

DURABILITAS MORTAR DENGAN REPLACEMENT BAHAN POZZOLAN TERHADAP LINGKUNGAN AGRESIF

Durability of Mortar with Replacement Pozzolan Material on the Agresive Environment

Miko Eniarti*, Ngudiyono*, I Nyoman Merdana*, Tri Sulistiyowati*, Sofia Rawiana*,
Rahma Dwi Natasya*, Olan Maulana*

*Jurusan Teknik Sipil Universitas Mataram
Jl. Majapahit No 62, Mataram 83125 Indonesia

Email: mikoeniarti@unram.ac.id, ngudiyono@unram.ac.id, nyomanmerdana@unram.ac.id,
trisulistiyowati@unram.ac.id, sofiarawiana@unram.ac.id, rahmanatasya@gmail.com,
olanmaulana@gmail.com

Manuscript received: 17 Januari 2025

Accepted: 24 April 2025

Abstrak

Bahan pozzolan bisa digunakan sebagai salah satu material alternatif natural SCM (Supplementary Cementing Material) karena komponen utamanya adalah silika. Pemakaian bahan pozzolan (serbuk batuan silika, serbuk batu apung) sebagai replacement semen diharapkan dapat meningkatkan durabilitas mortar. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang datanya dianalisis lebih lanjut secara deskriptif. Benda uji berbentuk kubus dengan panjang, lebar dan tinggi 50 mm. Pengujian yang dilakukan meliputi : konsistensi normal, waktu pengikatan (setting time), temperatur hidrasi, kuat tekan mortar, kadar klorida dan pengujian pH. Persentase replacement semen oleh pozzolan adalah 15% dari berat semen, sedangkan nilai faktor air semen 0,5 dan sebagai pembanding dibuat mortar tanpa bahan pozzolan. Perawatan benda uji dilakukan dengan merendam benda uji selama 28 hari pada kondisi air normal dan 90 hari pada lingkungan agresif (air laut dan larutan asam sulfat). Hasil penelitian menunjukkan bahwa dampak lingkungan agresif mortar tanpa pozzolan, replacement pozzolan serbuk batu apung, replacement pozzolan serbuk batuan silika kuat tekan berturut-turut 16,60 Mpa, 20,6 MPa, 23,16 Mpa diekspose air laut nilainya paling rendah. Mortar yang diekspose larutan asam sulfat berturut turut 22,11 MPa, 25,47 MPa, 28,39 MPa. Mortar pada kondisi normal kuat tekannya paling tinggi, yaitu 23,45 MPa, 26,69 MPa, 29,09 MPa. Konsistensi normal mortar dengan replacement pozzolan jumlah airnya meningkat hingga 6,22 % dan setting time meningkat hingga 41,46 %. Sebaliknya untuk temperatur hidrasi, puncaknya terjadi pada pasta semen murni pada suhu 38°C.

Kata kunci : Durabilitas, Pozzolan, Replacement, Lingkungan agresif.

PENDAHULUAN

Mortar adalah bahan bangunan berupa adukan semen yang biasa digunakan dalam pekerjaan tukang batu terdiri dari air, semen portland dan agregat halus. Mortar memegang peran yang sangat penting dimana hampir semua bangunan sipil menggunakan mortar untuk pasangan bata, pasangan batu, pembuatan beton dan sebagai finising bangunan berupa plesteran. Mortar rentan terhadap serangan lingkungan agresif disebabkan kapur Ca(OH)_2 yang merupakan hasil sampingan proses hidrasi, mempunyai sifat basa yang kuat sehingga mudah bereaksi dengan lingkungan asam.

Pencampuran mortar dengan bahan pozzolan akan mengurangi jumlah kapur Ca(OH)_2 . Pozzolan adalah bahan yang mengandung senyawa silikat dan aluminat yang tidak mempunyai sifat mengikat seperti semen, akan tetapi dalam bentuknya yang halus dan dengan adanya air senyawa-senyawa tersebut akan bereaksi dengan kapur pada suhu normal membentuk senyawa Kalsium Silikat Hidrat dan Kalsium Aluminat Hidrat yang bersifat hidraulis dan mempunyai angka kelarutan yang cukup rendah sehingga sangat berperan dalam pengerasan mortar (Tjokrodinuljo,1996).

Durabilitas mortar terhadap pengaruh lingkungan sekitar mempengaruhi usia pemakaian bangunan. Pengaruh lingkungan yang paling berbahaya adalah serangan sulfat (SO_4) dan reaksi alkali agregat yang biasanya dikandung oleh air laut. Air laut umumnya mengandung 3,5% garam, yaitu natrium klorida (NaCl), magnesium sulfat $\text{Mg}(\text{SO}_4)$ dan magnesium klorida MgCl_2 . Adanya garam dalam air laut dapat mengurangi kekuatan bahan sampai 20% (Tjokrodimuljo, 1996). Salah satu cara untuk meningkatkan durabilitas mortar adalah dengan menggunakan bahan pozzolan, yaitu bahan alam atau buatan yang sebagian besar terdiri dari unsur silikat/aluminat yang reaktif. Unsur silika dapat berfungsi sebagai *filler* yang mengisi pori-pori mortar dan pada kondisi yang sesuai dapat bereaksi dengan kapur membentuk gel yang bersifat sebagai bahan perekat.

