



Iron Extraction from Coal Fly Ash Using HCl Solution

Slamet Budi Setyo[✉], Triastuti Sulistyaningsih, Agung Tri Prasetya, Ella Kusumastuti

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang
Gedung D6 Kampus Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229, Indonesia

Info Artikel

Diterima Juli 2021

Disetujui Agustus 2021

Dipublikasikan September
2021

Keywords:

Ekstraksi besi

Fly ash

Larutan HCl

Waktu ekstraksi

Abstrak

Sekitar 780 juta ton *fly ash* diproduksi setiap tahun di seluruh dunia. Pemanfaatan *fly ash* yang masih minimal, menyebabkan timbunan *fly ash* yang semakin meningkat. Berdasarkan hal tersebut maka dilakukan penelitian ekstraksi besi dari *fly ash* batubara menggunakan pelarut HCl. Penelitian ini bertujuan mengetahui persentase besi terekstrak dalam *fly ash* pada variasi konsentrasi larutan HCl dan waktu ekstraksi. Penelitian ini diawali dengan preparasi sampel *fly ash* menggunakan oven selanjutnya dikarakterisasi menggunakan XRF (*X-Ray fluorescence*) dan FTIR (*Fourier Transform Infra Merah*). *Fly ash* yang sudah dipreparasi kemudian diekstraksi menggunakan HCl yang ditambah dengan MIBK (*Metil Isobutil Keton*) 50 mL (10%) dan EDTA (*Etilen Diamin Tetra Asetat*) 25 mL (0,01 M). Larutan MIBK dan EDTA merupakan variabel tetap sebagai pengkelat besi. Ekstraksi besi dilakukan dengan variasi konsentrasi HCl dan waktu ekstraksi. Persentase besi yang terekstrak selanjutnya diselidiki menggunakan AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentase besi yang terekstrak paling tinggi diperoleh pada ekstraksi menggunakan HCl 9 N selama 1 menit yakni sebesar 11,48%.

Abstract

Around 780 million tonnes of fly ash are produced annually worldwide. The use of fly ash is still minimal, causing fly ash piles to increase. Based on this, a study was conducted on the extraction of iron from coal fly ash using HCl as a solvent. This study aims to determine the percentage of iron extracted in fly ash at various concentrations of HCl solution and extraction time. This research began with the preparation of fly ash samples using an oven and then characterized using XRF (*X-Ray fluorescence*) and FTIR (*Fourier Transform Infrared*). The prepared fly ash was then extracted using HCl with 50 mL (10%) MIBK (*Methyl Isobutyl Ketone*) and 25 mL EDTA (*Ethylene Diamine Tetra Acetate*) (0.01 M). MIBK and EDTA solutions are fixed variables as iron chelators. Iron extraction was carried out by varying the concentration of HCl and extraction time. The percentage of iron extracted was further investigated using AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*). The results showed that the highest percentage of extracted iron was obtained by extraction using 9 N HCl for 1 minute, which was 11.48%.

✉ Alamat korespondensi:

Gedung D6 Lantai 2 Kampus Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229

E-mail: budiselamet2014@gmail.com

Pendahuluan

Fly ash merupakan abu yang dihasilkan dari transformasi, pelunakan bahan anorganik yang terdapat dalam batubara. Dalam satu ukuran pengapian batubara, sekitar 80% *fly ash* tercipta dan sisanya adalah *bottom ash*, yaitu sebesar 20% (Bhatt *et al.*, 2018). Menurut data dari Kementerian Lingkungan Hidup limbah *fly ash* yang dihasilkan mencapai 85 ton/hari dan limbah *bottom ash* mencapai 48 ton/hari (Dinas LH Kabupaten Bandung, 2008). Sedangkan dalam bagian penjelasan Pasal 459 Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, abu hasil pembakaran batu bara dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan kegiatan lainnya tak termasuk sebagai limbah B3. Pada bagian penjelasan Pasal 459 huruf C PP 22/2021 diatur *fly ash* dan *bottom ash* hasil pembakaran batu bara dari PLTU dan kegiatan lainnya tak termasuk sebagai limbah B3, tetapi non-B3. Hal ini dikarenakan pembakaran batu bara di kegiatan PLTU pada temperatur tinggi sehingga karbon dalam *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) menjadi minimum dan lebih stabil saat disimpan (Ranjbar *et al.*, 2017).

