



Ketahanan sulfat dan laju korosi beton yang menggunakan kaolin dan abu terbang

Steve W.M Supit¹, Ferry Sondakh², dan Regina Waworuntu³

Program Studi Konstruksi Bangunan Gedung, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Manado,
Manado, 95252 ^{1,2,3}

E-mail: ¹stevewmsupit@gmail.com

Abstrak

Pemanfaatan sisa limbah industri maupun sumber daya alam sebagai material konstruksi bangunan semakin berkembang dewasa ini karena kandungannya yang menyerupai semen sehingga dapat mengganti sebagian berat semen dalam komposisi campuran beton. Tujuan penelitian ini difokuskan pada evaluasi campuran beton dengan menggunakan kaolin dan abu terbang terhadap ketahanan beton akan sulfat dan laju korosi. Prosentasi kaolin diambil 10% (BK) dari berat semen dan tanpa dikalsinasi sedangkan abu terbang 40% berukuran lolos saringan No.100 (BFA) dan campuran kombinasi dengan 15% abu terbang lolos saringan No.200 (BFA25%+BFA15%). Metode pengujian adalah studi eksperimen di Lab. Uji Bahan Politeknik Negeri Manado dengan prosedur sesuai SNI 03-2834-2000 dan American Society of Testing Materials (ASTM)-standard. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton dengan kandungan kaolin, abu terbang dan kombinasi ukuran partikel abu terbang memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap kandungan asam serta memberikan hasil yang masih setara dengan beton normal pada uji laju korosi. Dapat disimpulkan bahwa penggunaan kaolin dan abu terbang dapat menjadi alternatif material konstruksi khususnya di daerah-daerah yang korosif.

Kata kunci—kaolin, abu terbang, beton, sulfat, korosi

1. PENDAHULUAN

Untuk dunia modern yang marak dengan pembangunan infrastruktur, peranan material pembentuk elemen konstruksi sangat diperlukan untuk menjamin kekuatan dan ketahanan bangunan. Dewasa ini, komposisi campuran beton banyak divariasikan dengan penambahan material-material lain yang disebut juga *pozzolan* seperti abu terbang (*Fly ash*), *Silica Fume*, abu sekam padi, abu serabut kelapa ataupun kaolin untuk mereduksi penggunaan semen, meningkatkan kekuatan, serta memperbaiki karakteristik beton. *Pozzolan* adalah bahan yang mengandung senyawa silika dan alumina, yang tidak mempunyai sifat mengikat seperti semen namun dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida yang pada suhu normal membentuk senyawa kalsium silikat hidrat yang bersifat hidraulis dan mempunyai angka kelarutan yang cukup rendah [1].

Walaupun pemanfaatannya sudah mulai tersebar luas karena menghasilkan beton yang lebih kuat dan ekonomis, namun masalah ketahanan terhadap serangan kimiawi dari beton dengan *pozzolan* dibandingkan dengan beton normal masih perlu diteliti. Umumnya kekuatan dan ketahanan pada beton dengan dan tanpa *pozzolan* sangat dipengaruhi oleh lingkungan korosif khususnya jika dibangun di daerah pantai, bangunan dermaga pelabuhan, talud dan

bangunan lainnya. Lingkungan asam yang mengandung unsur kimia asam akan merusak beton secara perlahan-lahan mulai dari tepi dan sudut beton dengan terjadinya pelepasan butiran-butiran partikel beton sehingga beton menjadi keropos [2]. Ada banyak jenis asam yang dapat merusak beton, salah satu diantaranya adalah asam sulfat (H_2SO_4) yang sangat agresif terhadap beton. Menurut Song (2007) [3], asam sulfat adalah senyawa asam yang terbentuk secara alam di permukaan tanah dan air tanah dan asam sulfat adalah asam yang paling sering dijumpai di lingkungan sekitar serta agresifitasnya yang tinggi dibandingkan dengan asam lainnya. Serangan asam yang ada akan membuat beton mengalami korosi, sehingga bisa terjadi ekspansi, retak dan kehancuran pada beton. Demikian juga dengan pengaruh ion klorida yang umumnya berasal dari kandungan air laut yang juga dapat menyebabkan laju korosi menjadi lebih cepat sehingga mempengaruhi ketahanan bangunan yang memiliki pengaruh langsung dari air laut.

