
PENINGKATAN KUALITAS MONITORING PROSES PRODUKSI ALUMINIUM FOIL : EVALUASI KINERJA FURNACE DENGAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS DAN KUALITAS PROSES DENGAN STATISTICAL PROCESS CONTROL (SPC - EWMA, CUSUM)

Muhamad Fasial

Fakultas Teknologi Industri, Departemen Teknik Fisika
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Wiratno Argo Asmoro

Fakultas Teknologi Industri, Departemen Teknik Fisika
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Ruri Agung Wahyuono

Fakultas Teknologi Industri, Departemen Teknik Fisika
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Email: ruri_tf014@gmail.com

Edy Sugiantoro

PT. Supra Aluminium Industri (SAI)
JL. Raya Kasri No. 146, Pandaan, Pasuruan

ABSTRAK

Artikel ini mempresentasikan evaluasi performansi tungku anil (*annealing furnace*) pada produksi aluminium foil dikarenakan mayoritas cacat produk bersumber pada proses anil. Evaluasi secara termodinamik terhadap distribusi temperatur dan aliran udara di dalam tungku anil dilakukan berbasis *Computational Fluid Dynamic (CFD)*. Evaluasi sistem produksi aluminium foil untuk mengetahui kualitas proses menyeluruh dilakukan melalui pengendalian proses statistik menggunakan skema EWMA dan CUSUM. Hasil investigasi menunjukkan bahwa tungku anil dengan model inlet-outlet udara panas dari samping yang diinvestigasi pada artikel ini menunjukkan distribusi temperatur yang homogen, tetapi terdapat beberapa volume dimana aliran udara mengalami saturasi dan dapat menyebabkan pengebakan uap minyak pendingin pada proses sebelumnya (*rolling*). Berdasarkan respon pengendalian temperatur (PID), nilai *gain* proporsional perlu diperbesar agar *settling time* menjadi lebih pendek. Waktu konduksi aluminium yang berbeda berdasarkan data eksperimen dan perhitungan teoretis menunjukkan adanya panas yang hilang berlebih selama proses anil, sehingga perbaikan sistem isolasi tungku anil diperlukan. Hasil evaluasi kualitas proses menunjukkan bahwa grafik kendali CUSUM mampu mendeteksi perubahan proses skala kecil dan besar, namun metode ini membutuhkan inspeksi lebih lanjut apakah data proses keluar dalam batas kendali atau tidak. Grafik kendali EWMA (faktor pembobotan $\lambda = 0,6$) mampu mendeteksi cacat proses yang lebih banyak (terverifikasi dengan hasil inspeksi) dari grafik kendali CUSUM, sehingga skema EWMA lebih cocok digunakan untuk proses produksi aluminium foil dengan sistem *batch*.

Kata kunci: aluminium AA1235, furnace, CFD, statistical process control, EWMA, CUSUM.

ABSTRACT

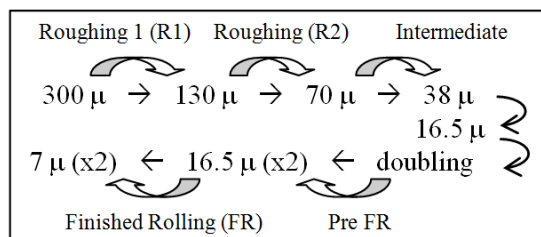
This paper presents evaluation of annealing furnace performance in the production of aluminum foil, since the majority of defects arises from improper annealing process. A thermodynamic evaluation of the temperature and air flow distribution inside the annealing chamber was carried out by means of Computational Fluid Dynamic (CFD). In addition, the overall process quality in aluminum foil production was assessed by different statistical process control schemes using EWMA and CUSUM. The results reveal that the sided blow inlet-outlet furnace investigated here shows quite homogeneous temperature distribution, but there is saturated airflow between the aluminum roll which might be unfavorable to remove the vaporized coolant oil. According to temperature control response, it is suggested to change the proportional mode control to higher value in order to obtain fast settling time since the furnace employs PID controller. The large difference between theoretical and actual conduction time of aluminum foil indicates more heat losses in furnace and hence, replacing the insulating material is required. Evaluation of production process quality reveals that CUSUM control chart enables the detection of both large and small shift in the process, but it needs a rigorous inspection to decide whether

the data point is out of control or not. The EWMA control charts ($\lambda = 0.6$) perform better monitoring capability that can detect more out of control data in aluminum processing.

Keywords: aluminum AA1235, furnace, CFD, statistical process control, EWMA, CUSUM.

