



Terbit online pada laman web jurnal :
<https://ejournal.sttp-yds.ac.id/index.php/js/index>

SAINSTEK

| ISSN (Print) 2337-6910 | ISSN (Online) 2460-1039 |



Daya Tahan Erosi Abrasi Mortar Geopolimer pada Struktur Bangunan Air

AS Ariyanto ^{a,c*}, SI Wahyudi ^b, M Mukhlisin ^c

^aMahasiswa Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Indonesia.

^bProgram Doktor Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Indonesia.

^cJurusan Teknik Teknik Sipil, Politeknik Negeri Semarang

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 11 Mei 2025

Revisi Akhir: 09 Juni 2025

Diterbitkan Online: 29 Juni 2025

KATA KUNCI

Abrasi, Struktur Bangunan Air, Mortar Geopolimer, ASTM C 1138.

*KORESPONDENSI

Telepon: "+62 (82351205797)

E-mail: arief.subakti@polines.ac.id

ABSTRACT

Kerusakan pada permukaan struktur hidrolik seperti spillway, pilar jembatan, dinding saluran terjadi karena gesekan permukaan antara partikel yang terbawa di dalam air, seperti pasir, kerikil. Kerusakan abrasi permukaan ini akan mempengaruhi umur layanan dari struktur hidrolik. Untuk itu diperlukan material yang memiliki daya tahan abrasi yang mumpuni. Salah satu material yang dapat digunakan adalah geopolimer. Geopolimer merupakan material ramah lingkungan dengan bahan dasar aluminosilikat dan alkali aktivator. Novelty dari penelitian ini adalah penggunaan material geopolimer sebagai binder dari mortar. Pada penelitian ini geopolimer di buat dengan sistem satu komponen yang diaduk secara kering dengan perbandingan binder dan agregat adalah 1: 2, Mix desain geopolimer dibuat dengan pada 14 Molar. Pengujian abrasi yang dilakukan menggunakan metode Uji ASTM C 1138 *Under water test*. Dari pengujian tersebut diperoleh hasil uji abrasi mortar geopolimer pada umur 28 hari adalah $1,318 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ dengan kuat tekan 47,61 Mpa, sedangkan Mortar Portland Semen dengan komposisi 1 : 2 adalah $1,45 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ dan kuat tekan 28,04 MPa. Daya tahan abrasi mortar geopolimer 36,8 kali lebih baik dari Mortar Portland Semen dengan komposisi yang sama.

1. PENDAHULUAN

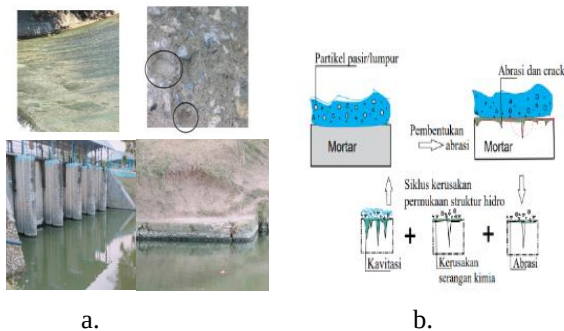
Struktur hidrolik dikenal sebagai bangunan yang sebagian atau seluruh bagiannya terendam, baik yang terdapat di wilayah sungai, wilayah pesisir, dan muara, yang dapat dibangun untuk menahan, mengalirkan, atau mengganggu aliran air alami [1]. Salah satu kerusakan yang terjadi pada struktur bangunan air adalah kerusakan pada permukaan struktur bangunan air yang disebabkan oleh dampak jangka panjang dari aliran yang mengandung sedimen [2]. Memahami penyebab kerusakan pada permukaan beton dan pasangan batu sangat penting dalam desain dan rehabilitasi struktur hidrolik. Kerusakan pada permukaan struktur beton dipengaruhi oleh berbagai faktor, diantaranya ukuran dan kandungan partikel yang terbawa

oleh air, kecepatan aliran air/sedimen, sudut dampak aliran, waktu paparan, dan kualitas mutu.[3]

Menurut ACI 207.6R-17 [4] Kerusakan permukaan pasangan batu dan beton pada struktur hidrolik didefinisikan sebagai erosi yang terjadi akibat kavitasi, abrasi, dan serangan kimia. Kavitasi dan abrasi adalah proses fisik, sedangkan serangan kimia terjadi ketika komponen-komponen beton bereaksi dengan senyawa kimia terbawa air. Kerusakan yang disebabkan oleh kavitasi terlihat dalam bentuk rongga dan lubang, dan berbeda dari erosi akibat abrasi yang menghasilkan permukaan yang lebih halus. Kerusakan abrasi yang terbesar disebabkan oleh partikel padat yang terlarut dalam air seperti pasir, kerikil, lumpur, es, dan partikel lainnya

yang berputar dan bertumbukan dengan permukaan beton selama masa pakai struktur hidrolik.[5]