Berdasarkan beberapa hal di atas, kualitas campuran beton perlu diperbaiki yang salah satunya dengan menggunakan material pozzolan. Ketahanan beton terhadap serangan kimiawi yang tinggi dapat meningkatkan tingkat layanan bangunan infrastruktur menjadi lebih lama bahkan melebihi umur rencana sehingga dapat secara signifikan mengurangi biaya pemeliharaan akibat kerusakan struktur.

Oleh karena itu berdasarkan beberapa latar belakang di atas, pengujian ketahanan beton dengan dan tanpa *pozzolan* pada lingkungan korosif dengan menggunakan material lokal Propinsi Sulawesi Utara sangat penting sehingga dapat diketahui potensi pemanfaatan material lokal yang bukan hanya dapat meningkatkan karakteristik mekanik beton, namun juga memiliki kemampuan dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan-serangan kimiawi.

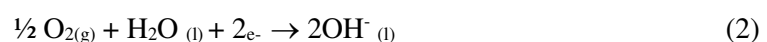
2. DASAR TEORI

Korosi didefinisikan sebagai kerusakan atau penurunan mutu suatu material yang diakibatkan oleh reaksi antar lingkungan dan material itu sendiri. Penetrasi oleh ion klorida dan karbonasi merupakan penyebab utama dari korosi. Salah satu penyebab utama korosi adalah penetrasi ion klorida (HCL atau NaCL) dan asam sulfat (H_2SO_4) yang bereaksi dengan oksigen dan permukaan logam.

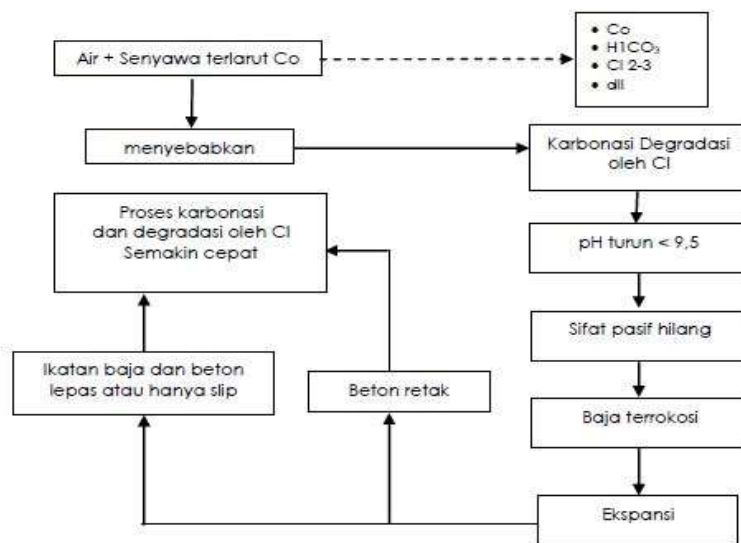
Korosi yang terjadi pada baja (seperti pada baja tulangan dalam beton) merupakan sebuah proses reaksi elektrokimia (*electrochemical reaction*), yang melibatkan transfer elektron dari satu jenis material ke material lain. Reaksi ini terjadi jika ada reaksi anodik atau oksidasi dan reaksi katodik atau reduksi [4]. Reaksi anodik pada baja adalah reaksi oksidasi atau penguraian baja menjadi ion. Reaksinya dapat ditulis sebagai berikut:



Dua buah elektron (2e^-) yang dihasilkan pada reaksi anodik haruslah dikonsumsi di tempat lain pada permukaan baja untuk menjaga kenetralan elektrik. Berikut ini adalah reaksi yang mengkonsumsi air dan oksigen:



Reaksi anodik (okdasi) dan katodik (reduksi) adalah reaksi-reaksi parsial, yang keduanya harus terjadi secara simultan dan pada tingkat yang sama. Kondisi ini menjadi prinsip dasar korosi, yaitu selama korosi pada metal berlangsung, maka tingkat oksidasi sama dengan tingkat reduksi. Dengan kata lain produksi jumlah elektron dan konsumsi jumlah elektron adalah sama. Korosi akan terjadi secara terus menerus sampai konstruksi hancur. Proses terjadinya korosi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir terjadinya Lingkaran Korosi [5]

3. METODE PENELITIAN

3.1 Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini terlihat pada Tabel 1. Material *pozzolan* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu abu terbang kelas C dari PLTU 2 Amurang dan kaolin dari Desa Toraget Kec. Langowan. Sesuai dengan hasil yang telah diuji, menghasilkan abu terbang yang digunakan memiliki kandungan $\text{CaO} > 5\%$ maka sesuai dengan ACI Manual of Concrete Practice 1993 Part 1 226.3R-3 [6] menyatakan bahwa *fly ash* ini merupakan *pozzolan* kelas C. Hasil pemeriksaan komposisi kimia semen PCC, abu terbang dan kaolin dapat dilihat pada Tabel 2..