1. PENDAHULUAN

Produksi rol aluminium foilseringkali mendapati perubahan proses yang berdampak pada cacat-cacat produk. Cacat produk ini sebagian besar disebabkan oleh ketidaksesuaian kondisi dan penanganan pada dua proses utama yaitu *rolling* dan *finishing* [1-3]. Pada industri rol aluminium foil secara umum menggunakan pekerjaan dingin (*cold works*) pada proses rolling yang terdiri dari beberapa tahapan reduksi seperti pada Gambar 1. Proses pengerjaan dingin berimplikasi bahwa semua proses dikerjakan dibawah temperatur rekristalisasi paduan aluminium, dalam hal ini paduan AA 1235. Selama proses *rolling*, minyak pendingin juga disemprotkan untuk mengurangi friksi mekanik yang berdampak pada cacat permukaan.



Gambar 1. Tahapan Proses Rolling Pada Produksi Aluminium Foil [3]

Selanjutnya, proses *finishing* aluminium foil juga meliputi beberapa tahapan yaitu *separating*, *slitting*, *rewinding*, anil, dan pengepakan [2,3]. Pada proses ini, tahapan anil merupakan tahapan kritis yang menentukan apakah kualitas akhir aluminium foil sesuai standar [1-3]. Hal ini dikarenakan proses anil ditujukan untuk mengembalikan sifat mekanik aluminium setelah pengerjaan dingin serta untuk menghilangkan minyak pendingin yang melapisi permukaan aluminium selama *rolling*.

Pada artikel ini, evaluasi proses anil dilakukan dengan mensimulasikan kondisi termal tungku anil sesuai dengan kondisi proses yang ditetapkan di industri (studi kasus PT. SAI). Simulasi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak CFD (*Computational Fluid Dynamics*) dan perhitungan teoretis berdasarkan kesetimbangan energi termodinamika digunakan untuk mengevaluasi isolasi termal tungku anil [4]. Selain itu, monitoring kualitas proses pada tahapan *rolling* juga dilakukan dengan menggunakan strategi pengendalian proses statistik (*Statistical Process Control, SPC*) [5,6] terhadap variabel inspeksi seperti panjang, massa dan densitas. Monitoring kualitas proses sangat penting untuk menjaga luaran produk pada kualitas standar dengan parameter produk yang seragam (atau dengan simpangan yang dapat ditoleransi) [7]. SPC (*statistical process control*) merupakan metode pengawasan/monitoring sebuah sistem secara statistik yang mampu mengevaluasi kinerja sebuah proses berdasarkan data pengukuran [5,6]. Aplikasi SPC, seperti grafik kendali, umumnya digunakan untuk meningkatkan dan menjaga kualitas proses atau produk dengan mereduksi variansi pada proses maupun produk. Dalam penggunaannya, grafik kendali tipe *Sewhart* sangat jamak digunakan [8]. Namun demikian, teknik ini kurang sensitif untuk mendeteksi perubahan kualitas produk atau proses skala kecil. Oleh karena itu, dalam memonitor kualitas proses dalam produksi rol aluminium foil (dalam studi kasus ini adalah sistem *batch*), makalah ini mempresentasikan penggunaan grafik kendali CUSUM dan EWMA yang memiliki kapabilitas monitoring yang lebih baik dan sensitif.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Evaluasi Kinerja Tungku Anil (*Annealing Furnace*) Rol Aluminium Foil

Kinerja tungku anil dievaluasi ketika kondisi ruang tungku penuh dengan rol aluminium foil. Kapasitas muatan rol aluminium foil adalah 32 rol aluminium. Tahapan pemanasan di dalam tungku anil meliputi *pre-heating 1* (130°C, 8 jam), *pre-heating 2* (160°C, 8 jam), evaporasi (225°C, 15 jam), dan pengeringan (180°C, 60 jam). Simulasi CFD dilakukan untuk menganalisis aliran udara panas di dalam ruang tungku secara numerik [9,10]. Detil tahapan simulasi mengikuti referensi. Kalkulasi numerik yang digunakan didasarkan pada persamaan kesetimbangan energi berikut [9-11]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot k_{eff} \nabla T + \nabla \cdot (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) + S_h \quad (1)$$

Dengan k_{eff} adalah konduktivitas efektif yang merupakan jumlahan dari k dan k_t (konduktivitas termal akibat turbulensi). Dua suku pada ruas kanan menunjukkan transfer energi dan disipasi viskositas. Untuk benda padat (dalam hal ini mensimulasikan aluminium rol), transfer energi dihitung berdasarkan persamaan:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (2)$$

Dengan ρ adalah densitas benda padat, h adalah entalpi sensible, k adalah tetapan konduktivitas, T adalah temperatur permukaan aluminium, dan S_h adalah sumber panas volumetrik. Persamaan (1) dan (2) kemudian dikomplementerkan dengan persamaan kontinuitas dan kekekalan momentum untuk memperoleh hasil simulasi.

