

	<p><b>JURNAL CHEMURGY</b></p> <p>E-ISSN 2620-7435</p> <p>Available online at <a href="http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TK">http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TK</a></p>	 <p>SINTA Accreditation No. 200/M/KPT/2020</p>
---	--	---

## **RECOVERY FOSFOR MELALUI PROSES TERMOKIMIA UNTUK BAHAN BAKU PUPUK**

### ***PHOSPHOROUS RECOVERY THROUGH THERMOCHEMICAL PROCESS FOR FERTILIZER RAW MATERIAL***

**Suhendra<sup>1,\*</sup>, Christian Adam<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Industrial Engineering Faculty, Ahmad Dahlan University  
Jl. Ringroad Selatan, Kragilan, Tamanan, Kec. Banguntapan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta 55191

<sup>2</sup>Bundesanstalt fuer Materialforschung und -pruefung (BAM), Berlin, Germany

\*email : [suhendra@che.uad.ac.id](mailto:suhendra@che.uad.ac.id)

(Received: 17 Juni 2021; Reviewed: 18 Juni 2021; Accepted: 19 Juni 2021)

#### **Abstrak**

*Thermochemical process* (proses termokimia) telah lama dikenal sebagai sebuah proses untuk *recovery* komponen bernilai tinggi dengan menggunakan prinsip perpindahan panas dan reaksi kimia. Salah satu penerapan penting dari proses termokimia adalah untuk *recovery* fosfor dari bahan baku sekunder (*secondary raw materials*) sebagai alternatif fosfor yang berasal dari pertambangan. Bahan baku yang kaya unsur fosfor salah satunya adalah *sewage sludge ash* (SSA, abu pembakaran lumpur limbah) yang berasal dari pembakaran lumpur limbah dari pengolahan air buangan sanitasi penduduk. Karena SSA mengandung fosfor cukup tinggi, maka SSA berpotensi digunakan sebagai bahan baku untuk produksi pupuk. Selain untuk memperoleh komponen berharga, proses termokimia juga digunakan sekaligus untuk menghilangkan kandungan logam berat dari bahan baku yang digunakan sebelum penerapan pemupukan pada sektor pertanian. Eksperimen dasar untuk mengolah SSA dipresentasikan pada tulisan ini, dimulai dari penggunaan tanur putar untuk mengolah SSA secara termokimia dan akhirnya penggunaan proses granulasi untuk membentuk produk akhir berupa granulat yang memudahkan penyimpanan, transport dan penggunaan di lahan pertanian. Bahan donor *chlor* digunakan pada proses termokimia agar bereaksi dengan logam berat yang dikandung SSA sehingga kadar logam beratnya berkurang pada produk SSA yang dihasilkan. Penerapan proses granulasi menggunakan intensive mixer dari Eircih Mixer<sup>(R)</sup>. Produk samping dari proses produksi caprolactam yang mengandung amonium sulfat ditambahkan dalam proses granulasi. Produk samping ini selain berfungsi sebagai penambah unsur N pada produk akhir juga berfungsi sebagai material pengikat (*binding materials*) dalam proses granulasi. Produk akhir dari eksperimen ini berupa produk pupuk granulat yang memiliki kekuatan dan distribusi partikel sangat layak digunakan untuk aplikasi pupuk pada sektor pertanian.

**Kata kunci:** *granulasi, pupuk, thermochemical process, sewage sludge ash*

#### **Abstract**

*Thermochemical process* has been recognised as a process to recover valuable materials by means heat transfer utilisation and chemical reaction. One of important application of thermochemical process is to recover phosphorous from secondary raw materials as an alternative raw material from phosphorous from mining industry. One of phosphorous-rich resource is Sewage sludge ashes (SSA) coming from incineration of sewage sludge. Since SSA contains considerable mass fractions of phosphorus (5-10 w-% P), hence SSA can be utilised for fertiliser raw materials. In addition to gain valuable components, a thermochemical process is

also used to eliminate or reduce heavy metals prior to the utilisation of SSA-based fertiliser in agricultural sector. The fundamental experiment in thermochemical treatment of SSA is presented in this paper, starting from the use rotary kiln for thermochemical treatment of SSA raw material and the use of granulation process to develop a suitable end product for storage, transport and application in the agricultural lands. A chlor-donor material is required in thermochemical treatment in order the heavy metals to be eliminated from SSA raw material. Granulation process was applied in this experiment by means of intensive mixer from Eirich mixer. In this experiment, a side product containing rich ammonium sulphate from caprolactom production was added in granulation process. This side product is used both as a N-carrier component and liquid binding materials. Granulation processes were carried out with intensive mixers in laboratory scale and NPS- and NPKS-fertilisers were produced. The strength and particle size distribution of generated granules particles are sufficient to be used as a fertiliser granules according to normal standard from fertiliser industries.

