

# EVALUASI EFISIENSI PANAS DAN EMISI GAS RUMAH KACA PADA ROTARY KILN PABRIK SEMEN

Farisa Ridha Mutiara\*) Hadiyanto\*\*)

## Abstract

*Kiln is an equipment which has vital existence in the manufacture of cement. Kiln firing requires a high temperature to produce a clinker. Higher combustion temperature allows heat transfer occurs on the surface coating on the walls of the kiln that is not evenly distributed, so most of the heat is absorbed. As a consequence, it requires large amounts of fuel. Heat efficiency in the kiln is important to know. Production of clinker in the kiln which occurs at high temperatures, will also release a variety of gases, such as CO<sub>2</sub>. Carbon dioxide is included as one of the greenhouse gas, this gas will negatively impact the earth's ozone. Therefore, need to know the range of greenhouse gas that is formed, in order to determine the appropriate mitigation and prevention. Evaluation result of heat efficiency in the kiln is 43,17% by generating greenhouse gas emissions amounted to 6,173 tonnes CO<sub>2</sub> equivalent / tonne of coal.*

*Key words : efficiency, greenhouse gas, kiln, cement*

## Pendahuluan

Dewasa ini efisiensi energi mutlak diperlukan untuk menghadapi perkembangan industri. Industri yang tidak memperhatikan efisiensi energinya akan kesulitan menghadapi persaingan usaha dan menjaga keberlangsungan hidup industri tersebut. Selain itu, industri tidak dapat lepas dari perannya untuk ikut serta menjaga keseimbangan alam. Polusi yang terbentuk harus sebisa mungkin diatasi agar tidak membahayakan kehidupan manusia di kemudian hari.

Di era pembangunan seperti saat ini, kebutuhan akan semen cenderung mengalami peningkatan. Hal ini, mengakibatkan keberadaan pabrik semen di tiap daerah tidak terelakkan. Seiring dengan berkembangnya industri semen, ternyata muncul dampak negatif dari industri ini, yaitu tercemarnya udara disekitar pabrik. Oleh karena itu, polusi udara ini perlu dikurangi dan sebisa mungkin dicegah dari sumbernya. Dalam rangka untuk mengetahui cara mengurangi dan mencegah polusi tersebut, maka perlu diketahui terlebih dahulu sumber dan jumlah gas penyebab polusi tersebut.

Proses utama dalam industri pembuatan semen adalah proses pembakaran. Dalam proses pembakaran terjadi reaksi perubahan dari bahan baku menjadi klinker yang disertai dengan pelepasan gas CO<sub>2</sub>.

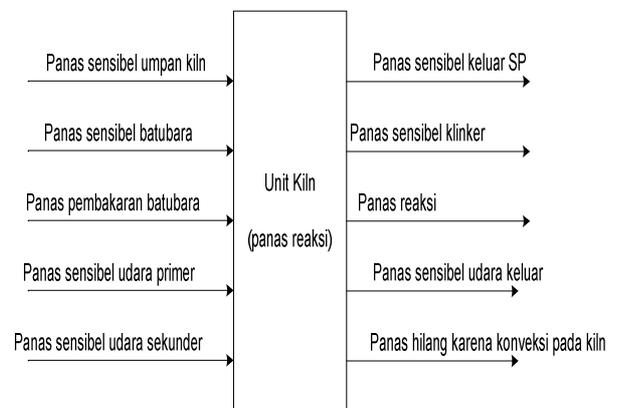
Unit pembakaran utama dalam industri semen adalah *rotary kiln*. Saat ini, unit pembakaran tidak hanya terdiri dari *rotary kiln*, tetapi juga dilengkapi dengan *preheater*. Terdapat dua jenis *preheater*, yaitu *grate preheater* yang digunakan sejak tahun 1929 dan *suspension preheater* yang digunakan sejak tahun 1950 (Locher dan Kropp, 1986). *Grate preheater* saat ini sudah jarang digunakan karena transfer panas yang terjadi kurang sempurna, sedangkan pada *suspension preheater*, transfer panas antara bahan dengan gas panas terjadi secara searah pada saluran lengkung antar *cyclone* yang disebut *riser duct*, sehingga trans-

fer panas yang terjadi lebih efektif dan sempurna (Duda, 1985).

