

Studi Numerik Pengaruh Laju Umpan Kiln terhadap Rugi Tekanan dan Efisiensi Pemisahan Top Siklon Suatu Pabrik Semen

Daniel Ikun Paa^{1,a*}, Prihadi Setyo Darmanto^{2,b}

¹Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Kupang, Jl. Adi Sucipto Penfui P.O. Box 139 Kupang, Indonesia

²Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung Jl. Ganesha 10 Bandung, Indonesia

Email: [a dnlpaa@gmail.com](mailto:dnlpaa@gmail.com), [b prihadi2001@yahoo.com](mailto:prihadi2001@yahoo.com)

Abstrak

Dalam penelitian ini, metodologi pendekatan dengan simulasi numerik diaplikasikan untuk mempelajari karakteristik pola aliran gas yang membawa partikel umpan kiln (aerosol) dengan berbagai laju yang divariasikan dari 50~90 ton per jam (TPH) ke dalam siklon paling atas (*top* siklon) dari sistem *suspension preheater* (SP) suatu pabrik semen. Karakteristik pola aliran aerosol tersebut dipelajari untuk menunjukkan dua parameter kinerja utama yaitu rugi tekanan dan efisiensi pemisahan yang digunakan dalam analisis kinerja *top* siklon. Hasilnya menunjukkan bahwa laju umpan kiln yang divariasikan cukup mempengaruhi peningkatan rugi tekanan aliran aerosol dan efisiensi pemisahan *top* siklon. Setiap kenaikan laju umpan kiln menyebabkan perubahan kecepatan *inlet* rata-rata sekitar 1,02 m/s. Perubahan kecepatan inilah yang menyebabkan perubahan nilai efisiensi pemisahan dan rugi tekanan. Dimana perubahan nilai efisiensi pemisahan terlihat cukup signifikan mulai variasi laju dari 60~80 TPH, sedangkan variasi laju yang lebih besar dari 80 TPH terlihat praktis tidak besar. Bila diinginkan kerugian aliran aerosol yang tidak terlalu besar mengingat kemampuan kerja ID *fan* yang tersedia, sebaiknya *top* siklon ini dioperasikan pada laju umpan kiln maksimum 75 TPH dengan rugi tekanan 41,13 mmH₂O, efisiensi pemisahan 94,93%.

Kata kunci : *top* siklon, kecepatan *inlet*, rugi tekanan, efisiensi pemisahan.

Pendahuluan

Mahalnya nilai investasi suatu pabrik semen [1] serta meningkatnya biaya energi dari bahan bakar minyak, batu bara dan listrik yang sejalan dengan meningkatnya kebutuhan semen dalam negeri setiap tahunnya [2], membuat sebagian pengusaha semen di Indonesia yang tidak mengoperasikan sistem produksinya sebanding dengan kapasitas desain sejak awal mulai berupaya untuk meningkatkannya dengan berbagai cara. Artinya dengan kapasitas sistem produksi yang ada saat ini masih memiliki peluang untuk meningkatkan kapasitasnya mencapai kondisi desain. Karena secara teknik untuk mendukung proses produksi dengan kapasitas sistem desain, maka sudah tentu peralatan utama harus diinstalasi dengan kapasitas lebih untuk menjamin keamanan operasi, termasuk untuk mengatasi rugi-rugi operasi pada peralatan produksi lainnya. Salah satu bagian sistem yang dapat dijadikan sebagai obyek untuk memprediksi peningkatan ini adalah *top* siklon dari sistem SP, yaitu tempat dimana bahan baku semen (umpan kiln) dengan laju tertentu diumpankan untuk menjalani proses pemanasan awal dan sekaligus pemisahan dari gas yang membawanya.

Karakteristik kinerja utama dari sebuah siklon ditentukan oleh parameter efisiensi pemisahan dan rugi tekanan alirannya. Untuk mengevaluasi kinerjanya, berbagai penelitian telah dilakukan, yang pada umumnya menggunakan metodologi pendekatan dengan model matematika dan simulasi numerik, mengingat kompleksitas aliran aerosol di dalam sebuah siklon, pengukuran data operasi yang cukup sulit dilakukan di lapangan karena konstruksi yang kompleks, temperatur operasi yang tinggi serta instalasinya secara seri dengan siklon-siklon dibawahnya.

