

# Disain PLTU Skala Kecil Berbahan Bakar Batubara

## Agus Rusyana Hoetman<sup>1,a)</sup>

<sup>1</sup>Balai Besar Teknologi Konversi Energi, BPPT  
Puspiptek Serpong, Tangerang-Selatan-Banten, Indonesia 15320

<sup>a)</sup>agus.rusyana@bppt.go.id

### Abstrak

Makalah ini membahas disain Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batubara skala kecil. Diperbandingkan teknologi pembakaran yang ada untuk skala kecil yaitu *fluidized bed* dan *stoker*. Alat kontrol polusi partikulat dan SO<sub>2</sub>, serta fasilitas *water* dan *waste water treatment* juga disajikan. *Heatrate* pada PLTU skala kecil ini tidak sama dengan skala besar, karena pada PLTU batubara skala kecil efisiensi boilernya lebih rendah (83-85%) dan kebutuhan *auxiliary power* jauh lebih besar (10-15%) [4]. Efisiensi unit PLTU batubara skala kecil ini rata-rata hanya sekitar 22-23% [17]. Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batubara skala kecil di mulut tambang diluar Jawa-Bali saat ini meningkat, hal ini dikarenakan harga bahan bakarnya terhitung relative lebih murah dan perbaikan pada pengoperasiannya sekarang dapat lebih kompetitif dibandingkan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Namun untuk itu, ada beberapa aspek disain PLTU batubara yang perlu ditingkatkan, mengingat PLTU batubara mempunyai beberapa komponen utama yang membutuhkan persyaratan yang lebih kompleks dibandingkan PLTD.

**Kata kunci:** boiler, fluidized bed, PLTU, polusi, stoker

### Abstract

*This paper discussed the design of small-scale Coal Steam Power plant. Where Combustion technology for the small-scale that is fluidized bed and stoker will be compared. Particulate pollution, SO<sub>2</sub> control devices, and facilities for water and waste water treatment are also presented. The Heatrate on a small scale power plant will not be the same as a large scale, this is due to the small scale coal power plant boiler efficiency is lower (83-85%) and also need much greater power auxiliary (10-15%) [4]. The efficiency of small-scale coal power unit on average is only about 22-23%.*

*Construction of small scale coal mine mouth steam Power plant outside Java-Bali is increasing, this is because the price of fuel relatively cheaper and improvement of the operation can now be more competitive than diesel power plant. But there are some aspects of the design in coal small scale Power plant needs to be proved, given the coal power plant has several major components that require more complex requirements than diesel.*

**Keywords:** power plant, fluidized bed, stoker, pollution

## I. LATAR BELAKANG

Kebutuhan listrik di luar Jawa-Bali, terutama daerah yang luas dengan jarak antar kabupaten yang berjauhan dan densitas penduduk agak rendah umumnya tidak lebih dari 20 MW. Jarak antar daerah ini yang berjauhan mengakibatkan biaya transmisi menjadi mahal dan juga rugi-rugi tegangan listrik akan tinggi. Selain itu, perbedaan antara beban puncak dan normal dapat mencapai 2 atau 3 kalinya, karena pada daerah tersebut umumnya didominasi oleh pelanggan rumah tangga. Karakteristik kebutuhan listrik seperti ini akan sesuai bila di suplai oleh Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD).[15]. Namun, pada saat ini harga bahan bakar solar semakin tinggi karena subsidi pemerintah berkurang, dan biaya pemeliharaan juga meningkat. Sehingga harga pembangkitan listrik menggunakan PLTD akan lebih mahal dibandingkan PLTU terutama pada daerah yang memang memiliki sumberdaya energi.

Pada daerah-daerah di Kalimantan dan Sumatera yang mempunyai potensi sumberdaya energi seperti batubara, hal ini akan sangat menguntungkan jika dibangun beberapa PLTU skala kecil terutama di mulut tambang yang terdistribusi dan mensuplai kebutuhan listrik pada daerah tersebut.

Pada makalah ini, dibahas mengenai disain PLTU berbahan bakar batubara skala kecil. Tidak seperti PLTD yang cukup menggunakan fasilitas yang cukup ringkas. Pada PLTU memiliki beberapa komponen utama, yaitu: sistem penanganan bahan bakar, boiler, turbine & generator, sistem pendingin, *water* dan *waste water treatment*, dan alat kontrol polusi. Selain itu, efisiensi dan *heat rate* PLTU batubara skala kecil juga akan dibahas.