**Key words:** fertiliser, granulation, sewage sludge ash, thermochemical process.

## 1. PENDAHULUAN

Fosfor (P) merupakan unsur esensial bagi semua organisme hidup, termasuk tumbuhan dan hewan, dan fungsinya tidak dapat tergantikan oleh komponen manapun. Unsur fosfor adalah bahan yang fungsinya tidak tergantikan untuk sel hidup, organ penting manusia serta komponen penting dari pembawa informasi genetik (DNA/ RNA). Selain itu, fosfor juga digunakan dalam banyak sektor kehidupan seperti industri, pertanian, energi, kesehatan dan lain sebagainya. Mengacu pada sektor penggunaannya, sektor pertanian membutuhkan fosfor dalam jumlah besar untuk produksi pangan karenanya menentukan industri pangan masa depan (Cordell, Drangert and White, 2009). Karenanya, peningkatan konsumsi sumber pangan penduduk dunia menjadi faktor utama peningkatan kebutuhan unsur fosfor.

Sumber bahan baku fosfor utama hingga saat ini berasal dari tambang fosfor. Beberapa negara Afrika, utamanya Maroko, dan Cina adalah salah satu pengekspor utama fosfor (United States Geological Survey, 2021). Karenanya, fosfor terbatas sebagai sumber mineral memiliki potensi risiko berkurangnya pasokan di masa depan. Harga pasar fosfor tergantung pada banyak faktor, yang paling penting adalah tarif ekspor (Cina), biaya transportasi (berbagai faktor harga minyak), spekulasi di pasar komoditas serta keadaan ekonomi secara umum. Salah satu contoh peningkatan harga sangat pesat adalah ketika kebutuhan pertanian melonjak yang kemudian diiringi kenaikan harga mineral fosfor beberapa kali lipat.

Selain problematika *supply* dan harga, permasalahan sumber daya mineral fosfor adalah kandungan logam berat yang tinggi pada mineral fosfor hasil penambangan konvensional, terutama uranium dan cadmium (Vogel *et al.*, 2016, 2020). Bahkan, banyak daerah deposit mineral menunjukkan kandungan uranium-238 dan radium-226 hingga beberapa puluh kali lebih tinggi dari biasanya (Vogel *et al.*, 2020). Karenanya, dari banyak hasil dari penelitian terdahulu mengingatkan potensi akumulasi logam berat dan isotop radioaktif yang disebabkan oleh pemupukan pada tanah dengan pupuk mineral fosfat akan berpotensi menjadi masalah kesehatan dan lingkungan yang serius.

Berdasarkan fakta tersebut, maka banyak negara di Eropa mengantisipasi berbagai problematika tersebut dengan membangun teknologi *recovery* fosfor dari bahan baku sekunder non pertambangan seperti dari sewage sludge ash (SSA, abu pembakaran lumpur limbah), abu pembakaran biomassa dan limbah industri peternakan. Tujuan pengembangan teknologi *recovery* fosfor dari bahan baku sekunder ini adalah untuk menjaga eksploitasi berlebihan sumber daya fosfat dari tambang yang terbatas.

Sebagai contoh, sistem pengolahan air limbah sanitasi perumahan penduduk tiap tahun menghasilkan limbah padatan sekitar 2 juta ton per tahun di Jerman dan sekitar 30 juta ton per tahun di Eropa. Umumnya, limbah padat yang dihasilkan harus dibakar di unit pembakaran (*incineration plant*) dan dihasilkan *sewage sludge ash* (SSA/abu sisa pembakaran). Hasil pembakaran SSA umumnya mengandung fosfor tinggi, karenanya dapat dijadikan sumber P alternatif. Salah satu potensi penggunaan SSA ini adalah sebagai sumber bahan baku pupuk sebagai pemberi suplai unsur P yang diperlukan oleh tanaman. Akan tetapi, meskipun SSA mengandung P cukup tinggi yang diperlukan oleh tanaman, SSA tersebut tidak boleh langsung digunakan untuk pertanian ataupun ditimbun, melainkan harus diolah terlebih dahulu agar mengurangi konsentrasi logam berat dan komponen yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan makhluk hidup di sekitarnya (Adam *et al.*, 2008).

Karenanya, selain target memperoleh komponen P yang cukup, teknologi *recovery* fosfor juga harus menjamin rendahnya kandungan bahan berbahaya tidak melebihi ambang batas yang disyaratkan peraturan negara. Proses yang dikaji sebelumnya untuk mengurangi konsentrasi logam berat dikeal dengan *thermochemical process* (proses termokimia) (Adam, 2010; Jiang *et al.*, 2021; Krüger dan Adam, 2015).

