

Analisis Distribusi Temperatur dan Aliran Fluida pada Proses Pengeringan Butiran Teh Bentuk Silinder Di Dalam *Fluidized Bed Dryer* Menggunakan *Computational Fluid Dynamic (CFD)*

MSK Tony Suryo Utomo^{a,*}, Eflita Yohana^a, Mauli Astuti Khoiriyah^b

^aDosen Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

^bMahasiswa Program Studi S1, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: mauiast96@gmail.com

Abstract

Drying is simultaneously heat and vapor transfer process that needed heat energy to evaporate the moisture from the object that needed to be dried. This research is done by simulation. The product chosen for this simulation is tea. A numerical simulation of mass transfer in tea is done by placing the tea material in the domain computation of an external flow. This study aims to analyze the temperature distribution of tea particles using Computational Fluid Dynamics (CFD) and analyze the effect of variations inlet speed and inlet temperature on drying time so that the optimum drying method for tea drying is obtained. The decrease of mass in tea was calculated analytically using the mass loss rate equation. Tea is modeled in a shape like a cylinder after it has been whitered. The airflow inlet velocity and inlet temperature are varied according to the minimum and maximum fluidization and based on the drying temperature of tea for fluidized bed dryer. The time used to decrease the moisture content up to 3% based on temperature at velocity 1,6 m/s is 354 s (88°C), 300 s (93°C), and 256 s (98°C) respectively. While at 2,6 m/s of velocity inlet the required time is 277 s (88°C), 234 s (93°C), and 200 s (98°C) and for 3,6 m/s velocity inlet is 235 s (88°C), 199 s (93°C), and 169 s (98°C) respectively. For optimal drying of tea is done by increasing the inlet speed of fluid flow compared with increasing the temperature.

Keywords: Decrease of mass, flow velocity, drying temperature, moisture content, drying time.

Abstrak

Pengeringan merupakan proses perpindahan panas dan uap air secara simultan yang memerlukan energi panas untuk menguapkan kandungan air dari bahan yang akan dikeringkan. Penelitian ini dilakukan dengan cara simulasi. Produk yang dipilih untuk simulasi ini yaitu teh. Simulasi numerik perpindahan massa pada teh dilakukan dengan menempatkan material teh pada domain komputasi sebuah aliran eksternal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi temperatur pada partikel teh dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dan menganalisis pengaruh variasi kecepatan inlet dan temperatur inlet terhadap waktu pengeringan sehingga diperoleh metode pengeringan yang paling optimum pada pengeringan teh. Penurunan massa pada teh dihitung secara analitik dengan menggunakan persamaan laju penurunan massa. Teh dimodelkan dengan bentuk menyerupai silinder setelah dilakukan pelayuan untuk kemudian dikeringkan. Kecepatan masuk aliran udara dan temperatur masuk divariasikan sesuai dengan batas kecepatan minimum dan maksimum fluidisasi dan temperatur pengeringan teh untuk fluidized bed dryer. Waktu yang digunakan untuk menurunkan kadar air hingga 3% berdasarkan temperatur pada kecepatan 1,6 m/s secara berurutan adalah 354 s (88°C), 300 s (93°C), dan 256 s (98°C). Sementara pada kecepatan 2,6 m/s waktu yang dibutuhkan adalah 277 s (88°C), 234 s (93°C), dan 200 s (98°C) serta untuk kecepatan 3,6 m/s berturut-turut 235 s (88°C), 199 s (93°C), dan 169 s (98°C). Untuk pengeringan teh lebih optimal dilakukan dengan menaikkan kecepatan masuk aliran fluida dibandingkan dengan menaikkan temperatur.

Kata kunci: Kadar air, kecepatan aliran masuk, penurunan massa, temperatur pengeringan, waktu pengeringan.

