

GEOPOLIMER SEBAGAI MATERIAL INFRASTRUKTUR BERKELANJUTAN DI LINGKUNGAN GAMBUT

Monita Olivia^{1,2}

¹Program Studi SI Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

²Laboratorium Struktur, Fakultas Teknik, Universitas Riau
monita.olivia@lecturer.unri.ac.id

ABSTRAK

Rawa gambut merupakan lingkungan tanah organik dengan kadar air tinggi, daya dukung rendah dan derajat keasaman tinggi. Struktur beton di lingkungan asam rentan mengalami kerusakan jangka panjang akibat asam-asam organik dan non-organik seperti asam humat dan asam sulfat dapat menyerang kalsium pada beton membentuk garam, meningkatkan porositas, menurunkan kekuatan beton, serta berpotensi mempercepat korosi tulangan pada beton. Ketahanan konstruksi di lingkungan asam, seperti tanah gambut, merupakan permasalahan infrastruktur dengan dampak signifikan karena material yang digunakan sebaiknya ekonomis dan memiliki durabilitas tinggi. Geopolimer dihasilkan dari proses geopolimerisasi bahan kaya silikat dan alumina, seperti abu terbang dan abu sawit, menggunakan larutan aktivator. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa material geopolimer memiliki sifat fisik dan mekanik yang sebanding dengan material berbasis semen OPC (Ordinary Portland Cement), serta tahan terhadap lingkungan agresif seperti suhu tinggi, lingkungan asam dan air laut. Tulisan ini mengkaji potensi geopolimer sebagai material untuk aplikasi infrastruktur di lingkungan asam rawa gambut. Material geopolimer memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap lingkungan asam karena memiliki ikatan aluminosilikat yang stabil dan tidak mudah bereaksi langsung dengan senyawa asam di lingkungan gambut.

Kata kunci: *abu sawit, abu terbang, aluminosilikat, asam, gambut, geopolimer, infrastruktur.*

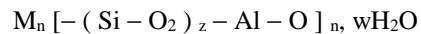
1. PENDAHULUAN

Penyediaan infrastruktur seperti transportasi, jalan, pengairan, air limbah dan air bersih merupakan salah satu prioritas pemerintah dalam pembangunan. Pembangunan infrastruktur fisik seperti saluran air maupun perkerasan jalan di lingkungan gambut biasanya mengalami berbagai permasalahan akibat daya dukung tanah rendah, kadar air tinggi, rangkak, deformasi dan derajat keasaman yang tinggi. Gambut merupakan tanah organik yang banyak ditemukan di negara-negara tropis dan subtropis. Tanah gambut merupakan akumulasi penguraian sisa-sisa tanaman lapuk kurang sempurna dan tergenang air (Agus dan Subiksa, 2008). Gambut memiliki kadar air sangat tinggi, yakni sekitar 100-1300% dari berat keringnya sehingga berat isi gambut tidak besar, lembek serta memiliki daya dukung beban rendah (Mutalib et al. 1994). Sisa pelapukan tanaman tidak sempurna akibat kondisi jenuh air dan rendah unsur hara membentuk bahan organik dengan ketebalan sekitar 50 cm atau lebih. Ketebalan lapisan organik gambut sangat menentukan tipe senyawa asam yang dikandungnya. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa gambut baru terbentuk mengandung nitrogen dan asam fulvat, sedangkan gambut lama lebih kaya senyawa asam humat (Spedding, 1988).

