

PEMANFAATAN RESIDU PEMBAKARAN SAMPAH ORGANIK RUMAH TANGGA

Eko Naryono^{1,2} Soemarno^{1,3}

¹Program Studi Kajian Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Brawijaya

²Laboratorium Termodinamika, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

³Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang

Abstrak

Pembakaran sampah organik rumah tangga menghasilkan residu padat 25-30% yang terdiri dari abu bawah (BA), abu atas (FA) dan kondensat air yang mengandung tar. Abu bawah sebagian besar terdiri dari bahan anorganik seperti Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Cl dan logam berat antara lain Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb dan Zn, sedangkan abu atas tersusun dari bahan organik dan anorganik. Bahan organik yang terdapat dalam residu antara lain polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH), chloro benzene (CB), polychlorinated biphenyl (PCB), polychlorinated dibenzo-*p*-dioksin (PCDD) dan furan (PCDF). Residu pembakaran biomass perlu diolah atau dimanfaatkan agar tidak mengganggu lingkungan. Salah satu metode pengolahan yang mudah diterapkan dan aman terhadap lingkungan adalah pemadatan dan stabilisasi menggunakan semen atau lempung sebagai binder. Pemanfaatan produk ini dapat digunakan untuk batako atau batu bata. Berdasarkan prediksi, pembakaran sampah kota Malang sebesar 400 ton/hari menghasilkan abu 72 ton/hari. Pemakaian abu sebesar 25% pada pembuatan batako dengan perbandingan semen : pasir : abu sebesar 3,75 : 30 : 1,25 dapat menghasilkan batako setiap hari 366545 buah.

Kata kunci: Abu, Batako, Residu, Pemadatan, Sampah organik rumah tangga

Abstract

Burning of household organic waste produces solid residues generate 25-30 % of the bottom ash (BA), fly ash (FA) and the condensate water containing tar . Bottom ash composed mostly of inorganic materials such as Si , Al , Fe , Ca , Mg , K , Na , Cl and heavy metals such as Cd , Cr , Cu , Hg , Ni , Pb and Zn , while fly ash is composed of organic materials and inorganic materials . Organic matter content in the residue consists of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) , chloro benzene (CB) , polychlorinated biphenyls (PCBs) , polychlorinated dibenzo - p - dioxins (PCDD) and furans (PCDF) . Incinerator residues need to be processed or reused to make it more environmentally friendly . One effective method of processing to do and more environmentally friendly is solidification and stabilization using cement or clay as a binder . and the the product can be used for concrete block or brick . Based on the prediction , combustion of 400 tons / day waste generated Malang city can be produced 72 tons / day of ash . The use ash by 25 % to make concrete block with cement, sand and ash ratio at 3.75 : 30 : 1.25 can produce 366,545 pieces of concrete block every day.

Keywords: Ash, Concrete block, Residues, Solidification, Domestic waste

PENDAHULUAN

Pada proses pembakaran sampah rumah tangga kuantitas dan konsentrasi residu pembakaran tergantung dari karakteristik sampah, perancangan dan pengoperasian peralatan sistem pembakaran. Residu padat yang dihasilkan pada pembakaran sampah (MSW) mencapai 25-30% massa (Millarth, Roethel dan Kargbo, 2004) yang dapat diklasifikasikan menjadi dua macam yaitu bottom ash (BA) dan fly ash (FA). Bottom ash sebagian besar terdiri dari bahan anorganik yang tidak mudah terbakar (*non-combustible*). Fly ash merupakan campuran bahan organik dan anorganik yang mempunyai titik didih rendah sehingga pada saat terbakar

dapat terikut pada aliran gas buang dalam bentuk *particulate matter* (PM).

Sebagian besar komponen anorganik penyusun utama residu hasil pembakaran adalah Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Cl dan logam berat antara lain Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb dan Zn, komposisi komponen ini bervariasi tergantung dari jenis sampah yang dibakar (Quina *et al.*, 2007). Bahan organik jumlah kecil (*trace*) juga ditemukan dalam residu antara lain polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH), chloro benzene (CB), polychlorinated biphenyl (PCB), polychlorinated dibenzo-*p*-dioksin (PCDD) dan furan (PCDF).

Residu pembakaran biomass perlu diolah atau dimanfaatkan agar tidak mengganggu lingkungan. Dampak residu yang ditimbulkan dari pengolahan sampah pada jangka panjang apabila langsung ditimbun adalah terlarutnya kontaminan oleh air (Hjelmar, 1996). Kandungan

Alamat Korespondensi

Eko Naryono

Email : eko_naryono@yahoo.com

Alamat : Jl. Bantaran Barat I/30 Malang, 65141

garam pada residu sangat sulit distabilkan apabila tidak dicuci terlebih dahulu sebelum ditimbun. Particulate matter (PM) pada FA terdiri dari campuran jelaga, tar, *volatil organic compound* (VOC) dan *polycyclic aromatic hidrocarbon* PAH. Bahan ini dikategorikan sebagai bahan B3 (Quina et al., 2007) karena dapat berdampak negatif terhadap kesehatan

Prinsip utama pemanfaatan atau pengolahan residu adalah mengubah bahan tersebut menjadi stabil sehingga pada kondisi terpapar di atmosfer tidak berbahaya bagi lingkungan. Teknik pengolahan residu secara gasis besar dapat dikelompokkan menjadi tiga proses utama (Chandler et al., 1997): (1) proses pemisahan, (2) pemadatan/stabilisasi, (3) proses termal. Proses pemisahan merupakan proses ekstraksi beberapa jenis komponen pada residu yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas agar dapat dimanfaatkan lebih lanjut. Beberapa metode ekstraksi pada residu antara lain: ekstraksi menggunakan asam, peleburan menggunakan alkali, ion exchange (Mohapatra dan Rao, 2001). Pemadatan / stabilisasi (*solidification / stabilization, s/s*) bertujuan untuk mengikat secara fisika maupun kimia komponen beracun pada limbah menggunakan aditif atau binder. Pada proses pemadatan, biasanya digunakan semen sebagai binder untuk mengikat atau membungkus abu guna mengurangi terlepasnya (*leachability*) kontaminan (Charles et al., 2010). Proses termal dilakukan dengan cara melebur abu pada temperatur 1360°C sampai 1500°C membentuk slag yang mempunyai *leaching value* rendah.