*Rotary kiln* merupakan suatu silinder dengan kemiringan horizontal 3-4% dan berputar 1-4 rev/min. Material masuk melalui ujung atas dan kemudian turun, arus material berlawanan dengan gas panas dari api yang berasal dari ujung bawah. Suhu material maksimal sekitar 1450°C, yang tercapai pada *burning zone*. Material di *burning zone* berupa semisolid dan akan memadat sempurna pada *cooling zone* (Taylor, 1997).

Bagian dalam *rotary kiln* dilapisi dengan batu tahan api untuk melindungi dinding kiln. Batu tahan api harus bersifat tahan terhadap suhu tinggi, tahan terhadap perubahan suhu mendadak, tahan terhadap serangan kimia, tahan terhadap abrasi dan memiliki sifat *coatability* (Peray dan Waddell, 1972).

Suhu tinggi pada kiln diperoleh dari pembakaran batubara sebagai bahan bakar utama. Panas yang dihasilkan oleh batubara ini tidak hanya dimanfaatkan sebagai panas reaksi, tetapi juga sebagai panas sensible dan panas konveksi, seperti yang nampak pada bagan di Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Bagan Neraca Panas di Sekitar Kiln

\*) Mahasiswa Jurusan Teknik Kimia FT Undip

\*\*) Staf Pengajar Jurusan Teknik Kimia FT Undip

Produksi semen merupakan proses produksi yang membutuhkan energi tinggi. Konsumsi energi pada industri semen sekitar 5% dari konsumsi energi industri global. Industri semen merupakan sumber utama emisi gas CO<sub>2</sub>, hal ini dikarenakan bahan bakar yang digunakan mengandung karbon yang dominan, seperti batubara (Worrell, dkk., 2001).

Terbentuknya gas CO<sub>2</sub> ini akan menimbulkan dampak lingkungan, dimana kualitas udara di lingkungan sekitarnya akan menurun. Sumber pembentukan gas rumah kaca pada sistem kiln adalah pada pembakaran bahan bakar (batubara), pada pembentukan CaO dan MgO, serta pada debu yang terbentuk. Reaksi yang terjadi pada pembentukan gas rumah kaca adalah sebagai berikut :

1. Pembakaran bahan bakar  
 $C_nH_m + (n+m) (O_2 + 3,785 N_2)^* \rightarrow$   
 $n CO_2 + (\frac{m}{4}) H_2O + 3,785 (n + \frac{m}{4}) N_2 \dots\dots\dots (1)$   
 \*Komposisi udara : Nitrogen 79%, Oksigen 21%
2. Pembentukan CaO dan MgO  
 $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \dots\dots\dots (2)$   
 $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2 \dots\dots\dots (3)$   
 (Duda, 1985)

Efisiensi panas kiln merupakan indikator untuk menentukan baik atau tidaknya pengoperasian kiln. Dengan mengetahui efisiensi kiln maka dapat diambil suatu tindakan yang tepat supaya efisiensi yang ada tidak menurun dan panas yang disediakan untuk jumlah produk yang sama bisa lebih sedikit. Perhitungan emisi gas rumah kaca akan bermanfaat untuk mengetahui cara penanggulangan dan meminimalkan pembentukan gas tersebut.

### Metodologi

Data-data yang digunakan untuk mengevaluasi efisiensi panas dan emisi gas rumah kaca pada kiln diperoleh dari:

1. Data Lapangan  
 Data-data diperoleh dari *Central Control Room* (CCR) III, Laboratorium Pengendalian Proses dan Laboratorium Jaminan Mutu PT Semen Gresik (Persero), Tbk. dan data-data tersebut meliputi :  
 a. Analisa umpan kiln  
 b. Analisa batubara
2. Data dari Pustaka  
 Data-data berat molekul dan kapasitas panas diambil dari Perry dan Green (1999) serta Smith, dkk (2001).