Tabel 1. Material yang Digunakan

Nama Material	Keterangan
Semen	Portland Cement Composite (PCC) merek Tiga Roda
Agregat Halus	Amurang, Kab. Minahasa Selatan
Agregat Kasar	Desa Lansot, Kec Kema, Kab Minahasa Uatara
<i>Fly ash</i>	PLTU II Amurang, Kab Minahasa Selatan
Kaolin	Desa Toraget, Kec Langowan Utara, Kab Minahasa
Air	Air Suling Laboratorium Uji Bahan Politeknik Negeri Manado

Tabel 2. Komposisi kimia semen, abu terbang dan kaolin yang digunakan

Analisa kimia	PCC	Fly Ash	Kaolin
SiO ₂	8.43	18.77	40.48
Al ₂ O ₃	1.65	6.89	31.17
Fe ₂ O ₃	4.81	21.8	0.87
CaO	73.12	28.13	1.20
MgO	-	4.65	3.65
K ₂ O	-	1.38	0.73
Na ₂ O	-	7.41	12.32
SO ₃	2.71	6.65	2.59

3.2 Metode pengujian

3.2.1 Komposisi campuran

Proses perencanaan komposisi beton berdasarkan SNI 03-2834-2000 [7] dengan prosentase kaolin yang digunakan adalah 10% dari berat semen sedangkan abu terbang sebesar 40% dan kombinasi 25% + 15% berdasarkan ukuran partikel dimana abu terbang yang lolos saringan No. 200 dinamakan *fine fly ash (FFA)*. Prosentase ini didasarkan dari penelitian sebelumnya yang menghasilkan kuat tekan maksimum pada beton [8][9]. Proporsi campuran yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Proporsi material campuran beton normal dan *pozzolan*

Tipe campuran	Proporsi (kg/m ³)			
	BN	BK	BFA	BFA+FFA
Semen	380	342	228	228
Kaolin	-	38	-	-
Fly ash	-	-	152	95
Fine fly ash	-	-	-	57
Agregat Kasar	1155	1155	1155	1155
Agregat Halus	650	650	650	650
Rasio air : semen	0,5	0,5	0,5	0,5
Rasio agregat : semen	4,75 : 1	5,28 : 1	7,92 : 1	7,92 : 1
Rasio pasir : agregat	0,36 – 0,41	0,36 – 0,41	0,36 – 0,41	0,36 – 0,41

3.2.2 Pengujian ketahanan sulfat

Untuk pengujian ketahanan sulfat beton, benda uji yang digunakan adalah silinder berukuran 100x50 mm sebanyak 2 sampel untuk tiap campuran dan ditimbang pada umur 4, 7, 14, 21, 28, dan 42 hari untuk mencari perubahan berat sampel akibat perendaman pada H₂SO₄. Prosedur pengujian menggunakan AST C 267-01 [10].

3.2.3 Pengujian laju dan densitas arus korosi

Pada pengujian korosi, nilai arus sampai waktu tertentu direkam secara berkala untuk melihat peningkatannya yang menjadi pertanda inisiasi korosi. Prosedur yang digunakan sebagai berikut:

- Menyiapkan bak rendaman yang bersih dari kotoran, air sesuai dengan kebutuhan yang telah diperhitungkan, dan garam NaCl *pure analyzed* sebanyak 3,5% dari volume air.
- Masukkan beton kedalam bak rendaman yang sudah terisi air garam, kemudian menghubungkannya dengan *power supply*.
- Mengamati dan mencatat perubahan arus menggunakan *volt meter* dan *power supply* masing-masing air rendaman setiap siang hari hingga beton pecah. Metode yang digunakan yaitu metode basah kering (4 hari basah dan 3 hari kering).
- Setelah bacaan arus sudah konstan dan beton sudah banyak yang retak serta tulangan besi sudah berkarat, proses pengamatan dihentikan, dan beton diangkat dari air dan dipotret untuk melihat perubahan yang terjadi setelah korosi.
- Benda uji dipecahkan untuk melihat baja tulangan yang ada didalamnya. Menimbang berat baja tulangan kembali untuk mendapatkan selisih berat sebelum dan setelah pengujian. Selisih berat baja tulangan tersebut akan digunakan sebagai data untuk mendapatkan nilai laju korosi (*corrosion rate*) dan densitas arus korosi (*corrosion current density*)

Gambar eksperimen yang dilakukan untuk mengukur laju korosi dan densitas arus korosi dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3 dengan metode pengujian mengikuti standard ASTM C876-15 [11].

Laju korosi (*corrosion rate*) adalah kecepatan rambatan atau kecepatan penurunan kualitas bahan terhadap waktu. Laju korosi merupakan parameter dalam menentukan kelayakan suatu konstruksi dengan mengukur ketahanan terhadap korosi pada suatu material. Satuan yang digunakan adalah $\text{gr/m}^2\cdot\text{h}$ (grams per square metre per hour) [12]. Ada dua cara menghitung laju korosi yaitu metode kehilangan berat dan metode elektrokimia. Metode yang digunakan untuk menghitung laju korosi dalam penelitian ini adalah metode kehilangan berat. Metode kehilangan berat merupakan perhitungan laju korosi dengan mengukur kekurangan berat akibat korosi yang terjadi. Untuk menghitung nilai laju korosi dengan menggunakan metode kehilangan berat, digunakan rumus sebagai berikut:

$$CR = (K \times W) / (A \times T \times D) \quad (3)$$

Dimana:

CR = laju korosi (*corrosion rate*) ($\text{gr/m}^2\cdot\text{h}$),

K = konstanta ($1,0 \times 10^4 \times D \text{ gr/m}^2\cdot\text{h}$),

W = kehilangan berat (gr),

Densitas arus korosi (*corrosion current density*) adalah ukuran kerapatan arus korosi suatu benda yang dinyatakan dalam miliAmpere per satuan luas. Densitas arus korosi dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$I_{\text{corr}} = (W_o - W_c) / (F \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot W \cdot t) \quad (4)$$

Dimana: I

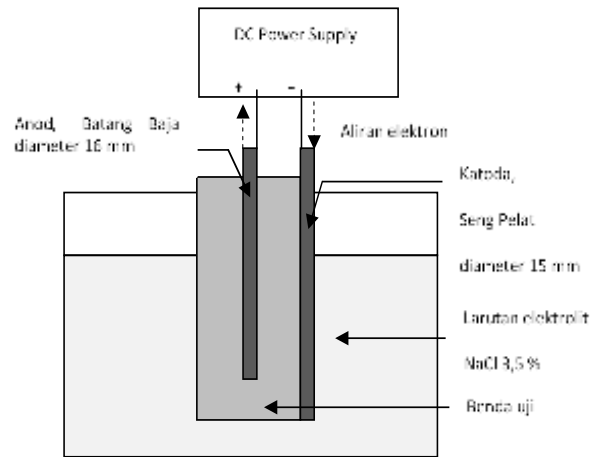
corr = densitas arus korosi (mA/cm^2),

W_o = berat tulangan sebelum korosi (gr),

W_c = berat tulangan setelah korosi (gr),

F = konstanta Faraday's (96487 Amp-sec),

- d = diameter baja tulangan (mm),
 L = panjang baja tulangan yang terendam (mm),
 W = berat equivalent baja, diambil dari rasio berat atom besi (27925 gr),
 t = waktu terhadap korosi (sec).



