

ANALISIS RETAK DAN PATAHNYA REFRAKTORI TABUNG ALUMINA PADA TUNGKU SINTER MINI CARBOLITE CTF/-/600

Achmad Suntoro
Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir (PRFN-BATAN)
suntoro@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS RETAK DAN PATAHNYA REFRAKTORI TABUNG ALUMINA PADA TUNGKU SINTER MINI CARBOLITE CTF/-/600. Analisis retak dan patahnya refraktori tabung alumina pada tungku sinter mini Carbolite CTF/-/600 telah dilakukan. Data penyebab kerusakan tersebut digunakan untuk pendekatan menentukan karakteristik batas aman operasi tungku selanjutnya. Beberapa persamaan matematik natural-response dari tungku diturunkan dari data eksperimen operasional tungku. Dari persamaan-persamaan tersebut, karakteristik batas aman suhu untuk mematikan sistem tungku dari operasinya dalam bentuk persamaan matematik dan batas aman perubahan suhu (slope) ditentukan. Batasan maksimum perubahan suhu tungku menurut fabrikasi tungku adalah $300\text{ }^{\circ}\text{C/jam}$, tetapi dari data eksperimen dan pendekatan proses ekstrapolasi yang dilakukan, tabung alumina tungku retak dan patah pada perubahan suhu $257\text{ }^{\circ}\text{C/jam}$. Angka $257\text{ }^{\circ}\text{C/jam}$ selanjutnya digunakan sebagai referensi bahwa operasi tungku harus dikendalikan perubahan suhunya selalu dibawah $257\text{ }^{\circ}\text{C/jam}$. Ditemukan bahwa konstanta-waktu untuk suhu-turun dari sistem tungku akan berubah dengan berubahnya suhu maksimum operasi tungku.

Kata kunci : konstanta-waktu, tungku-sinter, alumina, perubahan suhu, natural-response.

ABSTRACT

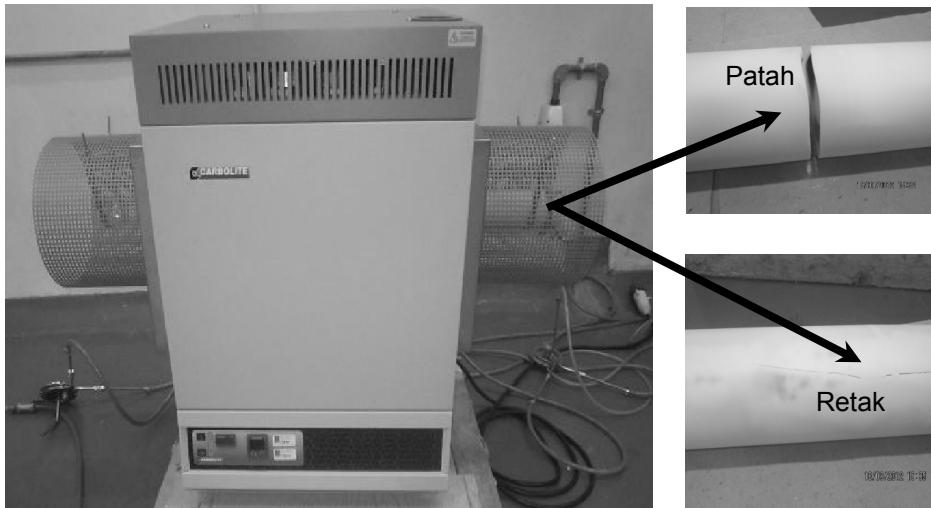
AN ANALYSIS OF CRACK AND FRACTURE OF THE ALUMINA REFRACTORY TUBE IN THE MINI SINTER FURNACE CARBOLITE CTF/ - /600. An analysis of crack and fracture of the alumina refractory tube mini sinter furnace Carbolite CTF/ - /600 has been done. Data causing the crack and fracture are used to determine the next characteristics of safety threshold furnace operation. Natural-response mathematical equations of the furnace are derived based on the experimental furnace data operations. Based on the equations, both the temperature to shut down the furnace from its operation in the form of a mathematical equation and the characteristics of safety threshold of temperature change (slope) are obtained. Safety therehold for temperature change according to the furnace manufacturer is $300\text{ }^{\circ}\text{C/hour}$, but from the experimental data and the extrapolation process implemented, the crack and fracture of the alumina tube was happened at the slope $257\text{ }^{\circ}\text{C/hour}$. The number $257\text{ }^{\circ}\text{C/hour}$ is then to be used as a reference number that the temperature slope of the operational furnace must be controlled always under $257\text{ }^{\circ}\text{C/hour}$. It has been found that the time constant for temperature drop of the furnace will change with the changing of the maximum temperature operation of the furnace.