Selain analisis distribusi temperatur dan aliran udara, analisis laju konduksi pada rol aluminium telah dikembangkan. Pendekatan perpindahan panas dan analisis volume atur (*control volume*) digunakan untuk menentukan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur acuan pada kondisi tunak/mantab/*steady*. Asumsi pertama adalah rol aluminium dimodelkan sebagai silinder rigid sehingga persamaan Fourier untuk konduksi dapat dinyatakan sebagai berikut [4]:

$$q_r = \frac{2\pi k L (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3)$$

Dengan r_1 adalah radius dalam silinder, r_2 adalah radius luar silinder rol aluminium, T_1 adalah temperatur bagian dalam dan T_2 adalah temperatur bagian luar rol aluminium, L adalah lebar rol aluminium dan k adalah konduktivitas termal aluminium.

Pada tahap evaporasi, perbedaan temperatur adalah 65°C. Konduktivitas aluminium pada temperatur evaporasi adalah 222 W/m K. Pada studi kasus ini, spesifikasi rol adalah lebar 82 cm, diameter dalam 8 cm, dan diameter luar 34 cm. Dengan menggunakan persamaan (3), laju panas yang dibutuhkan untuk evaporasi adalah 5.413 kW. Dikarenakan waktu setting untuk respon transien dari pre-heating ke evaporasi adalah 1 jam, maka jumlah panas yang dibutuhkan mendekati 51,356 kWh. Nilai ini akan digunakan untuk analisis termal menggunakan persamaan kesetimbangan energi di dalam ruang tungku [4]:

$$\dot{Q}_{cv} = \sum_{q=1}^{q_n} \rho A_{eq} V_{eq} \left(h_{eq} + \frac{V_{eq}^2}{2} + g z_{eq} \right) - \sum_{p=1}^{p_n} \rho A_{ip} V_{ip} \left(h_{ip} + \frac{V_{ip}^2}{2} + g z_{ip} \right) \quad (4)$$

Dengan Q_{cv} adalah akumulasi panas pada volum atur (ruang tungku), ρ adalah massa jenis udara, A adalah luas area, h adalah entalpi udara, dan z adalah elevasi. Indeks ip dan eq berturut-turut menunjukkan komponen pada input udara (ip) dan output udara (eq). Dengan menghitung akumulasi panas di dalam ruang tungku, waktu untuk mencapai kondisi tunak secara teoretis dapat dihitung dan dikomparasikan dengan hasil pengamatan di lapangan.

2.2 Kontrol Proses Statistik: CUSUM dan EWMA

Pada kasus ini, 481 data pengamatan pada tahun 2010 digunakan untuk diolah secara statistik. Proses produksi dilakukan dengan masukan paduan aluminium tipe AA1235 untuk menghasilkan aluminium *foil* dengan ketebalan 6.5 μm dan panjang 18000 m. Variabel pengukuran/pengamatan terdiri dari panjang *foil*, massa dan densitas yang direkapitulasikan saat inspeksi fisik. Adapun uji normalitas data terhadap masing-masing variabel pengamatan telah dilakukan sebelum melakukan analisis statistik. Penggunaan aplikasi SPC berupa grafik kendali CUSUM dan EWMA pada metode yang dijelaskan berikut akan dibandingkan dengan performa penggunaan grafik kendali *Sewhart X* (data tidak ditampilkan)

Grafik kendali *cumulative sum* (CUSUM) bekerja sebagai berikut: Apabila telah dikumpulkan sejumlah m sampel, masing-masing memiliki ukuran n , dan dihitung nilai rata-rata setiap sampel, maka grafik kendali CUSUM disusun dengan membuat grafik variabel m seperti formulasi berikut [14]:

$$S_m = \sum_{i=1}^m (\bar{x}_i - \hat{\mu}_0) \quad (5)$$

atau

$$S'_m = \frac{1}{\sigma_x} \sum_{i=1}^m (\bar{x}_i - \hat{\mu}_0) \quad (6)$$

Dengan μ_0 adalah estimasi rata-rata di dalam kendali, σ_x adalah simpangan baku yang diketahui atau diestimasi dari nilai rata-rata. Selama sebuah proses dalam kendali (sebaran nilai mendekati μ_0) maka data pada grafik kendali akan tersebar di dekat nilai nol. Apabila nilai rata-rata proses mengalami perubahan, semisal terjadi peningkatan signifikan, maka data CUSUM akan bergeser naik dan begitu pula sebaliknya apabila nilai rata-rata proses menurun.