Kandungan bahan organik pada gambut terdiri dari senyawa-senyawa humat (10-20%), lignin, selulosa, hemiselulosa, lilin, tannin, resin, suberin, protein dan lainnya (Spedding, 1998). Senyawa-senyawa organik tersebut memiliki unsur hara rendah dan mengandung asam organik merugikan bagi tanaman. Derajat keasaman tinggi dengan pH 3-5 sangat umum ditemukan di Indonesia, terutama pada lapisan gambut tebal di daerah Sumatera dan Kalimantan. Gambut di daerah tropis memiliki kandungan senyawa-senyawa humat yang lebih tinggi daripada gambut di daerah beriklim subtropis karena gambut tropis banyak mengandung lignin dari pepohonan. Lignin yang terdegradasi dalam kondisi anaerob membentuk senyawa-senyawa humat (Kononova, et al. 1968) dengan tingkat agresivitas lebih tinggi daripada gambut subtropis karena proses pembentukannya terjadi secara parsial dalam kondisi anaerob.

2. GEOPOLIMER

Beton geopolimer dibuat tanpa semen dari 100% limbah agro-industri kaya silika dan alumina dengan pengaktifan menggunakan larutan aktivator seperti kombinasi NaOH dan natrium silikat pada suhu tinggi. Istilah geopolimer dipopulerkan oleh Davidovits (1994) bagi polimer mineral yang dihasilkan dari geokimia. Geopolimer adalah polimer alumina silikat inorganik yang disintesa dari bahan silika dan aluminium. Bahan silika dan aluminium diperoleh dari bahan alami maupun hasil sampingan industri seperti abu terbang. Proses geopolimerisasi meliputi reaksi kimia dalam kondisi basa pada mineral Al-Si, yang akan melepaskan ikatan Si-O-Al-O, berikut:



dengan Mn adalah elemen alkali, simbol – menunjukkan adanya ikatan, z adalah 1, 2, atau 3, and n adalah derajat polimerisasi.

Bahan dasar geopolimer umumnya mengandung silika dan alumina cukup tinggi, memiliki fasa amorphous reaktif atau fasa butiran-halus (Perera, 2007). Berbagai bahan dasar digunakan dalam penelitian seperti abu terbang kelas F, abu terbang kelas C, metakaolin, dan slag. Menurut Xu & van Deventer (2002), bahan untuk geopolimerisasi juga dapat berupa bahan tunggal maupun kombinasi berbagai bahan. Walaupun bahan dasar yang digunakan berbeda, pada dasarnya pengaktifan dengan larutan alkali akan memberikan hasil akhir berupa amorphous aluminasilikat. Tetapi van Jaarsveld, *et al.* (2003) menyatakan bahwa tiap bahan dasar yang digunakan sebenarnya mempengaruhi sifat fisik dan kimia geopolimer. Penggunaan abu terbang dari berbagai sumber yang memiliki perbedaan secara mineralogi dan kelarutan akan mempengaruhi kemampuan abu terbang tersebut untuk bereaksi dalam campuran geopolimer. Oleh karena itu, hasil pengaktifan berbagai bahan dasar jenis yang sama sebenarnya akan berbeda karena tiap bahan memiliki variasi kandungan mineral.

Aktivator yang digunakan dalam geopolimerisasi dapat berupa Ca(OH)₂, NaOH, natrium silikat, kombinasi NaOH dan natrium silikat, kombinasi KOH dan NaOH, KOH, potassium silikat dan kombinasinya, serta natrium karbonat. Faktor terpenting dalam penggunaan aktivator basa ini adalah ion [OH]⁻. Ion ini dalam sistem *aqueous* dikenal dapat meningkatkan kecepatan reaksi dengan memutuskan ikatan alumina dan silika (Arjunan, *et al.* 2001). Ion [OH]⁻ berperan dalam memutuskan ikatan Si-O-Si, Si-O-Al, Al-O-Al, dan membentuk kelompok Si-OH dan Al-OH. Selanjutnya pada kelompok ini terbentuk gel amorphous aluminosilikat yang merupakan hasil akhir geopolimerisasi. Sedangkan tahap akhir dari pengaktifan dengan larutan alkali, yaitu kristalisasi tidak tercapai dalam proses geopolimerisasi (Fernandez-Jimenez, *et al.* 2005). Hasil akhir berupa bahan cementitious baru berupa amorphous alkali aluminosilikat mengandung *quartz*, *mullite* dan *maghemite* dalam jumlah kecil, sama seperti yang diperoleh dalam pengaktifan metakaolin (Palomo, *et al.* 1999). Kombinasi larutan alkali yang digunakan (aktivator) menentukan hasil akhir dan kekuatan geopolimer. Penelitian Fernandez-Jimenez, *et al.* (2005) mengenai pengaruh larutan alkali pada hasil akhir geopolimer menunjukkan bahwa kombinasi NaOH dan Na₂SiO₃ (natrium silikat) menghasilkan material padat hampir tidak berpori dan memiliki ikatan yang kuat antara agregat dan matriks geopolimer. Penambahan natrium silikat telah memperkuat proses polimerisasi bahan ionik dalam sistem geopolimer.