Pada penerapannya ketiga metode di atas memerlukan evaluasi kemudahan penerapan teknologinya dan keamanan terhadap lingkungan. Paper ini bertujuan untuk mengevaluasi ketiga pilihan di atas yang sesuai untuk diterapkan pada pengolahan residu pembakaran sampah organik rumah tangga kota Malang. Sebagai dasar pertimbangan pemilihan digunakan review hasil penelitian terdahulu tentang teknik pengolahan dan pemanfaatan abu sisa pembakaran.

Karakteristik Residu Pembakaran Sampah Organik Rumah Tangga

Sisa pembakaran (residu) merupakan sisa padatan hasil pembakaran. yang terdiri dari *bottom ash* dan *fly ash*. Residu pembakaran sampah organik rumah tangga selain berupa padatan juga dihasilkan residu cair hasil kondensasi uap air yang terkandung dalam sampah bercampur tar dengan konsentrasi 4.29%

(Quina, Bordado dan Quinta-Ferreira, 2008). Komponen utama penyusun abu hasil pembakaran adalah Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, dan Cl dan beberapa jenis logam berat antara lain Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb dan Zn (Belevi dan Langmeier, 2000) dengan komposisi komponen bervariasi tergantung dari jenis sampah yang dibakar. Bahan organik jumlah kecil (*trace*) juga ditemukan dalam residu antara lain polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH), chloro benzene (CB), polychlorinated biphenyl (PCB), polychlorinated dibenzo-*p*-dioksin (PCDD) dan furan (PCDF).

Belevi dan Langmeier (2000) meneliti komponen kimia penyusun sampah dan fraksi komponen yang tertinggal pada abu bawah hasil pembakaran sampah rumah tangga dan campuran sampah rumah tangga dan sampah komersial seperti terlihat pada Tabel 1. Data ini dapat digunakan untuk prediksi komposisi kimia abu bawah hasil pembakaran sampah rumah tangga. Sebagai contoh komponen Cl pada sampah setelah dibakar sebagian besar (90%) terikat pada gas buang sedangkan pada abu bawah sekitar 9-11%.

Penelitian Terdahulu Pengolahan Residu Pembakaran Pemanfaatan Fly Ash sebagai Pencampur Pembuatan Keramik

Penelitian yang dilakukan oleh Karamanov, Pelino dan Hreglich (2003) bertujuan mempelajari pengaruh temperatur terhadap proses sintering keramik yang dibuat dari campuran abu terbang hasil pembakaran insinerator dan feldspar. Parameter yang diuji adalah kesetabilan kimia produk keramik yang dihasilkan.

Tabel 1. Komposisi kimia penyusun abu dan sampah rumah tangga dan campuran

| Komp onen | Sampah rumah tangga | | Sampah campuran | |
|-----------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| | Komposis i sampah (%massa) | Fraksi abu bawah (%) | Komposis i sampah (%massa) | Fraksi abu Bawah (%) |
| H2O | 29±4 | - | 24±3 | - |
| Cl | 0,73±0,12 | 9±2 | 0,69±0,11 | 10±2 |
| K | 0,25±0,05 | 67±5 | 0,23±0,04 | 67±5 |
| Na | 0,48±0,12 | 89±4 | 0,51±0,12 | 92±2 |
| S | 0,14±0,02 | 24±5 | 0,13±0,02 | 19±4 |
| Pb | 0,053±0,011 | 59±7 | 0,070±0,013 | 44±7 |
| Zn | 0,13±0,03 | 53±9 | 0,16±0,03 | 43±8 |
| Cu | 0,082±0,033 | 97±1 | 0,078±0,031 | 96±1 |
| Ca | 2,4±0,6 | 89±3 | 2,4±0,6 | 92±2 |
| Al | 1,3±0,3 | 88±2 | 1,1±0,3 | 91±2 |
| Fe | 3,1±0,8 | 99,2±0,2 | 2,7±0,7 | 98,9±0,3 |
| Si | 3,8±0,9 | 95±1 | 3,7±0,8 | 97±1 |

Sumber : Belevi dan Langmeier (2000).

Metode Percobaan

Percobaan dilakukan dengan cara mencampur 70% abu terbang dan 30% limbah

feldspar. Abu terbang diambil dari insinerator pembakar sampah kota (MSW). Produk insinerator berupa abu bawah sebesar 230 kg dan 28 kg abu terbang setiap pembakaran 1000 kg MSW. Berdasarkan hasil analisa menunjukkan bahwa abu bawah sebagai bahan inert, sedangkan abu terbang sebagai bahan yang beracun karena mengandung, klorida, sulfat dan logam berat antara lain Cd, Cr, Cu, Hg dan Se.

Guna memisahkan garam yang dapat terlarut seperti NaCl dan Na₂SO₄, mula mula abu terbang dicuci menggunakan air kemudian disaring. Setelah pencucian dan pengeringan terjadi penurunan massa sekitar 43-45%. Pada penelitian ini digunakan dua macam sampel, yang pertama dibuat dengan melelehkan abu tanpa penambahan aditif diberi kode G-100. Sampel kedua dibuat dengan cara mencampur abu terbang 70% (MSWA) dan 30% limbah feldspar (FW) diberi kode G-70. Komposisi kimia abu terbang, limbah feldspar, G-100 dan G70 terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi abu, feldspar, G-100 dan G-70

| Komponen | MSWA | FW | G-100 | G-70 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 24.42 | 65.11 | 30.59 | 41.24 |
| TiO ₂ | 1.91 | 0.12 | 2.32 | 1.10 |
| Al ₂ O ₃ | 11.52 | 18.73 | 14.91 | 15.24 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.10 | 0.003 | 0.08 | 0.07 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.35 | 1.52 | 2.93 | 2.45 |
| CaO | 30.0 | 1.92 | 37.24 | 24.65 |
| MgO | 4.21 | 1.02 | 5.23 | 3.68 |
| BaO | 0.14 | 0.02 | 0.15 | 0.12 |
| ZnO | 1.42 | 0.01 | 1.71 | 1.09 |
| PbO | 0.14 | - | 0.16 | 0.11 |
| CuO | 0.05 | 0.002 | 0.06 | 0.03 |
| CdO | 0.015 | - | 0.02 | 0.01 |
| NiO | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Na ₂ O | 2.12 | 7.83 | 2.52 | 4.36 |
| K ₂ O | 0.62 | 1.11 | 0.83 | 0.92 |
| SO ₂ | 2.31 | - | - | - |
| P ₂ O ₅ | 1.48 | 0.12 | - | - |
| L.O.I | 17.2 | 2.53 | - | - |

Sumber : Karamanov, Pelino dan Hreglich (2003).