Teknik *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) merupakan sebuah statistik untuk memonitor proses dengan menghitung rata-rata dan memberikan pembobotan tertentu pada data historis dan data aktual. Dengan EWMA, pengambilan keputusan berdasarkan statistik EWMA yang melibatkan semua data (historis dan aktual) merupakan nilai rata-rata terbobot secara eksponensial. Dengan faktor pembobotan, λ , prosedur kendali EWMA menjadi lebih sensitif terhadap simpangan yang sangat kecil dalam sebuah proses. Statistik EWMA diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$EWMA_t = \lambda Y_t + (1 - \lambda)EWMA_{t-1} \text{ untuk } t = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Dengan $EWMA_0$ adalah nilai rata-rata data target, Y_t adalah pengamatan pada waktu ke t , n adalah jumlah pengamatan termasuk $EWMA_0$, $0 < \lambda < 1$ adalah sebuah konstanta yang menentukan kebutuhan memori dari EWMA. Parameter-parameter ini menentukan bagaimana laju data lama diproses dalam statistik EWMA. Nilai $\lambda = 1$ berimplikasi bahwa hanya data terbaru mempengaruhi EWMA, sedangkan untuk $\lambda \ll 1$ memberikan bobot yang lebih besar pada data lama. Secara praktis nilai λ biasanya ditentukan antara 0.2 dan 0.3. Adapun nilai variansi dari statistik EWMA dihitung berdasarkan persamaan:

$$s^2_{ewma} = \left(\frac{\lambda}{2 - \lambda} \right) \cdot s^2 \quad (8)$$

Untuk nilai t yang sangat besar, dimana adalah simpangan baku (deviasi standar) yang dihitung dari data historis. Nilai tengah dari grafik kendali adalah nilai target atau $EWMA_0$. Batas-batas kendali kemudian didefinisikan sebagai berikut:

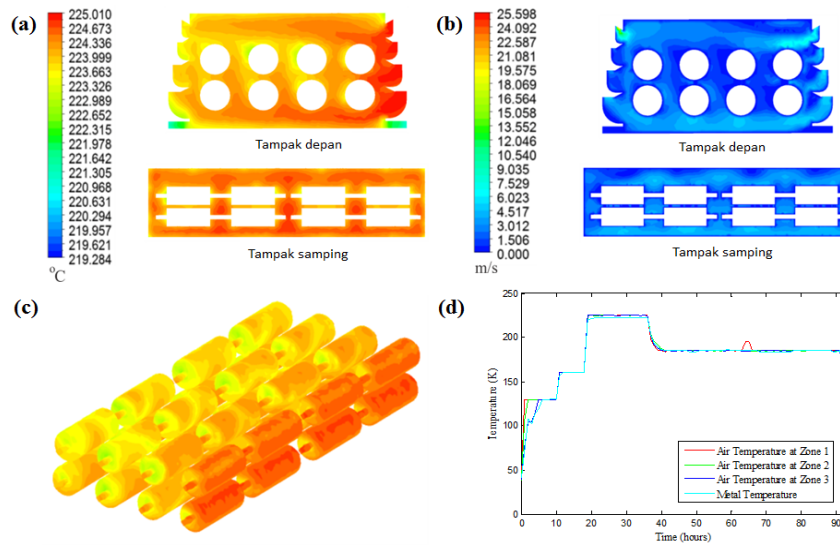
$$UCL = EWMA_0 + k \cdot s_{ewma} \quad (9)$$

$$LCL = EWMA_0 - k \cdot s_{ewma} \quad (10)$$

Dengan faktor k bernilai 3 untuk memenuhi kriteria *six sigma*.