Gambar 2. Set up pengujian laju korosi



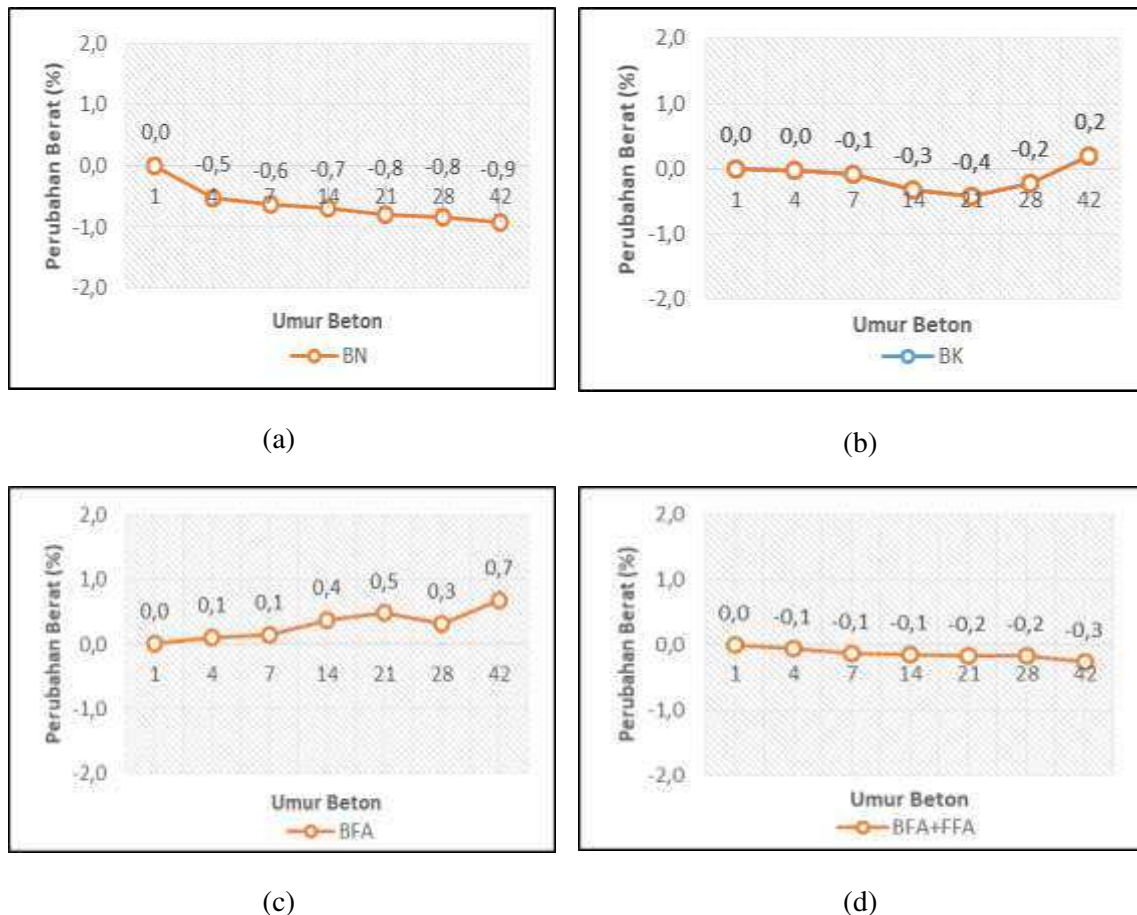
Gambar 3. Proses pengamatan perubahan arus

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Ketahanan sulfat

Gambar 4 menunjukkan hasil perubahan berat beton akibat perendaman sulfat yang dilakukan pada waktu yang direncanakan yakni 1, 4, 7, 14, 21, 28 dan 42 hari. Terlihat pada gambar bahwa beton normal (Gambar 4a) mengalami pengurangan berat yang sangat signifikan dari awal perendaman, hingga umur 42 hari dengan variasi pengurangan berat dari 0,5-0,9%. Adapun beton yang menggunakan material *pozzolan* abu terbang maupun kaolin memberikan hasil yang lebih baik dengan prosentase pengurangan berat yang lebih kecil dibandingkan dengan beton normal. Dapat dilihat pada gambar 4b, beton kaolin memiliki perubahan berat yang hanya

berkisar 0,1-0,4% sedangkan beton dengan 40% abu terbang (Gambar 4c) tidak menunjukkan adanya pengurangan berat malahan penambahan berat mulai dari 0,1-0,7% yang dapat terjadi akibat penyerapan air. Ketika prosentase abu terbang yang lebih halus dikombinasikan dalam campuran beton abu terbang, terlihat bahwa terjadi pengurangan berat namun hanya berkisar antara 0,1-0,3% (lihat Gambar 4d).