Komponen utama dari *fly ash* batubara yang terdapat di pembangkit listrik adalah alumina (Al_2O_3), silika (SiO_2), oksida besi (Fe_2O_3), dan sisanya adalah karbon, belerang, kalsium, dan magnesium. Banyaknya perusahaan yang menggunakan batu bara untuk bahan bakar meninggalkan berbagai masalah besar karena *fly ash* hasil dari proses pembakaran mengandung kadar logam berat yang penting (Almahayni *et al.*, 2018; Kaur *et al.*, 2018)). Pembuangan abu sisa pembakaran yang berupa *fly ash* maupun *bottom ash* dapat berakibat buruk pada lingkungan disekitar sehingga dibutuhkan penanganan khusus agar dapat mengatasi masalah tersebut salah satunya yaitu dengan cara memanfaatkan limbah batubara menjadi material baru yang mempunyai nilai ekonomis (Anggia *et al.*, 2016).

Keberadaan senyawa besi pada *fly ash* menjadikannya sangat potensial untuk dikembangkan lebih lanjut menjadi produk-produk lebih berdaya guna dan bernilai ekonomi tinggi. Selain itu ketersediannya yang melimpah menjadi salah satu faktor pendorong untuk dikembangkannya besi dari *fly ash*. Jumlah komponen yang terkandung dalam *fly ash* batubara umumnya bervariasi tergantung dengan proses pembakaran dalam PLTU. Seperti bahan utama dalam penelitian ini adalah *fly ash* yang diperoleh dari PLTU Rembang. Terdapat tiga komponen utama yang terdapat pada *fly ash* PLTU Rembang yaitu, SiO_2 (38,74 %), Fe_2O_3 (20,16%), dan Al_2O_3 (16,43 %). Kandungan tersebut diperoleh dari hasil karakterisasi menggunakan XRF Universitas Sebelas Maret. Karena kandungan Fe yang cukup banyak. Maka, dalam penelitian ini akan dilakukan pemisahan Fe dari *Fly ash* menggunakan metode ekstraksi paling banyak mengandung besi (Zeng *et al.*, 2012).

Metode yang dapat digunakan untuk memisahkan senyawa besi dalam *fly ash* adalah *magnetic separation*, destruksi dan ekstraksi. Diantara beberapa metode untuk memisahkan besi *fly ash*, ekstraksi adalah metode yang paling efektif karena menggunakan bahan yang mudah didapat dan lebih ekonomis. Ekstraksi merupakan proses pemisahan suatu zat dari campurannya dengan menggunakan pelarut. Pelarut yang digunakan harus bisa mengekstrak substansi yang diinginkan tanpa harus melarutkan material yang lainnya. Senyawa besi dalam *fly ash* dapat dilarutkan dengan asam kuat seperti HCl, H_2SO_4 dan HNO_3 (Kheloufi *et al.*, 2011).

Seperti yang telah dilakukan oleh Yoon (2019), dalam percobaan yang dilakukan menggunakan pelarut HCl, didapatkan hasil sebesar 32 % Fe_2O_3 yang didapatkan dengan konsentrasi HCl 7 N dan waktu pengadukan selama 24 jam. Larutan HCl digunakan sebagai pelarut dikarenakan dapat melarutkan besi hingga 90 % (Kheloufi, 2009). Dalam penelitian Yoon (2019), menggunakan variasi konsentrasi HCl sebesar 3, 5, dan 7 N dan waktu pengadukan selama 1,5, 24 dan 46 jam. Didapatkan data yang paling efektif untuk proses pemisahan besi dari *fly ash* adalah 7 N dengan waktu pengadukan 24 jam. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya, maka dalam penelitian ini menggunakan variasi konsentrasi HCl untuk mengetahui konsentrasi HCl yang paling efektif untuk pemisahan besi. Dilakukan pula variasi waktu pengadukan karena waktu pengadukan berpengaruh terhadap hasil ekstraksi besi.