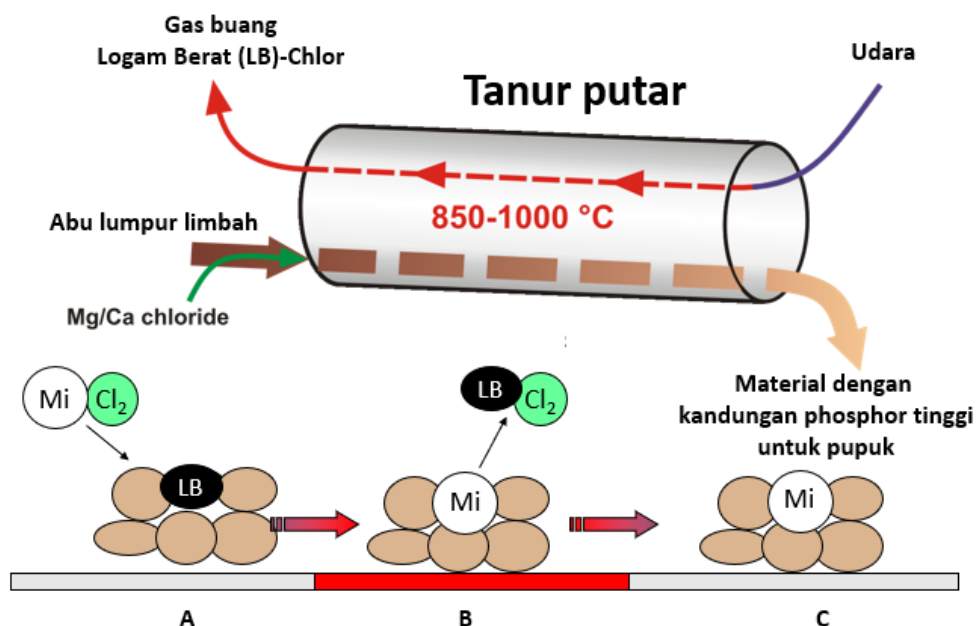
Karenanya, berdasarkan posisi fosfor yang sangat strategis di masa depan tersebut tulisan ini dipresentasikan untuk memberikan wacana tentang *recovery* fosfor dari bahan baku sekunder (*secondary raw materials*) non pertambangan seperti limbah hasil pembakaran *sewage sludge* (lumpur limbah), industri biomassa dan peternakan. Tulisan ini terutama membahas secara singkat aspek fundamental dari rangkaian proses termokimia (*thermochemical process*) yang menjadi pilihan utama dalam mengaplikasikan teknologi *recovery* fosfor dari sumber limbah. Pembahasan selanjutnya adalah aplikasi proses granulasi sebagai teknologi hilir untuk mendesain produk akhir bahan yang telah mengandung fosfor hasil *recovery*.

### 1.1 PROSES TERMOKIMIA

Proses termokimia (*thermochemical processes*) dikenal sebagai proses untuk *recovery* bahan bernilai tinggi sekaligus menghilangkan kandungan bahan berbahaya yang tidak diinginkan melalui intervensi penggunaan panas dan reaksi kimia, sehingga selain mampu mendapatkan bahan baku yang ditargetkan juga dapat mengurangi bahan berbahaya seperti logam berat dan bahan beradiasi berbahaya (Stemann, Peplinski and Adam, 2015).

Selain penggunaan sumber panas, proses termokimia menggunakan aplikasi reaksi kimia untuk menurunkan kandungan logam berat. Target komponen yang akan *direcovery* adalah komponen yang memiliki urgensi penting dalam satu sektor penting, misalkan fosfor (P) sebagai komponen utama (*primary component*) yang dapat digunakan pada industri pupuk dan bahan mineral berguna lainnya (*secondary components*) seperti  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  and  $\text{K}_2\text{O}$ . Unit operasi yang lazim digunakan pada proses termokimia adalah tanur putar (*rotary kiln*). Umumnya, reaksi kimia dilakukan dengan *supply chlor-donor* seperti  $\text{MgCl}_2$  dan  $\text{CaCl}_2$  dan suplai udara yang dialirkan berlawanan arah (*counter current*).