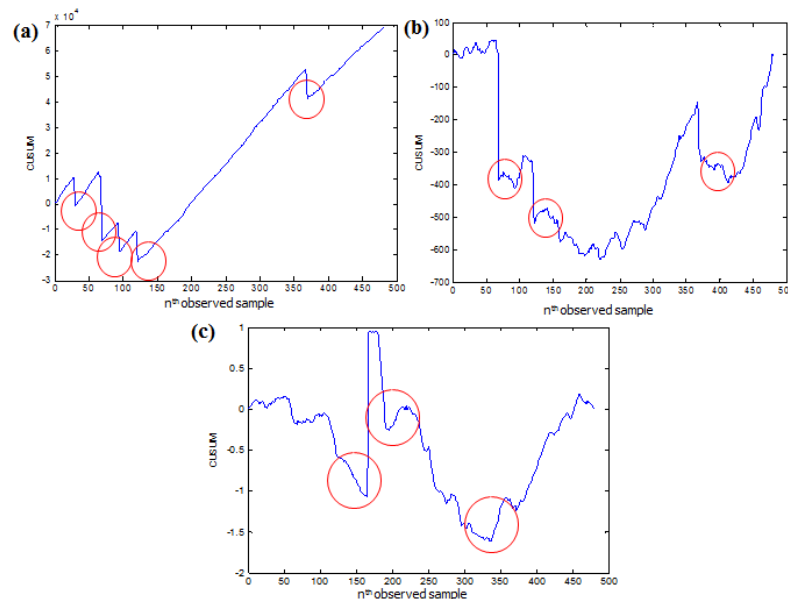
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi CFD terhadap kondisi termal ruang tungku disajikan pada Gambar 2a dan 2b. Hasil simulasi distribusi temperatur (Gambar 2a) menunjukkan bahwa temperatur sesuai hasil set temperatur evaporasi (225°C) terdistribusi di bagian bawah ruang tungku, sedangkan bagian atas tungku anil mengalami penurunan temperatur udara 4-6°C. Penurunan temperatur pada bagian atas tungku tepat ditoleransi karena susunan rol aluminium *foil* hanya sampai dibagian tengah ruang. Analisis aliran udara dalam ruang tungku mengunjukkan rata-rata kecepatan aliran sebesar 2.09 ms⁻¹. Udara dengan kecepatan aliran yang tinggi (3.35 – 4.19 ms⁻¹) ditemukan dibagian bawah ruang tungku.



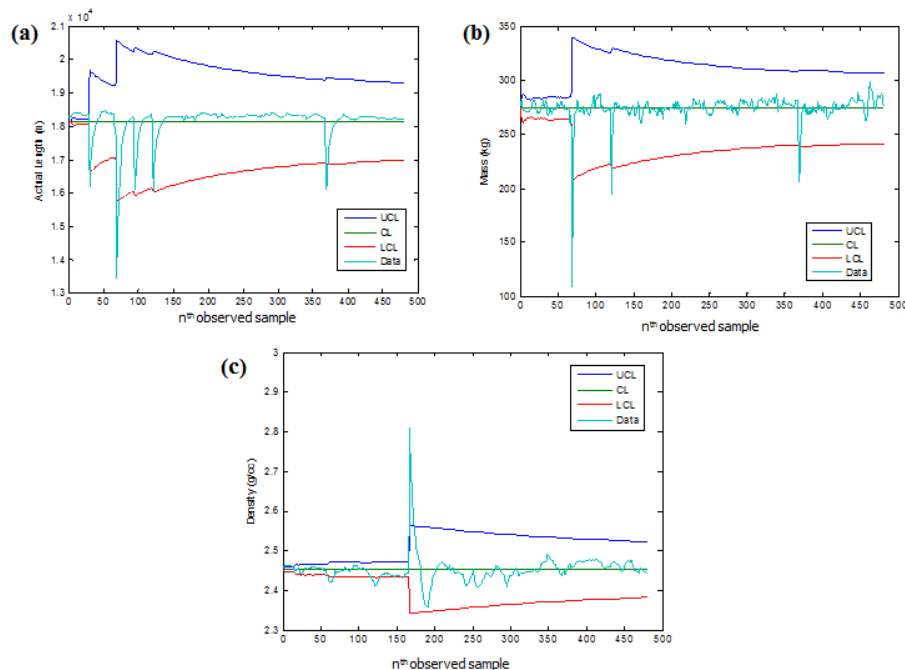
Gambar 2. Distribusi Temperatur (a) Dan Aliran Udara (b) Di Dalam Ruang Tungku Anil. (c) Distribusi Temperatur Permukaan Rol Aluminium Foil Di Dalam Tungku Dan (d) Respon Kendali Temperatur Pada Masing-Masing Tahapan Proses Pemanasan