Metode

Alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi neraca analitik, erlenmeyer 100 mL (Pyrex), erlenmeyer 250 mL (Pyrex), beaker glass ukuran 250 mL (Pyrex), labu ukur ukuran 10, 25, 50, 100, dan 250 mL (Pyrex), gelas ukur 50 mL (Pyrex), kaca arloji, corong, corong pemisah, pengaduk gelas, pipet tetes, pipet volume Pyrex 10 mL dan 25 mL, ball pipet, oven, X-Ray fluorescence (XRF) PANalytical, Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) PerkinElmer Analyst 400, FTIR spectrophotometer 8201PC Shimadzu,

sentrifuge, *magnetic stirrer* (IKAMAG) dan kertas saring *Whatman*. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *fly ash* batubara, HCl *p.a* 37% Merck ($\rho=1,19 \text{ gr/cm}^3$), NaCl *p.a* ($\rho=2,17 \text{ gr/cm}^3$), Metil Isobutil Keton (MIBK) ($\rho= 0,802 \text{ g/mL}$), Etilen Diamin Tetra Asetat *p.a* (EDTA) ($\rho= 860 \text{ mg/mL}^{-1}$), dan aquades.

Preparasi *Fly ash*

Sebanyak 10 gram sampel (*fly ash*) di ambil selanjutnya dikeringkan menggunakan oven pada suhu 110°C selama 24 jam untuk mengekstrak bahan organik dalam *fly ash* sehingga tidak menjadi pengotor dalam proses ekstraksi senyawa logam (Yoon *et al.*, 2019).

Ekstraksi Besi dengan Variasi Konsentrasi HCl

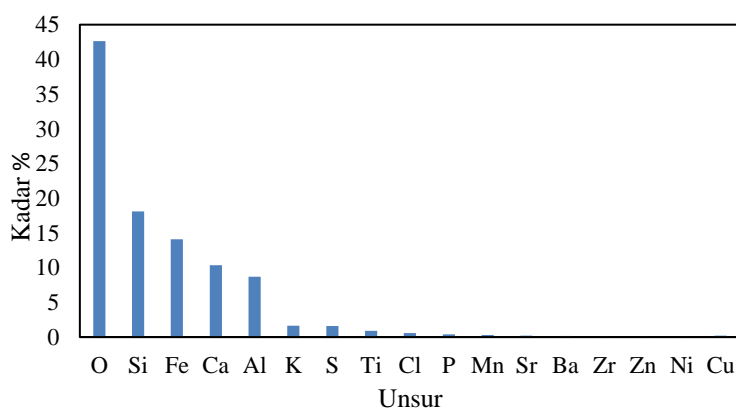
Sebanyak 10 gram *fly ash* ditambah 100 mL HCl dengan konsentrasi yang telah divariasikan yaitu 5, 7, 9 N. Variasi ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh besar atau kecilnya kandungan besi hasil ekstraksi dengan variasi larutan HCl. Selanjutnya larutan diaduk dengan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 250 rpm selama 24 jam. Lalu larutan disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan antara larutan dengan residu. Filtrat yang didapatkan kemudian diuji absorbansinya untuk mengetahui kandungan Fe yang larut dalam HCl menggunakan AAS (Yoon *et al.*, 2019; Ardeniswan *et al.*, 1993).

Ekstraksi Besi dengan Variasi Waktu

Filtrat yang didapatkan diambil sebanyak 10 mL selanjutnya direaksikan dengan MIBK sebanyak 10 mL. Selanjutnya ke dalam larutan tersebut ditambah agen *salting-out* 1 gram NaCl dan ekstrak EDTA 0,1 M sebanyak 5 mL. Larutan dimasukkan ke dalam corong pemisah. Kemudian larutan dikocok agar dapat tercampur homogen dengan waktu ekstraksi dibuat bervariasi dari waktu 1, 2, 3, 4 dan 5 menit sampai terbentuk 2 fase terpisah. Dilanjutkan sesuai prosedur dan absorbansinya diukur menggunakan AAS. Selanjutnya dibuat grafik hubungan waktu ekstraksi dan absorbansi (Yoon *et al.*, 2019; Ardeniswan *et al.*, 1993).