Gambar 1 memberikan ilustrasi konsep umum dalam proses termokimia untuk proses termokimia mengolah SSA yang menggunakan tanur putar seperti yang telah digunakan pada penelitian sebelumnya (Bundesanstalt fuer Materialforschung und -pruefung (BAM), 2008; Adam *et al.*, 2009; Stemann, Peplinski and Adam, 2015). SSA dimasukkan bersama *chlor-donor* pada tanur putar dengan suhu sekitar  $850 - 1000^\circ\text{C}$ . Logam berat yang dikandung dalam SSA (gambar 1A) akan bereaksi dengan *chlor* dengan aliran udara yang cukup dan membentuk material fase gas (gambar 1B) yang mengalir pada pipa gas buang. Produk yang dihasilkan adalah SSA yang sudah diolah dengan kadar logam berat yang lebih rendah dan sesuai standar baku peraturan lingkungan (gambar 1C).



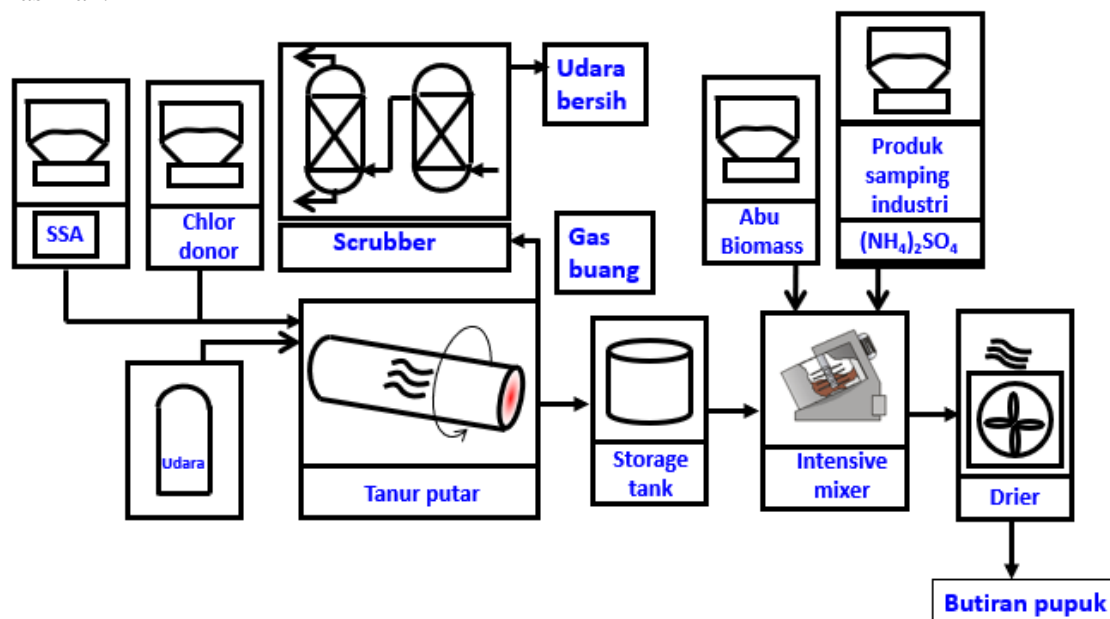
Gambar 1. Ilustrasi proses termokimia untuk mengolah SSA

Sayangnya, tidak setiap senyawa fosfat dapat dijadikan bahan baku pupuk. Untuk mendorong pertumbuhan tanaman, kandungan P total serta komponen sekunder merupakan karakteristik penting dari suatu pupuk (Krüger dan Adam, 2017). Agar dapat berpengaruh pada pertumbuhan tanaman, unsur P yang dikandung pupuk harus berada pada kondisi bioavailabilitas yang cukup (Jeon dan Kim, 2017). Parameter bioavailabilitas ini penting sebagai dosis standar bagi satu unsur pada pupuk agar unsur tersebut bisa langsung diserap oleh tanaman dan berdampak pada pertumbuhan tanamannya.

## 2. METODOLOGI

Secara umum, proses produksi produk pupuk dari bahan baku SSA yang diolah secara termokimia diilustrasikan pada gambar 2 berikut. Rangkaian alat utama terdiri dari tanki bahan baku dan produk, *scrubber*, tanur putar (*rotary kiln*) dan *intensive mixer*. Sementara bahan baku yang digunakan terdiri dari SSA, bahan *chlor*-donor (misal: berupa  $MgCl_2$ ) dengan *Cl-conc.*: 150 g Cl/kg *ash, binder* (bahan pembuat efek perekat partikel), abu pembakaran biomassa (pembakaran kayu atau sekam) dan bahan pensuplai ammonium sulfat dari produk samping industri pengolahan caprolactam. Konsentrasi garam ammonium yang dikandung pada produk samping industri tersebut adalah 17,2 mg/L  $NH_4^+$ .