Tabel 3. Hasil analisa pengujian TCLP sampel dan abu terbang

| Logam | MSWA | G-100 | G-70 | Ambang max. |
|------------------|---------|-------|--------|-------------|
| Cd | 0.00723 | 0.045 | 0.0003 | 0.02 |
| Pb | <0.001 | 0.007 | 0.001 | 0.2 |
| Cu | 0.068 | 0.069 | 0.0042 | 0.1 |
| Cr ^{IV} | 0.499 | 0.076 | 0.001 | 0.2 |
| Se | 0.446 | - | - | 0.03 |
| Mn | 0.004 | 0.011 | 0.002 | 2 |
| Zn | - | 0.28 | 0.05 | 2 |
| Ni | <0.1 | 0.06 | 0.01 | 2 |
| Fe | 0.17 | 0.01 | 0.02 | 2 |
| Hg | 0.0015 | - | - | 0.005 |

Sumber : Karamanov, Pelino dan Hreglich (2003).

Kesetabilan kimia sampel G-100 dan G-70 diuji menggunakan cara leaching dalam asam asetat 0,5 M selama 24 jam sesuai prosedur pengujian *toxic characteristic leaching procedure* (TCLP). Hasil analisa media leaching dapat dilihat pada Tabel 3.

Hasil Percobaan

Hasil pengujian TCLP pada sampel G-100 menunjukkan konsentrasi Cd pada larutan tinggi melebihi ambang batas, sedangkan Cr dan Cu sedikit lebih rendah dari ambang batas. Dengan alasan tersebut maka sampel G-100 tidak dilakukan penelitian lebih lanjut. Pada sampel G-70 dengan penambahan feldspar dapat menurunkan hampir semua komponen pada larutan sampai di bawah ambang batas yang diperbolehkan. Dari penelitian ini dapat disimpulkan pemanfaatan abu terbang sebagai bahan campuran keramik dapat menurunkan dampak lingkungan abu terbang.

Vitrifikasi Abu Bawah dan Abu Terbang

Penelitian ini dilakukan oleh Liu dan Liu (2005) dengan tujuan mengevaluasi kinerja insinerator untuk pengembangan lanjut sehingga menghasilkan produk pembakaran sampah kota yang ramah lingkungan. Salah satu tahap penelitian yang dilakukan adalah dengan cara vitrifikasi residu pembakaran abu bawah dan abu terbang hasil pengolahan *air pollution control* (APC) pada gas buang. Hasil dari proses vitrifikasi berbentuk padat hasil leburan abu yang dicampur dengan 3% gelas sebagai binder. Produk ini dapat digunakan sebagai substitusi sebagian bahan bangunan. Kandungan logam pada abu yang telah mengalami vitrifikasi menjadi stabil.

Metode Percobaan

Abu yang digunakan percobaan diperoleh dari insinerator sampah kota (MSW) yang telah beroperasi di Taiyuan (China) dengan kapasitas 100 ton per hari. Abu terbang diperoleh dari hasil *air pollution control* (APC). Hasil abu terbang kemudian dicampur dengan abu bawah dan dilakukan vitrifikasi dengan menambahkan 2-3% gelas kemudian dipanaskan pada temperatur 1000-1100°C. Produk hasil vitrifikasi kemudian diuji tingkat kemudahan terlarutnya logam berat (*leachability*) dengan pengujian TCLP.

Pengujian TCLP dilakukan sebagai berikut: sampel diayak menggunakan *screen* 4mesh, hasil ayakan yang lolos diuji dengan cara direndam menggunakan aquades yang dijaga PH nya pada sekitar 5 ± 0,2 dengan cara penambahan larutan asam asetat 0,5M. Setelah 24 jam perendaman, padatan dipisahkan dengan cara disaring. Larutan

hasil *leaching* diencerkan 20 kali kemudian kandungan logam berat. Hasil pengujian *leachability* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil analisa pengujian TCLP sampel produk vitrifikasi (mg/l)

| Logam berat | Leachability | Batasan terdiksi | Standar EPA China | Standar EPA U.S | Standar EPA Jepang |
|------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| Hg | 1.98x10 ⁻⁴ | 10 ⁻⁴ | 0.05 | 0.2 | 0.005 |
| Pb | N.A | 0.04 | 3 | 5.0 | 0.3 |
| As | N.A | 0.04 | 1.5 | 5.0 | 0.3 |
| Cd | N.A | 0.03 | 0.3 | 1.0 | 0.3 |
| Cu | 0.23 | 0.04 | 50 | | |
| Zn | 0.38 | 0.03 | 50 | | |
| Ni | 0.12 | 0.10 | 10 | | |
| Be | N.A | 0.002 | 100 | | |
| Cr ⁶⁺ | N.A | 0.004 | 1.5 | | |
| Cr | 0.045 | 0.004 | 10 | 5.0 | |

Sumber : Liu dan Liu (2005).

Hasil Penelitian

Tabel 4 menunjukkan bahwa konsentrasi logam berat Hg, Pb, As, Cd, dan Cr memenuhi persyaratan ambang batas EPA China, U.S. dan Jepang. Konsentrasi Cu, Zn, dan Ni jauh lebih besar dari logam yang lain tetapi masih di bawah ambang batas EPA China. Khusus logam Cr⁶⁺ yang lebih berbahaya dari Cr ternyata dapat dikontrol dengan baik karena konsentrasi jauh lebih kecil dari ambang batas EPA China. Selain logam berat di atas juga dilakukan pengujian TCLP sianida dan fluoride. Hasil pengujian menunjukkan konsentrasi masing masing keduanya secara berurutan 0.0041 dan 0.09 mg/l. Konsentrasi ini di bawah ambang batas standart EPA China yaitu sebesar 1 mg/l untuk sianida dan 50 mg/l fluoride. Secara umum dapat disimpulkan bahwa proses vitrifikasi pada residu abu pembakaran insinerator dapat menghasilkan produk yang aman terhadap lingkungan.

