

ANALISIS PERPINDAHAN KALOR KONVEKSI PADA *ROTARY KILN* DI PT. SEMEN BATURAJA (PERSERO) Tbk

M. I. Ammarullah, A. T. Prakoso, D. Wicaksono, I. G. Fadhlurrahman, I. Yani,
Hasan Basri^{1*}

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Indralaya, 30662, Sumatera Selatan,
Indonesia

*Corresponding author: hasan_basri@unsri.ac.id

ABSTRAK:

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa seberapa besar laju perpindahan kalor secara konveksi pada rotary kiln khususnya pada daerah pembakaran dimana terjadinya titik kritis (red spot) dan menganalisa distribusi temperatur. Kontribusi penelitian yaitu untuk menjaga performansi rotary kiln akibat kerusakan dari beban termal agar tidak terjadinya panas berlebihan sehingga memperpanjang umur penggunaan rotary kiln. Hal ini dapat diperoleh dari perhitungan teoritis dan analisis simulasi dengan software SolidWorks. Data dari rotary kiln diolah dengan perhitungan distribusi temperatur, aliran kalor (heat flux) dengan cara simulasi. Data yang diperoleh dianalisa lebih lanjut agar meningkatkan efektifitas dan efisiensi penggunaan rotary kiln. Hasil perbandingan analisis distribusi temperatur pada perhitungan teoritis dan analisis program menunjukkan perbedaan yang tidak terlalu jauh pada meter ke 36, hasil perhitungan teoritis didapatkan T_s sebesar $1677,1^{\circ}\text{C}$ dan dari simulasi $1677,85^{\circ}\text{C}$. Perbandingan selisih perhitungan teoritis maupun simulasi menunjukkan hasil yang hampir sama berarti dapat dinyatakan bahwa metode yang digunakan adalah sudah sesuai. Nilai heat flux konveksi pada daerah pembakaran berbeda-beda, salah satunya dipengaruhi oleh ketebalan lapisan coating dan pada meter ke 36 di dapatkan nilai heat flux sebesar $117.864,2$ Watt.

Kata Kunci: *Rotary kiln, red spot, distribusi temperatur, perpindahan kalor konveksi, heat flux.*

PENDAHULUAN

Industri semen merupakan salah satu perusahaan besar yang berperan penting dalam proses pembangunan di berbagai bidang. PT. Semen Baturaja (Persero) Tbk merupakan salah satu perusahaan yang memproduksi semen. *Rotary kiln* merupakan sebuah alat pembakar produk *rawmill* menjadi klinker di pabrik semen, peranannya sangat besar sebagai komponen utama penghasil produk semen. Penggunaan energi pada unit ini meliputi energi untuk proses pembakaran (UNIDO, 1994).

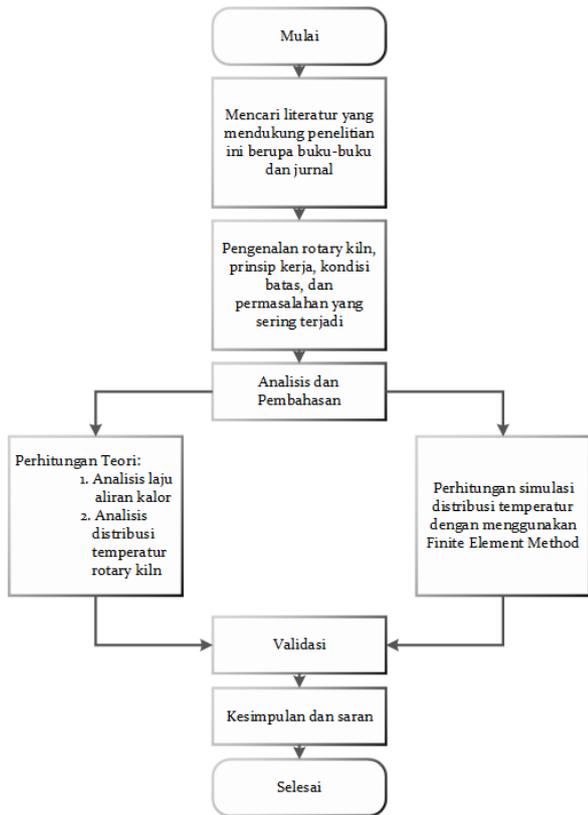
Pada pabrik semen, proses pembakaran pembentukan klinker merupakan tahapan proses yang sangat vital. Salah satu faktor dominan penyebab berhentinya pengoperasian *kiln* adalah kerusakan pada batu tahanan api yang melapisi dinding bagian dalam *rotary kiln*, ini

disebabkan oleh beberapa hal diantaranya, kerusakan karena beban termal. Dalam hal ini terjadi proses perpindahan kalor secara konveksi di dalam *rotary kiln* dari gas ke klinker. Oleh karena itu diperlukan analisis seberapa besar laju perpindahan kalor konveksi pada *rotary kiln*.