## II. ASPEK DESAIN PLTU BATUBARA

### A. Lokasi PLTU

Penentuan lokasi PLTU ini adalah salah satu faktor yang sangat penting, karena akan sangat berpengaruh pada disain PLTU dan pada akhirnya akan berpengaruh pada biaya pembangunannya. Beberapa pertimbangan teknis yang perlu di lihat adalah sebagai berikut:

#### a. Akses ke lokasi

Akses ini penting terutama untuk kemudahan dalam pembangunan PLTU, suplai bahan bakar, distribusi listrik dan lainnya.

#### b. Ketersediaan sumberdaya air

Sumberdaya air ini diperlukan untuk sistem pendingin PLTU di kondenser, make up water untuk boiler dan juga operasional PLTU.

c. Kondisi Lapisan Tanah

Kondisi lapisan tanah harus diketahui untuk memastikan bahwa tanah tersebut akan sanggup menahan beban PLTU dan fasilitas penunjangnya. Dalam hal ini, beberapa tes geologi sangat diperlukan pada daerah yang akan dipilih.

d. Zone atau daerah lokasi

Peruntukan lahan setempat atau tata ruang harus diperhatikan terutama pada daerah yang berdekatan dengan fasilitas lain yang sudah ada dan juga zone

gempa untuk menentukan koefisien seismik yang diperlukan dalam disain

B. Teknologi Pembakaran Batubara

Teknologi pembakaran batubara untuk kapasitas steam hingga 300.000 lb/hr biasanya didominasi oleh *Atmospheric Fluidized Bed Combustion (AFBC)* dan *Stoker*. Pada subbab ini dibahas mengenai perbandingan secara teknis keunggulan dan kelemahan masing-masing teknologi, dimana ditunjukkan di tabel 1 [4].

Sistem pembakaran dengan stoker mempunyai beberapa tipe yang dapat diklasifikasikan menjadi 4 macam berdasarkan metode pengumpulan bahan bakar kedalam furnace, yaitu:

**Tabel 1.** Perbandingan Teknologi Pembakaran AFBC dan Stoker [4]

| Parameter                            | AFBC   | Stoker   |
|--------------------------------------|--|--|
| 1. Temperatur pembakaran             | Temperatur pembakaran dibawah 1000°C sehingga emisi NO <sub>x</sub> lebih rendah.  | Temperatur pembakaran mencapai 1200°C, sehingga NO <sub>x</sub> lebih tinggi, namun berdasarkan prediksi masih dibawah baku mutu lingkungan.   |
| 2. Efisiensi Pembakaran              | Resident time batubara di bed lebih lama dan efisiensi pembakaran tinggi. Pada beban rendah, dimana kebutuhan pembakaran batubara lebih rendah dari kebutuhan untuk fluidisasi akan terjadi excess air yang tinggi dan menurunkan efisiensi pembakaran | Pada variasi ukuran batubara yang terlalu lebar dapat mengakibatkan penurunan efisiensi pembakaran<br>Pada beban rendah, tebal batubara pada <i>grate</i> dikurangi dan laju udara dapat dengan mudah dikurangi tanpa mempengaruhi kinerja pembakaran.                 |
| 3. Kontrol Emisi SO <sub>2</sub>     | Reduksi gas emisi SO <sub>2</sub> dapat langsung dengan injeksi batu kapur kedalam <i>bed scrubber</i> .   | Menggunakan <i>scrubber</i> , injeksi batukapur pada <i>furnace</i> , dan <i>duck injection</i>  |
| 4. Kontrol Pembakaran                | Dengan mengatur laju umpan bahan bakar   | Dengan mengatur ketinggian <i>gate</i> dan kecepatan <i>grate</i>  |
| 5. Permasalahan pembakaran           | Penumpukan bottom ash yang berlebihan pada bed dapat mengganggu fluidisasi<br>Temperatur pembakaran diatas Initial Deformation Temperature dan kandungan sodium tinggi akan mengakibatkan agglomerasi bed material                                     | Penumpukan bottom ash tidak mengganggu kinerja pembakaran dan akan jatuh pada akhir <i>grate</i> .<br>Temperatur pembakaran diatas temperatur fluid batubara bisa mengakibatkan slag pada <i>grate</i> yang dapat merusak <i>grate</i> .                               |
| 6. Pembuangan Fly Ash dan Bottom ash | Fly ash ditangkap dengan mudah dengan alat kontrol polusi<br>Bottom ash tercampur dengan bed material dan batubara, sehingga pengambilan bottom ash secara kontinyu agak rumit. Perlu dilakukan sieving material.                                      | Fly ash ditangkap dengan mudah dengan alat kontrol polusi<br>Bottom ash jatuh pada akhir <i>grate</i> .  |
| 7. Pengoperasian                     | Penyalan awal agak lama karena harus menaikkan temperatur bed material diatas temperatur penyalan batubara<br>Mudah, tetapi kondisi fluidisasi dan temperatur bed harus terus diamati  | Penyalan awal agak cepat dan mudah dengan mendistribusikan batubara diatas <i>grate</i> dan dinyalakan secara manual dengan disuplai udara ke <i>grate</i> .<br>Mudah, temperatur pembakaran pada <i>grate</i> harus diamati agar tidak melebihi temperatur fluid ash. |