Pemanfaatan Fly Ash sebagai Filler Pembuatan Batu Bata

Penelitian ini dilakukan Koseoglu, Polat dan Polat (2010) dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan aditif fly ash batubara dan air asam buangan proses industri terhadap kesetabilan logam berat yang terkandung produk batu bata berdasarkan perilaku pelarutan (*leaching*). Parameter yang diukur adalah kapasitas struktur batubata dalam mengikat logam berat, kekuatan mekanik dan kemampuan batu bata terhadap penyerapan air.

Metode Percobaan

Percobaan dilakukan menggunakan bahan batu bata yang biasa digunakan untuk produksi batu bata di daerah Turgulu-Manisa Turki. Tanah lempung yang digunakan diberi kode M, dibuat dengan cara mencampur 66% lempung A, 19% lempung B, dan 15% lempung C. Tanah lempung

M dicampur air 10%, kemudian dicetak berbentuk silinder dengan ukuran standart diameter 8 cm, panjang 14 cm yang diberi kode batu bata tipe S.

Batu bata yang mengandung fly ash dan air asam buangan proses dibuat pada kondisi sama tetapi dengan mencampur lempung dengan fly ash dan air asam pada berbagai perbandingan. Batu bata ini diberi kode A (fly ash divariasi, tanpa air asam limbah proses dan 10% air bersih), tipe B (tanpa fly ash, air asam buangan proses divariasi, dan 10% air bersih), dan tipe C (fly ash divariasi, 5% air asam buangan proses dan 5% air bersih). Data komposisi dan kode batu bata untuk eksperimen dapat dilihat pada Tabel 5. Data komposisi kimia lempung, fly ash dan air asam buangan proses dapat dilihat pada Tabel 6 dan 7.

Sampel untuk masing masing batu bata dari keempat kode di atas dibuat 5 buah, untuk pengujian *leaching*, ketahanan terhadap air dan kekuatan mekanik. Semua batu bata dikeringkan dalam oven pada temperatur 107°C selama satu hari, kemudian dibakar pada 1080°C selama 4jam, sesuai dengan prosedur pembuatan batu bata komersial.

Pengujian Parameter

Pengujian parameter meliputi kemampuan batu bata menyerap air, kekuatan batu bata dan *leaching*. Untuk menghitung kapasitas penyerapan batu bata terhadap air dilakukan sebagai berikut: sampel batu bata direndam dalam air selama 1 minggu. Rasio padatan/air selalu tetap 1/10, Setiap sampel ditimbang sebelum dan sesudah perendaman .

$$\text{Kapasitas penyerapan air (\%)} = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100\%$$

dimana *m_i*, masa batu bata setelah dibakar, *m_f*, masa batubata setelah direndam dalam air 1 selama 1 minggu.

Tabel 5. Komposisi dan kode sampel batu bata untuk eksperimen

| Tipe batu bata | Komposisi, % | | |
|----------------|--------------|---------|-----------------|
| | Lempung (M) | Fly ash | Air asam proses |
| tipe S | | | |
| S | 100 | 0 | 0 |
| tipe A | | | |
| A1 | 97.5 | 2.5 | 0 |
| A2 | 95 | 5 | 0 |
| A3 | 90 | 10 | 0 |
| A4 | 80 | 20 | 0 |
| A5 | 60 | 40 | 0 |
| tipe B | | | |
| B1 | 97.5 | 0 | 2.5 |
| B2 | 95 | 0 | 5 |

| | | | |
|--------|------|-----|----|
| B3 | 90 | 0 | 10 |
| B4 | 80 | 0 | 20 |
| B5 | 60 | 0 | 40 |
| tipe C | | | |
| C1 | 97.5 | 2.5 | 5 |
| C2 | 95 | 5 | 5 |
| C3 | 90 | 10 | 5 |
| C4 | 80 | 20 | 5 |
| C5 | 60 | 40 | 5 |

Sumber : Koseoglu, Polat dan Polat (2010).

Tabel 6. Komposisi fly ash dan lempung

| Oksida | % Dalam sampel | | | |
|--------------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| | Fly ash | Lempung A | Lempung B | Lempung C |
| SiO ₂ | 55.9 | 70.5 | 49.4 | 60.0 |
| Al ₂ O ₃ | 16.4 | 13.3 | 15.7 | 13.7 |
| Fe ₂ O ₃ | 9.9 | 6.0 | 6.1 | 5.9 |
| CaO | 6.1 | 0.5 | 8.8 | 5.6 |
| MgO | 4.8 | 1.1 | 3.8 | 2.3 |
| K ₂ O | 1.6 | 1.7 | 1.7 | 2.0 |
| Na ₂ O ₃ | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 0.5 |
| TiO ₂ | NA | 0.8 | 0.04 | NA |
| MnO | NA | 0.6 | 0.05 | NA |
| CaO | 0.3 | NA | NA | NA |
| Cl | 0.06 | NA | NA | NA |
| SO ₃ | 1.1 | NA | NA | 0.01 |

Sumber : Koseoglu, Polat dan Polat (2010).

Tabel 7. Komposisi air asam buangan proses

| Elemen | ppm | Elemen | ppb |
|--------|------|--------|------|
| Na | 38.4 | Zn | 53.7 |
| Al | 33.4 | Fe | 50.6 |
| Mn | 9.0 | Sr | 44.1 |
| Mg | 2.0 | Li | 4.5 |
| Ca | 1.5 | Cu | 2.5 |
| Cr | 1.1 | Ni | 1.8 |
| K | 0.8 | As | 1.2 |
| | | Co | 0.8 |
| | | Cd | 0.7 |

Sumber : Koseoglu, Polat dan Polat (2010).