METODOLOGI PENELITIAN

Diagram Alir Penelitian

Proses penelitian dilakukan dengan tahapan seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pengambilan Data

Untuk menganalisis dengan akurat maka dibutuhkan data-data aktual yang diperoleh dari lokasi penelitian PT. Semen Baturaja, berikut ini akan dijelaskan mengenai data-data tersebut secara rinci.

Diskretisasi Geometrik dan Deskripsi Model

Shell kiln dan bagian-bagiannya telah dibuat menggunakan *software* SolidWorks 2014. Karakteristik geometri utama dari *shell rotary kiln* ditunjukkan pada Tabel 1 dan ketebalan dari *shell* di sepanjang bagian yang berbeda dari *rotary kiln* ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Karakteristik geometri utama dari *kiln*

| Spesifikasi | Ukuran | Satuan |
|----------------------------|--------|---------|
| Panjang <i>kiln</i> | 75 | meter |
| Diameter dalam <i>kiln</i> | 4.5 | meter |
| Jumlah <i>tyres</i> | 3 | buah |
| Kemiringan <i>kiln</i> | 3.5 | derajat |

Tabel 2 Variasi ketebalan *shell kiln*

| Bagian (mm) | Ketebalan (mm) |
|---------------|----------------|
| 0–10,300 | 25 |
| 10,300–11,900 | 40 |
| 11,900–14,100 | 60 |

| | |
|---------------|----|
| 14,100–19,700 | 40 |
| 19,700–41,100 | 28 |
| 41,100–42,900 | 40 |
| 42,900–45,100 | 60 |
| 45,100–46,900 | 40 |
| 46,900–65,300 | 28 |
| 65,300–66,900 | 40 |
| 66,900–69,500 | 70 |
| 69,500–72,500 | 90 |
| 72,500–75,000 | 60 |

Pada Tabel 3, titik nol diletakkan di ujung atas dari *rotary kiln*, disebut '*Inlet-1*'. Sedangkan ujung bawah disebut dengan '*III-Outlet*'.

Tabel 3 Jarak antara penopang

| Penopang | Jarak (mm) |
|--------------------|------------|
| <i>Inlet-I</i> | 13,000 |
| I-II | 31,000 |
| II-III | 27,000 |
| III- <i>Outlet</i> | 4,000 |

Rotary kiln mencakup dinding berbentuk silinder yang mempunyai ujung masukan dan ujung luaran. *Kiln* diletakkan miring agar ujung luaran berada di posisi yang lebih rendah dari pada ujung masukan agar dapat memproses material yang dimasukkan. Material mengalir dari ujung masukan menuju ke ujung luaran. Dinding *kiln* ditopang oleh *ring* atau *tyre* yang bersentuhan dengan *roller* baja, yang ditopang oleh *pier* beton dan rangka baja. Material yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Jenis-jenis material pada komponen kiln

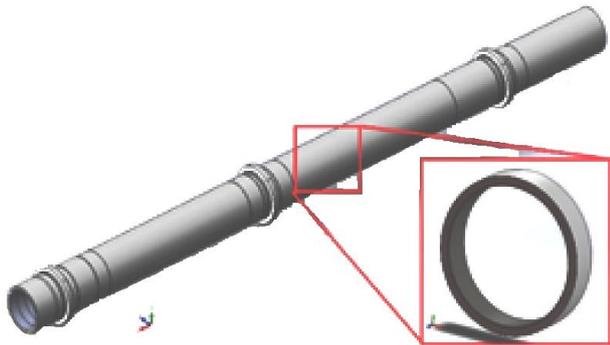
| Komponen | Spesifikasi Material |
|------------------------|--------------------------------------|
| <i>Shell</i> | ASTM 526 <i>Grade 70</i> atau SS 400 |
| <i>Tyres cast iron</i> | GS-25 Mo.25 |
| <i>Rollers cast</i> | GS-42 Cr Mo.5 |
| <i>Iron</i> | 30 Cr Ni Mo 8 |
| <i>Pinion</i> | (ISO R 638 = II-68 Type 3) |

Material tersebut digunakan untuk membuat komponen utama *kiln* yaitu dinding, *tyre*, *roller*, dan *pinion*. Material ini dimodelkan secara isotropik dan linear, tergantung pada temperatur elastis, menurut sifat elastisitas dari material yang digunakan, seperti tertera pada Tabel 5.