Data-data yang diperoleh digunakan untuk menghitung neraca massa dan panas. Neraca massa berguna untuk menghitung aliran-aliran massa yang masuk dan keluar dari kiln, setelah mengetahui aliran-aliran tersebut maka neraca panas dapat disusun. Selanjutnya efisiensi panas dapat dihitung dengan rumus :

$$\text{Efisiensi panas} = \frac{\text{Panas reaksi}}{\text{Panas masuk}} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

Gas rumah kaca di sekitar kiln didominasi oleh gas CO<sub>2</sub>, dimana perhitungannya berdasarkan sumber pembentukan gas tersebut. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Pembakaran bahan bakar  
 $\text{Emisi}_{CO_2} = \sum \text{bahan bakar} \times \text{Faktor emisi} \dots\dots\dots (5)$   
 $\text{Faktor emisi} = \frac{44}{12} \cdot Cc \text{ bahan bakar} \cdot \infty \dots\dots\dots (6)$

Dimana :  
 Cc bahan bakar = kandungan karbon dalam bahan bakar (gr C/kg bahan bakar)  
 ∞ = fraksi karbon teroksidasi

2. Pembentukan CaO dan MgO (penyusun terak)  
 $\text{Emisi}_{CO_2} = FE_{\text{terak}} \times Q_{\text{terak}} \dots\dots\dots (7)$   
 $FE_{\text{terak}} = \frac{44}{56,1} \cdot CaO_{\text{terak}} + \frac{44}{40,3} \cdot MgO_{\text{terak}} \dots\dots\dots (8)$   
 Dimana :  
 $FE_{\text{terak}}$  = faktor emisi terak (ton CO<sub>2</sub>/ton terak)  
 $Q_{\text{terak}}$  = jumlah terak (ton)

3. Pembentukan *dust*  
 $\text{Emisi}_{CO_2} = FE_{\text{dust}} \times Q_{\text{dust}} \dots\dots\dots (9)$   
 $FE_{\text{dust}} = \frac{\frac{FE_{\text{terak}} \cdot d}{1 + FE_{\text{terak}}}}{1 - \frac{FE_{\text{terak}} \cdot d}{1 + FE_{\text{terak}}}} \dots\dots\dots (10)$

Dimana :  
 $FE_{\text{dust}}$  = faktor emisi *dust* (ton CO<sub>2</sub>/ton *dust*)  
 $Q_{\text{dust}}$  = jumlah *dust* (ton)  
 d = CO<sub>2</sub> yang lepas per total CaCO<sub>3</sub> dalam *raw mix*  
 (Canada Government, 2004)

### Hasil dan Pembahasan

1. Data Lapangan  
 Melalui observasi lapangan di PT Semen Gresik (Persero), Tbk. pada 15 Februari 2011 diperoleh data-data sebagai berikut:

- a. Data umpan kiln  
 Umpan kiln sebesar 553.333 kg/jam.  
*Dust yang terbentuk diasumsikan 10% dari umpan* = 55.333,3 kg  
 Raw mix yang dibakar = 553.333 – 55.333,3 kg = 497.997,7 kg

Tabel 1. Komposisi Umpan kiln

Komp	%b Umpan
SiO <sub>2</sub>	13,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,38
CaO	42,11
CaCO <sub>3</sub> *	75,2
MgO	1,67
MgCO <sub>3</sub> **	3,51
H <sub>2</sub> O	0,8
SO <sub>3</sub>	0,17
Impure	0,95

\* dalam umpan kiln CaO terikat sebagai CaCO<sub>3</sub>  
 \*\*dalam umpan kiln MgO terikat sebagai MgCO<sub>3</sub>

b. Analisa batubara

Batubara masuk = 51.833 kg/jam

Komposisi dari batubara yang digunakan tersebut tertera pada Tabel 2. Batubara ini mengandung ash sebanyak 3.809,73 kg. Ash tersebut memiliki komposisi seperti yang tertera pada Tabel 3.

Tabel 2. Komposisi Batubara

Komp	% Berat	Massa (kg)
H <sub>2</sub>	4,98	2.581,28
C	65,14	33.764,02
N <sub>2</sub>	1,3	673,83
O <sub>2</sub>	17,79	9.221,09
S	0,46	238,43
H <sub>2</sub> O	2,98	1.544,62
Ash	7,35	3.809,73

Tabel 3. Komposisi Ash Batubara

Komp	% Berat	Massa (kg)
SiO <sub>2</sub>	28,44	1.083,49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,59	708,23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,46	169,91
CaO	37,49	1.428,27
MgO	1,37	52,19
SO <sub>3</sub>	2,51	95,62
LOI	7,14	272,03