Key words: time-constant, sintering-furnace, alumina, temperature-change, natural-response.

1. PENDAHULUAN

Sintering adalah proses pembentukan material padat melalui pemanasan tanpa meleleh pada suhu mendekati titik leleh dari materi tersebut^[1]. Pemanasan dilakukan menggunakan tungku pemanas dimana suhu ruang pemanas tersebut dapat dikendalikan dan dapat dialiri gas selama proses pemanasan berlangsung. Carbolite CTF/-/600 adalah tungku sinter mini yang dapat dioperasikan hingga suhu $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan ruang pemanasnya berupa tabung sillinder dari batu alumina.

Tungku sinter mini Carbolite CTF/-/600 milik PTBBN-BATAN yang digunakan untuk proses sintering mengalami kerusakan, yaitu retak dan patah pada refraktori tabung alumina nya. Hal ini terjadi karena tungku dimatikan secara mendadak oleh operator pada suhu 1548 °C sehingga suhu tungku turun secara alamiah tanpa pengendalian. Tungku saat itu beroperasi pada suhu maximum 1750 °C.



Gambar 1. Tungku sinter mini Carbolite CTF/-/600 retak dan patah tabung alumina nya.

Dalam makalah ini, analisis karakteristik perubahan suhu tungku dilakukan untuk pendekatan dalam mendapatkan karakteristik batas aman (tidak rusak) tabung alumina dalam operasinya. Karakteristik batas aman pendekatan yang dimaksud meliputi batasan suhu untuk tungku boleh dimatikan (aliran listrik ke tungku dihentikan) dan kecepatan perubahan suhu operasi. Karakteristik perubahan suhu tinggi ke suhu rendah tanpa pengendalian merupakan *natural-response* atau bawaan sistem tungku. *Natural-response* ini akan ditentukan menggunakan data yang diperoleh dari percobaan dengan menggunakan pendekatan karakteristik komponen listrik kapasitor. Dari *natural-response* tersebut pendekatan batas aman kerja tungku ditentukan.

2. DASAR TEORI

2.1 Kejut Suhu

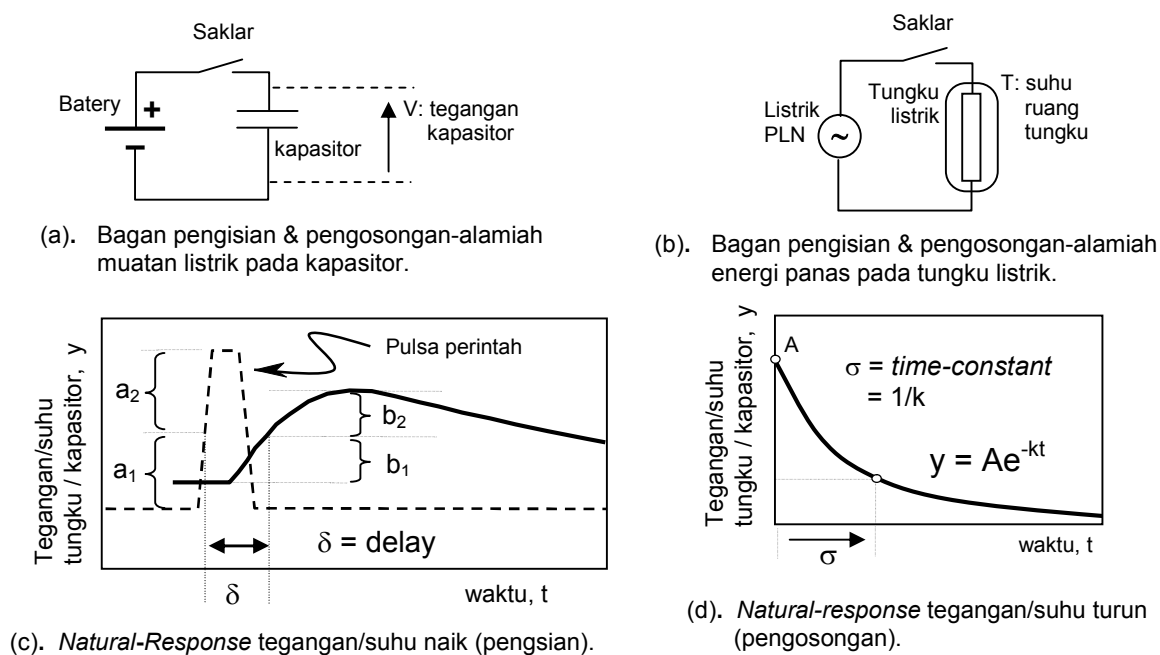
Kejut suhu (*thermal-shock*) adalah perubahan suhu yang terjadi secara mendadak dan bisa menjadi penyebab retak atau pecahnya bahan keramik serta gelas. Makin tinggi perubahan perbedaan suhu tersebut, makin besar kemungkinan rusaknya bahan keramik dan gelas tersebut^[2]. Berbeda dengan benda logam yang mempunyai sifat plastis terhadap perubahan bentuk, sehingga benda logam mempunyai daya tahan terhadap kejut suhu lebih tinggi dari bahan keramik dan gelas, karena keramik dan gelas bersifat *brittle* dan *fracture* yang tidak memiliki toleransi terhadap perubahan bentuk^[3]. Daya tahan terhadap kejut suhu suatu bahan tidak hanya tergantung pada jenis bahannya saja, tetapi juga tergantung pada siklus pemanasan dan bentuk geometri dari bahan bersangkutan^[4].