Spesifikasi komponen salah satu SSA yang digunakan ditampilkan pada tabel 1 dan 2 yang pernah ditampilkan pada riset sebelumnya (Adam, Suhendra, Vogel and Tezlaff, 2012). Tabel 1 menguraikan komposisi komponen utama yang dikandung SSA, sementara tabel 2 berisi komponen yang harus dikurangi kadarnya. Untuk mengolah secara termokimia, SSA terlebih dahulu ditreatment dengan penambahan *chlor* donor pada tanur putar yang dapat beroperasi hingga 1700°C. Udara dialirkan ke tanur putar dengan arah berlawanan dengan arah arus bahan padatan yang dimasukkan pada tanur putar. Produk olahan ditempatkan sementara pada wadah penyimpanan sementara (*storage tank*) sementara gas buang dialirkan ke *scrubber* untuk memisahkan gas-gas *toxic* yang dihasilkan.



Gambar 2. Ilustrasi rangkaian eksperimen produksi pupuk dari bahan baku SSA hasil pengolahan termokimia.

Tabel 1. Komponen utama sampel SSA yang diinginkan untuk produk pupuk

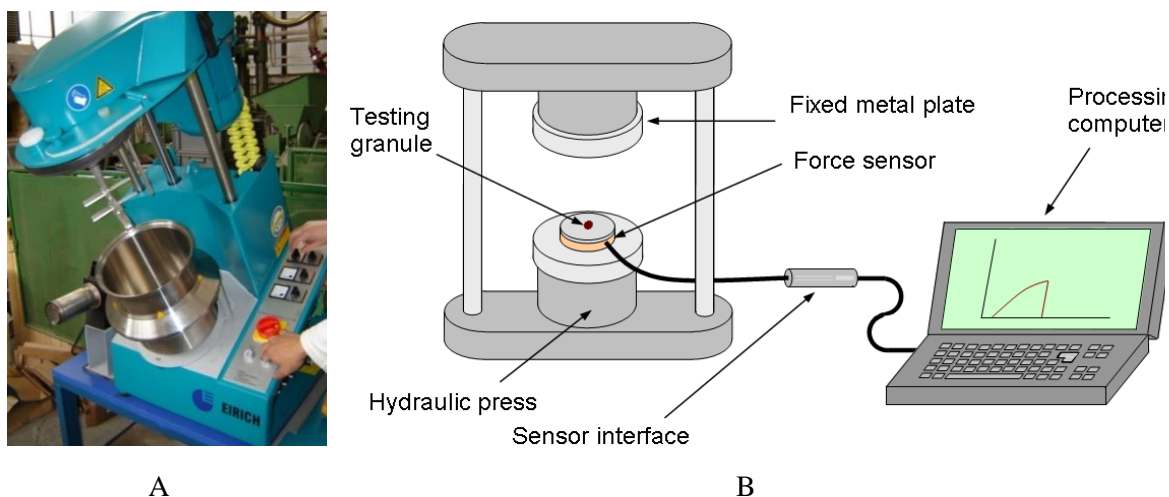
Komponen	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Cl
Fraksi massa (%)	5.59	13.42	10.01	1.058	1.502	0.104	0.559	9.004	1.297	0.588

Tabel 2. Komponen logam berat sampel SSA yang harus dikurangi atau dihilangkan dari SSA

Komponen	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sn	Tl	Zn
Fraksi berat (mg/ kg)	34.1	6.53	145	1113	<0.07	27.8	83.2	236	48.1	<0.5	2543

Setelah diperoleh hasil olah SSA dari tanur putar, selanjutnya dilakukan proses granulasi untuk memperoleh produk pupuk yang berbentuk butiran. Granulasi dilakukan di dalam *intensive mixer* dan granulator dari *Eirich – mixer®*, *Germany*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3A. Proses granulasi dilakukan dengan menggunakan SSA yang telah ditreatment dengan *additive* yang berbeda-beda. *Ammonium sulfate* ditambahkan pada *mixer* untuk membuat efek rekat dan halus dari *powder* sekaligus digunakan sebagai penambah unsur nitrogen dan sulfur pada produk granulat. Produk samping dari produksi *caprolactam (liquid brine)* yang masih mengandung *ammonium sulfate* digunakan sebagai perekat (*binder*) sekaligus penambah unsur N dan S. Serbuk abu sekam dari industri pembakaran digunakan untuk menambah efek pengeras sekaligus penambah unsur kalium (bahan-bahan padat dicampur pada kecepatan tinggi dengan waktu 3 menit). Setelah itu *liquid brine* ditambahkan ada kecepatan rendah. Proses granulasi dilakukan 10-15 menit. Produk granulat yang dihasilkan kemudian dikeringkan.