Hasil dan Pembahasan

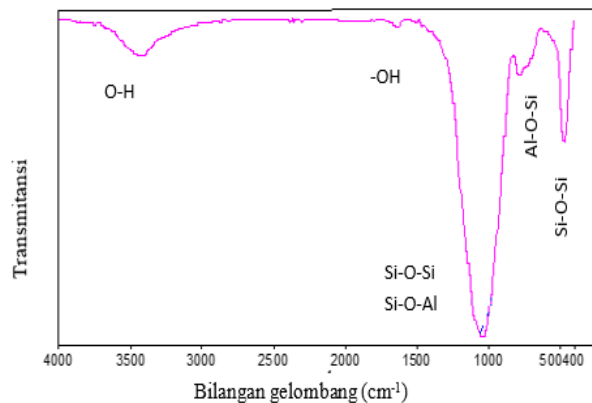
Sebelum dilakukan proses ekstraksi, sampel *fly ash* yang sudah dipreparasi diuji menggunakan XRF terlebih dahulu untuk mengetahui jumlah unsur logam Fe yang terdapat dalam *fly ash*. Data kandungan dan komposisi *fly ash* didapatkan hasil pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil Uji XRF *fly ash*

Unsur tertinggi dalam sampel *fly ash* yaitu oksigen sebesar 42,62% selanjutnya diikuti silika (Si) sebesar 18,11 %, besi (Fe) sebesar 14,10%, Carbon (C) sebesar 10,37% dan Aluminium (Al) sebesar 8,69% dan beberapa senyawa oksida lainnya dengan presentase kecil.

Selanjutnya *Fly ash* yang sudah dipreparasi menggunakan oven dengan suhu tinggi dianalisis menggunakan FT-IR untuk mengetahui adanya gugus fungsi yang berkaitan dengan silika yang terdapat pada *fly ash* yang telah diaktivasi, dimana sumbu-x merupakan bilangan gelombang dan sumbu-y merupakan Transmittansi. Spektrum yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 2.



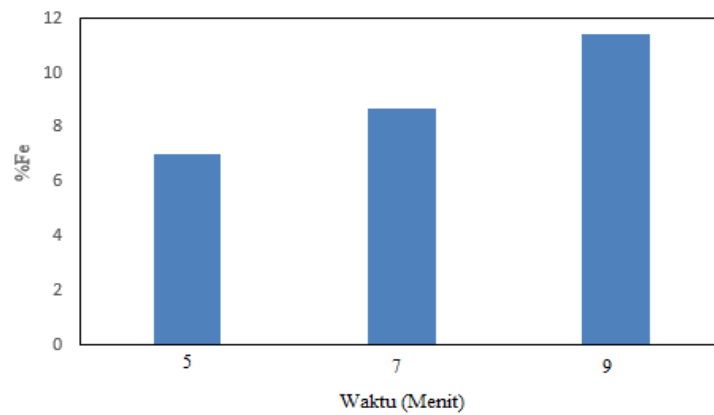
Gambar 2. Spektra FT-IR *Fly ash* PLTU Rembang

Berdasarkan Gambar 2, spektra IR *fly ash* menunjukkan adanya silika ditandai dengan adanya puncak dengan intensitas paling tinggi di bilangan gelombang 1050-944 cm^{-1} yang menunjukkan daerah vibrasi ulur asimetri gugus Si-O-Si atau Si-O-Al (Bakkali *et al.*, 2016). Pada bilangan gelombang 1039 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ulur asimetri gugus Si-O-Si atau Si-O-Al. Puncak pada bilangan gelombang 467 cm^{-1} merupakan pita vibrasi tekuk gugus Si-O-Si dan O-Si-O (Bakkali *et al.*, 2016). Pada bilangan gelombang sekitar 3400 cm^{-1} diindikasikan menunjukkan daerah vibrasi bengkokan untuk gugus O-H, sedangkan puncak pada bilangan gelombang sekitar 1600 cm^{-1} merupakan vibrasi regangan untuk gugus -OH yang menandakan adanya kandungan H_2O pada sampel (Bakkali *et al.*, 2016). Puncak yang didapatkan dalam penelitian ini adalah pada bilangan gelombang 3490 cm^{-1} yang menunjukkan adanya gugus O-H dan pada 1620 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi regangan dari gugus -OH. Pada bilangan gelombang 750-490 cm^{-1} terdapat Vibrasi ulur simetris Al-O-Si (Paniias *et al.*, 2006). Adanya vibrasi ulur simetris Al-O-Si pada sampel abu layang terdapat pada bilangan gelombang 764 cm^{-1} (Bakkali *et al.*, 2016).