Kekuatan akhir beton geopolimer dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, yaitu kepekatan larutan alkali, jenis larutan alkali, metode perawatan, suhu perawatan, waktu pra-perawatan, perbandingan bahan dasar dengan larutan alkali, kandungan air dan komposisi campuran. Kepekatan larutan alkali menentukan kekuatan beton geopolimer karena semakin pekat maka kekuatan beton akan meningkat dalam batas tertentu. Tetapi kepekatan yang sangat tinggi tidak dianjurkan karena beton menjadi tidak ekonomis (Fernandez-Jimenez, *et al.* 1999). Metode perawatan untuk kesempurnaan pembentukan material amorphous aluminosilikat adalah menggunakan suhu tinggi berkisar antar 60-90^oC (Hardjito, 2005). Panas akan membantu percepatan reaksi dalam campuran geopolimer sehingga jika kandungan air ditingkatkan secara drastis, maka terjadi kecenderungan pembentukan kristal geopolimer yang besar. Sedangkan penambahan air dalam jumlah yang sedang ternyata tidak secara signifikan mengubah ukuran kristal (van Jaarsveld, *et al.* 2002). Penambahan air akan memperbaiki kemudahan-pengerjaan beton tetapi akan menurunkan kuat tekan beton geopolimer (Hardjito, *et al.* 2004b). Waktu pra-perawatan pada suhu ruang sangat ditekankan karena dapat meningkatkan kuat tekan. Waktu pra-perawatan yang dianjurkan sekurang-kurangnya 24 jam (Bakharev, 2005) dan maksimum sekitar 3 hari (Hardjito, *et al.* 2005).

Penelitian mengenai sifat-sifat mekanis beton geopolimer telah dilakukan oleh berbagai peneliti. Karena jenis dan sifat berbeda tiap bahan dasar, komposisi campuran, jenis agregat, jenis larutan alkali dan metode pembuatan maka hasil penelitian yang diperoleh menjadi berbeda-beda. Kuat tekan berkisar antara 20-90

MPa, sehingga beton ini dapat dijadikan beton mutu tinggi (Sofi, *et al.* 2007). Berbagai pengujian lain yang dilakukan para peneliti tadi, seperti kuat tarik, kuat lentur, dan modulus elastisitas menunjukkan hasil kurang lebih sama dengan sifat-sifat tersebut pada beton konvensional. Karena menggunakan suhu tinggi dalam perawatan maka susut dan rangkai yang terjadi sangat kecil (Wallah, 2005). Keunggulan beton geopolimer di lingkungan asam seperti asam sulfat telah banyak diteliti. Hasil penelitian menunjukkan bahwa geopolimer unggul di lingkungan asam karena minimnya kandungan Ca(OH)_2 dalam beton (Song, 2007, Tockchom *et al.* 2009).