Pengaruh kerusakan akibat abrasi memiliki peran penting dalam mempertahankan umur layanan dari suatu struktur, untuk itu diperlukan perencanaan yang baik dan pemilihan material yang baik karena kerusakan abrasi pasti terjadi dan tidak mungkin dihindari. Kerusakan abrasi dan proses terjadinya kerusakan dapat dilihat pada gambar 1.a,b.



a. b.
Gambar 1.a. Kerusakan permukaan struktur hydruc di bendung sumungan kota semarang, 1b. Proses terjadinya kerusakan pada permukaan struktur hydraulik.(sumber dokumentasi sendiri)

Untuk mempertahankan struktur hidrolik agar tetap handal dan meningkatkan umur layanan struktur tersebut, beton yang digunakan harus memiliki ketahanan terhadap kerusakan akibat abrasi. Material penyusun beton dan plesteran pasangan batu terdiri dari binder dan agregate yang untuk selanjutnya campuran ini disebut sebagai Mortar. Selama ini binder dengan basis semen portland penggunaannya memiliki peningkatan 2,5% per tahun dengan 3500 milyar ton di tahun 2020 dan 4400 milyar ton pada tahun 2030 [6]. Penggunaan OPC secara global menduduki peringkat kedua setelah air sebagai material terbanyak yang digunakan.[7]. OPC merupakan material yang di dalam proses produksinya membutuhkan energi yang besar, setelah baja dan aluminium. Pada proses produksi OPC menghasilkan gas CO₂. Gas CO₂ yang dihasilkan OPC terdiri dari 325 kg/ton akibat pembakaran, 525 kg / ton pada proses kalsinasi kapur, 50 kg /ton akibat penggunaan energi listrik. Jadi dalam produksi 1 ton OPC menghasilkan sekitar 0,8 – 1 ton Gas CO₂. [8]

Berdasarkan hal tersebut, maka berbagai penelitian dilakukan untuk mencari cara untuk mengurangi penggunaan OPC dengan mencari alternative binder yang menghasilkan lebih sedikit CO₂ pada proses produksinya. Salah satu binder yang potensial sebagai pengganti semen yaitu *Alkali Activated Material Binder* dan *Geopolimer Binder*. [9].

Perkembangan penggunaan mortar kering siap pakai saat ini berkembang pesat seiring dengan perkembangan pembangunan. Salah satu pengembangan dan inovasi

adalah pembuatan mortar kering dengan teknologi geopolimer dengan menggunakan geopolimer binder sebagai pengganti *Ordinary Portland Semen* (OPC) yang diproduksi dengan menggunakan material yang ramah lingkungan seperti limbah abu terbang (*fly ash*), limbah keramik, limbah kaca, serta pengikat yang berbasis material alam.[10]

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Mortar

Mortar merupakan hasil pencampuran antara agregat halus, binder dan air. Mortar berfungsi sebagai media pengikat sekaligus elemen penyusun dalam konstruksi, baik untuk keperluan struktural maupun non-struktural. Sebagai contoh, mortar digunakan dalam pekerjaan struktural seperti pemasangan batu belah pada pondasi, sedangkan pada pekerjaan non-struktural, mortar diaplikasikan pada pasangan bata untuk dinding pengisi. Mengingat peran penting mortar dalam mendukung struktur bangunan, maka campuran yang digunakan harus sesuai dengan spesifikasi standar mortar nasional yaitu SNI 6882 2014 dan ASTM C 270. Standar ini menetapkan tipe mortar berdasarkan kuat tekan secara berturut turut adalah M dengan kuat tekan 17,2 Mpa, Tipe S dengan kuat tekan 12,4 Mpa, Tipe N dengan kuat tekan 5,2 Mpa dan O dengan kuat tekan 2,4 Mpa. Masih menurut standar tersebut penggunaan Mortar dapat diklasifikasikan untuk pekerjaan exterior dengan beban untuk tipe N,M.