Ekstraksi Besi dengan Variasi Konsentrasi HCl

Kandungan Fe hasil ekstraksi dari *fly ash* batubara menggunakan asam klorida (HCl) dengan variasi konsentrasi 5, 7, dan 9 N ditunjukkan pada Gambar 3. Kadar Fe pada konsentrasi 5 N yaitu 7,4 %, kemudian mengalami peningkatan pada konsentrasi 7 N yaitu 8,7 %. Pada konsentrasi 9 N kadar Fe mengalami peningkatan lagi menjadi 11,5 %. Naiknya konsentrasi Fe pada variasi konsentrasi HCl 5, 7, dan 9 N disebabkan oleh banyaknya ion H^+ dari HCl yang terdifusi sehingga besi dari abu layang tersebut dapat bereaksi dengan ion Cl^- di mana pada konsentrasi 9 N ion H^+ lebih banyak daripada ion H^+ pada HCl 5 dan 7 N sehingga kadar Fe yang dihasilkan dari ekstraksi juga lebih banyak. Fitri (2013) mengatakan bahwa semakin banyak logam yang dapat larut maka semakin tinggi konsentrasi asam. Hal ini dikarenakan semakin banyaknya ion H^+ dari HCl yang terdifusi, sehingga besi pada abu layang dapat bereaksi dengan ion Cl^- membentuk larutan FeCl_2 . Kemampuannya HCl dalam bereaksi dengan Fe semakin besar apabila konsentrasi HCl semakin tinggi. Sehingga dapat dikatakan bahwa kandungan Fe tertinggi pada ekstraksi *fly ash* menggunakan HCl dicapai pada konsentrasi 9 N.

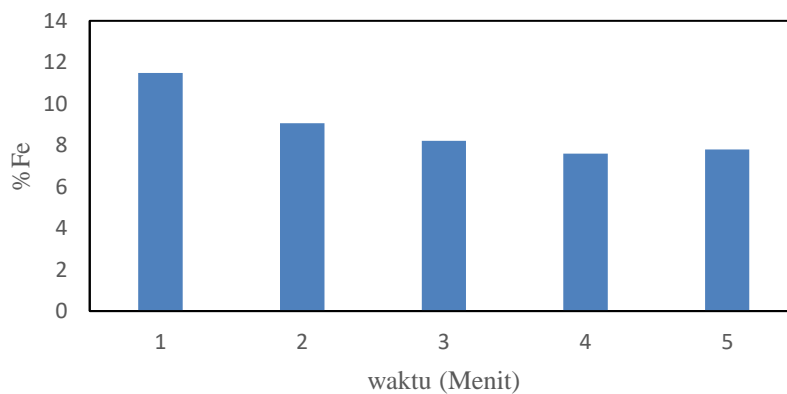
Hasil variasi konsentrasi yang dilakukan dalam penelitian ini sebanding dengan yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya. Yoon (2019), dalam percobaan yang dilakukan menggunakan pelarut HCl dengan variasi konsentrasi 3, 5 dan 7 N dan waktu pengadukan 1,5, 25 dan 46 Jam. Dari penelitian yang dihasilkan pada konsentrasi 7 N didapatkan sebesar 32 % Fe_2O_3 selama pengadukan 24 Jam. Sehingga dapat dikatakan bahwa semakin besar konsentrasi HCl yang digunakan untuk ekstraksi *fly ash* maka Fe yang didapatkan juga semakin besar.



Gambar 3. Kurva Persentase Fe yang terekstrak sesuai perubahan konsentrasi HCl

Ekstraksi Besi dengan Variasi Waktu

Setelah didapatkan konsentrasi yang paling tinggi hasil ekstraksinya yaitu 9 N, selanjutnya dilakukan variasi waktu. Sampel dilarutkan menggunakan konsentrasi yang paling tinggi hasil ekstraksinya yaitu HCl 9 N dengan variasi waktu pelarutan yaitu 1, 2, 3, 4 dan 5 Menit. Ekstraksi dilakukan dengan mengambil filtrat hasil preparasi *fly ash* dengan HCl pada variasi konsentrasi HCl yang paling tinggi, dalam hal ini adalah konsentrasi 9 N. Filtrat dari HCl 9 N diambil 10 mL digunakan untuk ekstraksi dengan MIBK 10 mL dan dengan ekstrak EDTA 5 mL. Larutan juga ditambahkan dengan NaCl dengan tujuan sebagai agen *salting-out* yaitu supaya kelarutan senyawa organik dalam air dapat menurun dan konsentrasi senyawa organik dalam fase organik dapat lebih besar daripada fase air. Ekstraksi dilakukan pada corong pemisah dengan sebelumnya dilakukan pengocokan dan setelah dikocok akan terbentuk 2 fase pada larutan. Sampel organik selanjutnya diuji karena mengandung Fe yang telah terekstrak AAS (Yoon *et al.*, 2019; Ardeniswan *et al.*, 1993).