Mengingat negara kita 67% wilayahnya berupa lautan, sedangkan batu apung dan batu silika tersebar di pulau Lombok dimana keduanya mengandung silikat yang tinggi. Oleh karena itu perlu diteliti durabilitas mortar dengan *replacement* kedua bahan *pozzolan* tersebut terhadap lingkungan agresif. Pemanfaatan pozzolan sebagai pengganti sebagian semen diharapkan mampu menambah umur masa layan bangunan serta biaya konstruksi bangunan menjadi lebih murah.

TINJAUAN PUSTAKA

Menurut Tjokrodimuljo (1996) pozzolan yang dapat digunakan sebagai bahan replacement semen pada mortar umumnya berkisar antara (10% – 35%) berat semen. Bahan pozzolan dapat membuat beton semakin kedap air, meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan garam, sulfat dan air asam. Laju kenaikannya lebih lambat pada umur 28 hari namun memiliki kuat tekan sedikit lebih tinggi setelah 90 hari. Komposisi yang optimal memberikan dampak positif terhadap kinerja mortar, menjadikan mortar lebih mudah diaduk, lebih kedap air, dan kuat tekannya meningkat. Pemakaian pozzolan sangat menguntungkan karena menghemat semen, dan mengurangi panas hidrasi yang mengakibatkan retakan serius pada mortar dapat dihindari.

Hasil penelitian Eniarti dkk (2023) penggantian semen oleh bahan pozzolan serbuk batu apung 10% dan 20% masih memenuhi syarat kekuatan untuk pasta semen menurut SNI 15-2049-2004. Joedono dan Wahyudi (2014) beton dengan kandungan pasir silika 15% mempunyai nilai kuat tekan yang optimum 25,654 MPa meningkat 10,573% dari beton normal. Hayati dkk (2019) penggantian semen dengan tanah diatomae, nilai kuat tekan pasta semen mengalami penurunan sebanding dengan penambahan kadar tanah diatomae. Akan tetapi penurunan kuat tekan tidak signifikan untuk variasi tanah diatomae 10%. Nilai kuat tekan rata-rata adalah 56,52 MPa (tanah diatomae 0%); 55,70 MPa (tanah diatomae 10%).

Dalam masa layan, kinerja material beton sangat dipengaruhi oleh lingkungan yang pada akhirnya dapat menurunkan durabilitasnya. Kemampuan dalam melawan aksi cuaca, serangan kimia atau sumber kerusakan lain didefinisikan sebagai durabilitas beton (Mehta dan Monteiro, 2006).

Penelitian tentang durabilitas beton telah dilakukan oleh Fajrin dkk (2023) lingkungan agresif air laut memberikan pengaruh yang paling signifikan dimana kekuatan tarik dan lentur menurun 18% dan 22,7 %. Kencanawati (2014) lingkungan agresif dengan proses karbonasi secara akselerasi menghasilkan modulus elastisitas menunjukkan penurunan nilai yang cukup signifikan 48,35 %. Roni dkk (2021) beton dengan berbagai mutu beton menggunakan semen PCC memberikan kontribusi yang

lebih baik dalam hal ketahanan beton di lingkungan gambut akibat adanya material pozzolanik yang terdapat pada semen PCC.

Durabilitas beton merupakan kemampuan beton untuk menahan bekerjanya pengaruh kimia, fisika, mekanis dan bakteri. Dari sekian banyak senyawa asam yang dapat merusak, yang paling banyak dan sering dilakukan penjagaan terhadapnya adalah senyawa sulfat. Garam-garam sulfat biasanya terdapat di dalam air, di dalam tanah, di laut, danau dan rawa-rawa. Sulfat ini dengan semen yang berkadar C_3A cukup tinggi, akan bersenyawa membentuk kuman semen (*cement bacillus*) yang rapuh dan membesar, sehingga lama kelamaan gugur dan rusak (Samekto dan Rahmadiyanto; 2001). Mortar karena sifatnya yang basa kuat akibat serangan lingkungan yang asam akan menurun nilai pH.

Akibat serangan asam sulfat terdapat dua reaksi yaitu, reaksi dengan calcium hidroksida menghasilkan calcium sulfat atau gypsum. Selanjutnya gypsum bereaksi dengan hydrated calcium aluminate akan menghasilkan calcium sulphoaluminate atau ettringite. Kedua reaksi tersebut meningkatkan volume padatan yang akan menyebabkan retak-retak pada beton (*Cement and Concrete Association of Australia*, 2002).

METODE PENELITIAN

Komposisi material yang dipergunakan.

Dalam penelitian ini komposisi material yang dipakai terdiri dari campuran pasir, bahan pozzolan, air dan semen. Sebelum pembuatan mortar terlebih dahulu dilakukan uji pendahuluan untuk mengetahui karakteristik pasta semen. Adapun uji pendahuluan yang dilakukan meliputi uji konsistensi normal, temperatur hidrasi dan *setting time*.