Studi yang telah dilakukan Chen dan Shi [3], menunjukkan bahwa parameter utama yang sangat penting untuk mengevaluasi kinerja suatu siklon separator jenis aliran balik yaitu efisiensi pemisahan dan rugi tekanan aliran. Selain itu Chen dan Shi [4], menyimpulkan bahwa dua faktor utama yang berpengaruh dalam evaluasi kinerja siklon separator jenis aliran balik yaitu rugi tekanan pada sisi masuk siklon sebagai representasi dari rugi tekanan lokal dan rugi tekanan akibat gesekan yang terdiri dari gesekan antara aliran berputar dengan dinding siklon, pada sisi masuk silinder keluar (*vortex finder*) dan pada

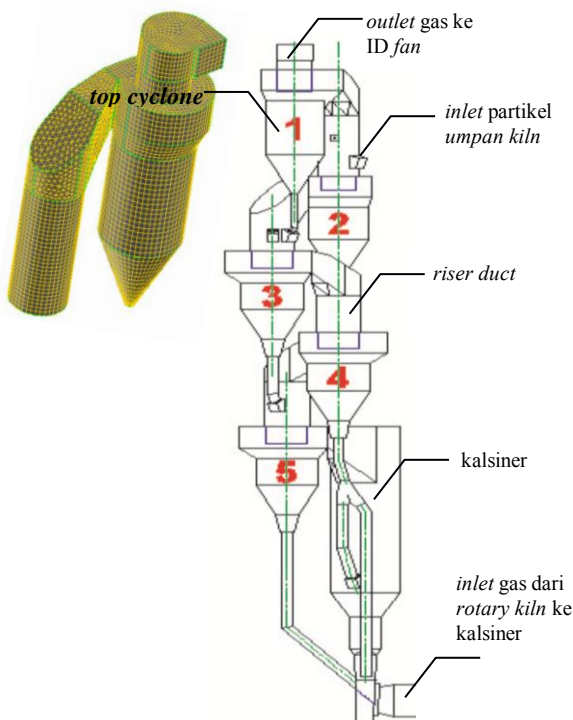
sisi keluar gas. Rugi tekanan karena aliran berputar tidak saja tergantung pada gesekan dengan dinding siklon tetapi juga dengan kecepatan tangensial gas. Selain itu studi yang dilakukan Marek dan Duda [6], mengasumsikan bahwa metode yang efektif untuk mempelajari karakteristik siklon dapat menggunakan program *computational fluid dynamics* (CFD).

Tujuan utama dari penelitian ini adalah menggunakan perangkat lunak Fluent 6.1 untuk mengetahui pengaruh variasi laju umpan kiln terhadap parameter kinerja utama yaitu efisiensi pemisahan dan rugi tekanan aliran pada *top* siklon yang masing-masing digunakan untuk untuk memprediksi peningkatan kapasitas produksi klinker dan konsumsi energi ID fan.

Metodologi

1. Pemodelan Geometri dan Diskritisasi

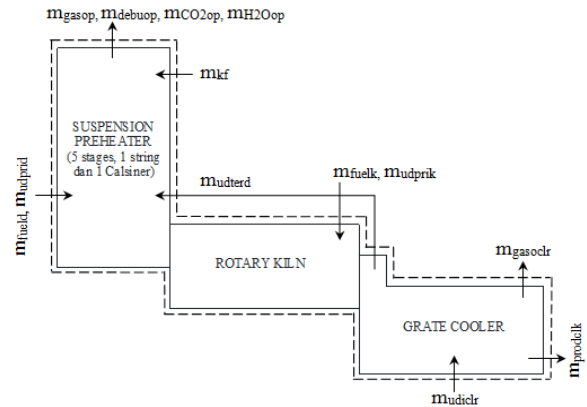
Obyek dalam penelitian adalah *top* siklon yang terinstalasi pada suatu sistem konfigurasi SP dengan 5 *stages*, 1 string siklon-siklon dan 1 kalsiner yang ditunjukkan pada gambar 1. Pemodelan geometrinya tanpa modifikasi, dengan menggunakan perangkat lunak Gambit 2.2.3. Sebagai domain komputasi yang kompleks, maka model elemen volume diskritisasi yang dibangun pada *top* siklon terdiri dari elemen terstruktur berbentuk balok (*hexahedral*), tetrahedral, piramida dan baji (*wedge*) dengan total 40701 elemen volume.