2.2. Mortar Geopolimer

Mortar Geopolimer merupakan campuran antara agregat halus dengan binder *Geopolimer*. *Geopolimer* memerlukan material yang memiliki kandungan silika dan alumina yang banyak seperti *fly ash*, slag, kaolinit, tanah liat, *silica fume*, andalusite, mika, abu sekam padi, red mud, dan lain sebagainya sebagai bahan dasar. Reagent / precursor alkali seperti hidroksida dan silikat Na dan K juga digunakan untuk aktivasi. Berdasarkan riset terdahulu bahan baku seperti *fly ash* dan slag menunjukkan kekuatan tekan yang lebih baik daripada bahan material yang lain [11,12]. Peneliti sebelumnya [13], melaporkan bahwa *fly ash* yang dikalsinasi dan material yang tidak dikalsinasi dapat digabungkan untuk meningkatkan kekuatan tekan dan mengurangi waktu reaksi. *Geopolimer* memiliki karakteristik yang sangat baik, seperti kekuatan awal yang tinggi; stabilitas termal pada suhu tinggi [14,15, 16,17]; sedikit penyusutan; ketahanan yang sangat baik terhadap korosi, api, sulfat, dan asam, ini membuktikan bahwa geopolimer dapat menjadi alternatif yang menarik untuk pengganti teknologi beton konvensional. Selain itu, menawarkan efisiensi biaya produksi 10% hingga 30%

dibandingkan dengan biaya sistem beton tradisional [18, 19]. *Geopolimer* tidak mudah terbakar, dan itulah sebabnya mereka menunjukkan ketahanan yang luar biasa terhadap api dan panas. Selain itu, CO₂ yang dilepaskan per unit volume semen *Geopolimer* sekitar sembilan kali lebih rendah daripada sistem OPC, yang menyebutnya sebagai material yang ramah lingkungan. Selain itu, polimerisasi yang ditingkatkan meningkatkan kandungan amorf dan meningkatkan kekuatan geopolimer berbasis abu terbang relatif [20].

2.3. Material Penyusun Mortar Geopolimer

2.3.1. Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan dapat berasal dari pasir alami yang diperoleh langsung dari sungai, galian, atau dari proses pemecahan batu dan dapat juga kombinasi gabungan dari keduanya. Agregat halus adalah agregat dengan ukuran butiran lebih kecil dari 4,8 mm. Agregat yang memiliki butiran lebih kecil dari 1,2 mm disebut pasir halus, jika lebih kecil dari 0,075 mm disebut *silt*, dan jika lebih kecil dari 0,002 mm disebut *clay*. Sesuai ASTM C 33, Agregat halus terdiri dari agregat alam maupun agregat buatan. *Agregate* halus lolos saringan 4,75mm, dengan kadar lumpur < 3%, dengan kadar organik kuning muda, sedangkan modulus kehalusan 2,3 -3,1.

2.3.2. Air

Air diperlukan pada pembuatan beton agar terjadi reaksi kimiawi dengan binder untuk membasahi agregat dan untuk melumas campuran agar mudah pengerjaannya. Sesuai SNI 7974 2013 Air yang dapat diminum umumnya dapat digunakan sebagai campuran beton. Air yang mengandung senyawa-senyawa yang berbahaya, yang tercemar garam, minyak, gula, atau bahan kimia lainnya, bila dipakai dalam campuran beton akan menurunkan kekuatannya dan dapat juga mengubah sifatsifat semen. Selain itu, air yang demikian dapat mengurangi afinitas antara agregat dengan pasta semen dan mungkin pula mempengaruhi kemudahan pengerjaan.

2.3.3. Aluminosilikat

Alumino silikat yang digunakan merupakan *fly ash* yang berasal dari PLTU Tanjung Jati B, Jepara. Dengan unsur kimia yang terkandung pada *fly ash* ini menurut hasil pengujian memiliki total kandungan SiO₂, Al₂O₃, dan FeO adalah 83,87%, sehingga dapat digolongkan pada kelas F (ASTM C618, 2021). *fly ash* yang digunakan memiliki ukuran kurang dari 0,075 mm atau lolos saringan no. 200 dengan kadar air 0%. Secara lengkap kandungan *fly ash* dari PLTU Tanjung Jati B Jepara ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Penyusun *fly ash* hasil pengujian XRD(hasil pengujian)

Komposisi Kimia	
SiO ₂ %	46.52
Al ₂ O ₃ %	24.95
Fe ₂ O ₃ %	12.4
CaO %	6.86
MgO %	0.724
K ₂ O %	1.83
Na ₂ O %	1,59
MnO %	0.06
TiO ₂ %	0.967
P ₂ O ₅ %	0.351
LOI %	

2.3.4. Aktivator

Reagent/activator yang digunakan adalah material dalam bentuk anhidrat atau powder yaitu NaSiO₃ anhidrat atau sodium metasilikat dengan dikombinasikan dengan material limbah lainnya. Jenis aktivator yang digunakan dalam penelitian ini adalah Sodium Hidroksida (NaOH) dan Sodium Metasilikat Pentahidrat Na₂SiO₃, Na₂SO₄ dan CaOH₂ didapat dari suplyer lokal, activator berbentuk kristal dengan kadar kemurnian 98%.