Komposisi mortar ditentukan sesuai yang umum digunakan di lapangan yakni 1pc : 4ps dengan fas 0,5. *Cementitious ratio* yaitu prosentase berat semen yang digantikan oleh pozzolan sebesar 15%. Berdasarkan komposisi tersebut kebutuhan masing-masing bahan disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Komposisi Campuran Mortar

CR (%)	Berat Pozzolan (gr)	Berat Semen (gr)	Berat Pasir (gr)	Fas
0	0	500	2000	0,5
15	75	425	2000	0,5

Kualifikasi dari masing-masing material adalah sebagai berikut:

- Semen : type I merk Tiga Roda
- Pasir : dari sungai Gebong, Narmada Lombok Barat. Gradasi masuk zone 2, lolos ayakan no. 8 (2,4mm) , BJ 2,697 kadar air 4,774 % modulus kehalusan butir 2,871 dan kadar lumpur 1,421%.
- Batu Apung : diambil dari desa Labuapi, Lombok Barat dihaluskan hingga lolos ayakan no(0,075mm)
- Batuan silika : diambil dari desa Batu Nampar Lombok Timur dihaluskan hingga lolos ayakan no. 200 (0,075mm)
- Air : dari sumur air di Laboratorium Struktur Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Unram.

Selanjutnya dibuat benda uji mortar dengan variasi seperti disajikan dalam Tabel 2. Benda uji mortar direndam dalam air normal maupun lingkungan agresif selama 28 hari, kemudian mortar direndam di lingkungan agresif. Lingkungan agresif dibedakan yaitu air laut dan larutan asam sulfat. Lingkungan asam sulfat dibuat dengan mencampurkan 1 liter air dengan 0,28 ml asam sulfat non teknis sehingga diperoleh pH = 2 dan penggantianannya dilakukan setiap 3 hari sekali. Sedangkan lingkungan air laut diambil dari pantai Tanjung Karang dengan setiap minggu air laut dibuang, diganti dengan air laut yang baru diambil dari pantai yang sama.

Tabel 2 Kebutuhan Benda Uji

Kuat Tekan	Pozzolan (%)				Jumlah
	Batu Apung		Batuan Silika		
	0	15	0	15	
1. Lingkungan Air Tawar	6	6	6	6	24
2. Lingkungan Air Laut	6	6	6	6	24
3. Lingkungan Asam Sulfat	6	6	6	6	24

Setelah masing-masing benda uji direndam di lingkungan agresif selama 90 hari, diangkat kemudian dilakukan pengujian kuat tekan untuk ketiga lingkungan. Guna mengetahui durabilitasnya benda uji yang direndam di larutan asam sulfat dilakukan uji pH sedangkan benda uji yang direndam di air laut dilakukan pengujian kadar klorida.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tes Konsistensi Normal

Menurut SNI 15-2049-2004, pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan konsistensi normal semen Portland dengan menggunakan alat vicat. Konsistensi normal adalah suatu kondisi standar yang menunjukkan pasta cukup basah artinya tidak terlalu encer dan tidak terlalu kering. Metode ini digunakan untuk menentukan kadar air yang dibutuhkan pada penyiapan pasta semen untuk pengujian. Konsistensi normal pasta tercapai apabila batang peluncur menembus sampai batas (10 + 1) mm di bawah permukaan pasta dalam waktu 30 detik setelah dilepaskan.

Banyaknya air untuk bereaksi dalam pembentukan pasta semen diperkirakan 25% dari berat semen, tetapi dalam kenyataannya tidak selalu 25% tergantung dari jenis semen. Kondisi air yang terlalu sedikit menyebabkan pasta agak kering dan reaksi dalam semen tidak sempurna, apabila terlalu banyak air akan terdapat pori-pori kapiler yang menyebabkan pasta keropos.

Pengujian konsistensi normal dilakukan untuk mengetahui banyaknya air yang dibutuhkan untuk pasta semen murni dan pasta *replacement* bahan pozzolan. Berat setiap variasi benda uji yang digunakan sebanyak 500 gr. Hasil pengujian konsistensi normal disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil Uji Konsistensi Normal

Pasta Semen	CR (%)	Berat Pozzolan (gr)	Berat Semen (gr)	Berat Air (gr)	Konsistensi Normal (%)	Penambahan Air (%)
Tanpa Pozzolan	0	0	500	134,33	26,86	-
Batu apung	15	75	425	142,67	28,53	6,22
Batuan Silika	15	75	425	137,33	27,46	2,23

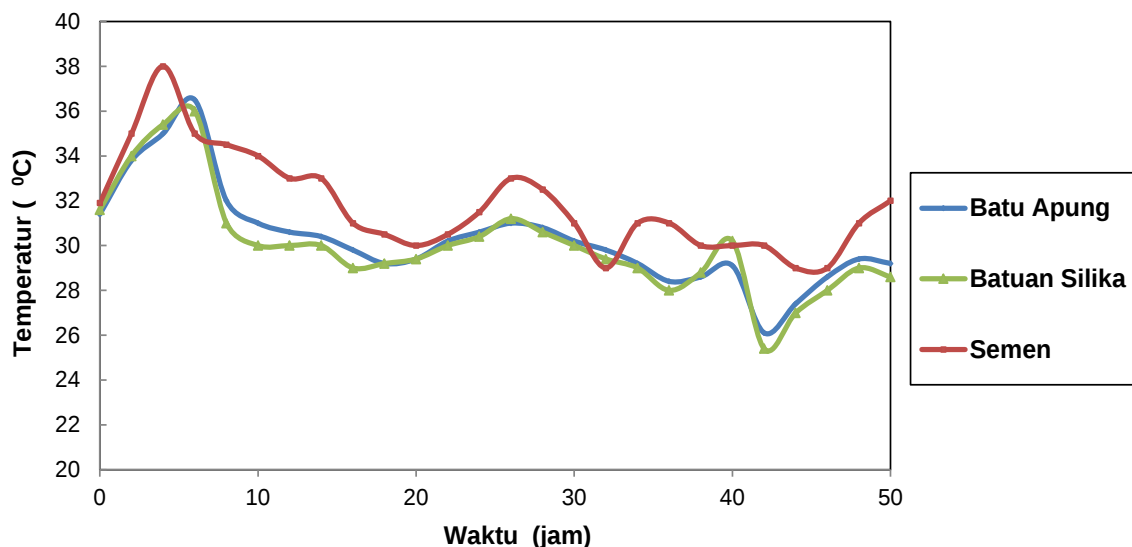
Berdasarkan Tabel 3 nampak bahwa dengan adanya *replacement* bahan pozzolan mengakibatkan jumlah air yang dibutuhkan semakin meningkat. Hal ini disebabkan pozzolan mampu menyerap air lebih banyak bila dibandingkan dengan semen. Dari kedua jenis pozzolan tersebut batu apung membutuhkan air yang lebih banyak, disebabkan batu apung batuan yang *poreus* sedangkan batuan silika adalah batuan yang sangat kompak.