Sistem pembakaran dengan stoker mempunyai beberapa jenis yang dapat diklasifikasikan menjadi 4 macam berdasarkan metoda pengumpanan bahan bakar kedalam *furnace*, yaitu:

1. Spreader stokers
2. Underfeed stokers

3. Water cooled vibrating grate stokers
  4. Chain grate dan traveling grate stoker
- Ada 2 (dua) jenis stoker yang umum ada dipasaran yaitu *spreader stokers* dan *traveling grate stokers*. Perbandingan kedua sistem pembakaran tersebut dijelaskan pada tabel 2 [4], [10].

**Tabel 2.** Perbandingan Teknologi Pembakaran Stoker Tipe *Spreader Stoker* dan *Travelling Grate*

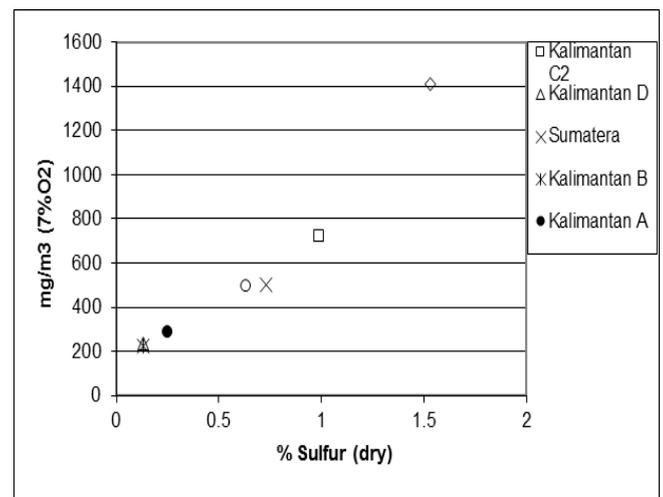
| Parameter            | <i>Spreader Stoker</i>   | <i>Travelling Grate</i>   |
|----------------------|--|---|
| Sistem Pembakaran    | Disemburkan keatas <i>grate</i> dengan <i>rotograte</i> . Batubara sebagian terbakar pada saat tersuspensi diatas <i>grate</i> . Sehingga ukuran batubara yang halus banyak terbawa udara gas buang.<br>Perlu power untuk motor pengumpan batubara<br>Perlu power untuk mengatur bukaan umpan batubara karena menggunakan hidrolis yang terus menerus bergerak<br><br>Respon terhadap perubahan beban cepat. Kapasitas maksimum pembakaran adalah 750.000 Btu/sq ft hr, dimensi <i>grate</i> menjadi lebih ringkas | Diumpkan kedalam <i>grate</i> secara gravitasi diatas <i>travelling grate</i> . Banyaknya batubara halus terbawa gas buang adalah kecil.<br><br>Tidak perlu motor pengumpan<br><br>Tidak perlu <i>power</i> , karena menggunakan sistem <i>gate</i> manual untuk mengatur ketebalan batubara.<br><br>Respon perubahan agak lambat<br><br>Kapasitas maksimum jenis ini 500.000 Btu/sq ft hr, sehingga dimensi <i>grate</i> lebih besar |
| <i>Air Preheater</i> | Tidak pakai  | Dianjurkan hingga maksimum 350°F  |
| Pengoperasian        | Mekanisme pengumpanan batubara (pada <i>rotograte</i> ) agak rumit dan perlu perawatan rutin<br>Ketebalan batubara pada <i>grate</i> sangat tipis sehingga <i>grate</i> sering terkena temperatur tinggi secara langsung dan sering merusak <i>grate</i> .<br>Kontrol pembakaran dengan mengatur bukaan pengumpan ke <i>rotograte</i>  | Mekanisme pengumpanan cukup sederhana<br><br>Tebalnya batubara dan abu <i>bottom ash</i> pada <i>grate</i> , sehingga temperatur tinggi tidak mengenai <i>grate</i> secara langsung.<br>Kontrol pembakaran dengan mengatur tebal batubara dan kecepatan <i>grate</i> .  |
| Kontrol Polusi       | Menggunakan <i>fabric filter</i> untuk partikulat, <i>scrubber</i> dan <i>duct injection</i> untuk emisi gas SO <sub>2</sub>   | Menggunakan <i>fabric filter</i> untuk partikulat, <i>scrubber</i> dan <i>duct injection</i> untuk emisi gas SO <sub>2</sub>  |