2. Efisiensi Panas *Rotary Kiln*

Neraca panas dapat ditentukan dengan menghitung neraca massa terlebih dahulu. Pada neraca panas tersebut, panas yang masuk ke dan keluar dari sistem *rotary kiln* adalah sebagai berikut:

- Panas sensibel umpan kiln merupakan panas yang dibawa umpan masuk ke *rotary kiln* dengan basis kering (tanpa air). Nilainya ditentukan oleh massa, komposisi dan suhu masuk umpan kiln tersebut.
- Panas sensibel air dalam umpan kiln merupakan panas yang dibawa air yang terkandung dalam umpan kiln. Nilainya ditentukan oleh kadar air dalam umpan kiln.
- Panas sensibel batubara merupakan panas yang dibawa batubara dengan basis kering (tanpa air). Nilainya ditentukan oleh massa dan suhu masuk batubara.
- Panas sensibel air dalam batubara merupakan panas yang dibawa air yang terkandung dalam batubara. Nilainya ditentukan oleh kadar air dalam batubara.
- Panas pembakaran batubara merupakan panas yang dihasilkan dari pembakaran batubara di *rotary kiln*. Nilainya ditentukan oleh massa dan nilai bakar batubara.
- Panas sensibel udara primer merupakan panas yang dibawa udara yang dimasukkan bersama bahan bakar. Nilainya ditentukan oleh massa dan suhu masuk udara primer.
- Panas sensibel udara sekunder merupakan panas yang dibawa oleh udara yang dimasukkan ke *rotary kiln*. Nilainya ditentukan oleh kebu-

tuhan udara sekunder dan suhu masuk udara tersebut.

- Panas sensibel gas buang merupakan panas yang terbawa keluar bersama gas buang dari *suspension preheater* dan *rotary kiln*. Nilainya ditentukan oleh massa, komposisi dan suhu gas buang tersebut.
- Panas sensibel klinker merupakan panas yang terbawa keluar bersama klinker yang dihasilkan pada *rotary kiln*. Nilainya ditentukan oleh massa dan suhu keluar klinker.
- Panas reaksi merupakan panas yang digunakan untuk reaksi pembentukan klinker. Panas ini terdiri dari :
  - panas penguapan air merupakan panas yang dibutuhkan untuk menguapkan air yang terkandung dalam umpan kiln dan batubara. Nilainya ditentukan oleh massa total air yang masuk ke sistem.
  - panas disosiasi MgCO<sub>3</sub> merupakan panas yang dibutuhkan untuk menguraikan MgCO<sub>3</sub> menjadi MgO dan CO<sub>2</sub>. Nilainya ditentukan oleh massa MgCO<sub>3</sub> dalam umpan kiln.
  - panas disosiasi CaCO<sub>3</sub> merupakan panas yang dibutuhkan untuk menguraikan CaCO<sub>3</sub> menjadi CaO dan CO<sub>2</sub>. Nilainya ditentukan oleh massa CaCO<sub>3</sub> dalam umpan kiln.
  - panas pembentukan klinker merupakan panas yang dibutuhkan untuk membentuk komponen-komponen penyusun klinker. Nilainya ditentukan oleh komposisi klinker yang terbentuk.
  - panas kristalisasi tanah liat merupakan panas yang dibutuhkan tanah liat agar SiO<sub>2</sub>.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2H<sub>2</sub>O dapat terkristalisasi. Nilainya ditentukan oleh kandungan SiO<sub>2</sub>.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2H<sub>2</sub>O dalam tanah liat.
- Panas hilang karena pendinginan merupakan panas yang terbawa keluar bersama gas panas yang tertarik pada unit pendinginan. Nilainya ditentukan oleh massa udara pendingin dan suhu keluar udara tersebut.
- Panas radiasi-konveksi yang hilang di kiln merupakan panas yang hilang karena terjadinya kedua peristiwa tersebut pada sistem. Nilainya ditentukan oleh luas dan suhu permukaan kiln, suhu lingkungan, serta massa klinker.
- Panas tak teranalisa merupakan panas yang keluar dari sistem ke lingkungan yang disebabkan oleh isolasi sistem yang tidak mampu menahan panas pada kiln tersebut.