Pada Gambar 2c ditunjukkan bahwa hampir keseluruhan rol aluminium foil mendapatkan perlakuan panas yang baik utamanya di dekat aliran udara panas masuk ruang tungku. Hal ini dapat mengurangi kemungkinan bahwa permukaan aluminium foil masih terlapisi minyak pendingin (karakteristik permukaan yang tidak diharapkan, umumnya disebut weta). Selain itu, respon transien dan *steady* pada masing-masing fase pemanasan ditampilkan pada Gambar 2d. Berdasarkan perhitungan termodinamika (persamaan 3 dan 4), waktu konduksi aluminium foil dalam tungku anil untuk mencapai kondisi *steady* adalah 0,15 jam. Waktu ini jauh lebih singkat dibandingkan waktu kondisi yang terekam dalam tungku untuk mencapai kondisi *steady*, yaitu 1 – 4 jam. Oleh karena waktu konduksi *steady* yang lama, maka *gain* proporsional dalam strategi kendali PID yang digunakan pada tungku anil harus diperbesar untuk mempercepat respon *steady*. Hal lain yang memungkinkan lambatnya waktu *steady* adalah kondisi isolasi termal yang tidak optimal di dalam tungku sehingga memungkinkan banyaknya rugi-rugi panas (*heat losses*). Dengan demikian, direkomendasikan untuk melakukan inspeksi pada sistem isolasi yang dipasang di dalam tungku anil termasuk dengan mengganti bahan isolator yang lama dengan material baru seperti grafit dan gipsum.



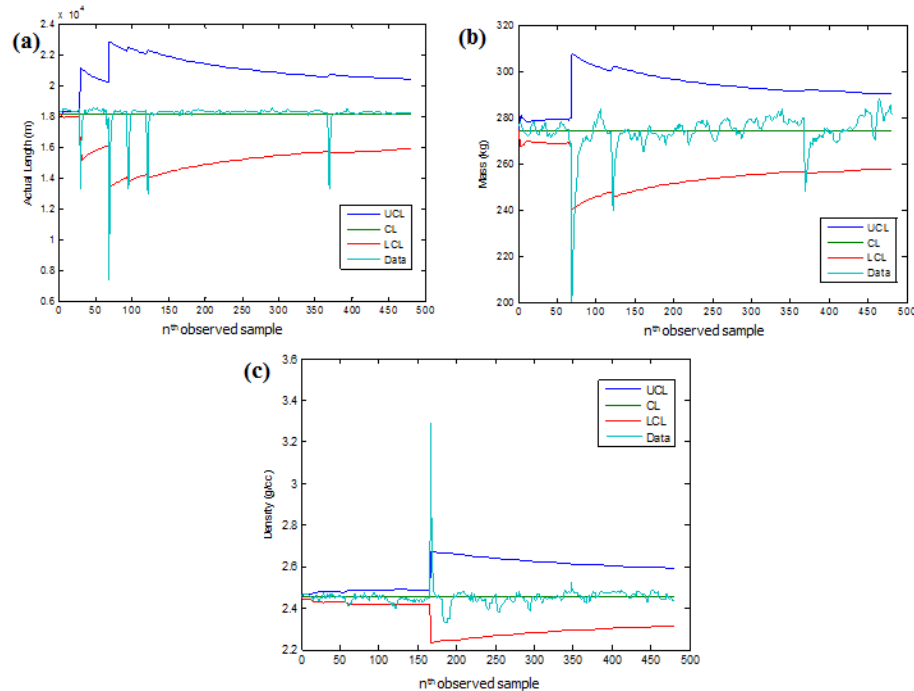
Gambar 3. Grafik Kendali CUSUM Untuk Variabel Pengukuran: (a) Panjang, (b) Massa, Dan (c) Densitas Aluminium Foil

Hasil pemeriksaan kualitas proses pada tahapan *rolling* dijabarkan sebagai berikut. Evaluasi strategi SPC menggunakan grafik kendali CUSUM direpresentasikan pada Gambar 3. Perubahan proses secara umum dapat dideteksi dengan mengamati gradient kurva CUSUM. Pada proses yang berjalan normal, kurva CUSUM menunjukkan tren yang meningkat karena merupakan penjumlahan dari nilai rata-rata sampel dan target proses. Ketika kurva secara tiba-tiba menurun atau meningkat sangat signifikan (terjadi perubahan gradien), maka simpangan baku dari data yang diamati adalah sangat besar. Hal ini menunjukkan bahwa proses telah berubah pada pengamatan tersebut karena gangguan atau karena perubahan target. Grafik kendali CUSUM untuk variabel panjang rol aluminium AA 1235 ditunjukkan pada Gambar 3a. Dengan mengamati grafik tersebut, dapat disimpulkan bahwa terdapat 5 proses diluar kendali pada pengamatan yang sama dengan grafik kendali *Sewhart X* (yaitu pengamatan ke-23, 70, 96, 122, dan 368). Untuk variabel massa (Gambar 3b) diperoleh tiga proses di luar kendali sama seperti hasil pengamatan pada grafik kendali *Sewhart X* yaitu pada pengamatan ke- 70, 122, dan 368. Grafik kendali CUSUM untuk densitas (Gambar 3c) menunjukkan perbaikan kapabilitas dibandingkan grafik kendali *Sewhart X* dengan mendeteksi perubahan proses kecil, yaitu setidaknya mampu mendeteksi 3 kejadian di luar kendali pada pengamatan ke -167, 196, dan 342.