Kejut suhu pada tungku bisa terjadi karena suhu menaik atau suhu menurun. Kejut suhu bisa terjadi karena terjadi kerusakan pada sistem kendali suhu berikut instalasinya sehingga suhu tungku naik atau turun lepas dari pengendalian. Selain itu, kerusakan tungku (listrik) juga bisa diakibatkan karena terjadi pemadaman arus listrik dari PLN atau kesalahan operasi dengan mematikan sistem tungku yang sedang bekerja ketika suhu tungku masih tinggi atau memberi perintah kepada kendali suhu untuk menaikkan atau menurunkan suhu dengan *slope* yang terlalu tinggi.

2.2 Perubahan Suhu Tungku Sinter

Perubahan suhu di ruang tungku sinter ditentukan oleh *time-delay* (δ) dan *time-constant* (σ) dari sistem tungku bersangkutan seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Terminologi dua variabel tersebut mengacu pada analogi karakteristik dalam rangkaian listrik^[5], yaitu *time-delay* (δ) adalah waktu antara datangnya sinyal input dan keluarnya sinyal output yang ditentukan dari masing-masing kondisi ketika mencapai setengah amplitudo ($a_1 = a_2$; $b_1 = b_2$; pada Gambar 2.c). Sedang *time-constant* adalah waktu yang diperlukan untuk amplitudo sinyal sehingga menjadi $1/e$ dari tingginya semula, dengan e adalah bilangan natural.

Proses pengisian dan pengosongan energi panas pada sebuah tungku listrik identik dengan proses pengisian dan pengosongan muatan listrik pada sebuah kapasitor^[6]. *Natural response* pengosongan muatan listrik pada kapasitor berbentuk fungsi eksponensial meluruh $V = Ae^{-kt}$ dengan nilai *time-constant* $\sigma = 1/k$, yang direpresentasikan dengan tegangan kapasitor-nya^[5]. Dalam makalah ini *natural response* tungku didekati dengan *natural response* kapasitor (Gambar 2.c dan d).



Gambar 2. Kesetaraan *time-delay* (δ) dan *time-constant* (σ) pada tungku & kapasitor.

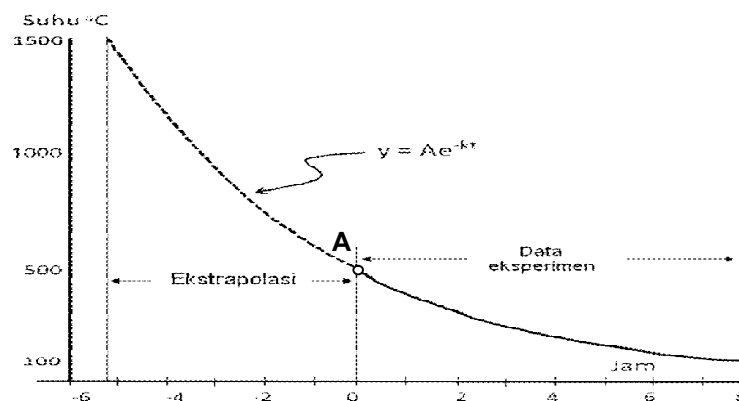
Batasan kerja tungku sinter mini Carbolite CTF/-/600 adalah: suhu maksimum 1800 °C, kecepatan perubahan suhu $|300 \text{ }^\circ\text{C/jam}|$, dan ketika mematikan sistem tungku harus pada suhu ketika suhu tungku turun secara alamiah (ditandai dengan telah nol nya aliran listrik ke filamen pemanas tungku dalam pengendalian-nya).