**C. ALAT KONTROL POLUSI**

Pengopersian PLTU berbahan bakar batubara diharapkan menggunakan teknologi yang ramah lingkungan agar memenuhi baku mutu lingkungan untuk gas buang PLTU pada Kep Men LH no.13 th. 1995

**C.1. Kontrol Emisi SO<sub>2</sub>**

Gambar 1 menunjukkan korelasi emisi SO<sub>2</sub> hasil uji bakar LSDE dengan kandungan sulfur batubara umpan. Pada kondisi sulfur sekitar 1% (dry) menunjukkan bahwa emisi SO<sub>2</sub> berada pada sekitar baku mutu SO<sub>2</sub> 750 mg/m<sup>3</sup> (7% O<sub>2</sub>, 1 atm, 250 C) [2]. Jika batubara umpan bersulphur lebih dari 1% dry, maka diperlukan alat control polusi SO<sub>2</sub>, dimana jenisnya bergantung pada efisiensi penangkapan yang diperlukan. Sistem absorpsi jenis *Spray-dryer* mempunyai efisiensi yang tinggi hampir menyamai *wet-scrubber*. Limbah dari sistem ini adalah kering dan lebih mudah diolah lebih lanjut.



**Gambar 1.** Korelasi kandungan sulphur batubara terhadap emisi SO<sub>2</sub> [2]

Bagaimanapun, peralatan yang digunakan untuk atomisasi agak rumit dan membutuhkan penanganan yang lebih dibandingkan *wet scrubber systems*. *Spray-dryer-type absorption systems* beroperasi pada temperatur gas yang lebih tinggi dari *wet scrubbers* dan kurang efektif untuk menghilangkan *pollutant* lain pada aliran gas seperti *condensable particulate matter*. Adapun perbandingan teknologi kontrol emisi SO<sub>2</sub> ditunjukkan pada Tabel 3.

### C.2. Kontrol Emisi Partikulat

Ada dua teknologi kontrol emisi partikulat yang mempunyai efisiensi tinggi sekitar 99% yaitu: Eletrostatic Precipitator (EP) dan Bag Filter. Prinsip kerja dengan menghujani partikel abu didalam gas buang dengan elektron. Kinerja EP ini dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu: Laju alir gas buang, distribusi ukuran partikulat, massa partikulat yang masuk dan resistivitas abu. Pada batubara bersulfur tinggi cenderung mempunyai resistivitas yang rendah sehingga mudah ditangkap, namun sebaliknya jika bersulfur rendah akan menurunkan efisiensi

penangkapan partikulat. Keunggulan EP ini terhadap *fabric filter* adalah *pressure drop*nya yang rendah. Namun, pada pembakaran batubara yang bersulfur sangat rendah biasanya digunakan *bag filter*, karena *fabric filter* tidak terpengaruh oleh resistivitas abu batubara.

*Fabric filters* berfungsi untuk mengumpulkan partikulat pada permukaan filter. *Fabric filters* digunakan dalam variasi yang lebar untuk berbagai aplikasi dimana dibutuhkan efisiensi penangkapan partikulat yang tinggi. Efisiensi biasanya berkisar dari 99% hingga 99,5% tergantung pada karakteristik *particulate matter* dan disain *fabric filter*.

Kinerja *fabric filters* biasanya tidak terpengaruh terhadap komposisi kimiawi *particulate matter*. Namun, tidak berlaku pada aliran gas yang dapat membangkitkan terjadinya korosif material yang merusak *filter media*. *Fabric filters* tidak dapat digunakan bila partikel didalam aliran gas berkondisi basah atau lengket. Kondisi ini dapat mengakibatkan akumulasi pada permukaan material dan memblok aliran gas.