- Pengukuran kekuatan tekan dilakukan dengan pengujian menggunakan peralatan Shimadzu AG-1 250kN
- Pengujian leaching dilakukan dengan merendam batu bata dalam aquades dengan rasio padat/cair sebesar 1/10 selama 1 jam , 1 hari, 1 minggu dan 1bulan untuk mengetahui jumlah logam berat yang terlarut ke air. Setelah perendaman sesuai waktu tersebut. larutan sampel dianalisa menggunakan *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* (ICP-MS Agilent 7500).

Hasil-hasil Penelitian

Hasil penelitian pada masing masing perlakuan variabel dapat dijelaskan berikut .

Kapasitas penyerapan air dan kekuatan tekan

Kapasitas penyerapan air dan kekuatan tekan pada sampel batu bata (Tabel 4) setelah pembakaran dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Kapasitas penyerapan air dan kekuatan tekan sampel

| | Kapasitas penyerapan air (%) | | | Kekuatan tekan. MPa | | |
|---|------------------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|
| | Tipe A | Tipe B | Tipe C | Tipe A | Tipe B | Tipe C |
| | S | 9.1 | 9.1 | 9.1 | 12 | 12.0 |
| 1 | 4.0 | 2.2 | 2.2 | 19.5 | 11.0 | 10.2 |
| 2 | 4.4 | 4.9 | 4.9 | 19.1 | 1.2 | 12.1 |
| 3 | 7.2 | 3.3 | 3.3 | 18.7 | 11.3 | 13.9 |
| 4 | 11.1 | 3.3 | 3.3 | 17.5 | 12.1 | 14.4 |
| 5 | 13.7 | 6.1 | 6.1 | 18.5 | 12.9 | 15.4 |

Sumber : Koseoglu, Polat dan Polat (2010).

Penambahan fly ash atau air asam buangan proses menyebabkan menurunnya kapasitas penyerapan air oleh batu bata pada semua rasio bila dibandingkan dengan batu bata standart (S). kecuali pada penambahan fly ash sebesar 40%. Hal ini menguntungkan apabila didasarkan pada kualitas standart batu bata. Penambahan fly ash menghasilkan batu bata dengan kekuatan tekan yang meningkat dari standart 12MPa menjadi 18-19 MPa. Hal ini disebabkan terjadinya ikatan yang lebih baik antar partikel dalam batu bata karena reaksi selama proses pengeringan. Pada penambahan air asam. tidak menyebabkan perubahan kenaikan kekuatan tekan. Hal ini menunjukkan tidak terjadi reaksi antara partikel dan air asam buangan proses. Kekuatan tekan naik dari 12MPa (batu bata standart) menjadi 15.4 MPa pada batu bata yang ditambahkan 40% fly ash dan 5% air asam. Secara garis besar dapat disimpulkan bahwa penambahan asam dan fly ash dapat menyebabkan perubahan yang positif terhadap kapasitas penyerapan air dan kekuatan tekan bila dibandingkan dengan batu bata standart.

Pengujian Leaching

Pengujian leaching pada batu bata yang dibakar untuk menentukan jumlah metal yang dapat terlarut dalam air. Hasil analisa ICP-MS pada larutan untuk leaching semua tipe batu bata menunjukkan bahwa konsentrasi logam (As, Mn, Co, Ni, Cu, Ti, Bi, Pb, Cd dan As. menunjukkan selalu di bawah 10 ppb setelah perendaman 1 bulan. Hanya logam berat Cr, Ni, Zn, Ag, Fe dan Al dan logam alkali tanah Ca, Mg, K dan Na yang terbaca pada konsentrasi di atas 10 ppb. Sebagai pembanding diberikan batas maksimum logam yang diperbolehkan sesuai peraturan yang berlaku di Turki seperti terlihat pada Tabel 9.

Berdasarkan batasan ini, semua logam hasil leaching pada semua tipe batu bata masih di bawah ambang batas yang diperbolehkan. Khusus pada logam Cr, Zn dan Fe pada pengujian

leaching mempunyai konsentrasi lebih besar dari Standard batu bata. tetapi konsentrasinya lebih rendah dari ambang batas yang diizinkan. Konsentrasi logam Ni, Al, dan Ag hasil leaching batu bata yang ditambahkan fly ash dan air asam lebih kecil dari hasil leaching batu bata Standard. Pada logam alkali tanah. Ca, Mg dan K pada pengujian leaching batu bata yang ditambahkan fly ash dan air asam mempunyai konsentrasi lebih besar daripada batu bata estandar. sedangkan untuk Na lebih kecil.

Tabel 9. Batasan maksimum logam yang diperbolehkan

| Logam berat | Batasan maksimum (%) | Logam alkali tanah | Batasan maksimum (%) |
|-------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| Cr | 2 | Ca | NL |
| Ni | 4 | Na | NL |
| Zn | 3-5 | K | NL |
| Ag | 1-5 | Mg | NL |
| Fe | 3-10 | pH | 6-9 |
| Al | 3 | | |

NL: Tidak ada batasan yang diatur regulasi

Sumber : Koseoglu, Polat dan Polat (2010) .

Berdasarkan hasil ini dapat disimpulkan bahwa logam yang dilepaskan ke dalam larutan batu bata tipe C (yang mengandung fly ash dan air asam buangan proses sebagai aditif) selalu lebih kecil dari ambang batas yang diizinkan. Hal ini disebabkan karena terjadi reaksi air asam dan fly ash yang bersifat alkali. Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan fly ash dan air asam buangan proses menguntungkan untuk mengatasi dampak buangan dari fly ash dan air asam buangan industri terhadap lingkungan.

Pemanfaatan Fly ash untuk Geopolimer dan Bottom Ash sebagai Filler

Penelitian ini dilakukan oleh Hardjito dan Shen (2010) yang bertujuan mempelajari berbagai parameter sifat mekanis mortar yang dibuat dari campuran geopolimer mortar dari fly ash (FA) dan bottom ash (BA) sebagai filler pengganti pasir. Latar belakang penelitian ini adalah recycle fly ash dan bottom ash yang merupakan residu pembakaran batubara sebagai bahan pengganti semen pada pembuatan mortar. Apabila dapat menggantikan semen maka dapat mengurangi potensi pengurangan emisi gas rumah kaca (CO₂) yang dihasilkan pada proses produksi semen. Dampak yang diharapkan dari penelitian ini adalah dapat mendukung pembangunan yang berkelanjutan.