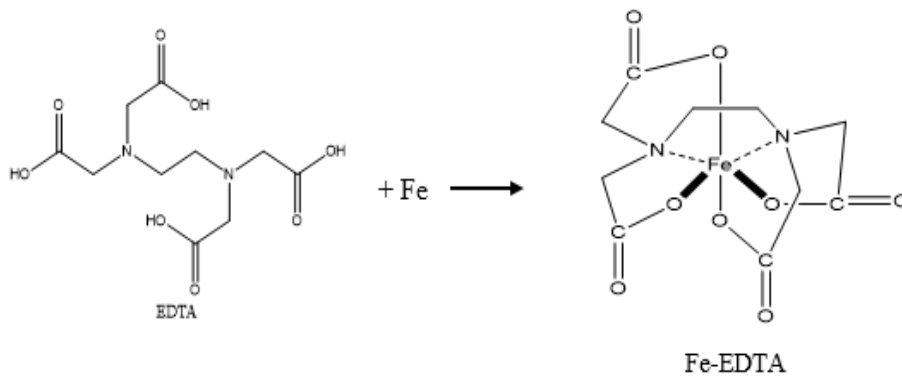


Gambar 4. Persentase Fe yang terekstrak sesuai perubahan waktu ekstraksi

Berdasarkan Gambar 4, menunjukkan waktu ekstraksi berpengaruh terhadap kadar logam Fe. Hasil yang didapatkan dari variasi waktu yaitu dari waktu 1 menit sebesar 11,48 % , 2 menit turun menjadi 9,06 % , 3 menit turun lagi menjadi 8,21 % , 4 menit sebesar 7,60% dan 7,80 % pada variasi waktu 5 menit. Seiring dengan waktu ekstraksi dari variasi 1 menit hingga 5 menit menunjukkan hasil konsentrasi semakin turun. Hasil tersebut menunjukkan kestabilan suatu senyawa kompleks Fe-EDTA dapat terjadi dalam waktu yang relatif cepat. Menurut Hasanah, (2006), penurunan ini disebabkan oleh terjadinya deprotonisasi sebagian pada EDTA, sehingga gugus asam karboksil tidak dapat terionisasi dengan sempurna sehingga pembentukan ikatan koordinasi antara EDTA dan ion logam tidak sempurna. Penurunan ini juga terjadi karena kemampuan ion H^+ pada HCl yang tidak mampu terdifusi dengan sempurna sehingga tidak dapat menguraikan besi oksida menjadi Fe^{2+} . Dari penelitian ini didapatkan waktu untuk mendapatkan ekstraksi Fe yang tinggi adalah pada waktu 1 menit.

Hasanah (2006), melakukan ekstraksi Fe dengan menggunakan ADPE selama 1, 2, 3, 4, 5, 7 dan 10 menit. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa waktu ekstraksi semakin besar maka Fe yang didapatkan semakin kecil. Sehingga dalam penelitian yang dilakukan waktu 1 menit diperoleh hasil paling tinggi yaitu dengan keefektifan sebesar 89%. Hal ini menunjukkan bahwa kestabilan senyawa kompleks Fe-APDC hanya terjadi dalam waktu yang relatif singkat. Dari hasil penelitiannya diperoleh waktu ekstraksi optimum selama 1 menit.

Menurut Harunsyah (2011) dalam senyawa EDTA terdapat 6 pasang elektron bebas yang berasal dari gugus C=O dan atom N. Sehingga mempunyai kemampuan yang lebih kuat mengikat logam besi (Fe). Hasil yang didapatkan dari preparasi yang telah dilakukan cukup signifikan, dimana kadar Fe dari *fly ash* yang dapat terekstrak hanya sebesar 11,42% dari Fe awal yang terkandung pada *fly ash* adalah sebesar 14,10%. Hasil ini menunjukkan bahwa metode yang dilakukan cukup efektif untuk proses ekstraksi Fe pada *fly ash*. Penjelasan reaksi yang terjadi dijelaskan pada gambar 5.