Gambar 4. Grafik Kendali EWMA ($\lambda=0.2$) Untuk Variabel Pengukuran: (a) Panjang, (b) Massa, Dan (c) Densitas Aluminium Foil

Grafik kendali EWMA dengan faktor pembobotan 0,2 (data historis lebih penting untuk EWMA) ditunjukkan pada Gambar 4. Grafik kendali EWMA ($\lambda = 0,2$) untuk variabel panjang rol tidak mampu mendeteksi proses di luar kendali sebaik pada grafik kendali *Sewhart X* dan CUSUM: EWMA ($\lambda = 0,2$) hanya mampu mendeteksi 3 proses di luar kendali (Gambar 4a), sedangkan *Sewhart X* dan CUSUM mampu mendeteksi 5 kejadian. Pada variabel massa (Gambar 4b), grafik kendali EWMA ($\lambda = 0,2$) mampu mendeteksi jumlah kejadian di luar kendali yang sama dengan grafik kendali *Sewhart X* dan CUSUM, yaitu pada pengamatan ke 70, 122 dan 368. Hasil yang lebih baik diperoleh pada grafik kendali EWMA ($\lambda = 0,2$) untuk monitoring variabel densitas dibandingkan grafik kendali *Sewhart X* dan CUSUM, yaitu mampu mendeteksi kejadian di luar kendali pada pengamatan ke-70, 122, dan 167, dimana grafik kendali *Sewhart X* dan CUSUM hanya mampu mendeteksi proses di luar kendali pada pengamatan ke 167. Hal ini menunjukkan bahwa grafik kendali EWMA lebih sensitif terhadap perubahan proses yang sangat kecil dan tidak dapat dideteksi oleh grafik kendali lainnya.



Gambar 5. Grafik Kendali EWMA ($\lambda=0.6$) Untuk Variabel Pengukuran: (a) Panjang, (b) Massa, Dan (c) Densitas Aluminium Foil

Sebagai pembandingan, grafik kendali EWMA dengan faktor pembobotan 0,6 ditunjukkan pada Gambar 5. Faktor pembobotan 0,6 dipilih karena nilai ini mendekati nilai netral/historis tetapi masih mempertimbangkan data aktual. Pada Gambar 5a, diperoleh 5 data inspeksi panjang rol aluminium foil yang diluar batas kendali EWMA. Jumlah data di luar kendali ini sama dengan hasil inspeksi dengan grafik kendali *Sewhart*. Dengan demikian, parameter panjang rol merupakan variabel yang cenderung mengabaikan data historis dan mempertimbangkan data aktual. Sebaliknya, grafik kendali EWMA ($\lambda=0,6$) untuk variabel massa (Gambar 5b) dan densitas (Gambar 5c) menunjukkan kemampuan deteksi yang hampir sama dengan grafik kendali EWMA ($\lambda=0,2$). Lebih lanjut, grafik kendali EWMA ($\lambda=0,6$) hampir tidak mampu mendeteksi data di luar kendali pada pengamatan ke 122 dan 368. Hal ini, menunjukkan bahwa variabel massa dan densitas cenderung mempertimbangkan data historis dibandingkan data aktual.