2.3.5. Perawatan

Pemilihan metode perawatan sampel mortar geopolimer dilakukan seperti pada mortar beton normal yaitu dengan cara di rendam pada air sebelum dilakukan pengujian.

2.3.6. Uji Tekan

Pengujian kuat tekan beton mengacu pada Pengujian kuat tekan mengikuti Standar uji kuat tekan semen *hydraulic* C109/C109M – 16a. Pengujian dilakukan dengan memberikan pembebanan secara bertahap pada benda uji sampai benda uji mengalami retak fraktur. Hasil dari pengujian kuat tekan didapatkan dari gaya aksial (P) yang terdistribusi pada batang penekan. Pengujian kuat tekan dengan menggunakan alat *compressive strength machine* merk Jinan kapasitas 300 kN (Gambar 3).

Kekuatan tekan mortar (MPa) = beban maksimum (P) dibagi luas penampang (A) benda uji seperti Persamaan 1.

$$\text{Kuat Tekan} = \frac{P}{A} \quad (1)$$



Gambar 2. Mesin Uji Tekan (sumber dokumentasi sendiri)

2.3.7. Uji Abrasi

Pengujian Abrasi dilakukan dengan metode under water test ASTM C1138 adalah metode uji abrasi standar yang dimaksudkan untuk memperkenalkan prosedur untuk mengevaluasi ketahanan abrasi relatif permukaan mortar yang mengalami pergerakan air dalam struktur hidrolik. Permukaan tersebut berada di bawah aksi abrasi langsung dari bahan yang dibawa air seperti pasir, kerikil, atau bahkan partikel batuan yang lebih besar. Metode ini mencakup tangki baja silinder di mana spesimen cakram beton dengan diameter sekitar 300 mm dan ketebalan 100 mm dimasukkan dan diuji seperti dapat dilihat pada gambar 3. Diameter tangki sedikit lebih besar dari diameter benda uji untuk menyederhanakan penyisipan dan pengangkatan spesimen menggunakan keranjang baja, sementara tingginya 450 mm. Pada permukaan spesimen beton, 70 bola baja dengan tiga diameter berbeda sekitar 13, 19 dan 25 mm ditempatkan untuk mensimulasikan partikel yang ditularkan melalui air yang tergerus seperti dapat dilihat pada Gambar 4. Tangki harus diisi dengan air hingga kedalaman yang sesuai dan air harus diputar pada kecepatan rotasi yang ditentukan 1200 rpm menggunakan baling baling agitasi berputar konfigurasi khusus. Gambar 3 menunjukkan alat uji yang dibuat dan digunakan dalam penelitian ini saat melakukan uji abrasi bawah air sesuai dengan persyaratan ASTM C1138. Penurunan berat abrasi dievaluasi pada interval waktu 12 jam dengan menimbang spesimen sebelum dan sesudah pengujian. ASTM C1138 merekomendasikan enam langkah dengan total waktu pengujian 72 jam. Untuk menghitung besarnya abrasi permukaan sampel dapat dihitung dengan Persamaan 2, Persamaan 3, dan Persamaan 4.

$$V_t = \frac{W_{air} - W_{water}}{G_w} \quad (2)$$

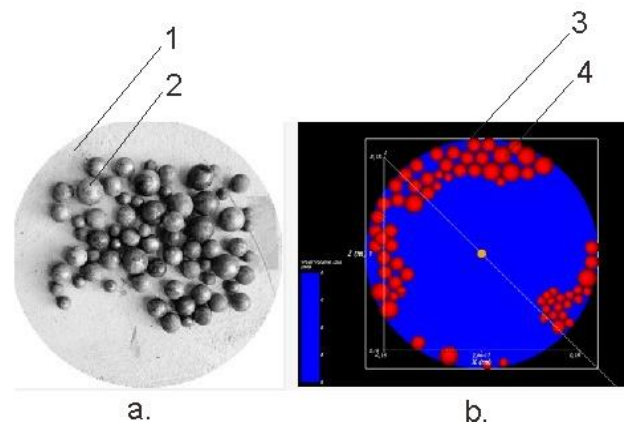
$$V_{Lt} = V_i - V_t \quad (3)$$

$$ADAt = V_{Lt} / A \quad (4)$$

Dimana V_t adalah volume sampel uji abrasi, V_{Lt} adalah perbedaan volume benda uji yang hilang setiap siklus, $ADAt$ adalah kedalaman Abrasi, A adalah luas penampang benda uji.