Gambar 5. Desorpsi Fe dengan EDTA membentuk senyawa kompleks (Allen *et al.*, 2014)

Simpulan

Ekstraksi Fe dari *fly ash* dapat dilakukan menggunakan HCl, EDTA dan MIBK. Variasi konsentrasi HCl dilakukan dengan 5, 7 dan 9 N, didapatkan hasil dengan konsentrasi 9 N sebesar 11,5 %. Setelah dilakukan ekstraksi dengan MIBK dan EDTA dilakukan variasi waktu 1, 2, 3, 4, 5 menit, didapatkan hasil paling besar yaitu pada proses ekstraksi 1 menit didapatkan hasil 11,48 %.

Daftar Referensi

- Abu, D., & Fly, T. 2013. Ekstraksi Dan Penentuan Kadar Ion Aluminium. *Jurnal Teknik Meterial*, 6 (3): 276-282.
- Allen, C.V., Destiarti, L., & Zaharah, T.A. 2014. Recovery Timbal Dengan Ekstraksi Fase Padat Menggunakan Kitosan Termobilisasi Padat. *Jurnal Kimia Katulistiwa*, 3(2): 1-6.
- Almahayni, T., & Vanhoudt, N. 2018. Does leaching of naturally occurring radionuclides from roadway pavements stabilised with coal fly ash have negative impacts on groundwater quality and human health? *Journal of Hazardous Materials*, 349(2010): 128-134.
- Anggia, D. M., & Suprpto. 2016. Pemurnian Silika pada Abu Layang dari Pembangkit Listrik di Paiton (PT YTL) dengan pelarut asam klorida dan aqua regia. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 5(2): 2337-3520 (2301-928X Print).
- Bakkali H., A. M. and F. I. 2016. NaOH Alkali-Activated Class F Fly ash: NaOH Molarity, Curing Conditions and Mass Ratio Effect. *Journal JMES*, 7(2): 397-401.
- Bhatt, A. K., Bhatia, R. K., Thakur, S., Rana, N., Sharma, V., & Rathour, R. K. 2018. Fuel from Waste: A Review on Scientific Solution for Waste Management and Environment Conservation. *J. Physic*, 8(2): 205-233.
- Fitri, N. T. D. 2013. Ekstraksi dan Penentuan Kadar Ion Aluminium Hasil Ekstraksi dari Abu Terbang (Fly ash) Batubara. *Skripsi tidak dipublikasikan*, Universitas Negeri Jember.

- Harunsyah. 2011. Peningkatan Mutu Minyak Nilam Rakyat Melalui Proses Pemurnian. *Jurnal Teknologi Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 11(1): 1–7.
- Hasanah, Y. U. 2006. Ekstraksi Ion Fe (II) Dengan Ekstraktan Ammonium Pirolidin Dithiokarbamat (APDC) Dalam Pelarut Metil Iso Butil Keton (IBK). *Jurnal Teknologi Politeknik*, 10 (1): 78-85.
- Kheloufi, A., Berbar, Y., Kefaifi, A., Medjahed, S. A., & Kerkar, F. 2011. Improvement of impurities removal from silica sand by using a leaching process. *Chemical Engineering Transactions*, 24: 1513–1518.
- Kaur, M., Singh, J., & Kaur, M. 2018. Synthesis of fly ash based geopolymer mortar considering different concentrations and combinations of alkaline activator solution. *Ceramics International*, 44(2): 1534–1537.
- Panias, D., Giannopoulou, I. P., P. 2006. Effect of Synthesis Parameters on Mechanical Properties of Fly ash-Based Geopolymers. *Colloids and Surfaces. Physicochemistry Engineering Aspects*, 1(2): 49–53.
- Ranjbar, N., & Kuenzel, C. 2017. Influence of preheating of fly ash precursors to produce geopolymers. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(7): 3165–3174.
- Sumardi, A. 1993. Penentuan Runutan Cu, Cr, Mn Dan Fe Dalam Matriks Air Laut Dengan Spektrofotometri Serapan Atom Dan Ekstraksi Pelarut. Puslitbang Kimia Terapan-LIPI.
- Yoon, S., & Bae, S. 2019. Novel synthesis of nanoscale zerovalent iron from coal fly ash and its application in oxidative degradation of methyl orange by Fenton reaction. *Journal of Hazardous Materials*, 365(4): 751–758.
- Zeng, Q., Li, K., Fen-chong, T., & Dangla, P. 2012. Cement and Concrete Research Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash. *Cement and Concrete Research*, 42(1): 194–204.