Setelah granulat kering, partikel disortir berdasar diameter partikelnya untuk diukur kekerasan masing-masing partikel granulat. Pengukuran kekerasan dilakukan pada 50 sampel granulat dengan menggunakan rangkaian eksperimen yang dibuat seperti gambar 3B. Partikel diletakkan di tengah-tengah sebuah *hydraulic press* yang dilengkapi dengan *a force sensor* (sensor tekanan). Sinyal *force sensor* terhubung seara *online* pada computer. Tekanan terdeteksi hingga partikel pecah yang ditandai dengan penurunan tajam dari tekanan yang terukur pada sensor. Tekanan yang terdeteksi sebelum pecah ditentukan sebagai kekuatan maksimum (*maximum strength/ N*) dari partikel granulat. Penetapan distribusi statistik kekuatan partikel digunakan dengan metode *Weibull Survival Distribution* (Rahmanian, Ghadiri and Ding, 2008).



Gambar 3. Alat granulasi *Eirich Mixer* (A) dan instrumen pengukur kekerasan partike granul (B)

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada eksperimen ini telah berhasil melakukan *recovery* fosfor dari SSA untuk digunakan sebagai bahan baku. Target eksperimen *recovery* fosfor pada penelitian ini tercapai, yaitu memperoleh fosfor dan nutrient yang diinginkan untuk bagan baku pupuk dan sekaligus mengurangi kandungan logam berat yang ada pada SSA.

Sebelum digunakan sebagai bahan baku pupuk, SSA harus ditreatment terlebih dahulu pada tanur putar untuk menghilangkan logam berat yang masih dikandung pada SSA. Dengan menggunakan *chlor-donor*, logam berat dapat dikurangi kandungannya hingga memenuhi syarat ambang batas maksimal kandungan logam berat yang boleh ada pada produk pupuk yang disyaratkan oleh peraturan negara Republik Federal Jerman.

Berdasar hasil yang diperoleh, laju pengurangan (*removal rate*) logam berat bervariasi tergantung jenis komponen dan *chlorine donor*. Laju pengurangan komponen Cd, Mo, Pb, Cu dan Zn dapat diturunkan dengan efektif lebih 95%, komponen Mo dan Sn 50-70%, sedangkan As, Cr dan Ni masih belum berhasil diobservasi, dengan pertimbangan bahwa umumnya komponen As, Cr dan Ni di dalam SSA selalu di bawah nilai ambang batas peraturan.



Selanjutnya, dengan konsentrasi sekitar 150 g Cl per kg SSA sejauh ini telah mampu menurunkan kadar logam berat dengan baik. Konsekuensinya, bila ada SSA memiliki konsentrasi lebih dari konsentrasi SSA yang ada dalam eksperimen ini maka perlu penyesuaian konsentrasi *chlor-donor* untuk meningkatkan laju penghilangan logam berat pada SSA.

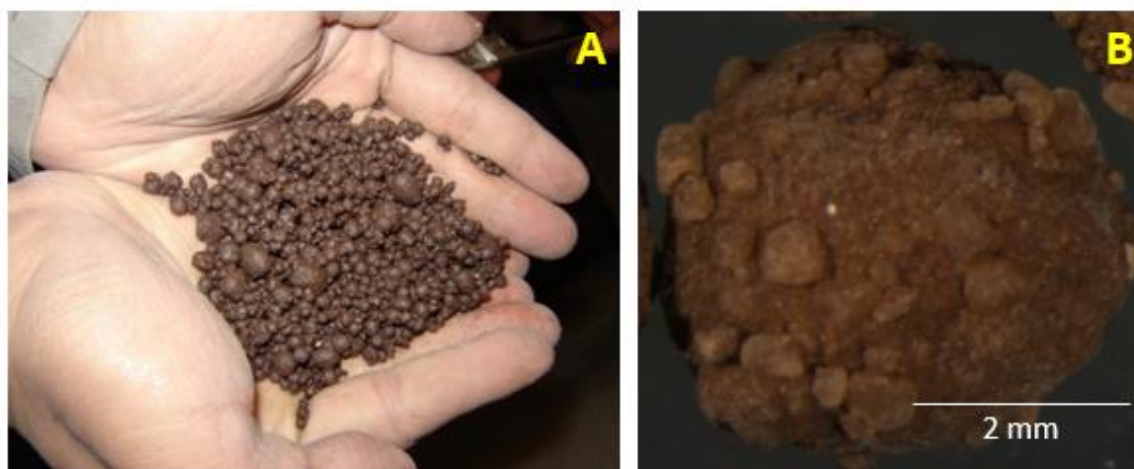
Setelah selesai proses termokimia, maka proses untuk mengolah bahan baku SSA tersebut selanjutnya adalah pembentukan produk partikel granul/granulat. Dibandingkan dengan produk yang masih berbentuk *powder*, dengan berbentuk granulat, maka produk lebih mudah dalam transportasi dan pada proses pemupukan ke lahan yang ditargetkan. Pada eksperimen ini hasil olah SSA yang siap diproses telah berhasil dibuat produk berbentuk granulat.