Gambar 4. Prosentase perubahan berat dari beton dengan variasi campuran

Dari hasil yang ada dapat disimpulkan bahwa beton dengan 40% abu terbang (BFA) memberikan ketahanan yang paling baik terhadap asam sulfat dibandingkan dengan beton lainnya. Demikian juga dengan beton yang menggunakan kaolin 10% dengan pengurangan berat yang kecil dengan nilai prosentase perubahan berat yang hampir sama dengan beton BFA+BFFA dimana penambahan partikel halus dalam campuran beton dengan abu terbang tidak memberikan pengaruh yang baik terhadap ketahanan sulfat beton. Hal ini kemungkinan terjadi akibat tidak terdistribusinya dengan baik partikel halus dalam beton sehingga menyebabkan asam sulfat mudah untuk menyerang beton dan mempengaruhi ketahanan tingkat permeabilitasnya. Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan abu terbang tipe C dengan prosentase 40% dapat memperbaiki kinerja abu terbang tipe C yang dikenal memiliki tingkat ketahanan terhadap sulfat yang rendah. Hal ini didukung oleh penelitian yang dilakukan

oleh penulis pada referensi [13] dimana komposisi campuran seperti perbandingan semen dan air yang rendah serta penggunaan *high volume fly ash*, *silica fume* maupun *ultrafine fly ash*. dapat memperbaiki ketahanan sulfat beton dengan abu terbang.

4.2 Laju korosi

Prosentase laju korosi baja tulangan pada beton dengan variasi campuran dengan 2 benda uji tiap campurannya ditunjukkan oleh Tabel 4 dan Gambar 5. Hasil pengujian ini memperlihatkan bahwa laju korosi yang lambat ditunjukkan oleh beton dengan abu terbang 40% dengan nilai laju korosi sebesar 0,40802 gr/m².h. sedangkan beton dengan 10% kaolin menunjukkan laju korosi yang paling cepat dengan nilai sebesar 2,19928 gr/m².h. Adapun beton normal memiliki nilai laju korosi yang seimbang dengan campuran beton dengan kombinasi ukuran partikel abu terbang (BFA+BFFA). Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan abu terbang 40% dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan NaCl. Sedangkan beton kaolin perlu diperbaiki dengan melakukan kalsinasi kaolin terlebih dahulu sehingga reaksi *pozzolan* dapat terjadi dan mempengaruhi tingkat kepadatan dan ketahanan beton kaolin terhadap serangan klorida.

Tabel 4. Laju korosi variasi campuran beton

Kode beton	Prosentase (gr/m ² .h)	Rata-rata (gr/m ² .h)
BN 1	1,12542	1,05144
BN 2	0,97746	
BK 1	2,18807	2,19928
BK 2	2,21049	
BFA 1	0,43941	0,40802
BFA 2	0,37664	
BFA+FFA 1	1,12094	1,05817
BFA+FFA 2	0,99539	

4.3 Densitas arus korosi

Hasil pengujian pada bagian 4.2 juga didukung oleh hasil pengujian densitas arus korosi sebagaimana ditunjukkan oleh Tabel 5. Densitas arus korosi rerata untuk benda uji BN, BK, BFA dan BFA+FFA berturut-turut adalah 1.04×10^{-6} mA/cm², 2.17×10^{-6} mA/cm², 4.02×10^{-7} mA/cm² dan 1.04×10^{-6} mA/cm² dimana beton kaolin menunjukkan rata-rata arus yang paling tinggi yang menunjukkan tingkat korosi yang paling besar dibandingkan dengan campuran beton lainnya. Adapun beton dengan menggunakan abu terbang 40% menghasilkan densitas arus korosi yang paling kecil dan selaras dengan hasil pengujian laju korosi. Walaupun tidak menunjukkan hasil tertinggi, beton dengan kombinasi ukuran partikel abu terbang berpotensi untuk dikembangkan karena menunjukkan hasil yang dapat mengimbangi hasil densitas arus korosi beton normal.