1. Pendahuluan

Saat ini Indonesia menduduki peringkat ke-14 negara eksportir teh dunia dengan pangsa pasar 1,38% dari total ekspor teh dunia. Tiap tahun, Indonesia mengeksport sekitar 50.000 ton hingga 70.000 ton teh ke seluruh dunia. Di pasar ekspor, Indonesia memiliki teh berkualitas baik dan aroma khas yang disukai oleh masyarakat global. Hal tersebut membuat ekspor teh Indonesia masih dapat terus dikembangkan. Permasalahan yang dihadapi per-teh-an nasional salah satunya ialah mutu teh rakyat yang masih rendah dan belum memenuhi SNI (kadar serat, kadar air dan kadar abu tak

larut asam yang tinggi) akibat terbatasnya penguasaan teknologi pengolahan produk dan belum mempunya petani mengikuti teknologi anjuran sebagaimana yang direkomendasikan (*Good Agriculture Practice/GAP; Good Manufacture Process/GMP*); standar kualitas produk (ISO), serta mesin dan peralatan yang kurang mendukung [1].

Di negara kita penggunaan mesin pengering masih terbatas pada industri menengah dan industri besar sedangkan untuk industri kecil proses pengeringan masih dilakukan dengan sistem penjemuran dengan memanfaatkan panas matahari. Proses pengeringan secara mekanis mempunyai banyak keunggulan dibandingkan dengan cara pengeringan tradisional, antara lain dalam hal volume bahan yang dikeringkan, keseragaman hasil, mutu, baik ditinjau dari segi keberhasilannya, kemurnian, dan kebersihannya.

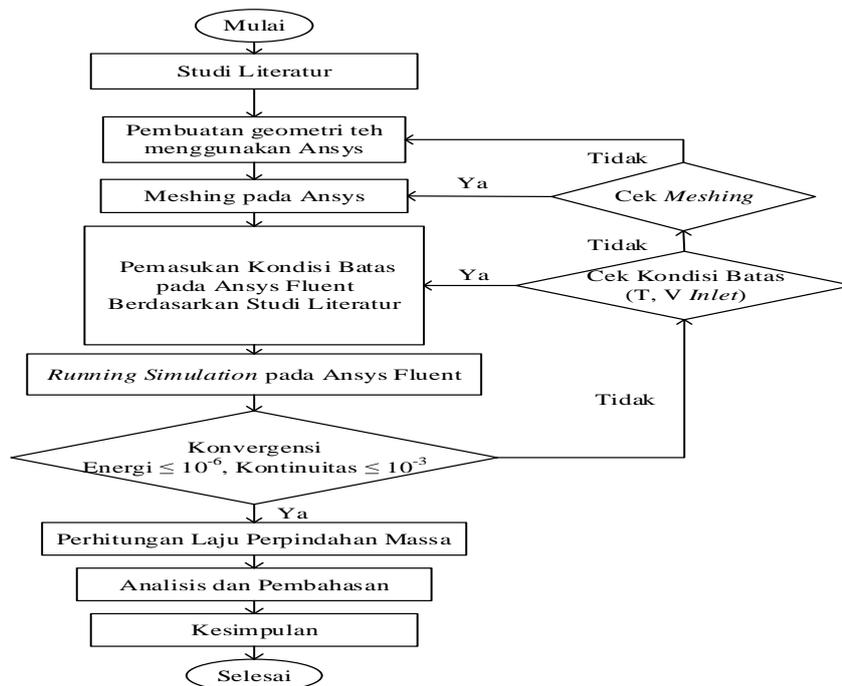
Keuntungan dari pengeringan itu sendiri adalah dapat meningkatkan stabilitas penyimpanan. Hal ini dikarenakan terjadinya pengurangan berat dan volume produk akibat dari pengurangan kandungan air. Keuntungan lainnya adalah pengemasan menjadi lebih mudah serta biaya untuk pengemasan, penyimpanan, dan pengangkutan menjadi lebih murah. Selain itu proses pengeringan juga mempunyai kelemahan yaitu kualitas dan nilai nutrisi dalam pangan menjadi rusak [2].