3. DURABILITAS BETON DI LINGKUNGAN ASAM

Secara umum beton memiliki ketahanan rendah pada lingkungan agresif seperti klorida, sulfat dan asam. Lingkungan asam biasanya merusak beton dengan mekanisme berbeda dari mekanisme perusakan beton oleh sulfat. Asam merusak beton dengan cara mengurai Ca(OH)_2 pada pasta semen, menghancurkan struktur kristal, dan menyisakan residu tidak bermanfaat pada kekuatan beton. Kemudian secara bertahap kerusakan ini menimbulkan penurunan kuat tekan beton sehingga masa layan struktur beton dapat berkurang (Zivica, 2006). Jenis-jenis asam yang biasa menyerang beton dapat berupa asam mineral, asam humat, asam karbonat dan air lunak, serta asam karbolik (Harrison, 1987). Asam mineral seperti asam klorida, asam nitrat dan asam sulfur merupakan asam berbahaya bagi beton. Asam klorida dan asam nitrat merupakan asam anorganik yang biasanya diproduksi oleh industri dalam jumlah besar dan berpotensi merusak beton secara tidak sengaja saat terjadi kebocoran atau akibat terpapar langsung tanpa pengawasan. Hanya asam sulfat umumnya ditemukan di alam, seperti pada hujan asam dan air pembuangan. Pada saluran pembuangan limbah terdapat hasil reaksi gas hydrogen sulfida (H_2S) dengan oksigen lewat perantara bakteri aerob *Sulfur Oxidizing* (SOB) menghasilkan asam sulfur. Tabel 1 menunjukkan konsentrasi dan nilai pH beberapa jenis asam yang umum ditemukan merusak beton.

Tabel 1 Konsentrasi dan nilai pH beberapa jenis asam (Eglinton, 1997).

Jenis asam		Konsentrasi larutan		
		Molaritas	(g/L)	Nilai pH
Natrium hidroksida	NaOH	1,0M	40	14
		0,1M	4	12,9
Kalsium hidroksida	Ca(OH)_2	Jenuh	1,2	12,4
Magnesium hidroksida	Mg(OH)_2	Jenuh	0,01	10,5
Kalsium karbonat	CaCO_3	Jenuh	0,02	9,4
Asam asetat	CH_3COOH	1,0M	60	2,4
		0,1M	6	2,9
Asam humat		Jenuh	0,19	3,5-4,0
Asam sulfat	H_2SO_4	1,0M	98	0,3
		0,1M	9.8	1,2

ACI (*American Concrete Institute*) membagi serangan asam menjadi 2 kategori, yaitu serangan asam sulfat dengan kalsium hidroksida yang membentuk gipsium dan serangan asam dengan kalsium aluminat hidrat yang membentuk *ettringite*. Kerusakan beton maupun mortar di lingkungan asam, terjadi karena ada dua reaksi utama yang memelopori kerusakan. Reaksi yang pertama adalah, kalsium hidroksida bereaksi dengan karbondioksida (CO_2) menghasilkan kalsium karbonat (CaCO_3) yang tidak larut dalam air. Pembentukan kalsium karbonat (CaCO_3) sebenarnya tidak menimbulkan kerusakan beton, tetapi proses berikutnya dimana kalsium karbonat (CaCO_3) akan bereaksi lagi dengan karbondioksida (CO_2) yang ada dalam air menghasilkan kalsium bikarbonat ($\text{Ca(HCO}_3)_2$) yang larut dalam air.

Mekanisme reaksi yang terjadi adalah:



Reaksi kedua adalah, apabila kalsium silikat hidrat (CSH) dan kalsium aluminat hidrat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) bereaksi dengan ion-ion asam maka akan menghasilkan gipsium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan *calcium sulphoaluminate* ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) yang dikenal dengan istilah *ettringite*. *Ettringite* mempunyai volume yang lebih besar dibandingkan dengan volume komponen penyusunnya sehingga akan mengakibatkan terjadinya ekspansi yang dapat menyebabkan kerusakan pada beton maupun mortar (Goyal *et al.*, 2009). Mekanisme reaksi pembentukan kalsium alumina hidrat dan *ettringite* yang terjadi adalah:





Asam humat merupakan gabungan beberapa jenis asam organik hasil penguraian dan pelapukan tanaman pada tanah gambut. Asam humat tergolong lemah dan tidak mudah larut di dalam air (MacFarlane, 1965). Tetapi kalsium humat atau garam-garam kalsium yang terbentuk dari hasil reaksi beton beberapa jenis asam humat, meskipun tidak mudah larut dalam air tetap menunjukkan potensi asam humat dalam merusak beton (Eglinton, 1997). Penumpukan kalsium humat yang tidak mudah larut dalam air membentuk semacam lapisan pelindung sehingga dapat membantu menghalangi matriks semen mengalami korosi asam lebih lanjut lagi. Hal ini menjadikan kondisi lingkungan gambut dengan air mengalir lebih destruktif dibanding air gambut tergenang karena kalsium humat mudah tergerus dalam kondisi air mengalir. Saat kelarutan kalsium humat semakin tinggi, maka laju korosi beton akan semakin tinggi pula (Harrison, 1987). Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa asam humat dan lignin dapat menghalangi waktu ikat normal dan pengerasan semen dengan agregat terkontaminasi gambut (Shirley, 1981).

Ketahanan beton di lingkungan asam menurut Shi & Stegemann (2000) dipengaruhi oleh karakteristik pori beton, kemampuan matriks semen untuk menetralkan asam dan hasil reaksi (produk) korosi akibat asam. Sedangkan menurut Zivica & Bajza (2002) dan Beddoe & Doner (2005), beton tahan asam ditentukan oleh jenis dan komposisi semen, nilai pH, tipe agregat dan penggunaan bahan tambah dalam campuran semen. Produk hidrasi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ beton lebih rentan terhadap asam karena bersifat alkalis, sehingga meningkatkan jumlah semen dalam campuran beton tidak memberikan hasil yang lebih baik. Sebaiknya semen dicampur dengan bahan tambah mineral seperti abu terbang dan silica fume sehingga akan meningkatkan jumlah gel C-S-H (*Calcium Silicate Hydrate*) melalui reaksi pozzolanik yang dapat memperbaiki struktur pori, meningkatkan kedapatan dan mengurangi jumlah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dalam pasta semen (Sobolev & Yeginobali, 2005). Reaksi pozzolanik dapat didefinisikan sebagai reaksi antara portlandite atau $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengan silika membentuk C-S-H. Beton dengan ketahanan atau durabilitas di lingkungan agresif umumnya dikaitkan dengan kuat tekan tinggi dan permeabilitas rendah. Kedua indikator ini berhubungan dengan porositas dan ukuran pori, serta kemampuan beton meloloskan air melalui pori-pori tersebut. Kedapatan beton yang ditandai dengan permeabilitas rendah lebih tahan terhadap serangan ion di lingkungan agresif.

4. GEOPOLIMER DI LINGKUNGAN GAMBUT

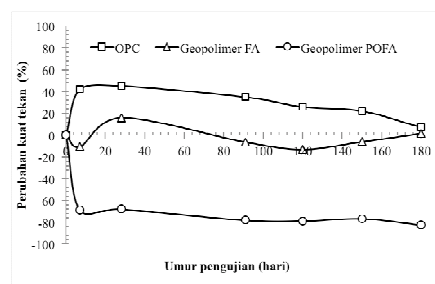
Penelitian mengenai geopolimer di lingkungan gambut telah dilakukan oleh Kelompok Riset Geopolimer Fakultas Teknik Universitas Riau sejak tahun 2005 dengan menggunakan abu terbang batu bara atau *fly ash* (FA) dan abu sawit atau *palm oil fuel ash* (POFA) dari industri lokal Provinsi Riau sebagai bahan dasar. Produk geopolimer abu terbang dan abu sawit yang dihasilkan memiliki kuat tekan berkisar antara 19,61-22,5 MPa pada umur 28 hari (Olivia et al. 2015). Hasil selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai slump beton segar, dan nilai kepadatan serta sifat mekanis beton geopolimer umur 28 hari (Olivia et al. 2015)