Foto butiran yang dihasilkan dalam *mixer intensive Eirich*® ditunjukkan pada Gambar 4. Gambar 4A mewakili gambaran produk secara umum, dimana granulat yang dihasilkan berbutiran halus dan baik, meskipun berbeda-beda diameter granulat yang dihasilkan. Sementara gambar 4B adalah *mikrograph* dari *scanning electron microscopy* untuk satu jenis partikel granulat. Fraksi massa terbesar ditemukan pada fraksi ukuran partikel 2-3,15 mm. Sebanyak 63% dari total massa granulat yang dihasilkan ada pada rentang diameter partikel 2-4 mm. Dengan asumsi bahwa partikel 1 - 6,3 mm cocok untuk aplikasi pupuk, maka produk yang dihasilkan 86% tercapai target. Fraksi kurang dari 1 mm sebanyak 6% dari total massa dan akan dikembalikan ke dalam *mixer* ke *batch* baru. Butiran besar lebih besar dari 6,3 mm sebanyak 7,5% dari total massa juga dapat ditambahkan ke produk *batch* berikutnya dengan dihaluskan atau dihancurkan dahulu.

Partikel yang lebih besar lebih stabil secara kekerasan dari pada partikel yang lebih kecil. Dua hasil perbandingan uji kekerasan pada granulat hasil proses granulasi dengan abu yang diolah dengan  $MgCl_2$  dan  $CaCl_2$ . Granul dengan  $MgCl_2$  lebih keras dibandingkan varian  $CaCl_2$ . Dari diskusi dengan produsen pupuk yang berbeda, granulat yang diharapkan mampu menahan gaya tekan minimal 20 N. Produk hasil proses granulasi pada eksperimen mampu menahan gaya lebih dari 20N, karenanya cocok untuk menjadi produk pupuk yang dapat dipasarkan. biasa termasuk karena mengatasi pengangkutan, penyimpanan dan penyebaran saat pemupukan.

Kandungan P dari abu yang diolah secara termokimia ini disesuaikan dengan triple super fosfat menjadi fraksi massa  $P_2O_5$  kira-kira. 26%. Komposisi pupuk yang dapat dihasilkan adalah pupuk NPS dengan 11% N, 16%  $P_2O_5$  dan 13,6% S. Komposisi pupuk NPKS yang dihasilkan dengan penambahan abu pembakaran jerami dengan komposisi 10% N, 14,4%  $P_2O_5$ , 1,8%  $K_2O$  dan 13,4% S.

Secara umum, penelitian ini menunjukkan keberhasilan rangkaian *recovery* fosfor dengan proses termokimia dengan bahan baku SSA. Produk akhir yang dihasilkan berkualitas baik secara kandungan unsurnya maupun kualitas fisik granulat yang memenuhi standar pupuk granulat. Beberapa eksperimen sekala besar dan skala industri pada proyek ini juga telah dipresentasikan sebelumnya (Suhendra, Vogel and Adam, 2010, 2011; Adam, Suhendra, Vogel, Krüger, *et al.*, 2012).



Gambar 4. Alat granulasi Eirich Mixer (A) dan instrumen pengukur kekerasan partikel granulat (B)

#### 4. KESIMPULAN

Proses *recovery* fosfor dapat diterapkan dari limbah lumpur abu (*sewage sludge ash*) dengan menggunakan proses termokimia. Material SSA adalah bahan baku yang cocok untuk produksi

pupuk. Logam berat harus dihilangkan dan bioavailabilitas-ketersediaan fosfor harus ditingkatkan sebelum aplikasi pertanian. Semua target tersebut (target komponen utama, target logam berat dan bioavailabilitas) dapat dicapai dengan perlakuan termokimia yang digabungkan dengan proses granulasi untuk membentuk granula yang mudah dalam penyimpanan, transportasi dan aplikasi di lahan pertanian. Penerapan rangkaian teknologi ini menjanjikan pemanfaatan limbah menjadi produk fosfor yang keberadaannya semakin kompleks dan berpotensi problem di masa depan terkait ketersediaan dan kandungan bahan lainnya yang membahayakan lingkungan dan kesehatan. Produk pupuk granula yang dihasilkan diproduksi dalam skala lab menggunakan *mixer intensif Eirich®* memiliki ketahanan partikel yang cukup baik sesuai yang ditetapkan standar industri pupuk pada umumnya. Teknologi termokimia yang dijelaskan pada tulisan ini dapat berkontribusi di masa depan untuk *recovery* potensi komponen lain yang bermanfaat pada sektor lainnya yang berkontribusi positif pada pelestarian sumber daya alam dan lingkungan.