Metode Percobaan

Fly ash yang digunakan dalam percobaan dari pembangkit tenaga dengan bahan bakar batubara di Sejingkat Malaysia. Sifat fisik FA luas

spesifik dan densitas masing masing 1.51 m²/ml dan 2370 kg/m³ . Komposisi kimia FA dianalisa menggunakan XRF terlihat pada tabel 10. Sesuai tabel dapat dihitung rasio SiO₂ terhadap Al₂O₃ sebesar 2.34. Bottom ash yang dipakai pada eksperimen diperoleh dari tempat yang sama. Specific gravity BA adalah 2.23 modulus tingkat kehalusan (fineness modulus, FM). Kadar air dikondisikan sebelumnya sebesar 22%. Pasir yang digunakan percobaan dalam kondisi *saturated surface-dry* (SSD). dengan specific gravity 2.67 dengan FM sebesar 1.44. Aktivator alkali yang dipilih adalah larutan kalium silikat (K₂SiO₃) dan larutan kalium hidroksida (KOH).

Tabel 10. Komposisi kimia fly ash

| Oksida | %(masa) |
|--------------------------------|---------|
| SiO ₂ | 58.0 |
| Al ₂ O ₃ | 24.8 |
| Fe ₂ O ₃ | 7.17 |
| K ₂ O | 3.14 |
| CaO | 2.40 |
| MgO | 1.95 |
| P ₂ O ₅ | 0.34 |
| Na ₂ O | 0.3 |
| TiO ₂ | 1.05 |
| MnO | 0.18 |
| SO ₃ | 0.08 |
| LOI | 0.32 |

Sumber: Hardjito dan Shen (2010) .

Sampel yang digunakan percobaan divariasikan seperti terlihat pada Tabel 11. R1 merupakan sample yang digunakan referensi, tanpa diberi bottom ash. R2 merupakan sample referensi yang digunakan untuk mempelajari pengaruh bebagai temperature curing. konsentrsai larutan KOH dan rasio K₂SiO₃ - KOH (massa) terhadap kuat tekan. Pada sampel R1, R2, 1-7, 12, 13, 15 dan 17 dilakukan pemanasan pada 400°C, 700°C, 1000°C pada hari ke enam percobaan. kemudian dilakukan uji kuat tekan pada hari ke tujuh. Sebagai referensi uji kuat tekan adalah hasil pengujian pada hari ke tujuh sample yang tanpa pemanasan (Belevi dan Langmeier, 2000; Karamanov, Pelino dan Hreglich, 2003; Liu dan Liu, 2005; Munir, 2008; Koseoglu, Polat dan Polat, 2010).

Pengujian Parameter

Pengujian parameter meliputi kuat tekan dan kemudahan pengerjaan (*workability*). Pengujian pada masing masing data menggunakan tiga sample dengan ukuran 50mm x 50 mm x 50 mm. Pengujian kuat tekan dengan kecepatan kenaikan beban 90kN/menit. *Workability* diukur berdasarkan aliran geopolimer mortar kondisi baru (*fresh*) pada meja mortar.

Tabel 11. Kode dan kondisi sampel untuk percobaan

| Campuran. no | Curing Temp (°C) | Konsentrasi KOH (M) | Rasio K ₂ SiO ₃ - KOH (massa) | Kandungan Bottom ash (%) | Kandungan Pasir (%) |
|--------------|------------------|---------------------|---|--------------------------|---------------------|
| R1 | 60 | 12 | 1.0 | 0 | 100 |
| R2 | 60 | 12 | 1.0 | 10 | 90 |
| 1 | 50 | 12 | 1.0 | 10 | 90 |
| 2 | 70 | 12 | 1.0 | 10 | 90 |
| 3 | 80 | 12 | 1.0 | 10 | 90 |
| 4 | 60 | 6 | 1.0 | 10 | 90 |
| 5 | 60 | 8 | 1.0 | 10 | 90 |
| 6 | 60 | 10 | 1.0 | 10 | 90 |
| 7 | 60 | 14 | 1.0 | 10 | 90 |
| 8* | 60 | 12 | 0.4 | 10 | 90 |
| 9* | 60 | 12 | 0.8 | 10 | 90 |
| 10* | 60 | 12 | 1.5 | 10 | 90 |
| 11* | 60 | 12 | 2.5 | 10 | 90 |
| 12 | 60 | 12 | 1.0 | 25 | 75 |
| 13 | 60 | 12 | 1.0 | 50 | 50 |
| 14* | 60 | 12 | 1.0 | 65 | 35 |
| 15 | 60 | 12 | 1.0 | 75 | 25 |
| 16* | 60 | 12 | 1.0 | 90 | 10 |
| 17 | 60 | 12 | 1.0 | 100 | 0 |

Sumber: Hardjito dan Shen (2010).

* Campuran tanpa pemanasan.

Hasil Penelitian

Kuat tekan

Pada sampel R1, R2, 12-17 dilakukan pengujian efek kandungan bottom ash pada kuat tekan. Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi kandungan bottom ash kuat tekan geopolimer dengan filler bottom ash semakin turun. Tetapi penambahan pada jumlah 10% bottom ash untuk menggantikan pasir pada pembuatan mortar menggunakan geopolimer dari fly ash tidak menyebabkan penurunan kuat tekan yang signifikan.

Pengaruh *curing temperature* terhadap kuat tekan menunjukkan semakin tinggi temperatur. kuat tekan meningkat. Pengaruh larutan KOH diujikan sampel R2 dan 4-7. Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi konsentrasi KOH. kuat tekan semakin naik. Pengaruh rasio K₂SiO₃ - KOH (massa). hasil pengujian sampel R2 dan 8-11 berbeda dari hasil penelitian Hardjito dan Shen (2010). Berdasarkan penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin besar rasio. kuat tekan semakin naik. Tetapi berdasarkan hasil penelitian ini menunjukkan rasio K₂SiO₃ - KOH (massa) pada rentang 0.4-1.0 mempunyai kuat tekan lebih besar dari rasio pada 1.5 dan 2.5 dengan hasil optimum kuat tekan pada rasio 1.