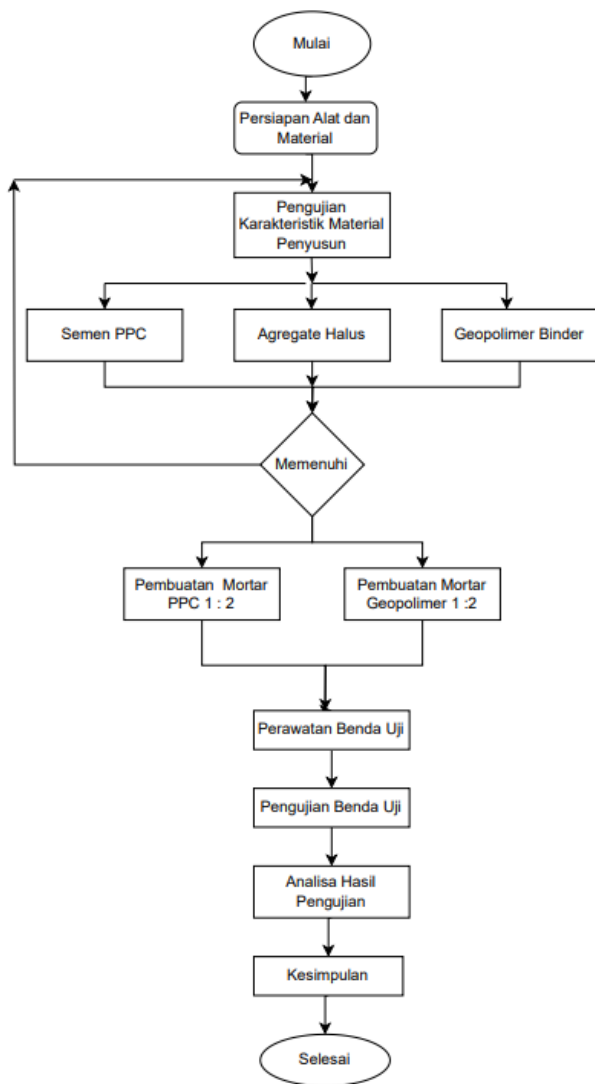
Gambar 3. Alat Uji Abrasi Underwater ASTM C1138 (sumber dokumentasi sendiri)



Gambar 4. Bola Baja Abrasive uji Underwatertest ASTM C1138 1,3. Benda Uji, 2 dan 4 Bola baja Abrasive (sumber dokumentasi sendiri)

3. METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan eksperimental di laboratorium, dengan cara memproduksi benda uji mortar untuk kemudian dilakukan analisis terhadap hasilnya. Tahapan pelaksanaan penelitian dirancang secara sistematis dan disajikan dalam bentuk diagram alir seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 5. Diagram alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

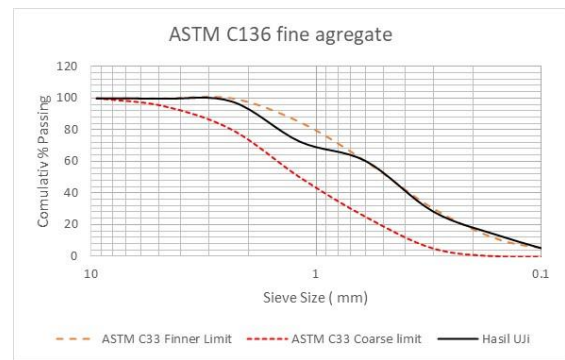
Hasil pengujian untuk setiap mortar geopolimer kering dianalisis, dan disajikan dalam bentuk grafik dan tabel. Pembahasan meliputi pengujian karakteristik material penyusun, kuat tekan, pengujian porositas dan absorsi, dan pengujian abrasi.

4.1. Hasil

4.1.1. Karakteristik Material Penyusun

Agregat halus yang digunakan berasal dari Muntilan, Jawa Tengah dan memiliki gradasi menerus seperti dapat dilihat pada Gambar 2.

Agregat yang digunakan memiliki kadar lumpur 0.2% dan berat jenis 1.69 t/m³, kadar air 0% dengan modulus kehalusan 2,5.