Gambar 1. Konfigurasi sistem SP dan *top* siklon obyek penelitian

2. Neraca Massa Sistem Kiln

Perhitungan neraca massa pada sistem kiln sebagaimana diberikan pada gambar 2 bertujuan untuk menentukan data *input* kondisi batas pada domain komputasi.



Gambar 2. Skematik aliran massa sistem kiln

Perhitungan dilakukan untuk beberapa laju umpan kiln (V_{kf}) yang divariasikan dengan nilai yang lebih kecil dan lebih besar dari nilai laju massa umpan kiln 60 TPH ke *top* siklon pada kondisi operasi. Data yang diperoleh dari hasil perhitungan terdiri dari laju massa umpan kiln (\dot{m}_{kf}), laju massa padatan tidak tersaring (\dot{m}_{xa}) dan laju massa gas pembakaran dari siklon *stage* 2 (\dot{m}_{gi}) yang ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter kondisi batas untuk simulasi aliran aerosol

V_{kf} [TPH]	\dot{m}_{kf} [kg/s]	\dot{m}_{xa} [kg/s]	\dot{m}_{gi} [kg/s]
50	13,88	1,38	11,34
55	15,27	1,52	12,48
60	16,67	1,67	13,62
65	18,05	1,80	14,75
70	19,44	1,94	15,88
75	20,83	2,08	17,02
80	22,22	2,22	18,15
85	23,61	2,36	19,30
90	25,0	2,50	20,42

Berdasarkan parameter kondisi batas pada tabel 1, maka perkiraan efisiensi pemisahan *top* siklon dan rugi tekanannya pada kondisi operasi laju umpan kiln 60 TPH dan variasi laju lainnya dapat disimulasikan. Nilai efisiensi pemisahan siklon (η_{ts}) dievaluasi dengan persamaan [7] :

$$\eta_{ts} = \frac{\dot{m}_t}{\dot{m}_{kf} + \dot{m}_{xa}} \times 100\%$$

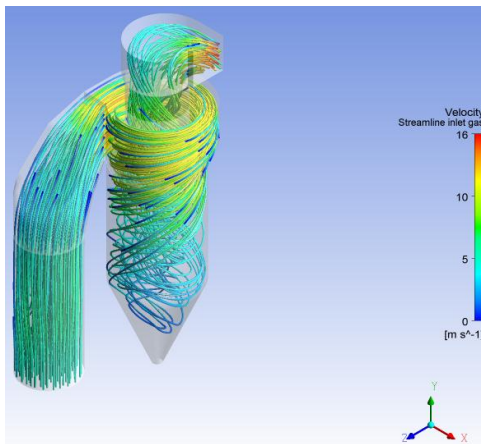
Dimana nilai laju massa material tersaring diketahui melalui nilai rata-rata *display particle tracks* di Fluent.

Hasil dan Analisis

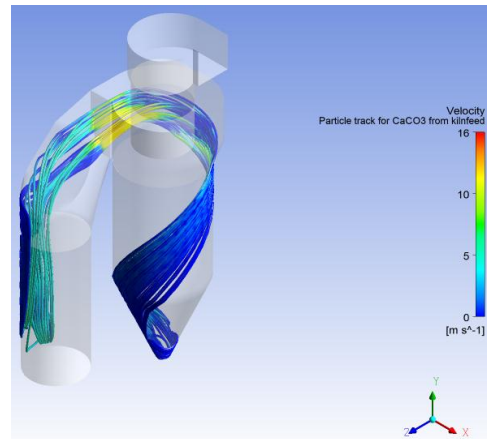
1. Hasil simulasi aliran aerosol di dalam top siklon

Perhitungan dalam simulasi numerik aliran aerosol pada *top* siklon hanya melibatkan persamaan kontinuitas dan momentum. Simulasi pertama, menggunakan data kondisi operasi yang ada yaitu 60 TPH. Simulasi dilakukan dengan acuan parameter operasi dengan efisiensi 93% dan rugi tekanan aliran *top* siklon sekitar 200 Pa~300 Pa, untuk memberikan validasi nilai mendekati kondisi tersebut, sehingga dapat digunakan sebagai acuan untuk melakukan simulasi delapan kondisi dengan beban laju umpan kiln lainnya.