3. TATA KERJA

Ketersediaan *natural-response* menjadi kunci dalam analisis yang dilakukan dalam makalah ini. Untuk mendapatkan *natural-response* suhu-naik diperlukan eksperimen khusus, yaitu dengan memberi input berupa pulsa pengendalian dengan tinggi dan lebar pulsa yang dapat diatur seperti pada Gambar 2.c, sehingga konstanta-waktu suhu-naik dan juga waktu-tunda (*delay*) atas perubahan suhu dalam ruangan tungku dapat ditentukan. Untuk konstanta-waktu suhu-turun dapat diperoleh dari data operasional tungku sehari-hari sehingga memungkinkan untuk tidak harus memerlukan eksperimen khusus. Dalam analisis ini akan digunakan konstanta-waktu suhu-turun yang telah tersedia datanya.

Analisis diarahkan untuk menemukan dua batas aman operasi tungku, yaitu batasan suhu tertinggi untuk diperbolehkan menghentikan aliran listrik ke tungku yang sedang beroperasi serta maksimum kecepatan perubahan (*slope*) kenaikan dan penurunan suhu operasi. Tiga set data operasional tungku sinter Carbolite CTF/-/600, yaitu untuk suhu maksimum: 900 °C, 1000 °C, dan 1200 °C digunakan untuk menentukan *natural response* tungku. Ketiga data tersebut seragam dalam perintah perubahan suhu-naik dan turun nya yaitu berturut-turut 200 °C/jam dan -150 °C/jam.

Dari data operasional tersebut diteliti (ditentukan) pada suhu berapa arus listrik ke filamen pemanas tungku telah menjadi nol. Kondisi ini akan menghasilkan *response* suhu alamiah dari tungku (*natural response*) karena suhu tungku menurun tanpa dikendalikan. Dimulai dari data ketika arus filamen tungku nol tersebut hingga akhir percobaan, persamaan matematis dari data tersebut ditentukan. Persamaan matematis tersebut adalah persamaan *natural-response* (penurunan alamiah) dari tungku sinter untuk suhu-turun yang berbentuk fungsi eksponensial meluruh (*decay*). Dengan fungsi tersebut, dilakukan ekstrapolasi untuk data sebelum arus ke filamen pemanas menjadi nol mengikuti fungsi *natural-response* suhu turun yang terbentuk, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Titik A adalah suhu yang menjadi amplitudo dari fungsi eksponensial pendekatan *natural-response* suhu-turun, dan k adalah konstanta yang terbentuk dari proses *curve-fitting* terhadap data tersebut. Proses *curve-fitting* dilakukan menggunakan fasilitas yang ada pada program Microsoft-Excel.



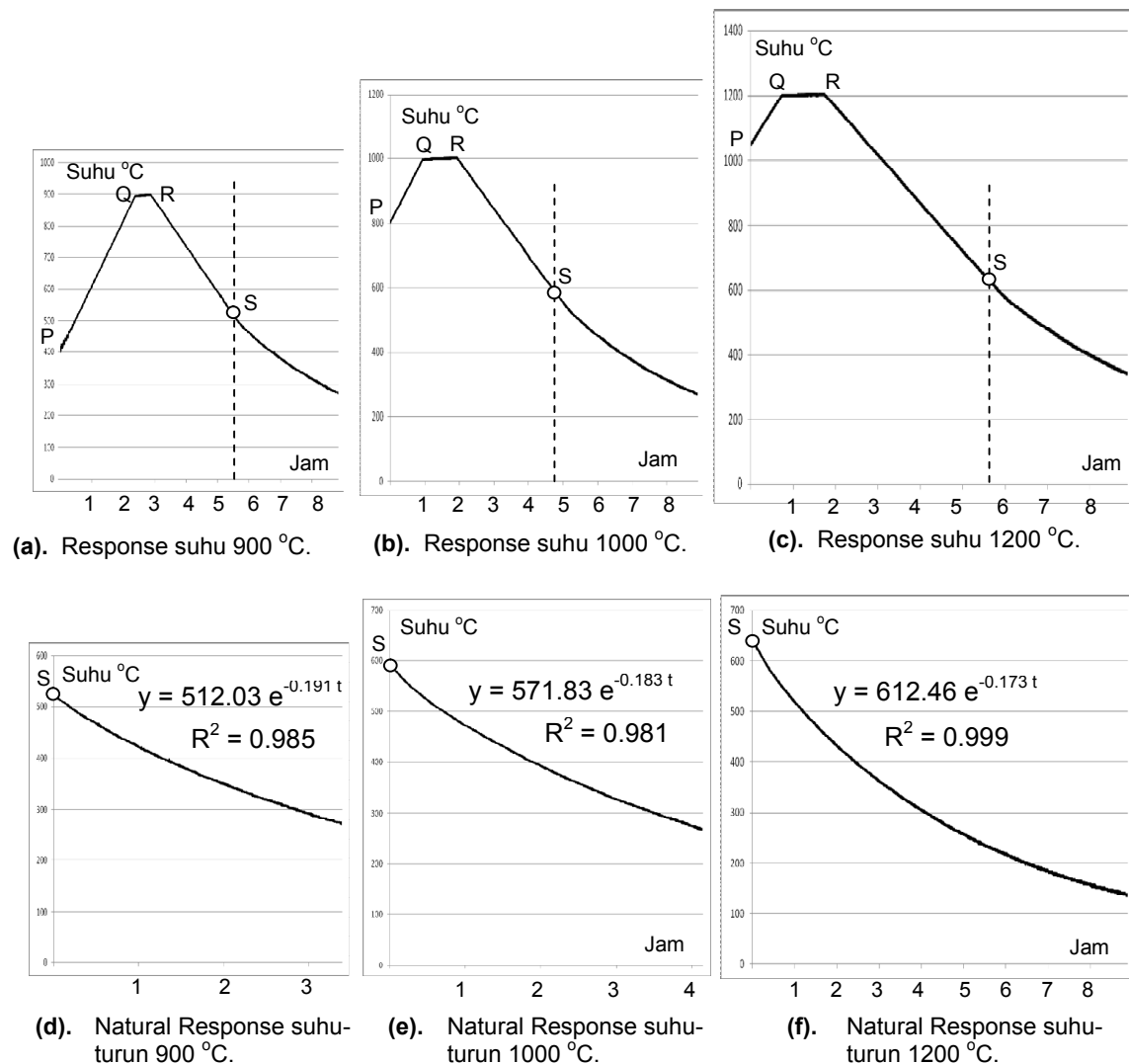
Gambar 3. Penurunan suhu tungku (*natural-response* dari data eksperimen).