Gambar 6. Analisa Saringan Pasir Muntilan (sumber analisa sendiri)

Precursor atau *aktivator* yang digunakan agar terjadi reaksi polimersasi menggunakan Sodium hidroksida (NaOH) dan Sodium Silikat Pentahidrat (Na₂SiO₃) dalam granular yang digunakan dalam penelitian ini.

4.1.2. Komposisi Campuran

Komposisi Mortar yang digunakan pada penelitian ini adalah Mortar PCC dan Mortar Geopolimer yang dicampur secara kering dengan perbandingan 1 (Binder) : 2 (Pasir). Pada Mortar PPC digunakan 1 PC : dan 2 Pasir dengan Fas 0.53, Sedangkan pada mortar Geopolimer digunakan perbandingan 1 Binder Geopolimer : 2 Pasir dengan penggunaan air w/b 0,26. Benda uji tekan menggunakan kubus dengan ukuran 50 x 50 x 50 mm sedangkan benda uji untuk uji abrasi menggunakan cetakan bulat dengan diameter 12 inch dan tebal 50 mm. Molaritas untuk NaOH adalah 14M. Komposisi dapat dilihat pada tabel 2. Komposisi Mortar Portland Semen dan Mortar Geopolimer.

Tabel 2. Komposisi Mortar 1 : 2

Item	MPPC (gram)	MG (gram)
Semen Portland	300	-
Fly Ash	-	195
NaOH	-	12,76
NaSiO ₃ Pentahidrat	-	70
Pasir	600	555,52
Air	159	72

4.1.3. Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan mortar geopolimer dilakukan dengan membandingkan antara mortar PPC 1 : 2 dengan mortar

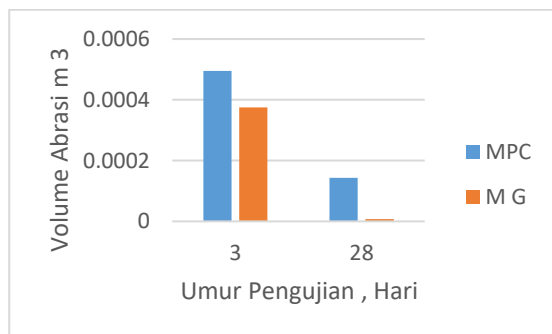
Geopolimer 1 : 2. Pengujian kuat tekan mortar geopolimer dilakukan pada umur 28 hari dengan curing perendaman air. Hasil rata-rata kuat tekan geopolimer dan mortar normal dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Variasi	Kuat Tekan Rata Rata Umur 3 Hari MPa	Kuat Tekan Rata Rata Umur 28 Hari MPa
MN	3.5	28.04
MG	15.7	47,61

Hasil kuat tekan menunjukkan bahwa kuat tekan mortar geopolimer memiliki nilai sebesar 76 Mpa dan mortar normal memiliki nilai sebesar 24 MPa, hal tersebut menunjukkan kuat tekan geopolimer dengan komposisi sama 1 : 2 menghasilkan nilai yang lebih tinggi. Ini terjadi karena reaksi polimerisasi geopolimer menghasilkan ikatan yang kuat dengan komposisi pasir dan binder yang sama dikarenakan perencanaan mix desain rasio na/si dan w/b yang tepat pada geopolimer seusia hasil penelitian sebelumnya.