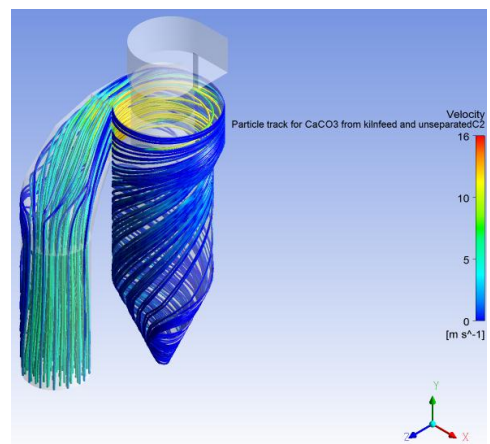
Hasil simulasi aliran aerosol diberikan masing-masing pada gambar 3, 4 dan gambar 5, yang menunjukkan distribusi kecepatan : *streamline* gas, partikel *track* umpan kiln, partikel umpan kiln dan padatan tidak tersaring dari siklon *stage 2*.



Gambar 3. Distribusi kecepatan *streamline* gas ($V_{kf} = 60$ TPH)

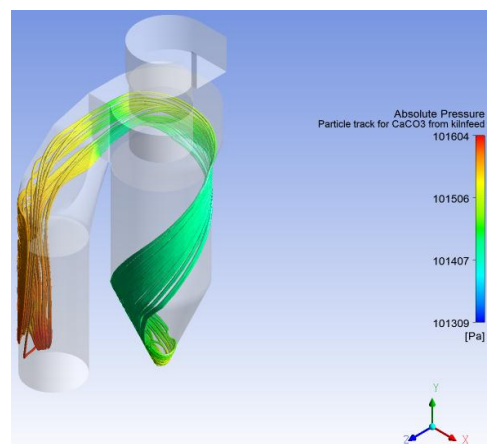


Gambar 4. Distribusi kecepatan partikel *track* umpan kiln ($V_{kf} = 60$ TPH)

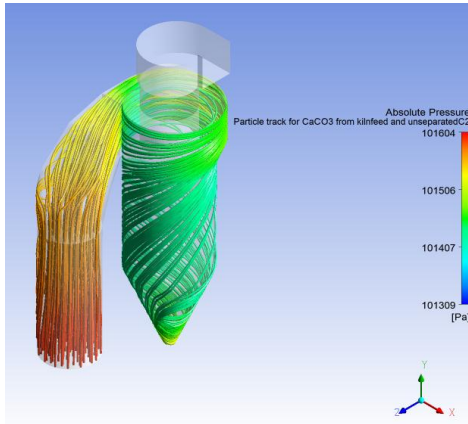


Gambar 5. Distribusi kecepatan partikel umpan kiln dan padatan tidak tersaring dari siklon *stage 2* ($V_{kf} = 60$ TPH)

Pada gambar 6 dan gambar 7 masing-masing menunjukkan distribusi tekanan partikel umpan kiln, partikel umpan kiln dan padatan tidak tersaring dari siklon *stage 2*.



Gambar 6. Distribusi tekanan partikel umpan kiln ($V_{kf} = 60$ TPH)



Gambar 7. Distribusi tekanan partikel umpan kiln dan padatan tidak tersaring dari siklon *stage 2* ($V_{kf} = 60$ TPH)