Mengetahui konsistensi semen merupakan langkah krusial dalam memastikan kualitas dan kinerja semen dalam proyek konstruksi. Jumlah air yang ditambahkan kedalam semen mempengaruhi waktu pengikatan semen, jika kurang dari konsistensi normal tidak akan menyelesaikan reaksi kimia sehingga terjadi penurunan kekuatan. Jika melebihi konsistensi akan meningkatkan rasio air semen dan dengan demikian akan mengurangi kekuatannya.

Menurut Tri Mulyono, 2004 dalam pembuatan mortar nilai fas berkisar 0,4 – 0,65 sedangkan menurut standar ASTM C 109 M, 2002 adalah 0,485. Hasil uji konsistensi normal kebutuhan air meningkat 6,22 % untuk batu apung dan 2,23 % untuk batuan silika, sehingga pembuatan benda uji mortar fas diambil $0,485 + 0,0223 = 0,5073$ dibulatkan menjadi 0,5.

Tes Temperatur Hidrasi

Pengujian temperatur hidrasi dimaksudkan untuk mengetahui perkembangan temperatur hidrasi pada campuran pasta semen. Pengujian temperatur hidrasi dilakukan selama 50 jam dan setiap 2 jam perkembangan temperatur hidrasi dari masing-masing benda uji dicatat. Hasil perkembangan temperatur hidrasi disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 1.



Gambar 1 Perkembangan temperatur hidrasi pasta semen selama 50 jam

Gambar 1 di atas menunjukkan bahwa adanya penggantian 15% proporsi semen oleh bahan pozzolan mengakibatkan puncak temperatur hidrasi menurun. Pasta semen murni mencapai temperatur hidrasi tertinggi pada waktu 4 jam dengan suhu 38 °C, sedangkan dengan penggantian 15% proporsi semen oleh pozzolan temperatur hidrasi tertinggi dicapai pada waktu 6 jam dengan suhu yang lebih rendah sebesar 36.5 °C untuk batu apung dan 36 °C untuk batuan silika.

Hal ini disebabkan dengan adanya penggantian sebagian semen berarti volume semen portland berkurang, sehingga senyawa-senyawa yang ada di dalam portland semen seperti C₃A, C₃S, C₄AF dan

C₂S juga berkurang volumenya. Dimana dengan berkurangnya volume senyawa-senyawa semen penghasil panas hidrasi di atas maka temperatur hidrasi akan berkurang. Diantara senyawa-senyawa tersebut ada senyawa yang sangat dominan dalam menghasilkan panas hidrasi seperti C₃A dengan panas hidrasi 207 kal/gr, sedang untuk C₃S adalah 120 kal/gr. (Samekto dan Rahmadiyanto, 2001).

Tes Setting Time

Menurut SNI 15-2049-2004, pengujian ini dilakukan untuk mengetahui lama waktu pengikatan awal campuran semen dengan alat vicat dan jarum vicat yang kecil. Waktu pengikatan awal adalah jangka waktu dari mulainya pengukuran pasta pada konsistensi normal sampai pasta kehilangan sebagian sifat plastis (menjadi beku). Adapun hasil pengujian waktu ikatan awal dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil Uji Setting Time

Pasta Semen	CR (%)	Berat Pozzolan (gr)	Berat Semen (gr)	Berat Air (gr)	Wkt Ikatan Awal (menit)	Wkt Ikatan Akhir (menit)	Penambahan Wkt
Tanpa Pozzolan	0	0	500	134,33	82	120	-
Batu apung	15	75	425	142,67	116	135	41,46
Batuan Silika	15	75	425	137,33	104	146	26,83

Dengan adanya *replacement* semen 15% oleh pozzolan mengakibatkan waktu ikatan awal pasta semen menjadi lebih lama 116 menit untuk batu apung dan 104 menit untuk batuan silika. Persentase penambahan waktu ikatan awal pasta semen adalah 41.46% untuk batu apung dan 26,83% untuk batuan silika.