Turunan (*diferensial*) dari persamaan matematik *natural-response* adalah persamaan matematik koefisien arah (*slope*) dari fungsi *natural-response* tersebut. Menggunakan dua persamaan tersebut dan data kejadian rusaknya tabung alumina tungku, pendekatan batasan aman operasional tungku dapat ditentukan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Eksperimen

Tiga set data percobaan operasi tungku sinter Carbolite CTF/-/600 untuk suhu operasi maksimum 900 °C, 1000 °C, dan 1200 °C yang akan digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.a. s/d 4.c. Data penurunan suhu secara alamiah ditemukan dimulai dari titik S ke kanan sehingga diperoleh Gambar 4.d. s/d 4.f. Dengan menggunakan teknik *curve-fitting* diperoleh persamaan matematik *natural-response* penurunan suhu dari masing-masing data tersebut, yaitu Y_{900} , Y_{1000} , dan Y_{1200} sehingga konstanta waktu nya ($\sigma = 1/k$) dapat ditentukan. Dua jenis data (persamaan matematik *natural-response* dan konstanta waktu nya) diberikan pada Tabel 1. Amplitudo dari persamaan *natural-response* yang diperoleh adalah suhu ketika filamen pemanas tungku tidak dikendalikan lagi atau arus listrik ke filamen pemanas nol untuk masing-masing suhu operasi maksimum berdasarkan hasil proses *curve-fitting*.



Gambar 4. Data grafis operasi tungku sinter Carbolite CTF/-/600.

Tabel 1. Data numerik dari Gambar 4.

Suhu operasi maksimum	Natural response suhu turun ^{*)} , jam		Konstanta waktu (σ), jam
	900 °C	$Y_{900} = 512.03 e^{-0.191 t}$	5.23
1000 °C	$Y_{1000} = 571.83 e^{-0.183 t}$	5.46	
1200 °C	$Y_{1200} = 612.46 e^{-0.173 t}$	5.78	

^{*)} t: waktu dalam jam.