Hasil dari perhitungan komponen-komponen panas masuk dan keluar tersebut tertera pada Tabel 3. berikut :

Tabel 3. Ringkasan Neraca Panas

Masuk		Keluar	
Sumber	Energi panas (kcal/kg)	Sumber	Energi panas (kcal/kg)
Sensibel umpan kiln (a)	15,688	Sensibel gas buang (h)	202,301
Sensibel air dalam umpan kiln (b)	0,493	Sensibel klinker (i)	240,03
Sensibel batubara (c)	1,7778	Panas reaksi (j)	525,084
Sensibel air dalam batubara (d)	0,191	Panas hilang karena pendinginan (k)	7,358
Pembakaran batubara (e)	842,859	Panas radiasi-konveksi yang hilang di kiln (l)	30,128
Sensibel udara primer (f)	1,108	Panas tak teranalisa	196,209
Sensibel udara sekunder (g)	338,993		
Jumlah	1201,1	Jumlah	1201,1

Panas yang dimanfaatkan unit kiln untuk proses pembakaran dan pembentukan klinker adalah 525,084

Tabel 4. Hasil Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca

Sumber Pembentukan	$\sum source$	Faktor Emisi	Emisi CO <sub>2</sub> (ton)
Pembakaran bahan bakar	51,833 ton batubara	2,3885 ton CO <sub>2</sub> /ton batubara	123,803
Pembentukan CaO dan MgO (penyusun terak)	323,618 ton terak	0,54 ton CO <sub>2</sub> /ton terak	174,76
Pembentukan Dust	55,3333 ton dust	0,3865 ton CO <sub>2</sub> /ton dust	21,3869
TOTAL EMISI CO <sub>2</sub>			319,9489

Melalui hasil tersebut, maka dapat dihitung emisi total gas rumah kaca di sekitar kiln adalah sebagai berikut:  
Emisi gas rumah kaca di sekitar kiln :

$$= \frac{\sum emisi CO_2}{massa batubara} = \frac{319,9489 ton CO_2}{51,833 ton batubara}$$

$$= 6,173 \text{ ton CO}_2 \text{ ekivalen/ton batubara}$$

Emisi gas rumah kaca yang dihasilkan sebesar 6,173 ton CO<sub>2</sub> ekivalen/ton batubara, angka ini cukup besar dan berdampak kurang baik terhadap kualitas udara di sekitarnya. Hendriks, dkk. (2012), mengemukakan beberapa metode untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, dalam hal ini gas CO<sub>2</sub>, adalah sebagai berikut :

a. Memperbaiki efisiensi energi pada proses

Dengan memperbaiki efisiensi proses, maka pemanfaatan energi menjadi lebih optimal dan emisi gas rumah kaca pun juga dapat berkurang. Efisiensi energi sistem kiln dapat ditingkatkan dengan mengganti *rotary kiln* dengan *stationary kiln*, sehingga *capital cost* akan turun, jenis bahan bakar

kcal/kg klinker dari panas masuk total sebesar 1201,1098 kcal/kg klinker. Dengan menggunakan persamaan (1) dapat dihitung nilai efisiensi pada *rotary kiln* sebesar 43,17%. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor antara lain:

- Feed yang masih mengandung senyawa alkali, sehingga menyebabkan ketidakstabilan *coating* dan jika tebal *coating* tidak rata akan mempengaruhi kinerja kiln karena panas yang hilang ke lingkungan akan bertambah.
- Kurang efektifnya kerja dari ID fan sehingga banyak udara panas tertarik keluar SP dan cooler sehingga pemanfaatan panas tidak maksimal.

Kebutuhan panas sebesar 1201,1098 kcal/kg terak dapat dikurangi bila panas yang masuk dapat dimanfaatkan secara maksimal yaitu dengan cara :

- Memperbaiki peralatan yang ada, antara lain dengan menutup kebocoran-kebocoran pada pipa ID fan dan SP
- Mengganti batu tahan api yang rusak
- Memantau kualitas bahan bakar

3. Emisi Gas Rumah Kaca pada *Rotary Kiln*

Berdasarkan perhitungan sesuai dengan persamaan (2), (3), (4), (5), (6) dan (7), maka diperoleh hasil perhitungan yang tersaji pada Tabel 4 berikut :

yang bisa digunakan lebih beragam dan penggunaan energi lebih rendah.