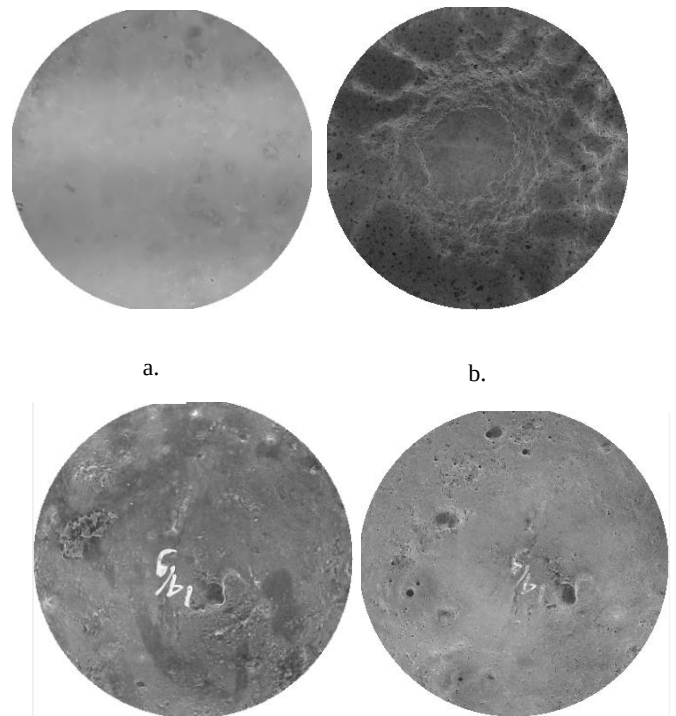
4.1.4. Abrasi

Pengujian abrasi dilakukan pada mortar normal dan mortar geopolimer pada umur 3 Hari dan 28 hari. Pengujian dilakukan menggunakan standar uji ASTM C 1138 dengan 6 siklus pengujian. Setiap siklus terdiri dari 12 jam dengan kecepatan putaran 1200 rpm. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil volume abrasi sampel uji MPC dan MG (Hasil Analisa)

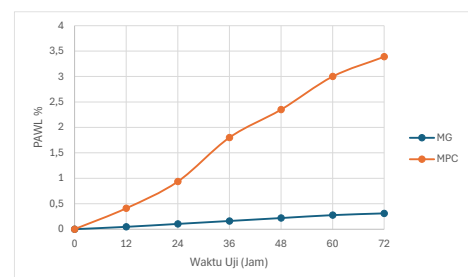
Pengaruh umur sampel mortar dengan daya tahan abrasi dapat dilihat pada gambar 5. Seiring dengan peningkatan kuat tekan mortar daya tahan abrasi akan meningkat. Pada mortar MPC dan MG memiliki pola yang hampir sama dikarenakan perawatan Mortar geopolimer juga dilakukan sama dengan Mortar Portland Semen yaitu dengan cara direndam.



Gambar 6. Gambar Sampel Uji Abrasi. a.Mortar PPC Sebelum uji Abrasi b.Mortar PPC setelah Uji Abrasi, c, Mortar Geopolimer sebelum uji Abrasi, d.Mortar Geopolimer Setelah Uji Abrasi. (Hasil Analisa)

Pada gambar 6 dapat dilihat pola kerusakan sampel pada uji abrasi akibat gesekan bola abrasif pada kecepatan 1200 rpm. Kerusakan terjadi pada bagian di bawah baling baling pemutar dari alat pemutar. Pola kerusakan ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya untuk material beton Normal dan Beton Geopolimer.[21]

Pengaruh komposisi campuran volume antar MPC dan MG dengan komposisi campuran yang sama 1 Binder : 2 Pasir menghasilkan kuat tekan dan nilai daya tahan abrasi yang berbeda, dimana pada mortar geopolimer menghasilkan 47,61 MPa sedangkan pada mortar normal 28,41 MPa.



Gambar 7. Hasil Presentase kehilangan berat Uji Abrasi ASTM C1138

Kehilangan berat akibat pengujian abrasi terjadi karena gesekan bola baja abrasif terhadap permukaan benda uji, pada Gambar 7 dapat dilihat kehilangan berat tiap siklus

pengujian 12 jam. Pola kehilangan berat akibat abrasi pada sampel uji mengalami kenaikan linear untuk setiap siklusnya tergantung kekuatan tekan, hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan Cheyad et al., [22]

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dengan tujuan untuk mendapatkan material yang memiliki daya tahan abrasi permukaan pada struktur bangunan air, dengan menggunakan uji eksperimental sesuai prosedur uji ASTM C 1138 dengan berbagai variable maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

Mortar geopolimer memiliki daya tahan abrasi yang lebih baik pada semua umur pengujian. Untuk semua sampel uji abrasi kerusakan permukaan berbanding lurus dengan kuat tekan, pada nilai kuat tekan yang rendah nilai kerusakan permukaan akan tinggi.

Kerusakan abrasi merupakan kerusakan yang berbanding lurus dengan fungsi dari waktu pengujian, semakin lama pengujian dilakukan maka nilai kehilangan berat rata-rata sebagai parameter abrasi naik secara linier.