2. Analisis

Dari hasil simulasi yang ditunjukkan pada *legend* gambar 3, 4 dan 5 memperlihatkan kecepatan rata-rata aliran aerosol pada zona masuk siklon sekitar 11,92 m/s. Selain itu terlihat bahwa aliran aerosol setelah masuk ke dalam silinder utama *top* siklon mulai bergerak di dalam aliran gas yang membawanya membentuk heliks kebawah menyusuri dinding siklon dalam arah aksial negatif [-y] dengan kecepatan rata-rata 0 m/s (warna biru). Kondisi ini menunjukkan bahwa kecepatan tangensial partikel mengalami gaya sentrifugal mulai menurun pada permukaan dinding. Selanjutnya terlihat bahwa lebih banyak partikel yang memiliki inersia besar bergerak dalam arah aksial negatif dan tidak mengikuti pola aliran vorteks, bergerak sampai ke bagian bawah siklon dan akhirnya akan tersaring. Pada gambar tersebut terlihat bahwa pola aliran vorteks dalam mulai terbentuk oleh aliran gas yang akan membawa partikel yang memiliki inersia kecil bergerak dalam arah aksial positif mengikuti kecepatan aliran gas melalui zona *vortex finder* keluar *top* siklon sebagai akibat dari adanya tarikan yang ditimbulkan oleh kerja ID *fan*.

Pada *legend* gambar 6 dan gambar 7, menunjukkan distribusi tekanan absolut partikel laju umpan kiln dan padatan tidak tersaring dari siklon *stage 2* masuk melalui gas *duct* menuju ke dalam *top* siklon. Dari hasil simulasi yang ditunjukkan tersebut diketahui nilai tekanan absolut pada zona gas masuk sekitar 101571 Pa. Selain itu nilai tekanan pengukuran aerosol pada zona gas masuk dan zona gas keluar yang masing-masing sekitar 264,10 Pa dan 0,02 Pa. Perbedaan tekanan statik pada zona gas masuk dan zona gas keluar

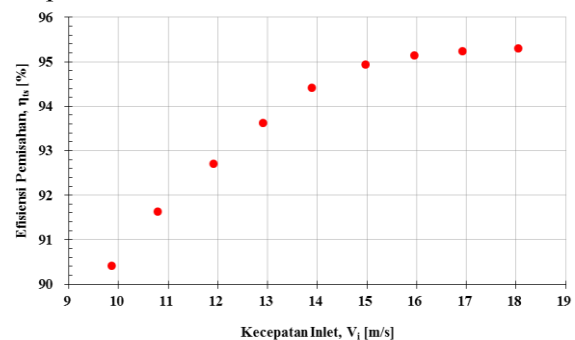
menunjukkan rugi tekanan total yang terjadi pada *top* siklon.

Dari hasil dan analisis simulasi secara keseluruhan untuk sembilan variasi laju umpan kiln, maka kecenderungan perubahan kecepatan *inlet* (V_i), laju massa material tersaring (\dot{m}_t) serta parameter kinerja efisiensi pemisahan (η_{ts}) dan rugi tekanan total (ΔP_{ts}) untuk masing-masing kondisi diberikan pada tabel 2.

Tabel 2. Data hasil simulasi

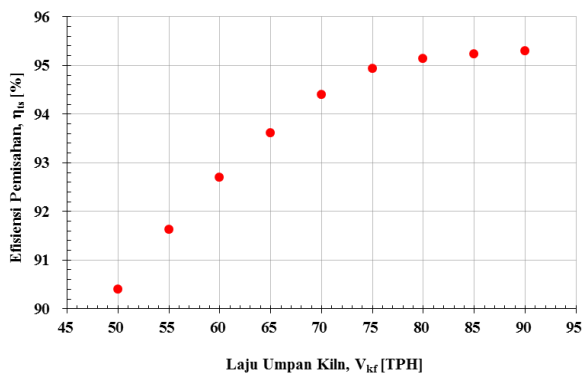
V_i [m/s]	\dot{m}_t [kg/s]	η_{ts} [%]	ΔP_{ts} [mmH ₂ O]
9,87	13,80	90,40	20,75
10,80	15,38	91,63	23,54
11,92	17,0	92,69	26,94
12,92	18,56	93,62	30,82
13,90	20,18	94,40	35,15
14,98	21,75	94,93	41,13
15,96	23,25	95,14	48,13
16,93	24,73	95,23	55,81
18,05	26,21	95,30	65,30