Tabel 5. Densitas arus korosi (mA/cm²)

Kode beton	Prosentase (mA/cm ²)	Rata-rata (mA/cm ²)
BN 1	1.11 x 10 ⁻⁶	1.04 x 10 ⁻⁶
BN 2	9.63 x 10 ⁻⁷	
BK 1	2.16 x 10 ⁻⁶	2.17 x 10 ⁻⁶
BK 2	2.18 x 10 ⁻⁶	
BFA 1	4.33 x 10 ⁻⁷	4.02 x 10 ⁻⁷
BFA 2	3.71 x 10 ⁻⁷	
BFA+FFA 1	1.10 x 10 ⁻⁶	1.04 x 10 ⁻⁶
BFA+FFA 2	9.81 x 10 ⁻⁷	

5. KESIMPULAN

Dari beberapa hasil penelitian di atas diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil pengujian ketahanan sulfat, laju korosi dan densitas arus korosi menunjukkan bahwa beton dengan menggunakan material abu terbang maupun kaolin memiliki hasil ketahanan yang lebih besar dibandingkan dengan beton PCC normal.
2. Penggunaan material pozzolan seperti abu terbang dan kaolin, dalam suatu campuran yang tepat berpotensi untuk meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan sulfat dan klorida. Dalam hal ini perlu diperhatikan perbandingan rasio w/c dan kalsinasi kaolin sehingga pemanfaatan material ini dapat lebih optimal.
3. Beton dengan 40% abu terbang tipe C dan kombinasi ukuran partikel berpotensi untuk diaplikasikan sebagai material konstruksi pada bangunan-bangunan yang rentan terhadap asam sulfat dan korosi seperti bangunan dekat pantai, tiang pancang, jembatan yang dibangun di air laut maupun dermaga.

6. SARAN

Dalam rangka pengembangan penelitian beberapa saran yang dapat digunakan sebagai berikut:

1. Diperlukan analisa lanjutan yang berkaitan dengan korelasi kuat tekan beton dan ketahanan sulfat maupun laju dan densitas arus korosi.
2. Pengujian dapat dilakukan untuk periode perendaman yang lebih lama sehingga tingkat agresifitas beton terhadap lingkungan asam dapat lebih diteliti secara optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Prasetyadi, W.P., (2018). Pengaruh penambahan pozzolan pada *Ordinary Portland Cement* terhadap kualitas *Pozzolan Portland Cement*, *Skripsi*, Fakultas Teknik dan Sains, Program Studi Teknik Kimia, Universitas Muhammadiyah Purwokerto, Banyumas.
- [2] Purba, Parhimpunan., (2006). Pengaruh kandungan sulfat terhadap kuat tekan beton. *METANA*, Vol. 4, No 1. Semarang.
- [3] Song, Xiujiang., (2007). Development and performance of class F fly ash based geopolymer concretes against sulphuric acid attack. *PhD Thesis*. Sydney, Australia: TheUniversity of New South Wales.
- [4] Broomfiel, J.P., (2007). *Corrosion of steel in concrete, understanding, investigation and repair*, 2nd Edition, London, Taylor and Francis.
- [5] Fahirah, F., (2007). Korosi Pada Beton Bertulang Dan Pencegahannya, *Jurnal SMARTek*, Vol. 5, No. 3, pp 190-195.
- [6] American Concrete Institute (ACI) parts 1 226.3R-3. (1993). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy, Weight and Mass Concrete, Washington, D.C.
- [7] SNI 03-2834-2000, Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- [8] Vurman, F., (2018). Studi eksperimen pengaruh metakaolin terhadap kuat tekan dan porositas beton fly ash bervolume tinggi, *Skripsi*, Jurusan Teknik Sipil, Program Studi D-IV, Konstruksi Bangunan Gedung, Politeknik Negeri Manado, Manado.
- [9] Supit, S., Rumbayan, R., Ticoalu,A., (2016), A study on the effects of metakaolin from Toraget village in indonesia, on cement concrete properties, *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*, Manado, Oktober 7.
- [10] American Society for Testing and Materials (ASTM) C 267-01 (2012), *Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes*. ASTM Internasional.
- [11] ASTM C876-15, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org.
- [12] Rostikasari, Astri., (2013). Kajian korosi pada beton bertulang dengan agregat kasar dari beton daur ulang, *Skripsi*, Program Studi Diploma III, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta.
- [13] Rajaram Dhole, Michael DA Thomas, Kevin J Folliard, Thano Drimalas., (2011), Sulfate resistance of mortar mixtures of high-calcium fly ashes and other pozzolans. *ACI Materials Journal*, Vol. 108, Issue 6, pp. 645-654.