Untuk penelitian selanjutnya diperlukan penelitian lanjutan metode penggunaan mortar geopolimer sebagai mortar untuk perbaikan kerusakan akibat abrasi pada struktur bangunan air seperti untuk perkuatan pilar jembatan terhadap *scouring*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih sebesar besarnya kepada Program Doktor Teknik Sipil Unissula Semarang sehingga penelitian dapat berjalan dengan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Murali, L. S. Wong, K. Karthikeyan, M. Abdellatif, and S. Dixit, "Concrete resilience under the impact of water forces: A review of abrasion resistance in hydraulic structures," *Results in Engineering*, vol. 26, p. 104654, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.RINENG.2025.104654.
- [2] A. S. Ariyanto, S. I. Wahyudi, and M. Mukhlisin, "A review of Enhancing Abrasion Resistance of Dry Geopolymer Ramie Fiber Composite Mortar in Hydraulic Structures," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1321/1/012034.
- [3] N. Zarrabi, M. N. Moghim, and M. R. Eftekhari, "Effect of hydraulic parameters on abrasion erosion of fiber reinforced concrete in hydraulic structures," *Constr Build Mater*, vol. 267, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120966.
- [4] ACI Committee 207, "ACI 207.6R-17 Report on the Erosion of Concrete in Hydraulic Structure," *ACI* 207, 2017.
- [5] Y. W. Liu, T. Yen, and T. H. Hsu, "Abrasion erosion of concrete by water-borne sand," *Cem Concr Res*, vol. 36, no. 10, pp. 1814–1820, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.03.018.
- [6] O. Akashi, T. Hanaoka, Y. Matsuoka, and M. Kainuma, "A projection for global CO₂ emissions from the industrial sector through 2030 based on activity level and technology changes," *Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 1855–1867, Apr. 2011, doi: 10.1016/J.ENERGY.2010.08.016.
- [7] J. Alex, J. Dhanalakshmi, and B. Ambedkar, "Experimental investigation on rice husk ash as cement replacement on concrete production," *Constr Build Mater*, vol. 127, pp. 353–362, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.09.150.
- [8] H. Yang et al., "A comprehensive overview of geopolymer composites: A bibliometric analysis and literature review," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00830.
- [9] J. Davidovits, "Geopolymers," *Journal of thermal analysis*, vol. 37, no. 8, pp. 1633–1656, 1991, doi: 10.1007/BF01912193.
- [10] T. Luukkonen, Z. Abdollahnejad, J. Yliniemi, P. Kinnunen, and M. Illikainen, "One-part alkali-activated materials: A review," *Cem Concr Res*, vol. 103, pp. 21–34, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2017.10.001.
- [11] J. Davidovits, "Geopolymer Chemistry and Applications, 5th edition," *J. Davidovits-Saint-Quentin, France*, no. January 2008, p. 680, 2008, Accessed: Apr. 26, 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/265076752>
- [12] H. Xu and J. S. J. Van Deventer, "The geopolymerisation of aluminosilicate minerals," *Int J Miner Process*, vol. 59, no. 3, pp. 247–266, 2000, doi: 10.1016/S0301-7516(99)00074-5.
- [13] V. F. F. Barbosa, K. J. D. MacKenzie, and C. Thaumaturgo, "Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysilicate polymers," *International Journal of Inorganic Materials*, vol. 2, no. 4, pp. 309–317, Sep. 2000, doi: 10.1016/S1466-6049(00)00041-6.
- [14] K. M. Klima, K. Schollbach, H. J. H. Brouwers, and Q. Yu, "Thermal and fire resistance of Class F fly ash based geopolymers – A review," *Constr Build Mater*, vol. 323, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126529.
- [15] S. Luhan, D. Nicolaides, and I. Luhan, "Fire Resistance Behaviour of Geopolymer Concrete: An Overview," *Buildings 2021, Vol. 11, Page 82*, vol. 11, no. 3, p. 82, Feb. 2021, doi: 10.3390/BUILDINGS11030082.
- [16] R. He, N. Dai, and Z. Wang, "Thermal and Mechanical Properties of Geopolymers Exposed to High Temperature: A Literature Review," *Advances in Civil*

- Engineering*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/7532703.
- [17] E. S. Romadhon, A. Antonius, and S. Sumirin, "Design of Low Alkali activator Geopolymer concrete mixtures," vol. 11, no. 3, pp. 627–638, 2022, doi: 10.32832/astonjado.v11i3.
- [18] S. E. Wallah, "Behaviour and Strength of Reinforced Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Beams." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/267918137>
- [19] J. Thaarrini and S. Dhivya, "Comparative Study on the Production Cost of Geopolymer and Conventional Concretes," 2016.
- [20] D. Hardjito and B. V Rangan, "DEVELOPMENT AND PROPERTIES OF LOW-CALCIUM FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE."
- [21] K. Ramujee and M. Potharaju, "Abrasion Resistance of Geopolymer Composites," *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 1961–1966, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.230.
- [22] S. M. Cheyad, A. N. Hilo, and T. S. Al-Gasham, "Comparing the abrasion resistance of conventional concrete and geopolymer samples," *Mater Today Proc*, vol. 56, pp. 1832–1839, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.029.