Pengeringan hampan terfluidasi (*fluidized bed drying*) adalah salah satu proses pengeringan dengan memanfaatkan aliran udara panas dengan kecepatan tertentu yang dilewatkan menembus hampan bahan sehingga hampan bahan tersebut memiliki sifat seperti fluida. Jenis pengeringan menggunakan FBD ini umum dipakai di Indonesia dimana suhu masuk (inlet) yang disarankan tidak boleh terlalu rendah maupun terlalu tinggi, optimal 85-100 °C, dan suhu keluar (outlet) 75-80°C [3].

Pada penelitian ini *fluidized bed dryer* akan digunakan untuk mengeringkan teh dimana teh dimodelkan secara partikel dan digulung menyerupai silinder kemudian disimulasikan menggunakan *software* CFD. Penggunaan CFD pada penelitian ini dipilih karena memiliki beberapa keuntungan salah satunya yaitu dapat menunjukkan distribusi aliran, penurunan massa, dan perpindahan panas secara jelas. Keuntungan lain yang dapat diperoleh yaitu sangat memungkinkan untuk menganalisa parameter masukan pada pengeringan yang sesuai dengan waktu dan biaya yang lebih minim.

2. Bahan dan Metode Penelitian

2.1. Diagram Alir Penelitian

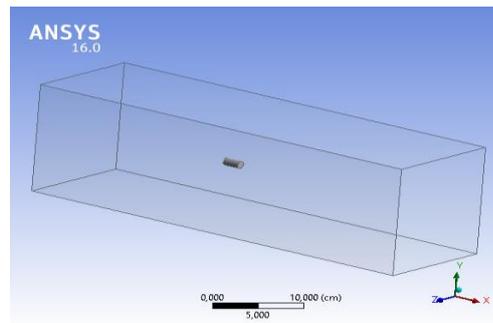


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2. Simulasi Pengeringan Butiran Teh

Pada penelitian ini diambil satu sampel partikel teh untuk disimulasikan. Satu partikel bahan makanan dapat disimulasikan untuk mewakili keseluruhan partikel bahan makanan yang dikeringkan. Oleh karena itu pada penelitian ini diambil satu sampel partikel teh yang dikeringkan [4]

Simulasi dilakukan dengan proses pembentukan geometri teh dan domain komputasi simulasi. Pemodelan geometri dibuat dengan bentuk silinder dengan diameter 1 cm dan panjang 2 cm dimana bentuk ini merupakan salah satu jenis pembentukan teh sebelum dikeringkan. Geometri teh ditunjukkan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan Geometri Simulasi.

Untuk material teh yang digunakan pada simulasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Material Teh [5].

No.	Sifat	Nilai
1.	Panas Spesifik	1,59-1,66 kJ / kg. K
2.	Konduktivitas Termal	0,0362-0,0486 W / m. K
3.	Densitas	433 kg/m ³
4.	Sphericity	0,83

Untuk melakukan simulasi, terlebih dahulu ditentukan kecepatan minimum fluidisasi. pada *fluidized bed dryer* diperlukan kecepatan minimum dan kecepatan maksimum fluidisasi untuk menentukan titik awal terjadinya fluidisasi dan menghindari material yang dikeringkan keluar dari *fluidized bed dryer*. Kecepatan minimum dan maksimum fluidisasi dapat dihitung dengan persamaan 1 [6]:

$$U_{mf} = \frac{(\psi d_p)^2}{150\mu} [g(\rho_c - \rho_g)] \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \tag{1}$$

Gravitation Term

$$\eta = g(\rho_c - \rho_g)$$

Porositas Minimum Fluidisasi

$$\varepsilon_{mf} = 0,586\psi^{-0,72} \left(\frac{\mu^2}{\rho_g \eta d_p^3} \right)^{0,029} \left(\frac{\rho_g}{\rho_c} \right)^{0,21}$$

Kecepatan maksimum fluidisasi dapat dihitung dengan persamaan :

$$U_t = \left(\frac{1,78 \cdot 10^{-2} \eta^2}{\rho_g \mu} \right)^{\frac{1}{3}} d_p \tag{2}$$

Sebelum dilakukan *running simulation* penentuan kondisi batas pada simulasi pengeringan teh dapat dilihat pada Table 2.