4. KESIMPULAN

Proses anil rol aluminium foil tipe AA 1235 dalam tungku anil telah dianalisis serta monitoring kualitas proses pada tahapan *rolling* menggunakan grafik kendali SPC telah dievaluasi. Berdasarkan hasil simulasi CFD, tungku anil dengan model udara panas dari sisi samping tungku memiliki distribusi temperatur yang cukup homogen untuk kondisi ruang tungku penuh dengan rol aluminium foil. Namun demikian, laju aliran udara didapati lebih tinggi untuk volume ruang pada bagian atas ruang tungku dan terdapat beberapa posisi rol aluminium yang dilingkupi oleh udara dengan aliran jenuh. Adanya perbedaan antara hitungan teoretis dan data eksperimen untuk waktu total konduksi aluminium mengindikasikan adanya permasalahan pada kondisi termal ruang tungku, yaitu adanya kebocoran panas yang disebabkan preformansi insulasi termal ruang yang rendah. Hasil evaluasi monitoring kualitas proses *rolling* menunjukkan bahwa strategi SPC menggunakan grafik kendali CUSUM mampu mendeteksi perubahan proses (yang menyebabkan cacat) baik skala kecil maupun besar. Akan tetapi, proses verifikasi CUSUM membutuhkan inspeksi secara mendetil untuk melakukan justifikasi apakah sebuah data benar-benar di luar batas kendali atau tidak. Grafik kendali EWMA menunjukkan kapabilitas monitoring yang lebih baik dibandingkan CUSUM. Hal ini diindikasikan dengan terdeteksinya lebih banyak kejadian cacat produksi dari parameter panjang, massa, dan densitas. Selain itu, grafik kendali EWMA terbaik diperoleh untuk faktor pembobotan 0,6 yang mengindikasikan bahwa data terbaru lebih mempengaruhi perormansi EWMA dibandingkan data lama.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] The Aluminum Association. (2007). *Rolling Aluminum: From the Mine Through the Mill*. The Aluminum Association, Inc.
- [2] Visual Quality Characteristic of Aluminum Sheet and Plate, the Aluminum Association Inc., 4th Edition February 2002.
- [3] Annisa Kesy Garside, 2005. "Penentuan Setting Parameter Proses Finishing Rolling untuk Aluminium Foil dengan Thickness Exit 7 Mikron di PT. Supra Aluminium Industri." Laporan Magang Dosen, Program Hibah A1, Jurusan Teknik Industri – FT, Universitas Muhammadiyah Malang.
- [4] Wahyuono, R. A., Asmoro, W. A., Sugiantoro, E., Faisal, M. 2012. "A Computational Fluid Dynamics Study of 6.5 Micron AA 1235 Annealing Treatment in Sided Blow Inlet – Outlet Furnace", Proceedings of the 6th Electrical Power, Electronics, Communications, and Informatics International Seminar, pp. D2-1.
- [5] Montgomery, D.C.(2004). Introduction to statistical quality control, fifth ed. John Wiley & Sons, New York.
- [6] Montgomery, D. C., 2007. SPC research–current trends. *Quality and Reliability Engineering International*, 23, 515-516.
- [7] Suyanto, Pancaputra, M. A., Wahyuono, R. A. 2011. "Designing of Expert System for Troubleshooting Diagnosis on Gas Chromatography GC-2010 by means of Inference Method", Proceeding of 2011 International Conference on Uncertainty Reasoning and Knowledge Engineering (URKE), pp. 5 – 8. Doi:10.1109/URKE.2011.6007820
- [8] Costa, A. F. B., 1998. Joint X and R charts with variable parameters. *IIE Transactions*, 30, 505-514.
- [9] Wahyuono, R. A. 2012. Analisis Distribusi Temperatur dan Aliran Udara pada Inkubator Bayi dengan Variasi Tipe Dinding dan Overhead Screen. Tugas Akhir, Teknik Fisika ITS, Surabaya.
- [10] Wahyuono, R. A., Hantoro, R., Nugroho, G. 2012. Study on Dry Heat Loss of a Very Low Birth Weight (VLBW) Newborn Nursed in an Infant Incubator with Overhead Screen“, Proceedings of Seminar on Intelligent Technology and Its Application (SITIA).
- [11] Agung W., R., Dahliyah, N. Putri, I. E., Setiawan, T. D., Hantoro, R. 2012. "Partial Double Wall Incubator for Proposed Optimal Thermoregulator Supporting Media of Newborn Care“, Proceeding of International Conference on Physics (ICP), Yogyakarta – Indonesia, pp. IAP13-1 – IAP13-4.
- [12] Wibowo, A. T. H., Wahyuono, R. A., Nugroho, G. 2013. Studi Numerik Pengaruh Geometri dan Desain Diffuser untuk Peningkatan Kinerja DAWT (Diffuser Augmented Wind Turbine). *Jurnal Teknik Mesin* 14(2), pp. 90-96.
- [13] Hawkins, D. M. and Olwell, D. H., 1998. Cumulative sum charts and charting for quality improvement. Springer, Berlin.
- [14] Jones, L. A., 2002. The statistical design of EWMA control charts with estimated parameters. *Journal of Quality Technology*, 34 (3), 277-288.
- [15] Lucas, J. M. and Saccucci, M. S. 1990. "Exponentially weighted moving average control schemes: Properties and enhancements", *Technometrics* 32, 1-29.