Ketahanan terhadap Panas

Pengaruh ketahanan panas diujikan pada sampel R1, R2, 12, 13, 15 dan 17. Kuat tekan terbesar ditunjukkan oleh sampel yang dipanaskan pada temperatur 400°C. Geopolimer mempunyai ketahanan terhadap panas sampai temperatur 700 °C tanpa mengalami penurunan kuat tekan yang signifikan.

Workability

Untuk mempelajari *Workability* digunakan sampel R1. R2. dan 12-17 *workability* semakin naik dengan kenaikan kandungan bottom ash. namun setelah mencapai 75% *workability* menurun.

Pemanfaatan Abu terbang untuk Menangkap (Sesquitrasi) CO₂

Penelitian ini dilakukan oleh Montes *et al.* (2009) bertujuan untuk memanfaatkan abu terbang pembakaran batubara pada industri yang mengandung 4.1% CaO untuk menangkap CO₂ dengan proses karbonasi. Penelitian ini bermanfaat untuk mengatasi dampak lingkungan karena akumulasi CO₂ hasil pembakaran bahan bakar fosil yang berpotensi menyebabkan pemanasan global dan pemanfaatan abu terbang hasil pembakaran batu bara.

Metode Percobaan

Percobaan dilakukan dengan cara mereaksikan abu terbang yang dicampur dengan air pada reaktor berbentuk autoclave dari bahan titanium (Gambar 1). Partikel abu terbang didispersikan dalam air dengan cara diaduk dan dikondisikan pada temperatur 25. 30 dan 60° C. Pada saat kondisi temperatur telah tercapai. CO₂ pada berbagai variasi tekanan dialirkan ke dalam reaktor dengan cara injeksi. Tekanan CO₂ divariasikan 10, 20, 30 dan 40 bar. Setelah proses injeksi CO₂ . penurunan tekanan dalam reaktor diamati untuk mengetahui kecepatan perpindahan massa CO₂ sampai mencapai kondisi kesetimbangan. Abu terbang yang dipakai pada penelitian ini diambil dari pengolahan APC pada pembangkit listrik batubara pada Los Barrios. Sepanyol selatan. Hasil analisa kandungan mineral dan kimia abu terbang yang dipakai sampel percobaan ditunjukkan pada Tabel 12 dan 13.

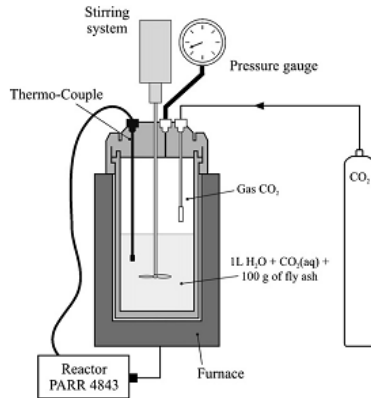
Hasil Percobaan

Hasil penelitian ex-situ proses sesquitrasi CO₂ menggunakan CaO yang berasal dari abu terbang pembakaran pada industri pembangkit listrik menunjukkan terjadinya perubahan yang signifikan CaO menjadi CaCO₃ dengan efisiensi karbonasi 82%. Reaksi yang terjadi pada proses karbonasi sebagai berikut:



Reaksi ini tidak dipengaruhi temperatur dan tekanan gas CO₂ . Hal ini menguntungkan karena dapat diterapkan untuk mengurangi kandungan CO₂ hasil pembakaran menggunakan peralatan (reaktor) yang tidak terlalu rumit

karena reaksi dapat berlangsung pada temperatur dan tekanan ruang. Proses sesquitrasi dapat dijalankan menggunakan absorpsi sederhana dengan cairan larutan CaOH.



Gambar 1. Rangkaian peralatan percobaan. sumber: (Montes et al., 2009).

Tabel 12. Kandungan mineral abu terbang

| Jenis mineral | Kandungan (% massa) |
|-----------------------|---------------------|
| Multilite | 20.8 |
| Kwarsa | 4.5 |
| Kapur padam (lime) | 4.1 |
| Anhidrat | 1.3 |
| K-feldspar | 2.5 |
| Magnetite | 0.5 |
| Chalcoaluminosilicate | 66.4 |

Sumber: (Montes et al., 2009).

Tabel 13. Komposisi kimia mineral abu terbang

| Jenis senyawa | Kandungan (% massa dalam) |
|---------------|--|
| Si | 41.3 (SiO ₂) |
| Al | 27.5 (Al ₂ O ₃) |
| C | 16 (CO ₂) |
| Ca | 5 (CaO) |
| Fe | 3.3 (Fe ₂ O) |
| Sr | 0.3 |
| Cl | 0.02 |
| Cr | 0.01 |
| Ni | 0.02 |
| Zn | 0.01 |
| Cu | 0.01 |
| Co | 0.01 |
| Se | 0.003 |

Sumber: (Montes et al., 2009).

Pada penelitian ini memberikan kesimpulan setiap ton abu terbang yang mengandung 4.1% CaO dapat menyerap 26 Kg CO₂. Teknik ini dapat digunakan untuk pemanfaatan abu terbang yang dihasilkan dari proses pembakaran pada pembangkit listrik dan penurunan emisi gas CO₂ dalam gas buang. Selain itu teknik ini dapat dijadikan dasar untuk menurunkan emisi gas buang pada insinerator

dengan cara absorpsi menggunakan larutan CaOH.

PEMBAHASAN UMUM

Residu pembakaran sampah rumah tangga baik BA. FA pada prinsipnya dapat dimanfaatkan baik sebagai bahan pencampur bahan bangunan (batu bata dan concrete). dicuci (ekstraksi) atau distabilkan dengan cara vitrifikasi. Dari ketiga metode ini yang paling mudah dilakukan adalah dimanfaatkan sebagai bahan bangunan. Pencucian abu menghasilkan air bekas cucian yang memerlukan pengolahan lebih lanjut sebelum dibuang. Penerapan teknik ini pada prakteknya sulit dilakukan karena besarnya volume BA. FA yang dihasilkan pada proses pembakaran sampah rumah tangga. Sebagai contoh. kota Malang menghasilkan sampah sebesar 400 ton setiap hari. Berdasarkan hasil analisa proximate. kandungan air sampah rumah tangga rata rata sekitar 40%. Sampah kering rumah tangga yang dihasilkan kota Malang setiap hari sebesar 240 ton. Pembakaran sampah kering ini akan menghasilkan abu sebesar 72 ton.