Berdasarkan data hasil simulasi yang ditunjukkan pada gambar 8 dan gambar 9 terlihat bahwa kecepatan *inlet* aerosol meningkat dengan bertambahnya laju umpan *kiln*. Setiap kenaikan laju umpan *kiln* 5 TPH (dari 50~90 TPH) menyebabkan perubahan kecepatan *inlet* rata-rata sekitar 1,02 m/s. Perubahan kecepatan *inlet* inilah yang menyebabkan perubahan nilai efisiensi pemisahan dan terjadinya kerugian tekanan aliran aerosol. Perubahan nilai efisiensi pemisahan terlihat cukup signifikan mulai dari 60 TPH hingga 80 TPH dengan prosentase perubahan nilainya sekitar 0,2% hingga 1% sedangkan perubahan nilai efisiensi pemisahan mulai dari 80 TPH hingga 90 TPH terlihat praktis tidak besar dengan prosentase nilai perubahannya sekitar 0,07% hingga 0,09%. Selanjutnya perubahan kerugian tekanan aliran aerosol terlihat tetap besar setiap ada kenaikan laju umpan kiln.



Gambar 8. Hubungan antara efisiensi pemisahan *top* siklon dan kecepatan *inlet*

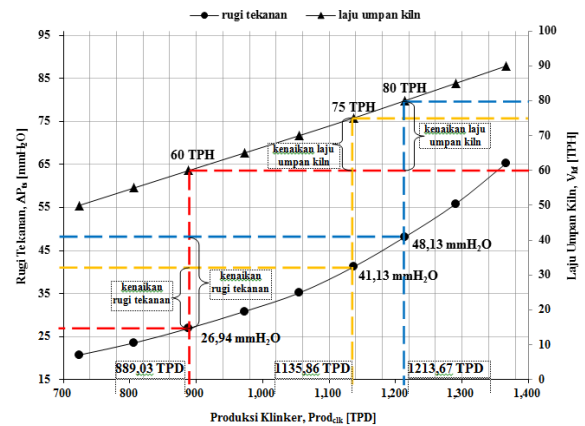
Pengaruh variasi laju umpan kiln terhadap parameter kinerja efisiensi pemisahan dan rugi tekanan aliran aerosol menunjukkan bahwa *top* siklon tersebut dapat dioperasikan pada kondisi yang tergantung pada beberapa pertimbangan antara lain, bila diinginkan kerugian aliran aerosol yang tidak terlalu besar mengingat kemampuan kerja ID *fan* yang tersedia, sebaiknya *top* siklon ini dioperasikan pada laju umpan kiln maksimum 75 TPH. Bila diinginkan laju umpan kiln yang lebih tinggi yaitu 80 TPH keatas, *top* siklon masih dapat menampung kerugian aliran tersebut dengan catatan ID *fan* yang dipergunakan di pabrik semen obyek penelitian masih mampu mengatasi kerugian tekanan yang akan terjadi.



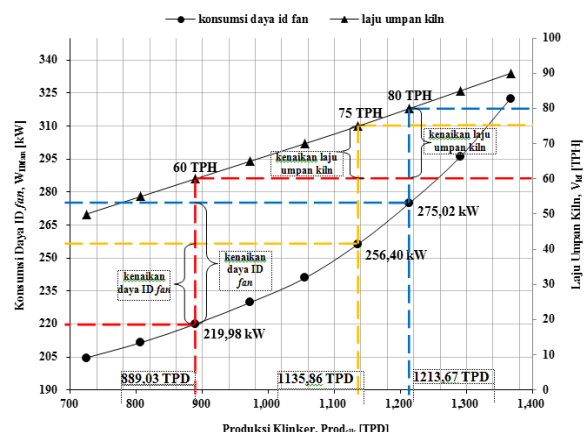
Gambar 9. Hubungan antara efisiensi pemisahan *top* siklon dan variasi laju umpan kiln