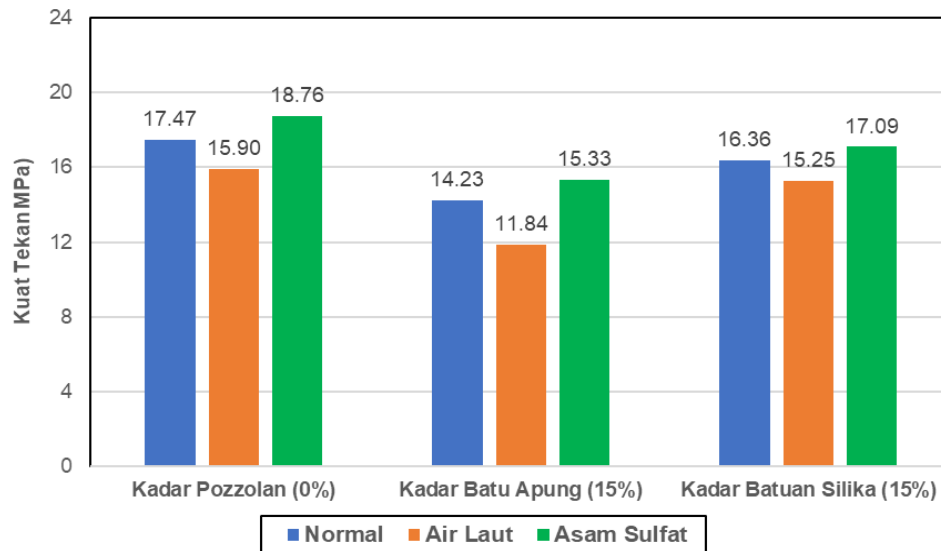
Berdasarkan hasil penelitian semen murni mengalami temperatur hidrasi 38^o C pada waktu 4 jam, sedangkan semen dengan pozzolan temperatur hidrasi turun hingga 36 °C dalam waktu 6 jam. Dengan adanya *replacement* semen oleh pozzolan terjadi penurunan temperatur hidrasi hingga 2^o C, dan semakin tinggi temperatur hidrasi maka semakin cepat pula waktu ikatan awal. Penurunan temperatur hidrasi terjadi karena senyawa C₃A, C₃S, C₄AF, C₂S yang merupakan senyawa semen penghasil panas hidrasi jumlahnya berkurang akibat *replacement* semen oleh pozzolan.

Hasil pengujian *setting time* sebanding dengan hasil pengujian konsistensi normal, semakin banyak air yang dibutuhkan maka semakin lama waktu untuk ikatan awal semen. Semakin banyak air maka temperatur hidrasi menurun sehingga perlu waktu lebih lama untuk proses hidrasi secara sempurna.

Tes Kuat Tekan Mortar

Tujuan dari tes tersebut adalah untuk membandingkan kekuatan mortar tanpa bahan pozzolan dengan mortar *replacement* bahan pozzolan, baik yang dirawat di lingkungan normal maupun yang direndam di lingkungan agresif. Sedang alat yang digunakan adalah Compression Testing Machine, pelaksanaan pengujian dilakukan setelah benda uji berusia 28 dan 90 hari.

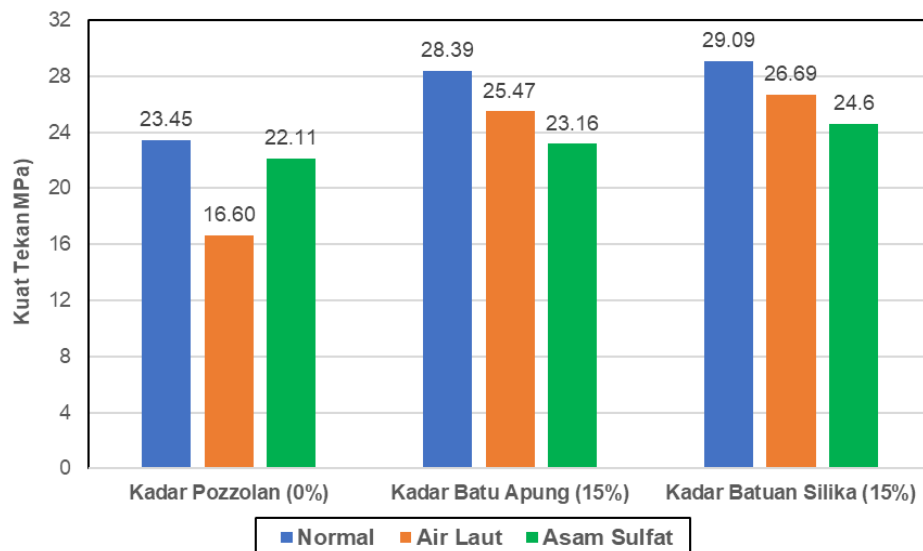
Untuk memudahkan analisis hasil pengujian kuat tekan mortar disajikan secara terpisah berdasarkan umur perawatan yaitu Gambar 2 untuk mortar umur 28 hari dan Gambar 3 untuk mortar umur 90 hari.



Gambar 2 Grafik Hubungan Kuat Tekan Mortar Umur 28 Hari

Berdasarkan Gambar 2 mortar dengan *replacement* bahan pozzolan mengalami penurunan kuat tekan pada semua jenis perawatan. Penurunan kuat tekan mortar terjadi karena reaksi yang terjadi antara kapur bebas Ca(OH)_2 yang merupakan sisa proses hidrasi semen dengan SiO_2 yang merupakan penyusun utama dari pozzolan masih berlangsung.

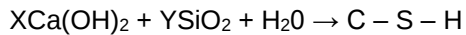
Kuat tekan tertinggi dicapai oleh mortar dari semen murni yang diekspose pada larutan asam sulfat yaitu sebesar 18.76 MPa. Hal ini terjadi karena adanya reaksi asam sulfat H_2SO_4 dengan kapur bebas Ca(OH)_2 yang membentuk *gypsum*, dimana *gypsum* ini akan menambah kepadatan mortar dan dengan sendirinya akan meningkatkan kuat tekan mortar. Pada umur 28 hari serangan sulfat belum membahayakan bagi durabilitas mortar.