Demikian juga pada pengolahan dengan metode vitrifikasi. teknik ini kurang layak diterapkan karena membutuhkan energi panas yang besar untuk mencapai temperatur tinggi (1360°C sampai 1500°C). Pemanfaatan residu untuk menyerap CO₂ tidak dapat menstabilkan abu karena partikel abu tetap dapat bergerak bebas yang berpotensi melepaskan polutan.

Teknologi yang sesuai diterapkan untuk pengolahan abu pembakaran sampah rumah tangga adalah pemadatan dan stabilisasi (s/s) menggunakan binder semen untuk filler pada pembuatan *concrete* atau tanah liat (lempung) pada pembuatan keramik atau batu bata. Secara teknis sistem ini mudah dilakukan dan ramah lingkungan karena dapat mengurangi tingkat leachability logam berat. Beberapa penelitian terdahulu pemanfaatan abu berdampak positif terhadap lingkungan (Munir, 2008; Hardjito dan Shen, 2010; Koseoglu, Polat dan Polat, 2010). Berdasarkan pengujian *leaching* yang dilakukan. diperoleh data konsentrasi logam berat pada solven jauh di bawah batas ambang standar yang diperbolehkan.

Proses s/s abu menggunakan binder menghasilkan batu bata dan concrete yang dapat digunakan sebagai bahan bangunan. Kualitas produk yang dihasilkan berdasarkan pengujian kuat tekan masih memenuhi syarat standart baku mutu pada penambahan abu 40% % massa pada batu bata (Koseoglu, Polat dan Polat, 2010) dan

25% pada concrete (Munir, 2008). Pemanfaatan air kondensat hasil pembakaran sampah dapat digunakan sebagai *homogenizer* pada pembuatan batu bata dan hidrator untuk reaksi hidrasi pada pembuatan *concrete*. Namun demikian sampai saat ini belum ditemukan referensi *open source* yang mereview penelitian pemanfaatan air kondensat hasil pembakaran sampah untuk kedua tujuan tersebut sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut.

Potensi pemanfaatan abu untuk pembuatan batu bata dan concrete untuk batako mempunyai nilai komersial yang besar. Sebagai contoh perkiraan jumlah batako yang dapat diproduksi dari abu hasil pembakaran sampah di kota Malang sebesar 72 ton setiap hari dapat dihitung sebagai berikut: apabila pemakaian abu pada pembuatan batako sebesar 25%. dengan perbandingan bahan baku semen, pasir dan abu secara berturutan 3.75 : 30 : 1.25 (Munir, 2008) akan diperoleh total massa campuran 2016 ton. Apabila massa setiap batako diperkirakan sebesar 5.5 kg maka setiap hari dapat dihasilkan batako sekitar 366545 buah. Penggunaan bahan bangunan yang dibuat dari campuran abu masih memerlukan penelitian lebih lanjut tentang dampak terhadap kesehatan dan lingkungan pada jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Belevi, H. dan M.Langmeier. 2000. Factors determining the element behavior in municipal acid waste incinerators 2 laboratory experiments. *Environmental Science & Technology*. 34 (12): 2507-2512.
- Chandler,A.J., Eighmy. T.T., O.Hartlen, D.Kosson, S.E.Sawel, H.van der Sloot dan J.Vehlow. 1997. Municipal solid waste incinerator residues. IAWG (International Ash Working Group). *Studies in Environmental Science*. vol. 67. Amsterdam
- Charles, H., K. Lam, W.M.Alvin, J.P. Barford dan G.McKay. 2010. Use of Incineration MSW Ash: A Review *Sustainability*. 2. 1943-1968.
- Hardjito. D. dan F.S.Shen. 2010. Fly ash-based geopolymer mortar incorporating bottom ash. *Modern Applied Science* 4 (1): 44-52.
- Hjelmar, O. 1996. Waste management in Demark. *Waste Manage*. 16 (5/6). 389 – 394.
- Karamanov, A., Pelino. M. dan A.Hreglich. 2003. Sintered glass-ceramic from municipal solid waste-incinerator fly ashes-part I : the influence of the heating rate on the sinter-crystallisation. *Journal of European Ceramic Society*. 23 : 827 – 832.
- Koseoglu. I., M.Polat dan H.Polat. 2010. Encapsuling fly ash and acidic process waste water in brick structure. *Journal of Hazardous Materials*. 176: 957-964.
- Liu,Y.A. dan Y.U.Liu. 2005. Novel incineration technology integrated with drying, pyrolysis, gasification, and combustion of MSW and ashes vitrification. *Environmental Science Technology* 39 . pp. 3855- 3863.
- Millarth, K., F.J.Roethel dan D.M.Kargbo. 2004. Waste-To-Energy Residues- The Search for Beneficial Uses. 12th North American Waste to Energy Conference (NAWTEC 12)
- Mohapatra,R. dan J.R.Rao. 2001. Review- some aspects of characterization, utilization and environmental effects of fly ash. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 76(1). Pp. 9-26.
- Montes. H.G., R. Pe´ rez-Lo´ peza, F. Renardc, J.M. Nietob dan L. Charlet. 2009. Mineral sequestration of CO₂ by aqueous carbonation of coal combustion fly-ash. *Journal of Hazardous Materials*. 161:1347– 1354
- Munir, M. 2008. Pemanfaatan abu batubara (*fly ash*) untuk hollow block yang bermutu dan aman bagi lingkungan. Tesis. Program Magister Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana. Universitas Diponegoro.
- Quina, J.M., J.C.Bordado dan R.M.Quinta-Ferreira. 2008. Review treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration. *Waste Management*. 28 : 2097-2121.
- Quina, M.J., R.C.Santos, J.C.M.Bordado dan R.M.Q. Ferreira. 2007. Characterization of air pollution control residues produced in a municipal solid waste incinerator in portugal. *J. Hazard. Mater*.