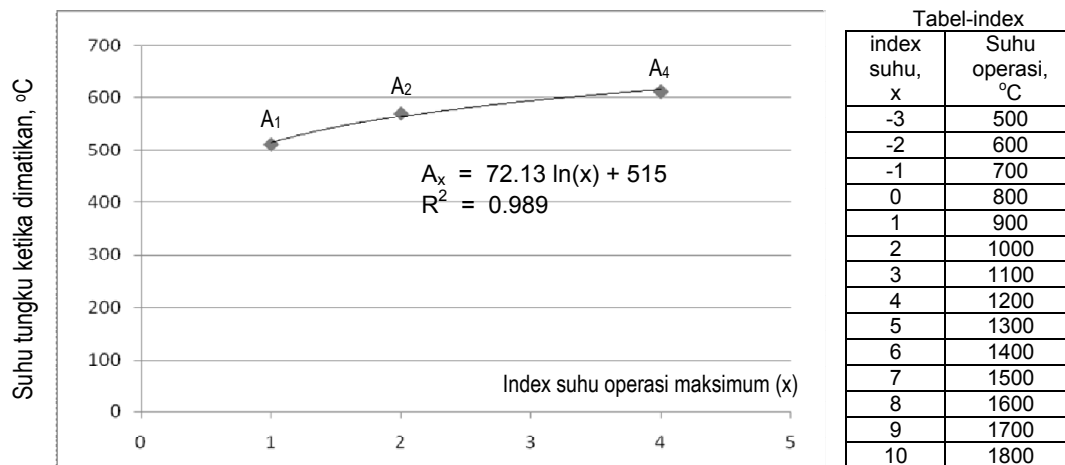
Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa konstanta waktu untuk *natural-response* suhu-turun berbeda (tidak tetap) untuk suhu operasi maksimum tungku yang berbeda. Makin tinggi suhu operasi, makin besar konstanta waktunya. Hal ini dapat dipahami karena makin tinggi suhu operasi yang digunakan berarti makin besar energy panas yang diberikan dan diterima sistem tungku, sehingga proses pendinginannya akan menjadi makin lambat yang ditandai dengan naiknya konstanta waktu. Perubahan lambatnya pendinginan tidak bersifat linier dengan naiknya suhu operasi, tetapi perubahan kenaikannya dari data terlihat makin mengecil, sehingga pendekatan *curve-fitting* menggunakan fungsi logaritmis akan digunakan.

4.1 Batas suhu mematikan operasi tungku

Batas suhu aman untuk diperbolehkan mematikan tungku adalah amplitudo dari masing-masing persamaan pada Tabel 1, yaitu suhu pada titik S pada Gambar 4.

Pendekatan ini diambil karena pada suhu tersebut adalah titik awal penurunan suhu tungku secara alamiah. Sistem pengendali suhu tidak bisa lagi menurunkan suhu tungku melalui perintahnya, karena saat itu arus listrik ke filamen pemanas tungku sudah nol. Pada posisi suhu tersebut, tungku dimatikan atau tidak dimatikan akan memberikan hasil yang sama, tabung alumina tidak akan rusak, kecuali jika *slope* penurunan suhunya saat itu melebihi batas. Untuk itu, data yang digunakan adalah data yang tidak menyebabkan tabung alumina rusak, sehingga suhu pada titik S tersebut merupakan amplitudo dari *natural response* tungku untuk data bersangkutan.

Gambar 4 adalah tiga-set sample data yang saat ini dimiliki. Tiga amplitudo persamaan pada Tabel 1 tersebut digunakan untuk proses *curve-fitting* menggunakan fungsi logaritmis (Gambar 5), dan diperoleh persamaan matematis sebagai berikut.



Gambar 5. Proses *curve-fitting* untuk nilai suhu tungku boleh dimatikan.

$$A_x = 72.13 \ln(x) + 515 \quad (1)$$

Dengan A_x : suhu tungku boleh dimatikan °C untuk suhu operasi maksimum pada index suhu x.

x : index suhu operasi maksimum (tabel pada Gambar 5).

Untuk operasi tungku dengan suhu operasi maksimum 1750 °C (diperoleh index-suhu = 9.5), berdasarkan persamaan (1) diperoleh nilai suhu sebagai berikut:

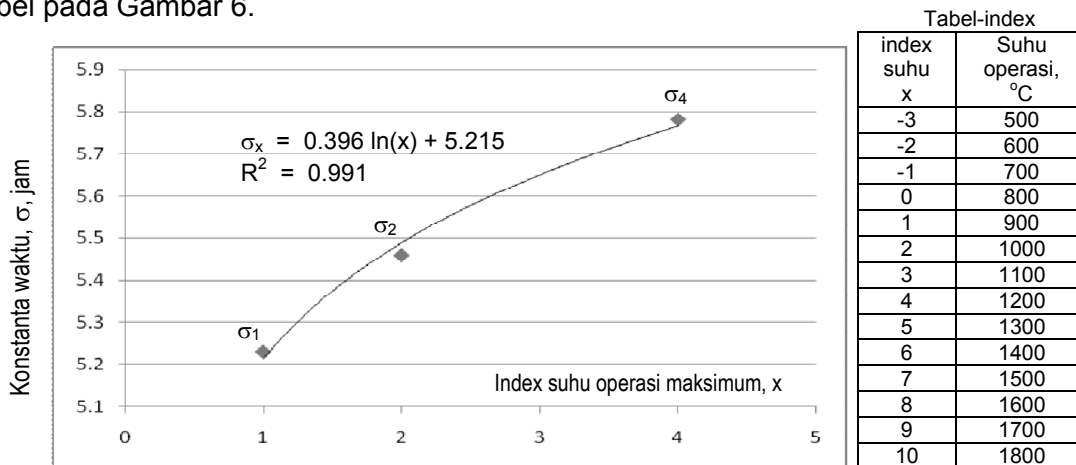
$$\begin{aligned} A_x &= 72.13 \ln(x) + 515 \\ A_{1750} &= 72.14 \ln(9.5) + 515 \\ A_{1750} &= 677 \text{ °C} \end{aligned}$$

Tungku sinter mini Carbolite CTF/-/600 boleh dimatikan dengan aman untuk operasi dengan suhu maksimum 1750 °C, tanpa tabung aluminanya rusak, yaitu ketika suhu tungku menunjuk nilai 677 °C atau lebih rendah. Kejadian retak dan patahnya tabung alumina tungku karena tungku dimatikan ketika suhu tungku pada suhu 1548 °C.