Gambar 3 Grafik Hubungan Kuat Tekan Mortar Umur 90 Hari

Sedangkan kuat tekan mortar usia perawatan 90 hari menunjukkan bahwa mortar dengan *replacemen* bahan pozzolan dapat meningkatkan kuat tekan mortar di semua jenis perawatan. Dengan persentase kenaikan kuat tekan tertinggi dicapai oleh mortar dengan *replacement* batuan silika, dimana kandungan silikat batuan silika lebih besar dari batu apung. Hal ini terjadi karena reaksi antara kapur

bebas Ca(OH)_2 dengan SiO_2 pada mortar dengan usia perawatan 90 hari sudah selesai (sempurna). Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :

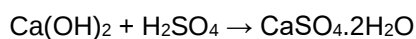


Kalsium silikat hidrat C-S-H yang dihasilkan dari reaksi tersebut berbentuk gel yang memiliki sifat seperti perekat dan sisanya berfungsi sebagai bahan pengisi (*filler*). Kedua fungsi tersebut akan berdampak positif yaitu meningkatkan kuat tekan mortar. Jadi mortar dengan *replacement* bahan pozzolan berangsur-angsur volume kapurnya akan berkurang. Kuat tekan tertinggi dicapai oleh mortar pada perawatan dengan air normal yaitu sebesar 29,09 MPa. Mortar dengan perawatan air laut dan larutan asam sulfat memiliki kuat tekan yang lebih rendah bila dibandingkan dengan kuat tekan mortar yang mengalami perawatan di air normal.

Kapur merupakan senyawa yang paling peka, mudah larut terutama di lingkungan agresif. Setelah kapur terlarut berarti porositas mortar bertambah besar maka lingkungan agresif akan mudah menyerang senyawa lainnya yaitu CAH (Calsium Aluminat Hidrat) yang lebih peka dari pada CSH. Kedua senyawa tersebut berfungsi sebagai perekat.

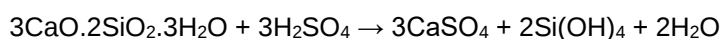
Untuk perendaman di air laut penurunan kuat tekan terjadi karena unsur-unsur kimia yang terkandung dalam air laut dapat menyerang mortar terutama oleh magnesium klorida. Magnesium klorida dalam air laut dapat menggabungkan diri dengan kalsium yang ada dalam mortar, sehingga timbul persenyawaan baru dengan volume yang lebih besar. Senyawa hasil reaksi antara kapur bebas Ca(OH)_2 dengan MgSO_4 menyebabkan terjadi pengembangan dan pemisahan dari pasta semen yang dapat menyebabkan terjadinya retak-retak dan terlepasnya partikel mortar, dimana dengan lepasnya partikel-partikel mortar ini dapat menurunkan kuat tekan mortar.

Sedangkan pada perawatan di lingkungan asam sulfat kuat tekan mortar mengalami penurunan kuat tekan karena adanya reaksi dari asam sulfat H_2SO_4 dengan Ca(OH)_2 yang membentuk *gypsum*.

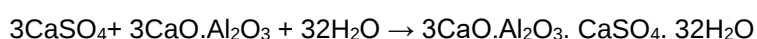


Pada awal serangan asam sulfat, *gypsum* yang dihasilkan akan mengisi pori-pori mortar sehingga akan menambah kepadatan mortar dan kuat tekan mortar akan meningkat, tetapi apabila berlangsung terus menerus maka beton akan mengalami deformasi, retak-retak dan akhirnya kehilangan daya kohesi.

Selain itu asam sulfat juga menyerang perekat pada beton yaitu C-S-H dengan reaksi sebagai berikut:



Kalsium sulfat (CaSO_4) hasil reaksi di atas kemudian bereaksi dengan *Trikalsium Aluminat* C_3A dalam semen membentuk *Ettringite*.

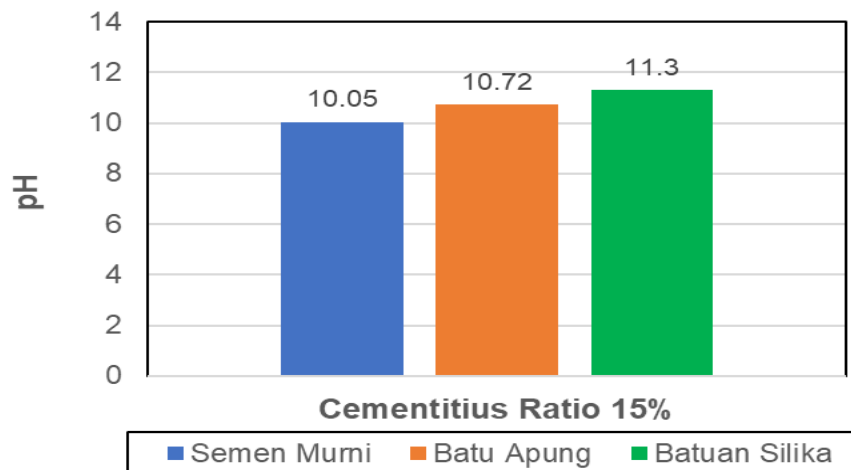


Ettringite ini memiliki sifat menyerap air sehingga volumenya dapat mengembang hingga 2.5 kali volume awal sehingga menyebabkan mortar retak-retak dan rapuh (Mehta, 1988).

pH Mortar

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana pengaruh pemakaian bahan *pozzolan* terhadap tingkat keasaman atau pH mortar dengan perendaman di dalam larutan asam sulfat. Pengaruh asam sulfat masuk ke dalam mortar merupakan indikasi pelapukan mortar karena materialnya mengalami pelarutan dalam lingkungan asam.