Tabel 2. Kondisi batas simulasi pengeringan teh

No.	Parameter	Nilai
1.	Domain Komputasi	15 x 15 x 50 cm
2.	Pengaturan General	- Transient - Gravity
3.	Model Aliran	- Laminar - Energy Equation - Species Transport
5.	Kondisi Batas	- Inlet : Velocity Inlet - Outlet : Pressure outlet
6.	Monitor	Kriteria Konvergensi - Continuity : 10 ⁻³ - Energy : 10 ⁻⁶

2.3 Perhitungan Penurunan Massa

2.3.1 Koefisien Difusi Massa

Salah satu pasangan zat yang paling banyak aplikasinya adalah uap air dan udara. Secara khusus persamaan koefisien difusi massa pasangan ini telah dirumuskan oleh Marrero dan Mason (1972). Persamaan ini hanya berlaku untuk interval suhu $280K < T < 450K$ dan dapat dituliskan sebagai berikut [7] :

$$D_{air-udara} = 1,87 \cdot 10^{-10} \frac{T^{2,072}}{P} \quad (3)$$

dimana $D_{air-udara}$ merupakan koefisien difusi massa air pada udara dan sebaliknya (m^2/s), T temperatur (K), dan P adalah tekanan (atm).

2.3.2 Perpindahan Massa Konveksi

a. Koefisien Perpindahan Massa

Koefisien perpindahan massa dapat dirumuskan dengan menggunakan bilangan Sherwood. Bilangan Sherwood merupakan bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk mengetahui perpindahan massa. Jika untuk perpindahan kalor digunakan bilangan Nusselt, maka untuk perpindahan massa digunakan bilangan Sherwood dengan membedakan bilangan Prandtl pada bilangan Nusselt dengan bilangan Schmidt [7].

$$Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}} \quad (4)$$

di mana Sh merupakan Bilangan Sherwood dan D_{AB} merupakan difusivitas massa (m^2/det)

b. Bilangan Schmidt

Bilangan schmidt adalah sebuah bilangan tak-berdimensi yang didefinisikan sebagai rasio difusifitas momentum (viskositas) terhadap difusifitas massa diffusivity. Bilangan ini digunakan untuk menentukan sifat aliran-aliran fluida yang mana pada aliran tersebut proses koveksi-difusi momentum dan massa berlangsung simultan.

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (5)$$

c. Koefiseien Perpindahan Massa [7]

Dengan menggunakan Analogi Chilton Colburn, koefiseien perpindahan massa dapat ditulis dengan persamaan berikut :

$$h_m = \frac{h}{\rho c_p \left(\frac{\alpha}{D_{AB}} \right)^{2/3}} \quad (6)$$

d. Tinjauan Perpindahan Massa

Perpindahan massa dapat dihitung menggunakan analogi perpindahan panas. Perpindahan massa dirumuskan dengan:

$$\dot{m}_{eva} = h_m A (\rho_s - \rho_\infty) \quad (7)$$

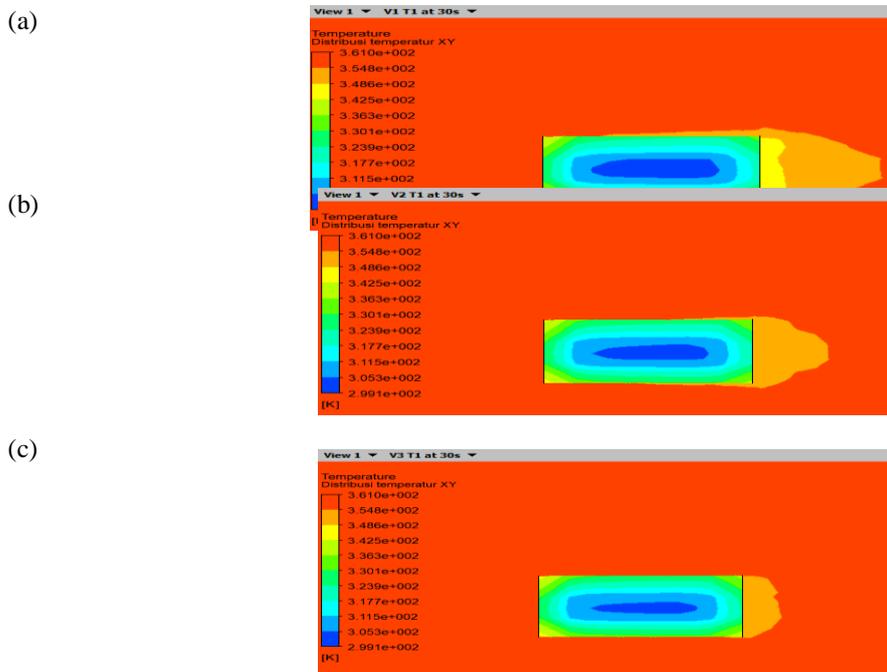
di mana ρ_s merupakan massa jenis pada permukaan benda (kg/m^3) dan ρ_∞ merupakan massa jenis fluida yang mengalir (kg/m^3)

3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini dilakukan variasi 3 kecepatan *inlet* yang berbeda yaitu 1,6 m/s, 2,6 m/s, dan 3,6 m/s dimana kecepatan tersebut berada diantara kecepatan minimum (0,22 m/s) dan maksimum fluidisasi (24,42 m/s). Selain itu pada simulasi ini juga dilakukan variasi temperatur *inlet* yaitu 88°C, 93°C, dan 98°C. Pada penelitian ini kemudian diamati perubahan temperature permukaan teh yang nantinya digunakan untuk menghitung laju penurunan massa pada teh. Selain itu kontur distribusi temperatur bagian dalam teh juga diamati sebagai akibat adanya difusi pada teh.

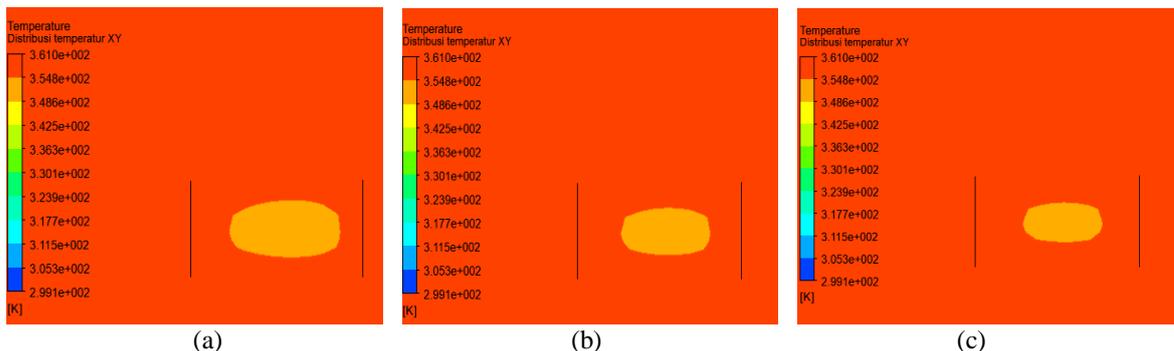
3.3 Kontur Distribusi Temperatur pada Teh

Kontur temperatur yang ditampilkan adalah kondisi teh pada awal pengeringan (30 detik awal), dan kondisi teh diakhir proses pengeringan (235 detik). Hasil simulasi berupa distribusi temperatur dilihat pada bagian tengah domain komputasi yaitu pada bidang XY. Distribusi temperatur permukaan teh pada awal pengeringan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Distribusi Temperatur Awal Pengeringan. (a) Kecepatan inlet 1,6 m/s dan temperatur inlet 88 °C, (b) Kecepatan inlet 2,6 m/s dan temperatur inlet 88 °C, (c) Kecepatan inlet 3,6 m/s dan temperatur inlet 88 °C