4.3 Batas *slope* perubahan suhu

Retak dan patahnya tabung alumina terjadi karena tungku dimatikan pada suhu 1548 °C pada posisi suhu tungku menurun dengan *slope* -150 °C/jam dari suhu maksimum 1750 °C. Data *natural-response* suhu-turun untuk operasi 1750 °C tidak tersedia. Untuk mengetahui pada *slope* berapa tabung alumina tersebut rusak dilakukan pendekatan menggunakan tiga set data pada Gambar 4. Pendekatan dilakukan menggunakan teknik ekstrapolasi konstanta waktu dari data tersebut. Dengan teknik *curve-fitting* dari data pada Tabel 1, dan mendekatinya menggunakan fungsi logaritmis,

diperoleh persamaan matematik konstanta-waktu sebagai fungsi index-suhu operasi maksimum, dimana index-suhu operasi setara dengan suhu operasi seperti ditunjukkan tabel pada Gambar 6.



Gambar 6. Proses *curve-fitting* konstanta waktu σ .

$$\sigma_x = 0.396 \ln(x) + 5.215 \quad (2)$$

Dengan σ_x : konstanta waktu untuk suhu operasi maksimum pada index-suhu x.
x : index-suhu operasi maksimum (tabel pada Gambar 6) .

Menggunakan persamaan (2) dan Tabel index-suhu untuk suhu operasi maksimum 1750 °C (diperoleh index = 9.5) dihitung konstanta-waktu nya $\sigma = 6.106$ jam. Untuk menentukan *slope* pada suhu 1548 °C, dibuat fungsi eksponensial dengan amplitudo 677 °C dengan koefisien variabel nya $-1/\sigma$, yang nilainya -0.163 . Angka 677 ditentukan menggunakan persamaan (1) untuk suhu operasi maksimum 1750 °C. Turunan (*derivative*) dari fungsi tersebut merupakan fungsi kecepatan perubahan suhu. Sehingga perhitungan untuk *slope* (kecepatan perubahan suhu) ketika tabung alumina retak dan patah, yaitu pada suhu 1548 °C, adalah sebagai berikut.

$$\begin{array}{l} y = A_{9.5} e^{-0.163 t} \\ 1548 = 677 e^{-0.163 t} \\ t = -5.074 \text{ jam} \end{array} \quad \parallel \quad \begin{array}{l} y' = -110.35 e^{-0.163 t} \\ y'_{1548} = -110.35 e^{-0.163 (-5.074)} \\ y'_{1548} = -257 \text{ }^\circ\text{C/jam} \end{array}$$

Tabung alumina tungku sinter mini Carbolite CTF/-/600 retak dan patah, karena dimatikan pada suhu 1548 °C, berdasarkan perhitungan diatas, peristiwa itu terjadi pada kecepatan penurunan suhu (*slope*) $-257 \text{ }^\circ\text{C/jam}$.

Petunjuk operasi tungku sinter mini Carbolite CTF/-/600 membatasi kecepatan kenaikan dan penurunan suhu dalam operasinya adalah $|300 \text{ }^\circ\text{C/jam}|$. Selama ini operasi tungku dilakukan hanya dengan kenaikan dan penurunan suhu berturut-turut $200 \text{ }^\circ\text{C/jam}$ dan $-150 \text{ }^\circ\text{C/jam}$. Kecepatan kenaikan dan atau penurunan suhu $|300 \text{ }^\circ\text{C/jam}|$ belum pernah dilakukan (tungku sinter mini Carbolite CTF/-/600 ini tungku baru). Berdasarkan data eksperimen dan pendekatan perhitungan dalam makalah ini, kecepatan kenaikan atau penurunan operasi tungku harus lebih rendah dari $|257 \text{ }^\circ\text{C/jam}|$, karena pada kecepatan tersebut tabung alumina retak dan patah.