**Tabel 3.** Perbandingan Kontrol Emisi SO<sub>2</sub>

| Metode            | Keunggulan  | Kelemahan   |
|-------------------|---|---|
| Spray Dryer       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efisiensi tinggi</li> <li>• Limbah dalam bentuk padat</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biaya tinggi</li> <li>• Kebutuhan perawatan yang lebih</li> <li>• Kebutuhan ruang yang lebih besar</li> <li>• Potensi terjadinya terbawanya air</li> </ul>                                   |
| Wet Scrubber      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efisiensi tinggi</li> <li>• Sekaligus dapat menangkap partikulat</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kebutuhan ruang yang lebih besar</li> <li>• Perlu fasilitas pengolahan limbah cair</li> <li>• Kemungkinan korosif yang besar pada downstream scrubber seperti ID fan dan cerobong</li> </ul> |
| Furnace Injection | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sederhana</li> <li>• Biaya rendah</li> <li>• Kebutuhan ruang lebih kecil</li> <li>• Limbah dalam bentuk padat</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efisiensi rendah</li> <li>• Penggunaan reagent lebih banyak</li> <li>• Potensi terjadi fouling tinggi</li> </ul>   |
| Dry Injection     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sederhana</li> <li>• Biaya rendah</li> <li>• Kebutuhan ruang lebih kecil</li> <li>• Limbah dalam bentuk padat</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efisiensi rendah</li> <li>• Penggunaan reagent lebih banyak</li> </ul>   |

### D. Water dan Waste Water Treatment

Bahan baku air untuk sistem pendingin PLTU dapat diambil dari air sungai atau air laut. Sedangkan bahan baku air untuk *make-up boiler* perlu dilakukan treatment. Treatment tersebut banyak bergantung pada kondisi air yang dijadikan sumber. Pada treatment dengan sistem konvensional, pada tahap pertama, adalah penyaringan dan klorinasi, serta diikuti dengan *coagulation* dan *flocculation*. Setelah diklarifikasi air akan difilter. Media umum untuk filter adalah pasir dan karbon aktif. Alternatif lainnya selain metode konvensional adalah menggunakan proses membran yang disebut *ultra-filtration* (UF). Oleh karena ukuran micro pore (e.g. 0.01-0.05 microns), maka UF sangat efektif untuk menghilangkan krista dan sebagian menghilangkan bacteria dan virus, dan ketika dikombinasikan dengan *disinfections* dapat

megontrol mikroorganisma didalam air. Dengan metode membran ini, pengoperasiannya lebih praktis dan luas lahan untuk peralatan lebih ringkas. Selain itu, harga peralatan juga semakin kompetitif dengan konvensional.

Guna menghilangkan kandungan mineral pada air dibutuhkan proses demineralisasi. Pada sistem konvensional menggunakan metode *anion-cation* dan desalinasi (untuk menghilangkan kandungan mineral garam). Sedangkan dengan metode membran menggunakan *Reverse Osmosis (RO) membrane*. Jenis *Reverse Osmosis (RO) membrane* yang digunakan bergantung pada jenis sumber air yaitu: *potable water*, *brackish water* atau *seawater*. Untuk jenis air laut (*seawater*) tekanan air yang dibutuhkan untuk masuk ke membran adalah (700 psi) paling tinggi diantara jenis dua jenis lainnya.

RO membrane ini akan sangat optimal jika menggunakan UF sebagai RO Pre-treatment dibandingkan dengan metode konvensional. Hal ini dikarenakan UF dapat menghasilkan *turbidity* 0.04-0,1 NTU dan SDI (*Silt Density Index*) 0.3-2. Sedangkan metode konvensional, dihasilkan *turbidity* 0,1 – 1 dan SDI 2 – 6. Hal ini akan mengurangi *fouling* organik pada RO membrane. Selain itu, dengan UF design flux RO akan lebih tinggi yaitu 12-20 gfd (*gallons per square foot per day*), sedangkan dengan konvensional hanya berkisar 8-12 gfd [15].