## 5. ACKNOWLEDGEMENT

*Most of the experimental work presented in this paper have been done at the Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM/ Federal Institute for Material Research and Testing), Berlin, Germany. It is great pleasure for me to undertake this project with enormous collaboration and help from colleagues at the Department of Materials and Environment, BAM, Berlin, Germany.*

## DAFTAR PUSTAKA

- Adam, C., Peplinski, B., Michaelis, M., Kley, G., dan Simon, F.-G. (2009) 'Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery', *Waste Management*. Elsevier Ltd, 29(3), p. 1122–1128. doi: 10.1016/j.wasman.2008.09.011.
- Adam, C. (2010) 'Phosphorrückgewinnung im Bereich der kommunalen Abwasserreinigung'.
- Adam, C., Suhendra, Vogel, C. dan Tezloff, C. (2012) 'Production of marketable multi-nutrient fertilisers from different biomass-ashes and industrial by-products', in *ASH Utilisation 2012*. Stockholm, Sweden.
- Adam, C., Suhendra, Vogel, C., Krüger, O., dan Tezloff, C. (2012) 'Production of marketable multi-nutrients fertiliser from different biomass ashes and industrial byproducts', in *ASH Utilisation 2012*. Stockholm: Värmerforsk, Sweden.
- Adam, V. C., Peplinski, B., Kley, G., Kratz, S., Schick, J., dan Schnug, E. (2008) 'Phosphorrückgewinnung aus - Klärschlammaschen – Ergebnisse aus dem EU-Projekt SUSAN Phosphorus recovery from sewage sludge ash – Results from the EU Project SUSAN', pp. 55–64.
- Bundesanstalt fuer Materialforschung und -pruefung (BAM) (2008) *Project SUSAN - Sustainable and Safe Re-Use of Municipal Sewage Sludge for Nutrient Recovery*.
- Cordell, D., Drangert, J. dan White, S. (2009) 'The story of phosphorus : Global food security and food for thought', 19, pp. 292–305. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.
- Jeon, S. dan Kim, D. (2017) 'Enhanced phosphorus bioavailability and heavy metal removal from sewage sludge ash through thermochemical treatment with chlorine donors', *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. doi: 10.1016/j.jiec.2017.09.028.
- Jiang, G., Donghai, Xu, Botian, H., Lu Liu, Shuzhong, W., dan Zhiqiang, W. (2021) 'Thermochemical methods for the treatment of municipal sludge', pp. 4–7.
- Krüger, O. dan Adam, C. (2015) 'Recovery potential of German sewage sludge ash'. doi: 10.1016/j.wasman.2015.01.025.
- Krüger, O. dan Adam, C. (2017) 'Phosphorus in recycling fertilizers - analytical challenges', *Environmental Research*. Elsevier Inc., 155(March), pp. 353–358. doi: 10.1016/j.envres.2017.02.034.
- Rahmanian, N., Ghadiri, M. dan Ding, Y. (2008) 'Effect of scale of operation on granule strength in high shear granulators', 63, pp. 915–923. doi: 10.1016/j.ces.2007.10.027.
- Stemann, J., Peplinski, B. dan Adam, C. (2015) 'Thermochemical treatment of sewage sludge ash

with sodium salt additives for phosphorus fertilizer production – Analysis of underlying chemical reactions’, *WASTE MANAGEMENT*. Elsevier Ltd, 3, pp. 3–8. doi: 10.1016/j.wasman.2015.07.029.

Suhendra, Vogel, C. dan Adam, C. (2010) ‘Granulation of sewage sludge ashes along with biomass ashes and industrial by-products for production of NPK fertilizer’, in *Aufbereitung und Recycling*. Freiberg, Germany.

Suhendra, Vogel, C. dan Adam, C. (2011) ‘Granulation of sewage sludge ashes, biomass ashes and industrial by-product for sustainable production of multinutrient fertiliser’, in *European Congress of Chemical Engineering*. Berlin, Germany.

United States Geological Survey (2021) *Mineral Commodities Summaries*. Virginia: USGS, Reston, Virginia.

Vogel, C., Krüger, O., Herzel, H., Amidani, L., Adam, C. (2016) ‘Chemical state of mercury and selenium in sewage sludge ash based’, *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier B.V., 313, pp. 179–184. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.03.079.

Vogel, C., Hoffman, M. C., Taube, M. C., Krüger, O., Barab, R., Adam, C. (2020) ‘Uranium and thorium species in phosphate rock and sewage sludge ash based phosphorus fertilizers’, *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier, 382(April 2019), p. 121100. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121100.