Tabel 5 Spesifikasi material ASTM 516 *Grade 70*

| Spesifikasi Material ASTM 516 <i>Grade 70</i> | Ukuran |
|--|------------------------|
| <i>Tensile strength</i> | 485 MPa |
| <i>Yield strength</i> | 260 MPa |
| <i>Density</i> | 7.85 g/cm ³ |
| <i>Poisson ratio</i> | 0.29 |
| <i>Modulus of elasticity</i> | 200 GPa |

Model geometri *rotary kiln* dirancang dengan menggunakan SolidWorks 2014, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



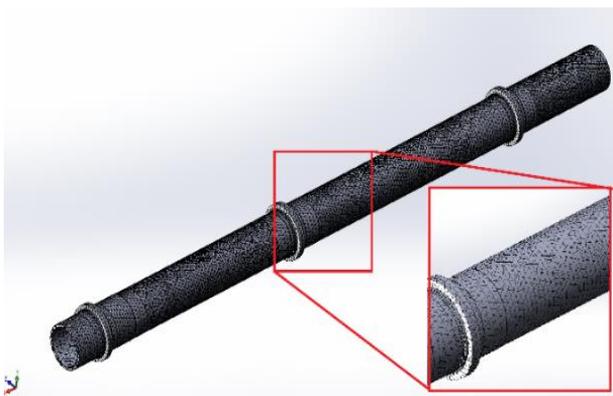
Gambar 2 Snapshot dari model tiga dimensi *shell kiln* menggunakan SolidWorks 2014

Analisa Elemen Hingga (Finite Element Analysis)

Analisis tiga dimensi *Finite Element Method* (FEM) dilakukan untuk mempelajari distribusi temperatur *rotary kiln*.

Kondisi Batas dan Evaluasi

Simulasi shell kiln dilakukan dengan menggunakan finite element analysis menggunakan perangkat lunak SolidWorks. Untuk menentukan analisis statik-struktural di shell kiln, kondisi batas dari finite element analysis digunakan pada simulasi ini untuk menganalisis distribusi temperatur pada dinding rotary kiln. Gambar 3 menunjukkan model untuk analisis FEM. Elemen yang digunakan adalah elemen tetrahedral tiga dimensi dengan jumlah elemen 115.592 yang digunakan untuk memodelkan solid isotropik. Seluruh model dianalisa karena tidak ada garis simetri pada masalah ini.



Gambar 3 Mesh dari kondisi batas yang diaplikasikan pada analisis numerikal

Data spesifik *kiln* di daerah *burning zone* pada meter ke-36, adalah sebagai berikut:

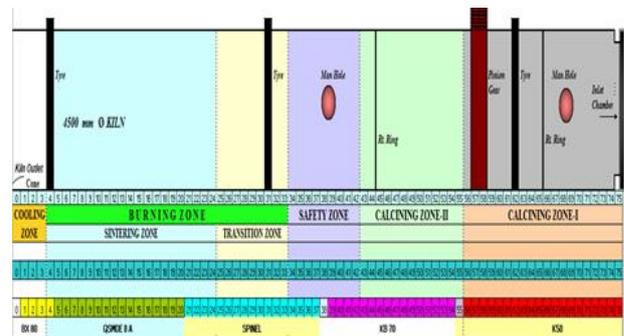
- Temperatur ambient = 30.00 °C
- Wind Velocity $V_{\infty,1}$ = 3.2 m/s $V_{\infty,4}$ = 2.1 m/s

