolimer mampu bertahan pada lingkungan hujan asam.

### 3.5 Perubahan Morfologi

**Gambar 9** memperlihatkan analisis SEM yang dilakukan untuk melihat perubahan struktur mikro dan komponen pasta geopolimer yang berbeda di bawah serangan hujan asam. Pada kondisi paparan hujan asam terlihat muncul retak mikro dan *micro gaps*. Kalsium yang terdapat dalam pasta geopolimer bereaksi dengan sulfat dan air yang menghasilkan kalsium sulfat atau *gypsum*.



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

**Gambar 9.** SEM Pasta Geopolimer Berbasis Nanosilika dan CNCs yang Terpapar Hujan Asam.

Kerusakan pada pasta geopolimer berbasis nanosilika dan CNCs disebabkan karena faktor internal dan eksternal. Faktor internal seperti kandungan sulfat yang sudah ada di raw material seperti *fly ash* dan faktor eksternal seperti pertukaran reaksi antara larutan agresif dengan komponen pasta geopolimer yang sudah mengeras [34]. Terbentuknya gypsum ini bila keadaannya kering, akan membentuk kristalnya yang seperti jarum dan mengembang, mendesak sisi sekitarnya sehingga terjadi pengrusakan pada sisi sekitarnya dan menyebabkan pasta geopolimer merapuh.

#### 4. Kesimpulan

Larutan asam mampu menurunkan kekuatan mekanis geopolimer. Namun demikian CNCs mampu meningkatkan kemampuannya sebagai bahan penguat dalam pasta geopolimer. Sementara itu nanosilika cukup berperan dalam daya tahan pasta geopolimer. Nanosilika mampu menambah ikatan Si-O pada pasta geopolimer walaupun setelah terpapar beberapa ikatan Si-O putus yang diikuti dengan penurunan kekuatan mekanis. Kuat tekan pasta geopolimer tanpa penambahan nanosilika dan CNCs setelah terpapar hujan asam menurun 36,14% pada pH 4, namun pada pasta geopolimer yang diberi nanosilika dan CNCs penurunan menurun hanya sebesar 19,74%. Hal ini menunjukkan nanosilika dan CNCs baik digunakan sebagai material dalam pasta geopolimer pada lingkungan asam dan air laut. Semakin rendah pH maka semakin besar terjadi penurunan kekuatan mekanis. Penurunan kinerja pasta geopolimer komposit pada pengaruh hujan asam disebabkan karena proses depolimerisasi dari alumina silikat dan pembebasan silikat, penggantian kation Na dan K oleh hidrogen atau ion

hidronium dan dealuminasi dari struktur geopolimer itu sendiri. Hal ini juga terhubung pada proses kondensasi polimer yang mengandung silika dan *quartz* yang menyebabkan penurunan kuat tekan pasta geopolimer. Dengan demikian geopolimer yang dikompositkan dengan nanosilika dan CNCs dapat diaplikasikan sebagai pelapis dinding bangunan karena memberikan daya tahan yang baik terutama pada geopolimer yang terpapar hujan asam.

**Daftar Pustaka**

- [1] H. K. Tchakouté, C. H. Rüscher, S. Kong, and N. Ranjbar, "Synthesis of sodium waterglass from white rice husk ash as an activator to produce metakaolin-based geopolymer cements," *J. Build. Eng.*, vol. 6, pp. 252–261, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.job.2016.04.007.
- [2] J. Davidovits, "Geopolymers: inorganic polymeric new materials," *J. Therm. Anal.*, vol. 37, no. 9, pp. 1633–1656, 1991, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [3] P. Abhilash, C. Sashidhar, and I. V. R. Reddy, "Evaluation of performance of Geopolymer Concrete in acid environment," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 7, pp. 1433–1438, 2017.
- [4] Y. Patrisia, D. W. Law, C. Gunasekara, and A. Wardhono, "Fly ash geopolymer concrete durability to sulphate, acid and peat attack," in *MATEC Web of Conferences*, 2022, p. 02003, doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202236402003>.
- [5] R. Alzebaree, A. Çevik, A. Mohammedameen, A. Niş, and M. E. Gülşan, "Mechanical performance of FRP-confined geopolymer concrete under seawater attack," *Adv. Struct. Eng.*, vol. 23, pp. 1055–1073, 2020, doi: 10.1177/1369433219886964.
- [6] L. B. de Oliveira, A. R. G. de Azevedo, M. T. Marvila, E. C. Pereira, R. Fediuk, and C. M. F. Vieira, "Durability of geopolymers with industrial waste," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, p. e00839, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00839>.
- [7] H. E. Elyamany, A. E. M. A. Elmoaty, and A. M. Elshaboury, "Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 184, pp. 111–127, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.212>.
- [8] F. H. A. Zaidi *et al.*, "Geopolymer as underwater concreting material: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 291, p. 123276, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123276> Get rights and content.
- [9] K. Chen, D. Wu, L. Xia, Q. Cai, and Z. Zhang, "Geopolymer concrete durability subjected to aggressive environments – A review of influence factors and comparison with ordinary Portland cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 279, p. 122496, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122496>.
- [10] C. Liu *et al.*, "Effect of nano-silica as cementitious materials-reducing admixtures on the workability, mechanical properties and durability of concrete," *Nanotechnol. Rev.*, vol. 10, no. 1, 2021, doi: <https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0097>.