Mortar yang berusia 90 hari dan telah mengalami pengujian kuat tekan dihaluskan kemudian di uji tingkat keasaman (pH) dengan pH meter. Adapun hasil pengujian pH mortar dapat dilihat Gambar 4 sebagai berikut :



Gambar 4 Grafik Hubungan CR – pH

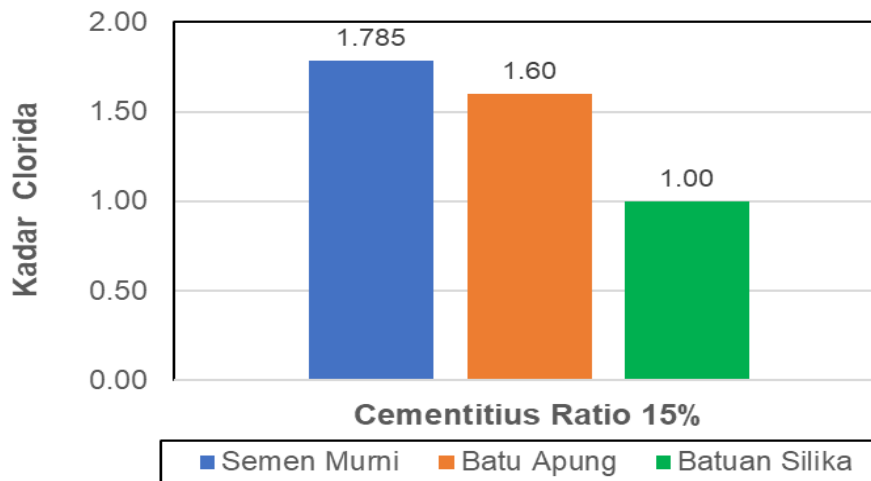
Berdasarkan Gambar 4. Grafik Hubungan *Cementitious Ratio* - pH menunjukkan bahwa mortar semen murni memiliki pH lebih rendah dibandingkan dengan mortar dengan bahan pozzolan. Hal tersebut dimungkinkan karena kepadatan mortar semen murni paling rendah sehingga serangan lingkungan asam lebih cepat. Lingkungan asam dapat melarutkan Kalsium silikat hidrat C-S-H sehingga daya ikat mortar berkurang, pada akhirnya dengan berjalannya waktu mortar menjadi rapuh.

Mortar merupakan material yang bersifat basa, jika direndam di lingkungan asam sulfat maka akan terjadi reaksi penetralan antara asam dan basa sehingga lingkungan asam sulfat meningkat pH nya sedangkan mortar berkurang pH nya. Nilai pH mortar untuk lingkungan agresif lebih kecil daripada pH mortar untuk lingkungan normal ± 12 , hal ini mengindikasikan terjadi proses pelarutan biasa dinyatakan mortar mengalami pelapukan.

Menurut P.K. Mehta (1988) ada beberapa hal yang bisa menyebabkan penurunan pH antara lain adanya peristiwa karbonasi antara CO_2 di udara maupun yang terlarut dengan kapur $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang ada di dalam mortar, dan juga adanya serangan chlor atau senyawa lain yang ada di air laut dengan senyawa yang ada di dalam mortar.

Kadar Klorida

Pengujian kadar klorida pada mortar dilakukan setelah pengujian kuat tekan mortar. Mortar sisa pengujian kuat tekan kemudian dihaluskan untuk diuji kadar klorida yang ada di dalamnya. Mortar yang digunakan dalam pengujian ini adalah mortar yang mengalami perawatan selama 90 hari di air laut. Hasil pengujian kadar klorida dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Grafik Hubungan CR – Kadar Clorida

Gambar 5 di atas menunjukkan bahwa dengan adanya *replacement* bahan pozzolan mengakibatkan jumlah ion klorida yang masuk ke dalam mortar menjadi lebih rendah yaitu sebesar 1,6% untuk batu apung dan 1% untuk batuan silika. Hal ini disebabkan karena adanya pozzolan mengakibatkan mortar semakin padat sehingga mengurangi timbulnya pengembangan dan pemisahan dari pasta semen. Penyerapan klorida oleh mortar akibat perendaman dengan air laut semakin berkurang. Dengan kepadatan mortar yang meningkat mengakibatkan ion Cl^- yang berasal dari MgCl yang terkandung dalam air laut menjadi berkurang dalam meningkatkan Ca^+ yang terkandung dalam mortar.