| | | |
|-----------------------------------|------------------|-----------|
| <i>Kiln</i> Diameter (D) | = 4.556 m | |
| Jari-jari r4 | = D/2 | = 2.278 m |
| Jari-jari r3 | = 2.278 – 0.028 | = 2.250 m |
| Jari-jari r2 | = 2.250 – 0.20 | = 2.050 m |
| Jari-jari r1 | = 2.050 – 0.05 | = 2.000 m |
| <i>Kiln</i> Rotation (ω) | = 3.40 rpm (CCW) | |
| Panjang <i>Kiln</i> (L) | = 1.00 m | |
| Ketebalan <i>Shell Kiln</i> | = 28.00 mm | = 0.028 m |
| Ketebalan <i>Brick</i> | = 200.00 mm | = 0.20 m |
| Ketebalan <i>Coating</i> | = 50.00 mm | = 0.05 m |
| k <i>Coating</i> (Duda, 1985) | = 0.73 W/m°C | |
| k <i>Brick</i> (Magro 85) | = 2.70 W/m°C | |
| k <i>shell</i> (ASTM A516) | = 52.00 W/m°C | |
| Temperatur <i>shell kiln</i> Ts | = 390.7 °C | |

Batu Tahan Api (Refractories)

Pada Lapisan dalam kiln terdapat batu tahan api yang berfungsi sebagai proteksi *shell kiln* terhadap temperatur tinggi agar tidak kontak langsung dengan nyala api atau padatan yang sangat panas, yang sekaligus dapat memperpanjang umur teknis dari *shell kiln*. Temperatur gas dan material tertinggi terletak pada *transition zone* (meter 25-36) yaitu sebesar 2050°C dan 1340°C pada meter 31 terjadi penurunan suhu drastis disebabkan karena sensor inframerah *shell scanner* tertutup oleh cincin penopang (*retaining ring*), pada meter 18-22 dan meter 11 terjadi lagi penurunan drastis disebabkan oleh adanya tiang konstruksi baja yang menutupi sensor inframerah.

Pemilihan kualitas batu tahan api pada masing-masing zona *kiln* disesuaikan dengan beban panas dan mekanis pada zona tersebut.



Gambar 4 Brick Chart PT. Semen Baturaja

Pengukuran Temperatur *Shell Kiln*

Pengukuran temperatur dilakukan dengan alat ukur temperatur manual (*infrared thermometer*) yakni dengan cara mengarahkan alat tersebut ke objek yang akan diukur temperaturnya sambil menekan tombol pada *infrared thermometer* maka suhu akan langsung diperoleh secara digital. Termometer non-kontak atau termometer inframerah dapat mengukur suhu tanpa kontak fisik antara termometer dan obyek dimana suhu diukur. Termometer ditujukan pada permukaan obyek dan secara langsung memberikan pembacaan suhu. Alat ini sangat berguna

untuk pengukuran di tungku atau suhu permukaan dan lain sebagainya.

Central Control Room (CCR) adalah ruangan yang berisikan banyak Personal Computer (PC) yang dikendalikan oleh user. Ruangan ini berguna untuk tempat melakukan pemantauan terhadap temperatur dinding kiln. Untuk dapat melakukan pemindaian temperatur shell kiln PT. Semen Baturaja menggunakan Centurion Scanner Telescope. Alat ini terletak 30 meter dari dinding luar kiln, yang dioperasikan menggunakan perangkat lunak komputer Wincem Graphic 3D. Gejala kerusakan pada shell kiln bisa dilihat dari indikasi temperatur yang terlalu tinggi. Pada monitor komputer di ruang CCR akan terdeteksi dengan munculnya red spot pada beberapa atau salah satu titik di permukaan shell kiln. Data temperatur shell kiln dari scanner ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6 Data temperatur shell kiln pada burning zone

| Meter ke- | Tshell |
|-----------|--------|
| 4 | 130 |
| 5 | 180 |
| 6 | 240 |
| 7 | 230 |
| 8 | 220 |
| 9 | 240 |
| 10 | 300 |
| 11 | 150 |
| 12 | 300 |
| 13 | 280 |
| 14 | 260 |
| 15 | 250 |
| 16 | 250 |
| 17 | 250 |
| 18 | 240 |
| 19 | 190 |
| 20 | 180 |
| 21 | 190 |
| 22 | 180 |
| 23 | 250 |
| 24 | 330 |
| 25 | 330 |
| 26 | 340 |
| 27 | 340 |
| 28 | 340 |
| 29 | 340 |
| 30 | 340 |
| 31 | 170 |
| 32 | 350 |
| 33 | 240 |
| 34 | 300 |
| 35 | 360 |
| 36 | 390,7 |

Nilai koefisien perpindahan kalor konveksi untuk udara didapatkan dengan persamaan berikut (Khabari, A., et al, 2014):