Jenis abu terbang	Slump (mm)	Kepadatan (kg/m^3)	Kuat tekan (MPa)	Kuat tarik (MPa)	Kuat lentur (MPa)	Modulus elastisitas (GPa)
Abu terbang batu bara (FA)	205	2346.65	22.58	1.76	3.29	26.91
Abu terbang sawit (POFA)	165	2295.43	19.61	1.57	3.03	20.99

Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa abu terbang dan abu sawit dari industri lokal dapat digunakan sebagai bahan dasar geopolimer. Meskipun campuran menunjukkan nilai slump yang tinggi, tetapi campuran masih bersifat kental dan sulit dipadatkan karena mengandung natrium silikat. Pada umur 28 hari, kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur dan modulus elastisitas beton geopolimer abu terbang lebih tinggi daripada geopolimer abu sawit. Hal ini disebabkan ikatan antara produk aluminosilikat dengan agregat yang lebih baik karena jumlah silikat pada campuran abu terbang. Hasil penelitian terhadap sifat mekanis beton geopolimer abu terbang dan abu sawit memperlihatkan bahwa kedua tipe geopolimer tersebut berpotensi dijadikan material untuk infrastruktur seperti saluran air kotor, box culvert maupun perkerasan kaku di tanah gambut.

Durabilitas material geopolimer terbuat dari abu terbang dan abu sawit di dalam air gambut yang asam telah dikaji (Olivia et al. 2016). Spesimen dicetak dalam cetakan 50x50x50mm dan dirawat di dalam suhu tinggi sebesar 100°C (oven) selama 24 jam. Kedua material memiliki kuat tekan berkisar antara 22,5 MPa pada umur 28 hari. Spesimen di rendam selama 180 hari di dalam air gambut dan perubahan kuat tekan diuji pada umur 7, 28, 91, 120, 150, dan 180 hari. Sebagai pembandingan, digunakan material OPC dengan kekuatan yang sama (Gambar 1).



Gambar 1. Perubahan kuat tekan setelah direndam di air gambut (Olivia et al. 2016)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampel OPC mengalami penurunan kuat tekan setelah direndam selama 28 hari dalam air gambut. Kuat tekan terus menurun hingga perendaman dilakukan selama 180 hari. Interaksi mortar OPC dengan asam pada air gambut dapat menyebabkan penundaan hidrasi pasta semen sehingga kuat tekan semakin berkurang. Kajian sebelumnya yang dilakukan oleh Olivia et al. (2014) menunjukkan bahwa mortar mutu tinggi juga mengalami penurunan kuat tekan setelah direndam di air gambut selama 91 hari. Mortar geopolimer abu sawit (POFA) yang direndam di air gambut, memperlihatkan penurunan kuat tekan yang cukup signifikan hingga 80% setelah direndam selama 180 hari. Kehilangan kuat tekan dapat diakibatkan oleh lemahnya ikatan antara produk aluminosilikat abu sawit, sehingga geopolimer dari abu sawit kurang stabil dan mudah rusak dalam larutan. Kuat tekan mortar geopolimer abu terbang (FA) tidak mengalami perubahan yang cukup signifikan. Penurunan kuat tekan terjadi setelah umur 28 hari hingga 120 hari, tetapi peningkatan kuat tekan terjadi setelah umur tersebut. Geopolimer yang dibuat dari bahan dasar amorf seperti abu terbang yang diaktifkan dengan natrium hidroksida akan lebih stabil saat direndam di air gambut. Geopolimer yang berinteraksi dengan asam lemah akan mengalami lindi dan terjadi pertukaran kation di kerangka aluminosilikat. Tetapi asam keras akan merusak ikatan Si-O-Al, meningkatkan jumlah ikatan Si-OH dan Al-OH, merusak kerangka aluminosilikat dan mengurangi massa geopolimer. Dibandingkan dengan material OPC atau geopolimer abu sawit (POFA), geopolimer abu terbang lebih cocok digunakan sebagai material infrastruktur untuk lingkungan gambut yang langsung