Daya listrik penggerak ID *fan* umumnya berbanding lurus dengan perkalian antara laju aliran dan rugi tekanan. Dengan membandingkan kenaikan produksi dan daya ID *fan* yang dibutuhkan untuk operasional *top* siklon seperti yang ditunjukkan pada gambar 10 dan 11, akan diperoleh beberapa hal berikut yaitu bila laju umpan kiln dinaikan dari 60 TPH menjadi 75 TPH (kenaikan 25%), maka rugi tekanan aliran aerosol meningkat sebesar 14,19 mmH₂O (kenaikan 52,67%) dengan peningkatan produksi klinker sekitar 27,76%. Selanjutnya jika laju umpan kiln dinaikan dari 60 TPH menjadi 80 TPH (kenaikan 33,3%), maka kenaikan rugi tekanan aliran aerosol meningkat sebesar 21,19 mmH₂O (kenaikan 78,65%) dengan peningkatan produksi klinker sekitar 36,51%. Bila laju umpan kiln dinaikan dari 60 TPH menjadi 75 TPH (kenaikan 25%), maka daya ID *fan* yang diperlukan akan naik pula dari 219,98 kW menjadi 256,40 kW (kenaikan 36,42 kW atau sekitar 16,5%). Bila laju umpan kiln dinaikan dari 60 TPH menjadi 80 TPH (kenaikan 33,3%), maka daya ID *fan* yang diperlukan akan

naik pula dari 219,98 kW menjadi 275,02 kW (kenaikan 55,04 kW atau sekitar 25%).



Gambar 10. Hubungan antara laju umpan kiln dan rugi tekanan total aliran aerosol di dalam *top* siklon terhadap kenaikan produksi klinker



Gambar 11. Hubungan antara laju umpan kiln dan konsumsi daya ID *fan* terhadap kenaikan produksi klinker

Jadi bila laju umpan kiln naik 25% disertai kenaikan daya ID *fan* 16,5%, sedangkan bila laju umpan kiln naik 33,3% maka daya ID *fan* naik sekitar 25%, sehingga untuk kenaikan laju umpan kiln 8,3% membutuhkan tambahan daya bagi ID *fan* sekitar 8,5%.

Kesimpulan

Perubahan laju umpan kiln mempengaruhi nilai efisiensi pemisahan *top* siklon dan peningkatan rugi tekanan aliran aerosol dalam *top* siklon. Perubahan ini berkontribusi pada kenaikan rugi tekanan total sistem SP sehingga terjadi penambahan daya untuk kerja ID *fan*. Peningkatan produksi klinker masih dapat dicapai dengan kapasitas peralatan utama yang terpasang pada

pabrik semen obyek penelitian dengan syarat *top* siklon bekerja pada laju umpan kiln 75 TPH, karena pada kondisi operasi ini kenaikan daya ID *fan* masih secara proporsional dengan kenaikan laju umpan kiln. Selanjutnya bila *top* bekerja pada laju umpan kiln mulai dari 80 TPH hingga 90 TPH, kenaikan daya ID *fan* terhadap kenaikan laju umpan kiln tidak lagi proporsional walaupun kenaikan ini tetap memberikan peningkatan produksi klinker.

Referensi

- [1] <http://www.psdg.bgl.esdm.go.id> : Peluang pendirian Industri Semen skala kecil, diakses bulan Februari 2014.
- [2] [http://www.kemenperindag.go.id/artikel/4492,3893 dan 6275/2013~2014,-Produksi & Konsumsi-Semen-Nasional](http://www.kemenperindag.go.id/artikel/4492,3893%20dan%206275/2013~2014,-Produksi%20&%20Konsumsi-Semen-Nasional), diakses bulan Desember 2013 ~ bulan Februari 2014.
- [3] Chen, J., dan Shi, M., A Universal Model to Calculate Cyclone Pressure Drop, Powder Technology, 171 (2007) 184 - 191.
- [4] Chen, J., dan Shi, M., Analysis on Cyclone Collection Efficiencies at Higt Temperatures, China Particuology, 1 (2003) 20-26.
- [5] Marek, W., dan Jerzy D., Application of Computational Fluida Dynamics to Optimization of Cyclone Dust Separators operated in the Cement Industry, Chemik, 67, 10 (2013) 985-994.
- [6] Duda, Walter H., Cemen Data Book Vol. 1, Bauverlag Gmbh, Berlin (1985).
- [7] Darmanto, Prihadi S., Teknologi dan Peralatan Pabrik Semen, Institut Teknologi Bandung (2004).
- [8] Versteeg, H. K., dan Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics, 2nd ed. Prentice Hall, (2007) 9 – 18.