- Mengganti bahan bakar yang mengandung karbon tinggi menjadi yang kandungan karbonnya rendah. Penggunaan bahan bakar mencapai 90% dari kebutuhan energi industri semen, sisanya energi listrik. Pilihan utama untuk mengurangi emisi gas rumah kaca adalah menggunakan bahan bakar dengan kandungan karbon yang lebih rendah, misalnya dengan mengganti batubara menjadi gas alam. Namun, hal ini juga memiliki kelemahan, yaitu akan menurunkan kualitas semen dan meningkatkan emisi gas yang berbahaya. Beberapa alternatif bahan bakar yang dapat digunakan adalah : bahan bakar alternatif berupa gas (*coke oven gas, refinery gas, pyrolysis gas, landfill gas*); bahan bakar alternatif berupa cair (*halogen-free spend solvents, mineral oils, distillation residues, hydraulic oils, insulating oils*); serta bahan bakar alternatif berupa padat (*waste wood, dried sewage sludge, agricultural residues, petroleum coke, tar*).

- c. Mengaplikasikan perbandingan terak/semen lebih rendah (meningkatkan rasio aditif/semen) : *blending cement*  
 Dalam *blending cement*, sejumlah terak akan digantikan dengan hasil samping industri, seperti abu terbang batubara (residu pembakaran batubara), *blast furnace slag* (residu pembuatan besi) atau material pozzolan lainnya (seperti material vulkanik). Material-material ini dicampur dengan terak hingga homogen, sehingga terbentuklah *blending cement*. Dengan mengurangi jumlah terak, maka emisi yang dihasilkan dari pembuatan terak itu sendiri juga akan berkurang.
- d. Memisahkan CO<sub>2</sub> dari *flue gas*  
 Pada teknik ini, CO<sub>2</sub> dipisahkan selama atau setelah proses produksi. Banyaknya gas CO<sub>2</sub> dalam *flue gas*, pembakaran CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> di atmosfer menjadi metode yang menjanjikan untuk *recovery* CO<sub>2</sub>. Pemisahan secara absorpsi kimiawi kurang memadai karena membutuhkan panas proses yang besar. Dalam pembakaran CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> di atmosfer, gas nitrogen terlebih dahulu dipisahkan di *air separation plant*, sehingga tidak dihasilkan gas NO<sub>x</sub>.

### Simpulan

Kebutuhan panas pada *rotary kiln* adalah sebesar 1201,1098 kcal/kg. Dari panas tersebut, sebanyak 525,084 kcal/kg digunakan sebagai panas reaksi, sehingga efisiensi panas dari *rotary kiln* sebesar 43,17%. Panas yang besar ini akan menghasilkan emisi gas rumah kaca sebesar 6,173 ton CO<sub>2</sub> ekuivalen/ton batubara.

### Saran

Efisiensi panas dapat ditingkatkan dengan cara melakukan penggantian batu tahan api pada kiln secara berkala dan memberikan isolasi (peredam panas) pada bagian luar *rotary kiln*. Upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca diantaranya dengan mengganti sebagian batubara dengan gas alam sebagai bahan bakar, selain itu dapat diimbangi dengan melakukan penghijauan di sekitar pabrik.

### Daftar Pustaka

1. Canada Government. 2004. *Cement Production : Guidance Manual of Estimating Greenhouse Gas Emissions*. Kanada : Environment Canada's Green Lane.
2. Duda, H.W. 1985. *Cement Data Book*. Berlin : Bauverlag.
3. Hendriks, C.A., Worrell, E., de Jager, D., Blok, K., dan Riemer, P. 2012. *Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry*. Greenhouse Gas Control Technologies Conference Paper.
4. Locher, F.W. dan Kropp, J. 1986. Cement and Concrete. *In Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Volume A5: 489-533. Germany : VCH.

5. Peray, K.E. and Waddell, J.J. 1972. *The Rotary Kiln*. New York ; Chemical Publishing Co. Inc.
6. Perry, R.H. dan Green D.W. 1999. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7<sup>th</sup> ed. USA : McGraw-Hill.
7. Smith, J.M., Van Ness, H.C., Abbott, M.M. 2001. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*. 6<sup>th</sup> ed. USA : Mc-Graw-Hill.
8. Taylor, H.F.W. 1997. *Cement Chemistry*. London : Thomas Telford Services.
9. Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., Meida, L.O. 2001. *Carbon Dioxide Emissions from The Global Cement Industry*. Annu. Rev. Energy Environment. 26 : 303-329.