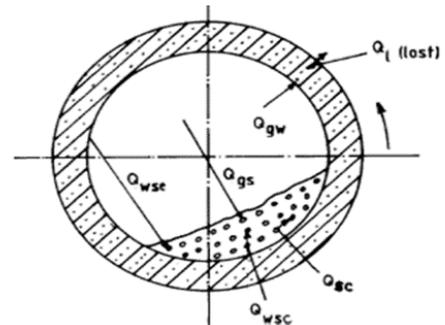
$$h_c = 10.45 - v + 10v^{1/2} \quad (1)$$

Maka,

$$h_1 = 10.45 - 3.2 + 10 \times 3.2^{1/2} = 25.14 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_2 = 10.45 - 2.1 + 10 \times 2.1^{1/2} = 22.84 \text{ W/m}^2\text{K}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 5 Profil aliran panas didalam kiln (Patil, R.K. et al, 2012).

Karena yang diketahui hanya profil temperatur shell (T_4/T_{sh}) maka untuk menganalisis distribusi temperatur perlu dihitung terlebih dahulu heat flux yang terjadi dari luar ke dalam dinding rotary kiln. Perhitungan teoritis heat flux didapatkan melalui rumus berikut:

$$Q_{Total} = Q_{Wall-Coating} = Q_{Coating-Brick} = Q_{Brick-Shell} = Q_{Shell-Udara} \quad (2)$$

Laju heat flux dari shell ke udara

$$Q_{Shell-Udara} = 2\pi L r_4 h_2 (T_{s,4} - T_{\infty,4}) \quad (3)$$

Laju heat flux dari brick ke shell

$$Q_{Shell-Udara} = \frac{2\pi L k_c (T_3 - T_{s,4})}{\ln(r_4/r_3)} \quad (4)$$

Laju heat flux dari coating ke brick

$$Q_{Shell-Udara} = \frac{2\pi L k_b (T_2 - T_3)}{\ln(r_3/r_2)} \quad (5)$$

Laju heat flux dari wall ke coating

$$Q_{Shell-Udara} = \frac{2\pi L k_a (T_{s,1} - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (6)$$

Data hasil perhitungan distribusi temperatur dan heat flux pada daerah pembakaran ditunjukkan masing-masing pada Tabel 7 dan Tabel 8.

Tabel 7 Data hasil perhitungan distribusi temperatur pada daerah *burning zone*

| Meter ke- | T _{s,1} (°C) | T ₂ (°C) | T ₃ (°C) | T _{s,4} (°C) |
|-----------|-----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 4 | 492.52 | 311.73 | 134.03 | 130 |
| 5 | 723.79 | 452.60 | 186.05 | 180 |
| 6 | 992.96 | 616.54 | 246.56 | 240 |
| 7 | 947.10 | 588.60 | 236.24 | 230 |
| 8 | 901.25 | 560.67 | 225.93 | 220 |
| 9 | 980.47 | 608.92 | 243.72 | 240 |
| 10 | 1245.62 | 770.42 | 303.34 | 300 |
| 11 | 570.28 | 151.49 | 151.49 | 150 |
| 12 | 1245.62 | 770.42 | 303.34 | 300 |
| 13 | 1155.58 | 715.57 | 283.09 | 280 |
| 14 | 1065.53 | 660.73 | 262.85 | 260 |
| 15 | 1020.51 | 633.30 | 252.72 | 250 |
| 16 | 1020.51 | 633.30 | 252.72 | 250 |
| 17 | 1020.51 | 633.30 | 252.72 | 250 |
| 18 | 975.49 | 605.88 | 242.60 | 240 |
| 19 | 750.37 | 468.77 | 191.98 | 190 |
| 20 | 705.35 | 441.34 | 181.86 | 180 |
| 21 | 760.62 | 479.02 | 191.98 | 190 |
| 22 | 714.96 | 450.95 | 181.86 | 180 |
| 23 | 1034.60 | 647.40 | 252.72 | 250 |
| 24 | 1399.92 | 871.91 | 333.71 | 330 |
| 25 | 1399.92 | 871.91 | 333.71 | 330 |
| 26 | 1445.58 | 899.97 | 343.84 | 340 |
| 27 | 1445.58 | 899.97 | 343.84 | 340 |
| 28 | 1445.58 | 899.97 | 343.84 | 340 |
| 29 | 1453.04 | 904.56 | 345.49 | 340 |
| 30 | 1453.04 | 904.56 | 345.49 | 340 |
| 31 | 678.29 | 428.42 | 173.74 | 170 |
| 32 | 1511.80 | 940.68 | 358.55 | 350 |
| 33 | 994.00 | 622.44 | 243.72 | 240 |
| 34 | 1269.42 | 791.71 | 304.79 | 300 |
| 35 | 1536.91 | 956.10 | 364.08 | 360 |
| 36 | 1677.09 | 1042.25 | 395.15 | 390,7 |