Pertanyaan muncul mengapa pada nilai *slope* yang masih dibawah dari batas nilai yang direkomendasikan oleh fabrikasi tungku berakibat tabung alumina tungku menjadi rusak. Kemungkinan hal ini dikarenakan bahwa tabung alumina yang digunakan adalah tabung baru (termasuk tungku yang digunakan juga tungku baru). Dari pengalaman mengoperasikan tungku sinter yang menggunakan batu alumina (tungku ME-06.1 di PTBBN-BATAN), berkali-kali beroperasi pada suhu operasi maksimum 1800 °C, tidak

terjadi masalah dengan batu alumina yang ada di dalam ruang pemanas tungku tersebut. Ketika mengoperasikan tungku ME-06.2 dengan menggunakan batu alumina baru, dan langsung dioperasikan pada suhu operasi maksimum 1800 °C, batu alumina baru tersebut meleleh di dalam ruang tungku.

Pemanasan langsung terhadap batu alumina baru membuat batu tersebut meleleh, sedangkan pemanasan batu alumina baru yang operasinya dilakukan secara bertahap berulang-ulang dari suhu rendah terus sampai pada suhu maksimum yang diperbolehkan yaitu 1800 °C, menghasilkan bahwa batu alumina baru tersebut selanjutnya aman (tidak leleh) pada suhu 1800 °C. Analogi kejadian tersebut kemungkinan berlaku juga pada tabung alumina tungku sinter mini Carbolite CTF/-/600. Jika telah berulang-ulang dioperasikan menggunakan slope dari |200 °C/jam| dan terus nilai *slope* tersebut dinaikkan secara bertahap untuk operasi berikutnya hingga sampai pada nilai slope |300 °C/jam|, maka setelah kondisi pengulangan tersebut dilalui, tungku sinter mini Carbolite CTF/-/600 kemungkinan akan sesuai dapat beroperasi mengikuti batasan kerja *slope* maksimum |300 °C/jam|.

5. KESIMPULAN

Analisis retak dan patahnya refraktori tungku sinter mini Carbolite CTF/-/600 milik PTBBN-BATAN telah dilakukan. Batas aman untuk operasi tungku telah dilanggar sehingga refraktori tabung alumina tungku tersebut menjadi retak dan patah. Dari data eksperimen dan proses ekstrapolasi yang dilakukan, batasan kecepatan kenaikan dan penurunan suhu yang direkomendasikan oleh fabrikasi tungku tidak sesuai dengan hasil analisis data eksperimen. Menurut buku petunjuk operasi tungku dari fabrikasi, kecepatan perubahan suhu tungku boleh dilakukan hingga nilai maksimum |300 °C/jam|, tetapi dari data eksperimen dan proses ekstrapolasi yang dilakukan, tabung alumina ruang tungku retak dan patah terjadi pada kecepatan penurunan suhu (*slope*) -257 °C/jam. Oleh karena itu, proses sintering yang menggunakan gas berbahaya yang dapat meledak, misalnya gas hydrogen, yang harus dioperasikan dengan kecepatan perubahan suhu (*slope*) |300 °C/jam| harus ditunda, sampai percobaan operasi menggunakan *slope* tersebut terbukti aman. Batasan suhu untuk mematikan sistem tungku dipengaruhi oleh suhu operasi maksimum yang digunakan. Batasan kecepatan maksimum perubahan suhu untuk operasional adalah |257 °C/jam|. Eksperimen menggunakan kecepatan lebih tinggi perlu dilakukan bertahap berulang-ulang hingga batas kecepatan perubahan suhu yang direkomendasikan oleh fabrikasi tungku dapat digunakan. Persamaan (1) dan (2) perlu di-*update* (revisi) menggunakan data yang lebih banyak lagi. Dalam makalah ini hanya tiga-set data yang digunakan, karena hanya tiga-set data tersebut yang tersedia saat makalah ini ditulis.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Encyclopedia., 2013, *The Columbia Electronic Encyclopedia.*, Columbia University Press. <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Sintering>. di-access tanggal 27 November 2014.
- [2]. Li Kai, et.al., 2014, *Normalized Evaluation of Thermal Shock Resistance for Ceramic Materials.*, Journal of Advanced Ceramics, Vol. 3, No. 3, P. 250-258.
- [3]. Kingery WD, Bowen HK, dan Uhlmann DR, 1976, *Introduction to Ceramics*, John Wiley and Sons. 2nd ed. New York. P. 817-830.
- [4]. Auerkari P., 1996, *Mechanical and Physical Properties of Engineering Alumina Ceramics.*, Research Notes 1792, Technical Research Center of Finland, Espoo.
- [5]. Smith RJ, 1971, *Circuits, Devices, and Systems*, John Wiley & Sons, New York.
- [6]. Suntoro A., Juli 2007., *Teknik Sampling Data Pada Sistem Kendali Suhu Tungku Sinter Pelet UO₂ ME-06*. Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi PTNBR – BATAN., Bandung. P. 215-223.