Gambar 3 menunjukkan bahwa variasi kecepatan *inlet* menyebabkan perbedaan luasan daerah temperatur rendah pada bagian belakang teh atau sisi yang menghadap *outlet*. Semakin tinggi kecepatan *inlet* maka luas daerah temperatur rendah akan semakin kecil. Temperatur pada akhir pengeringan juga dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Distribusi Temperatur Akhir Pengeringan. (a) Kecepatan inlet 1,6 m/s dan temperatur inlet 88 °C, (b) Kecepatan inlet 2,6 m/s dan temperatur inlet 88 °C, (c) Kecepatan inlet 3,6 m/s dan temperatur inlet 88 °C

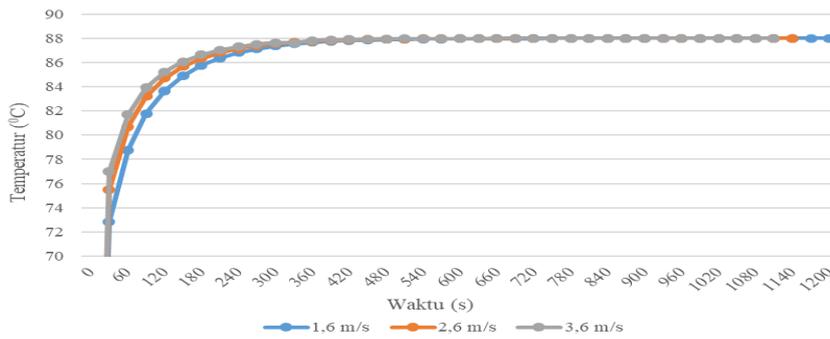
Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa adanya variasi kecepatan inlet pada pengeringan menyebabkan daerah dengan distribusi temperatur yang berbeda untuk setiap kecepatan. Semakin tinggi kecepatan inlet maka semakin sempit daerah dengan temperatur rendah pada bagian dalam teh. Pada kecepatan rendah penyerapan energi panas terjadi dengan lambat dan waktu yang dibutuhkan untuk penyerapan lebih lama.

3.2 Distribusi Temperatur pada Teh

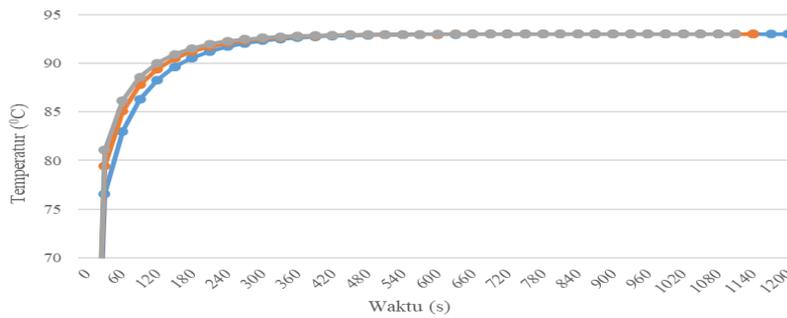
Distribusi temperatur kemudian diplot kedalam sebuah grafik temperatur pada sumbu-y dan waktu pengeringan pada sumbu-x. Grafik kenaikan temperatur pada permukaan teh dapat dilihat pada Gambar 5.

Pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa kenaikan temperatur terjadi sangat cepat pada awal pengeringan baik pada kecepatan inlet 1,6 m/s, 2,6 m/s, maupun 3,6 m/s disemua variasi temperatur inlet. Pada awal pengeringan yaitu pada

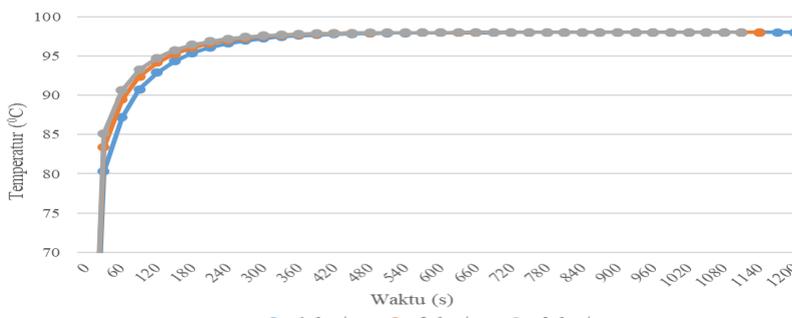
detik ke 30 temperatur pada permukaan teh terus mengalami kenaikan secara signifikan. Setelah mengalami kenaikan yang signifikan, temperatur akan konstan mendekati temperatur inlet yaitu 88°C, 93°C, dan 98°C.



(a) Temperatur Inlet 88°C



(b) Temperatur Inlet 93°C



(c) Temperatur Inlet 98°C

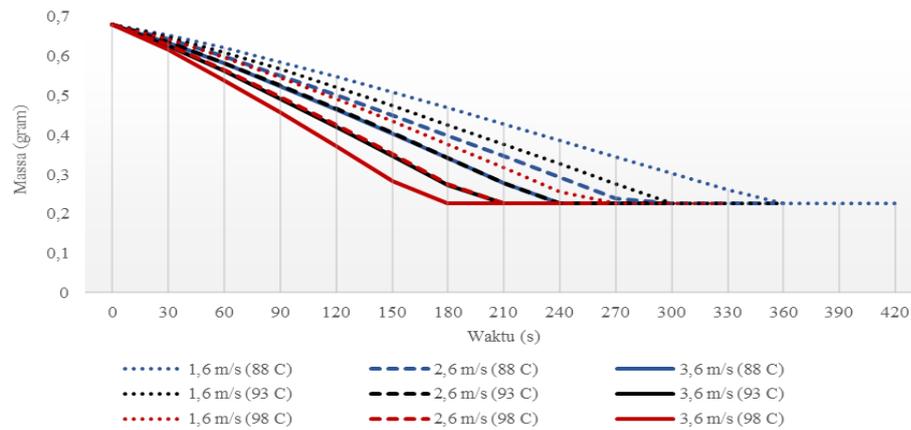
Gambar 5. Grafik Kenaikan Temperatur

3.3 Grafik Penurunan Massa

Penurunan massa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan perpindahan panas dan analogi perpindahan massa pada persamaan (3) sampai (7). Berdasarkan temperatur rata-rata pada permukaan teh dan data tambahan dari tabel sifat termofisik gas pada tekanan atmosfer maupun sifat udara pada temperatur saturasi dapat dihitung penurunan massa. Penurunan massa teh dihitung setiap 30 detik pengeringan dan kemudian diplot grafik penurunan massa terhadap waktu pengeringan. Grafik penurunan massa pada teh dapat dilihat pada Gambar 6.

Pada Gambar 6 dapat dilihat grafik penurunan massa pada temperatur dan kecepatan inlet yang berbeda. Pada grafik tersebut terlihat perbedaan waktu pengeringan untuk masing-masing variasi temperatur dan kecepatan inlet. Pada awalnya teh memiliki kadar air sekitar 70% dan berat teh basah 0,68 gr. Setelah dilakukan pengeringan berat teh akan berkurang dikarenakan adanya penguapan air dimana kadar air teh yang baik yaitu mencapai 3%. Kadar air pada teh harus dikurangi sebesar 67% agar kualitas teh tetap baik.