5. KESIMPULAN

Geopolimer merupakan material berasal dari limbah industri yang ketersediaannya cukup tinggi di Provinsi Riau. Material ini memiliki ketahanan terhadap asam di lingkungan gambut dan dapat digunakan sebagai material infrastruktur seperti saluran air maupun beton ringan untuk perkerasan kaku jalan di tanah gambut. Geopolimer abu terbang (FA) lebih direkomendasikan dibanding geopolimer abu sawit (POFA) untuk digunakan dalam aplikasi infrastruktur di tanah gambut. Ketahanan geopolimer terhadap asam disebabkan oleh ikatan aluminosilikat yang lebih stabil dan kandungan kalsium (Ca) lebih rendah dibandingkan OPC, serta tidak mengandung biomass seperti pada geopolimer abu sawit (POFA).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada anggota Kelompok Riset Geopolimer Fakultas Teknik, Universitas Riau, Edy Saputra, Chrisfela Wulandari, Lita Darmayanti, Iskandar Romey Sitompul, Zulfikar Djauhari, Batch 1, 2, dan 3, Laboratorium Struktur dan Bahan Fakultas Teknik, Universitas Riau. Pengambilan data dalam penelitian ini didanai oleh Unggulan Perguruan Tinggi (PUPT) DIKTI No DIPA 023.04.1.67.453/2015, Lembaga Penelitian, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus, F. & Subiksa, I.G.M. 2008. Lahan Gambut: Potensi untuk Pertanian dan Aspek Lingkungan. Bogor: Balai Penelitian Tanah Badan Penelitian dan World Agroforestry Centre.
- Arjunan, P., Silsbee, M.L. & Roy, D.M. Chemical activation of low calcium fly ash. Part 1: Identification of suitable activators and their dosage. 2001 International Ash Utilization Symposium. University of Kentucky: Center for Applied Energy Research.
- Bakharev, T. 2005. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement & Concrete Research* 35: 1224-1232.
- Beddoe, R.E. & Doner, H.W. 2005. Modeling acid attack on concrete: Part 1. The essential mechanisms. *Cement and Concrete Research*. Vol 35: 2333-2339.
- Davidovits, J. 1994. High alkali cements for 21st century concretes. In *Concrete Technology, Past, Present and Future*. Proceedings of V Mohan Malhotra Symposium. Editor: P Kumar Metha, ACI SP.
- Eglinton, M. 1997. Resistance of concrete to destructive agencies. In Hewlett, P.C. (ed). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books.

- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, J.G. & Puertas, F. 1999. Alkali activated slag mortars: mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research* 29: 1313-1321.
- Fernandez-Jimenez, A. & Palomo, A. 2005. Composition and microstructure of alkali-activated fly ash binder: effect of the activator. *Cement & Concrete Research* 35: 1984-1992.
- Goyal, S., Kumar, M., Sidhu, D.S. & Bhattacharjee, B. 2009. Resistance of mineral admixture concrete to acid attack. *Journal of Advanced Concrete Technology*. Vol 7: 273-283.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., & Rangan, B.V. 2004b. On the development of fly ash based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal* 101: 467-472.
- Hardjito, D. 2005. Development and properties of low calcium fly ash based geopolymer concrete. PhD Thesis of Civil Engineering & Computing Department. Perth: Curtin University of Technology.
- Harrison, W.H. 1987. Durability of concrete in acidic soils and waters. *Concrete* February 1987.
- Kononova, M.M., Alexandrova, I.V. & Titva, N.A. 1968. Decomposition of silicates by soil organic matter. *Soviet Soil Science*: 1005-1014.
- MacFarlane, I.C. 1965. The corrosiveness of muskeg waters: a review. *Canadian Geotechnical Journal* 11: 327-336.
- Mutalib, A.A., Lim, J.S., Wong, J.S. and Koonvai, L. 1994. Characterization, distribution and utilization of peat in Malaysia. In: B.Y. Aminuddin (Ed), *Tropical Peat*. Kuching: Proceedings of International Symposium on Tropical Peatland.
- Olivia, M., Hutapea, U.A., Sitompul, I.R., Darmayanti, L., Kamaldi, A., and Djauhari, Z. 2014. Resistance of plain and blended cements exposed to sulfuric acid solution and acidic peat water: a preliminary study. The 6th International Conference of Asian Concrete Federation, Seoul, Korea.
- Olivia, M., Kamaldi, A., Sitompul, I.R., Diyanto, I., and Saputra, E. 2015. Properties of geopolymer concrete from local fly ash (FA) and palm oil fuel ash (POFA). *Materials Science Forum* Vol. 803.
- Olivia, M., Wulandari, C., Sitompul, I.R., Darmayanti, L., and Djauhari, Z. 2016. Study of fly ash (FA) and palm oil fuel ash (POFA) geopolymer mortar resistance in acidic peat environment. *Materials Science Forum* (in press).
- Palomo, A. Grutzeck, M.W. & Blanco, M.T. 1999. Alkali-activated fly ashes. A cement for the future. *Cement & Concrete Research* 29: 1323-1329.
- Perera, D. 2007. Geopolymers-low energy and environmentally sound materials. Proceedings of the 1st International Congress on Ceramics. Freiman, S. (ed). The American Ceramic Society.
- Shi, C. & Stegemann, J.A. 2000. Acid corrosion resistance of different cementing materials. *Cement and Concrete Research*. Vol 30: 803-808.
- Shirley, D.E. 1981. Impurities in concreting aggregates. Slough, UK: Cement and Concrete Association, 1981; C & CA Construction Guide, Ref. 45016, 2nd edition.
- Song, X. 2007. Development and performance of class F fly ash based geopolymer concretes against sulphuric acid attack. Sydney: University of New South Wales.
- Sobolev, K. & Yeginobali, A. 2005. The development of high strength mortars with improved thermal and acid resistance. *Cement and Concrete Research*. Vol 35: 578-583.
- Sofi, M., van Deventer, J.S.J., Mendis, P.A. & Lukey, G.C. 2007. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement & Concrete Research* 37: 251-257.
- Spedding, P.J. 1988. *Peat. Fuel*. Vol 67: 883-900.
- Thokchom S, Ghosh P, Ghosh S. 2009. Effect of water absorption, porosity and sorptivity on durability of geopolymer mortars. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences* Vol 4(7): 28-32.
- van Jaarsveld, J.G.S, van Deventer, J.S.J. & Lukey, G.C. 2002. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymers. *Chemical Engineering Journal* 89: 63-73.
- van Jaarsveld, J.G.S, van Deventer, J.S.J. & Lukey, G.C. 2003. The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. *Material Letters* 57: 1272-1280.
- Wallah, S.E., Hardjito, D., Sumajouw, D.M.J. & Rangan, B.V. 2005. Creep and drying shrinkage behaviour of fly ash based geopolymer concrete. In Proceedings of Concrete 05 Conference. Concrete Institute of Australia, Melbourne.
- Xu, H. & van Deventer, J.S.J. 2002. Geopolymerisation of multiple materials. *Mineral Engineering* 15: 1131-1139.
- Zivica, V. 2006. Deterioration of cement-based materials due to the action of organic compounds. *Construction and Building Materials*. Vol 20: 634-641.
- Zivica, V. & Bajza, A. 2002. Acidic attack of cement-based materials- a review Part 2. Factors of rate of acidic attack and protective measures. *Construction and Building Materials*. Vol 16: 215-222.