Kepadatan mortar meningkat diakibatkan adanya reaksi antara kapur hasil hidrasi semen dengan silika yang terkandung dalam pozzolan membentuk $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ yang mengisi pori-pori mortar sehingga porositas mortar menjadi lebih rendah. Dengan porositas mortar yang rendah maka tingkat penyerapan Cl^- yang terlarut dalam air laut menjadi semakin sedikit. Pemakaian pozzolan akan mengurangi penyerapan kadar klorida, semakin tinggi kadar klorida maka kuat tekan akan semakin menurun.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Mortar dengan *replacement* bahan pozzolan 15% dari berat semen menunjukkan kinerja yang optimal pada umur 90 hari yaitu kuat tekannya lebih tinggi, tertinggi dicapai serbuk batuan silika 29,09 MPa, serbuk batu apung 26,69 MPa dan mortar semen murni nilainya paling rendah 23,45 MPa. Pengaruh ekspose lingkungan agresif selama 90 hari menurunkan kuat tekannya, paling rendah akibat ekspose air laut berturut-turut 23,16 MPa, 20,60 MPa dan 16,60 MPa. Sedangkan ekspose larutan asam sulfat berturut-turut 28,39 MPa, 25,47 MPa dan 22,11 MPa. Konsistensi normal untuk pasta semen dengan *replacement* bahan pozzolan 15% meningkat hingga 6,22% dan *setting time* meningkat hingga 41,46%. Puncak temperatur hidrasi pasta semen trennya menurun, semen murni 38°C dengan waktu ikat 4 jam, replacemen pozzolan suhu turun hingga 36°C dengan waktu ikat 6 jam. Efek lingkungan agresif berakibat mortar mengalami pelarutan dan pengasaman sehingga kuat tekan mengalami penurunan, hal tersebut merupakan indikasi berkurangnya durabilitas mortar yang berdampak pada masa layan semakin menurun.

Saran

Untuk memberi pengaruh lingkungan agresif yang optimal, sebaiknya penggantian media lingkungan agresif setiap hari.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society for Testing Materials. (1995). *Standards in Building Codes*, Vol. 1, 32 nd Edition. ASTM.
- American Society for Testing Materials. (2002). *ASTM C109/C 109M-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens)*. ASTM International. West Conshohocken. PA.
- Anonim. (2002). *Sulphate Resisting Cement and Concrete*. Cement and Concrete Association of Australia. Australia.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI 03-6825-2002. *Metode Pengujian Kuat Tekan Mortar Semen Portland untuk Pekerjaan Sipil*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI 03-6826-2002. *Metode Pengujian Konsistensi Normal Semen Portland dengan Alat Vicat untuk Pekerjaan Sipil*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2004). SNI 15-2049-2004. *Semen Portland*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Eniarti, M., Syahrany, M., Rawiana, S., Sulistyowati, T., & Rofaida, A. (2024). Pemanfaatan Campuran Serbuk Batu Apung dengan Abu Sekam Padi sebagai Pengganti Semen. *Spektrum Sipil*, 11(1), 19-28. <https://spektrum.unram.ac.id/index.php/Spektrum/article/view/341>.
- Fajrin, J., Permatasari, I., Hariyadi, H., Eniarti, M., Suparjo, S., & Pathurahman, P. (2023). Kuat Tarik dan Lentur Komposit Polyester-Abaka yang Diekspose pada Lingkungan Agresif. *Spektrum Sipil*, 10(1), 1-11. <https://spektrum.unram.ac.id/index.php/Spektrum/article/view/281>.
- Fajrin, J., Sugiarta, I. W., Khatimah, K., & Johar, A. J. (2023). Durabilitas Komposit Epoksi-Sisal yang Diekspose pada Lingkungan Agresif. *Spektrum Sipil*, 10(2), 165-176. <https://spektrum.unram.ac.id/index.php/Spektrum/article/view/330>.
- Hayati, S., Muttaqin, M., & Saidi, T. (2019). Studi Pasta Semen Campuran Dengan Tanah Diatome, *Journal of The Civil Engineering Student*, 1(3), 127-123. <https://jim.usk.ac.id/CES/article/viewFile/8539/7046>.
- Kencanawati, N. N. (2014). Pengaruh Carbondioksida (CO₂) terhadap Durabilitas Beton, *Spektrum Sipil*, 1(2), 163-168. <https://spektrum.unram.ac.id/index.php/Spektrum/article/view/70>.
- Mehta, P.K. (1988). *Durability of Concrete Exposed to Marine Environment a Fresh Look*, ACI - SP 109 - 1, Concrete in Marine Environment Proceedings, 2nd International Conference, Canada.
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (2006). *Concrete*, Mac-Graw Hill, USA, pp. 121-198.
- Mulyono, T. (2004). *Teknologi Beton*, Andi Publishing, Yogyakarta.
- Murdock, L.J. and Brook, K.M. (1981). (diterjemahkan oleh Ir. Stephanus Hindarko), *Bahan dan Praktek Beton*, Erlangga, Jakarta.
- Putra, D. (2006). Penambahan Abu Sekam Pada Beton Dalam Mengantisipasi Kerusakan Akibat Magnesium Sulfat Pada Air Laut. *Jurnal ilmiah teknik sipil*, 10(2), 195-203. <https://ojs.unud.ac.id/index.php/jits/article/view/3439/2473>.
- Roni, S., Olivia, M., & Wibisono, G. (2021). Durabilitas Beton Bertulang di Tanah Gambut Kabupaten Bengkalis. *Jurnal Teknik*, 15(1), 26 – 34. <https://journal.unilak.ac.id/index.php/teknik/article/view/5194/2985>.
- Samekto, W., & Rahmadiyanto, C. (2001). *Teknologi Beton*, Kanisius, Yogyakarta.
- Tjokrodinuljo, K. (1996). *Teknologi Beton*, Nafiri, Yogyakarta.