Untuk mencapai kandungan air didalam teh 3% atau berat teh kering sekitar 0,22 gr diperlukan waktu pengeringan yang berbeda untuk setiap temperatur dan kecepatan inlet. Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa pengeringan paling cepat terjadi pada kondisi kecepatan dan temperatur tinggi. Pada temperatur 98°C dan kecepatan inlet 3,6 m/s diperoleh waktu pengeringan yang paling cepat yaitu 169 detik atau sekitar 2,82 menit. Sedangkan waktu pengeringan yang paling lama yaitu 354 detik atau sekitar 5,9 menit pada temperatur 88°C dan kecepatan inlet 1,6 m/s. Waktu pengeringan untuk masing-masing temperatur dan kecepatan inlet dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 6. Penurunan Massa Pada Teh

Tabel 3. Perbandingan Waktu Pengeringan Butiran Teh

No.	Temperatur Inlet	Kecepatan Inlet	Waktu Pengeringan
1	88 ⁰ C	1,6 m/s	354 detik
		2,6 m/s	277 detik
		3,6 m/s	235 detik
2	93 ⁰ C	1,6 m/s	300 detik
		2,6 m/s	234 detik
		3,6 m/s	199 detik
3	98 ⁰ C	1,6 m/s	256 detik
		2,6 m/s	200 detik
		3,6 m/s	169 detik

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan dan temperatur *inlet* maka akan semakin singkat waktu pengeringan yang dibutuhkan. Untuk meningkatkan kecepatan pengeringan dapat dilakukan dengan menaikkan kecepatan *inlet* dibandingkan dengan menaikkan temperatur *inlet*. Hal ini dapat dilihat pada tabel bahwa waktu pengeringan pada kecepatan *inlet* 3,6 m/s dan temperatur *inlet* 88⁰C masih lebih cepat yaitu sebesar 235 detik dibandingkan dengan waktu pengeringan pada temperatur *inlet* 98⁰C dan kecepatan *inlet* 1,6 m/s yaitu 256 detik.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini yaitu terjadi distribusi temperatur pada material teh dimana temperatur yang cukup tinggi terjadi pada bagian depan atau sisi yang menghadap *inlet* sedangkan temperatur rendah terjadi pada bagian belakang atau sisi yang menghadap *outlet*. Untuk pengeringan paling cepat terjadi pada kecepatan *inlet* 3,6 m/s dan temperatur *inlet* 98⁰C yaitu sebesar 169 detik atau sekitar 2,82 menit. Sedangkan pengeringan paling lambat terjadi pada kecepatan *inlet* 1,6 m/s dan temperatur *inlet* 88⁰C yaitu sebesar 354 detik atau sekitar 5,9 menit. Selain itu semakin tinggi kecepatan dan temperatur *inlet* maka semakin singkat waktu pengeringan yang dibutuhkan. Waktu pengeringan paling efektif dapat dilakukan dengan menaikkan kecepatan *inlet* dibandingkan dengan menaikkan temperatur *inlet*.

Daftar Pustaka

- [1] Kementrian Pertanian, 2017, Pedoman Penanganan Pascapanen Tanaman Teh, Keputusan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor: 353/Kpts/HK.130/12/2015.
- [2] Santony, A., 2014, Kajian Numerik dan Eksperimental Proses Perpindahan Panas dan Perpindahan Massa pada Pengeringan.
- [3] Indriani, I., dkk., 2009, Pembuatan Fluidized Bed Dryer untuk Pengeringan Benih Pertanian Secara Semi Batch. *Laporan Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Kimia Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- [4] Krishnan, S., Aravamudan, K. 2012, *Simulation of non-Newtonian fluid.food particle heat transfer in the holding tube used in aseptic processing operations*. Food and Bioproducts Processing. Hal 129-148.
- [5] Shilin, D., Hongfan, Y., 1990, Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences Hangzhou, China; *Mathematical Model of Drying for Tea Dryer II.A Multi-Layer Drying Model for Tea Dryer [J]*; Journal of Tea Sciences.
- [6] Widayati, 2010, *Fenomena dan Kecepatan Fluidisasi (Umf)*. UPN “Veteran” Yogyakarta
- [7] Incropera, F.P., David P.D.W., 1985, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Second Edition. John Wiley & Sons Inc. : New York.