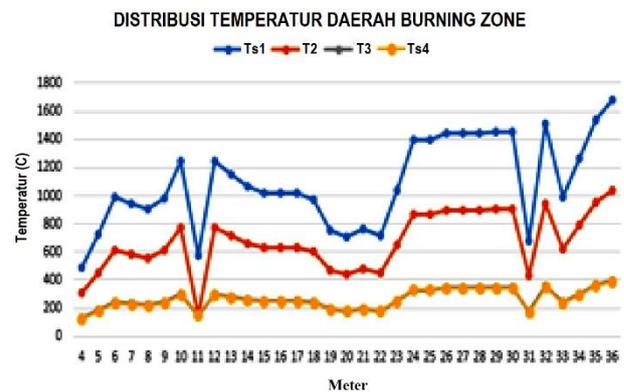
Tabel 8 Data hasil perhitungan *heat flux* pada daerah *burning zone*

| Meter ke- | Q _{Total} (W/m ²) |
|-----------|--|
| 4 | 33565.85996 |
| 5 | 50348.78993 |
| 6 | 69885.84175 |
| 7 | 66557.94453 |
| 8 | 63230.0473 |
| 9 | 68982.14553 |
| 10 | 88226.5719 |
| 11 | 39211.80973 |
| 12 | 88226.5719 |
| 13 | 81691.27028 |
| 14 | 75155.96866 |
| 15 | 71888.31784 |
| 16 | 71888.31784 |
| 17 | 71888.31784 |

| | |
|----|-------------|
| 18 | 68620.66703 |
| 19 | 52282.41298 |
| 20 | 49014.76217 |
| 21 | 52282.41298 |
| 22 | 49014.76217 |
| 23 | 71888.31784 |
| 24 | 98029.52433 |
| 25 | 98029.52433 |
| 26 | 101297.1751 |
| 27 | 101297.1751 |
| 28 | 101297.1751 |
| 29 | 101830.7863 |
| 30 | 101830.7863 |
| 31 | 46389.73979 |
| 32 | 106033.6909 |
| 33 | 68982.14553 |
| 34 | 88691.32996 |
| 35 | 107832.4768 |
| 36 | 117864.1648 |

Pembahasan Distribusi Temperatur

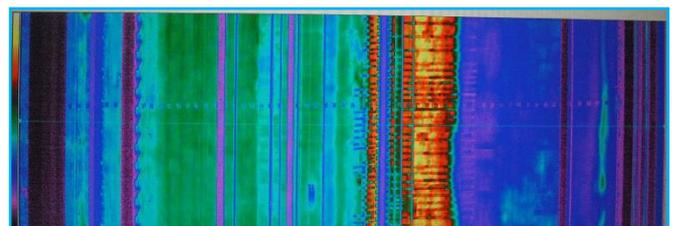
Untuk mempermudah dalam memahami data dan melakukan pembahasan, maka data yang disajikan dalam Tabel 7 yang berisi data hasil perhitungan distribusi temperatur akan disajikan ke dalam bentuk grafik seperti ditunjukkan pada Gambar 6 yang selanjutnya akan dideskripsikan dan dilakukan pembahasan.



Gambar 6 Grafik distribusi temperatur terhadap panjang *rotary kiln*

Distribusi Temperatur pada Shell Kiln

Data temperatur shell kiln dari scanner ditunjukkan pada Gambar 7. Rentang temperatur bagian dalam dari rotary kiln adalah sebesar 1000-1600°C.