- [11] P. Jaishankar, K. T. Poovizhi, and K. S. R. Mohan, "Strength and Durability Behaviour of Nano Silica on High Performance Concrete," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, pp. 415–418, 2018.
- [12] D. Adak, M. Sarkar, and S. Mandal, "Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 70, pp. 453–459, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.093>.
- [13] L. Handayani, S. Aprilia, C. Rahmawati, T. B. Aulia, and P. Ludviq, "Sodium Silicate from Rice Husk Ash and Their Effects as Geopolymer Cement," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 14, p. 2920, 2022.
- [14] M. Meliyana, C. Rahmawati, and L. Handayani, "Sintesis Nano Silika dari Abu Sekam Padi Dengan Metode Sol-Gel," in *Seminar Nasional Multi Disiplin Ilmu Universitas Asahan ke-3*, 2019, pp. 800–807.
- [15] M. Meliyana, C. Rahmawati, and L. Handayani, "Sintesis Silika Dari Abu Sekam Padi Dan Pengaruhnya Terhadap Karakteristik Bata Ringan," *Elkawnie*, vol. 5, no. 2, pp. 164–175, 2019.
- [16] C. Rahmawati, S. Aprilia, T. Saidi, and T. B. Aulia, "Current development of geopolymer cement with nanosilica and cellulose nanocrystals," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, pp. 1–8, doi: [10.1088/1742-6596/1783/1/012056](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1783/1/012056).
- [17] J. Ahmad, A. Majdi, A. F. Deifalla, H. F. Isleem, and C. Rahmawati, "Concrete Made with Partially Substitutions of Copper Slag (CPS): State of the Art Review," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 15, pp. 1–28, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15155196>.
- [18] C. Rahmawati *et al.*, "Mechanical Properties and Fracture Parameters of Geopolymers based on Cellulose Nanocrystals from Typha sp. Fibers," *Case Stud. Constr. Mater.*, p. e01498, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01498>.
- [19] J. Ahmad, M. M. Arbili, A. Majdi, F. Althoey, A. F. Deifalla, and C. Rahmawati, "Performance of concrete reinforced with jute fibers (natural fibers): A review," *J. Eng. Fiber. Fabr.*, pp. 1–17, 2022, doi: <https://doi.org/10.1177/15589250221121871>.
- [20] C. Rahmawati, S. Aprilia, T. Saidi, T. B. Aulia, and I. Ahmad, "Preparation and characterization of cellulose nanocrystals from typha sp. as a reinforcing agent," *J. Nat. fibers*, vol. 18, pp. 1–14, 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1904486>.
- [21] N. D. Rusli, A. A. A. Ghani, K. Mat, M. T. Yusof, M. Zamri Saad, and H. A. Hassim, "The Potential of Pretreated Oil Palm Frond in Enhancing Rumen Degradability and Growth Performance: A Review," *Adv. Anim. Vet. Sci.*, vol. 9, no. 6, pp. 811–822, 2021.



- [22] D. Ren, C. Yan, P. Duan, Z. Zhang, L. Li, and Z. Yan, "Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack," *Constr. Build. Mater.*, vol. 134, pp. 56–66, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.103>.
- [23] N. Ganesan, R. Abraham, and S. D. Raj, "Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 93, pp. 471–476, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.014>.
- [24] G. Laxmi, S. Patil, N. Hossiney, and H. K. Thejas, "Effect of hooked end steel fibers on strength and durability properties of ambient cured geopolymer concrete," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, p. e02122, 2023.
- [25] S. Y. Rani, M. S. Nusari, J. bin Non, S. Poddar, and A. Bhaumik, "Durability of geopolymer concrete with addition of polypropylene fibre," in *Materials Today: Proceedings*, 2022, pp. 2846–2851, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.164>.
- [26] C. Rahmawati, S. Aprilia, T. Saidi, T. B. Aulia, and A. E. Hadi, "The Effects of Nanosilica on Mechanical Properties and Fracture Toughness of Geopolymer Cement," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 13, p. 2178, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13132178>.
- [27] M. Jin, Z. Zheng, Y. Sun, L. Chen, and Z. Jin, "Resistance of metakaolin-MSWI fly ash based geopolymer to acid and alkaline environments," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 450, pp. 116–122, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.07.036>.
- [28] *ASTM C 109*. Standart test method for compressive strength of hydraulic 557 cement mortar (using 2-in or 50 mm cube specimens. In: Annual Book of 558 ASTM Standars, 2001.
- [29] S. Han, J. Zhong, Q. Yu, L. Yan, and J. Ou, "Sulfate resistance of eco-friendly and sulfate-resistant concrete using seawater sea-sand and high-ferrite Portland cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 305, no. April, p. 124753, 2021, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2021.124753](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124753).
- [30] A. Mehta and R. Siddique, "Sulfuric acid resistance of fly ash based geopolymer concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 136–143, Aug. 2017, doi: [10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.04.077](https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.04.077).
- [31] B. N. Sangeetha, "Effect of Rice Husk Ash and GGBS on Performance of Concrete," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 491–495, 2015.

- [32] M. Amran *et al.*, “Long-term durability properties of geopolymer concrete: An in-depth review,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, no. July, p. e00661, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00661.
- [33] F. Slaty, H. Khoury, H. Rahier, and J. Wastiels, “Durability of alkali activated cement produced from kaolinitic clay,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 104, pp. 229–237, 2015, doi: 10.1016/j.clay.2014.11.037.
- [34] C. Rahmawati, S. Aprilia, T. Saidi, and T. B. Aulia, “Mineralogical, Microstructural and Compressive Strength Characterization of Fly Ash as Materials in Geopolymer Cement,” *Elkawnie*, vol. 7, no. 1, pp. 1–17, 2021.