### III. HEAT RATE PADA PLTU BATUBARA SKALA KECIL

*Heat rate* dan efisiensi unit PLTU dipengaruhi oleh turbine *heat rate*, efisiensi boiler, *gross power* dan *auxiliary power*. Berdasarkan *Electric Light and Power's annual top 100 utility operating report thn 1997* menunjukkan 25 Terbaik PLTU batubara skala besar berkisar antara 8.996 Btu/kWh – 9.486 Btu/kWh. Pada PLTU batubara skala kecil, *heatrate* akan lebih besar bisa mencapai 15.500 Btu/kWh (atau efisiensi unit sekitar 22-23%) disebabkan efisiensi boiler (sekitar 83-85%) lebih rendah dari *pulverized coal boiler* (sekitar 85-90%) dan juga kebutuhan *auxiliary power* yang lebih tinggi dibandingkan skala besar. Pada PLTU skala besar, *auxiliary power* berkisar 6-8%, namun pada PLTU skala kecil (<20MW) menjadi 10-15%. Sedangkan pada FBC, *auxiliary power* bisa mencapai 17%, sehingga lebih besar dari Stoker boiler, karena power *FD fan* lebih besar untuk mengatasi *pressure drop* pada bednya [11], [16].

### IV. KESIMPULAN

Guna mendisain PLTU batubara skala kecil, ada beberapa aspek yang perlu diperhatikan yaitu: penentuan lokasi, disain batubara umpan dalam kaitannya pemilihan teknologi pembakaran dan kontrol polusi, kondisi sumberdaya air yang mempengaruhi disain sistem *water dan waste water treatment*.

Pada batubara yang bersulfur lebih dari 1% (dry) kemungkinan akan diatas baku mutu emisi SO<sub>2</sub> 750mg/m<sup>3</sup> (7% O<sub>2</sub>, 1 atm, 25°C), sehingga diperlukan alat kontrol polusi SO<sub>2</sub>, dimana jenisnya bergantung pada efisiensi penangkapan yang diperlukan.

Pada PLTU skala kecil < 20 MW, efisiensi boiler berkisar 83-85% dan *auxiliary power* 10-15%, sehingga *heatrate* PLTU batubara skala kecil ini cukup tinggi yaitu sekitar 15.500 Btu/kWh, atau efisiensi unit sekitar 22-23%.

### REFERENSI

- [1] Sastrawinata, Taufik, 2015, Small scale coal power Plant in Indonesia, APEC, expert group on clean fossil Energy.

- [2] UPT – LSDE, (1998-2002), Coal Combustion Test Report, LSDE, BPPT
- [3] Cayadi, (2004), Laporan Kemajuan FS 2x6MW Berau, LSDE, BPPT.
- [4] Cahyadi, (2001), Pengaruh Kualitas Batubara Terhadap Unit Pembangkit, Pelatihan Teknologi Pembakaran Batubara, LSDE, BPPT, Jakarta.
- [5] He, Y., Zhu, J., Zhang, D. and Manzoori, A. (1998) Studies of Fluid Bed Agglomeration and Defluidization, CRC Project Annual Report, 61 - 63.
- [6] Zhu, J.N., Ne, Y and Zhang, D.K (1998). Particle Agglomeration and Defluidization in Fluidized Bed. CRC Project Annual Report, Australia, 67-68.
- [7] Review of Potential Efficiency improvement at Coal Fired Power Plant, US-DOE Report, USA.
- [8] Cheremisinoff N.P. (1984) Hydrodynamics of Gas-Solids Fluidization, Gulf Publishing Co., 207-232.
- [9] Ekinci, E.(1992) Fluidized Bed Combustion of Coals and Environmental Protection, Kluwer Academic Publisher, 249 – 252
- [10] Gaffert, G.A.,(1952), Steam Power Station, Mc Graw Hill, New York.
- [11] Kunii, D. and Levenspiel, O.(1977) Fluidization Engineering, Robert E. Krueger Publishing, Australia, 1 – 2, 36-40.
- [12] Manzoori, A.R. and Agarwal, P.K. (1993) The Role of Inorganic Matter in Coal in The Formation of Agglomerates in Circulating Fluid Bed Combustor, Fuel 72, 1069-1075.
- [13] Perry, R.H. and Green, D. (1984) Perry's Chemical Engineer's Handbook, Mc Graw Hill, USA, 9-43 – 9-44.
- [14] Singer, J.G., (1981), Combustion: Fossil Power System, Combustion Engineering, Inc, USA.
- [15] Bates, W.T., (1999), Capillary UF as RO Pretreatment, International Water Conferences Proceedings, Pittsburgh, USA.
- [16] Firdaus, A. dan Juwarno, (2002) The scheme of the development and ownership mine mouth small scale power plant low rank coal power plant, Mine Mouth Power Plant Proceedings, Indonesian Coal Society, Bali, Indonesia.
- [17] <http://www.zgindustrialboiler.com/product/circulati>, 2016.
- [18] <https://www.oxfordbusinessgroup.com/analysis/coal-fired-plants-offer-more-affordable-power-source-indonesia,2015>.