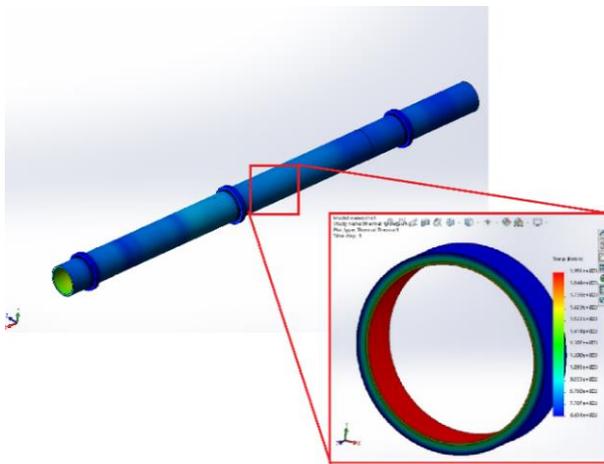
Gambar 7 Data temperatur mentah dari *scanner*

Pembahasan Aliran Kalor (*heat flux*)

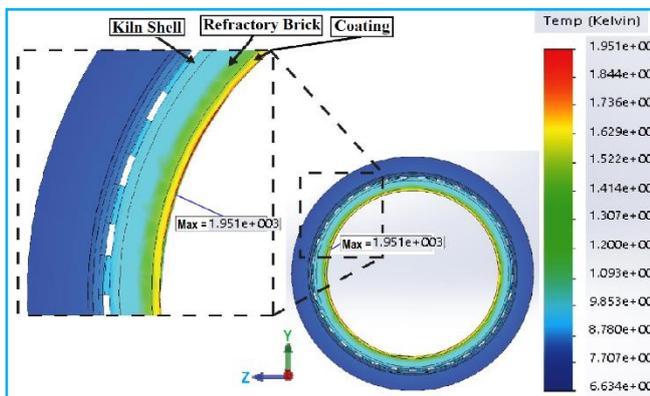
Nilai *heat flux* pada setiap meter daerah *burning zone* berbeda hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu ketebalan *shell kiln*, jenis batu tahan api, ketebalan lapisan (*coating*), dan yang utama adalah distribusi temperatur dari dalam yang berbeda beda disebabkan oleh bentuk nyala api, dengan menjumlahkan keseluruhan nilai *heat flux* (q) di setiap meter pada daerah pembakaran (meter 4-33) maka didapat panas total yaitu sebesar 2.523.256,805 Watt.

Terbukti bahwa besarnya aliran kalor pada meter 36 dari dalam dinding sampai keluar (arah radial) adalah sama sesuai pada persamaan (2).

Simulasi distribusi temperatur yang terindikasi *redspot* (meter ke 36) menggunakan *software* SolidWorks.



Gambar 8 Hasil analisa distribusi temperatur pada rotary kiln meter ke-36 dengan menggunakan FEM



Gambar 9 Cross section dari distribusi temperatur rotary kiln

Tabel 9 Analisis Perbandingan Perhitungan Distribusi Temperatur

| Temperatur | Teori (°C) | Simulasi (°C) | Perbedaan (%) |
|------------------|------------|---------------|---------------|
| T _{s,4} | 390.7 | 390.25 | 0.115% |
| T ₃ | 395.15 | 395.17 | 0.025% |
| T ₂ | 1042.25 | 1042.83 | 0.055% |
| T _{s,1} | 1677.09 | 1677.85 | 0.045% |

KESIMPULAN

Pada daerah pembakaran didapat aliran panas konveksi pada meter ke 36 yaitu sebesar 117864.1648 Watt. Hasil teoritis pada meter 36 didapatkan T_{gas} sebesar 2050.39°C. Titik kritis *red spot* pada meter 36 menggunakan simulasi program hasil perhitungan yang didapat sebesar 1677.09°C. Perbandingan analisis distribusi temperatur pada perhitungan teori dan simulasi program mengalami perbedaan yang tidak terlalu jauh, pada Ts1 perbedaannya hanya sebesar 0.0045%. Penelitian lebih lanjut sangat diperlukan dalam mempertimbangkan beban mekanis pada meter 34 yang lebih besar karena dekat dengan *retaining ring*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Khabari, M. Zenouzi, T. O'Connor and A. Rodas, 2014, "Natural and Forced Convective Heat Transfer Analysis of Nanostructured Surface". London
- [2] Data PT. Semen Baturaja (Persero), Departemen Penelitian dan Pengembangan, 26 Desember 2014.
- [3] R.K Patil, Dr.M.P.Khond, Dr.L.G.Nawale, 2012, "Heat Transfer Modelling of Rotary Kiln for Cement Plants". International Journal for Advancements in Technical Research & Development, India.11
- [5] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), 1994, "Output of a Seminar on Energy Conservation in Cement Industry". Japan.