



Revisão bibliográfica referente a modelos matemáticos de secagem em leito fluidizado

A REVIEW OF MODELS OF FLUIDIZED BED DRYING

Samuel Becher da Silva*, Maria Regina Parise†

RESUMO

Fluidização envolve o contato entre partículas sólidas e um fluxo ascendente de fluido (gás ou líquido), proporcionando uma intensa mistura entre o fluido e o sólido e, conseqüentemente, em altas taxas de transferência de calor e massa, além de uniformidade da temperatura no leito. A fluidização é utilizada em vários processos industriais tais como, secagem de sólidos, combustão e gaseificação de carvão e biomassa. Secagem é uma operação que resulta na remoção mássica de substâncias voláteis de uma matriz sólida, para a obtenção de um produto seco, através do fornecimento de energia térmica ao sistema sólido. O presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre modelos matemáticos de secagem em leito fluidizado. De maneira geral, o modelo de Henderson e Pabis foi o mais frequentemente utilizado pelos autores citados nesta revisão bibliográfica para a descrição dos estudos sobre os modelos de secagem em leito fluidizado, que apresentou resultado satisfatório para diferentes tipos de partículas sólidas.

Palavras-chave: leito fluidizado gás-sólido, modelos de secagem, curva de secagem.

ABSTRACT

Fluidization involves the contact between solid particles and an upward flow of fluid (gas or liquid), providing an intense mixing between the fluid and the solid and, consequently, in high heat and mass transfer rates, in addition to uniformity of temperature in the bed. Fluidization is used in various industrial processes such as drying of solids, combustion and gasification of coal and biomass. Drying is an operation that results in the mass removal of volatile substances from a solid matrix, to obtain a dry product, through the supply of thermal energy to the solid system. The present work aimed to carry out a literature review on mathematical models of fluidized bed drying. In general, the Henderson and Pabis model was the most frequently used by the authors mentioned in this literature review to describe studies on fluidized bed drying models, which presented satisfactory results for different types of solid particles.

Keywords: gas-solid fluidized bed, drying models, drying curve.

1 INTRODUÇÃO

O sucesso dos processos de secagem em leito fluidizado depende principalmente de seu comportamento fluidodinâmico e processos de transferência de calor e massa. Logo, um bom conhecimento dos mecanismos que governam os fenômenos complexos envolvidos em leitos fluidizados é de extrema importância na melhoria da eficiência e confiabilidade do sistema. (ZHAO et al., 2013).

* Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; samuelbecher@alunos.utfpr.edu.br

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa; parise@utfpr.edu.br



1.1 Razões de teor de água dos sólidos durante a secagem

Para determinar as razões de teor de água nos sólidos durante a secagem, utiliza-se a Eq. (1) (OLIVEIRA, 2012, p. 192):

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

onde,

- RX: a razão de teor de água, adimensional;
- X: teor de água do produto (kg de água/ kg material seco);
- X_i: teor de água inicial do produto (kg de água/ kg material seco);
- X_e: teor de água de equilíbrio do produto (kg de água/ kg material seco).

1.2 Modelos matemáticos de secagem

Na busca em descrever de forma mais apurada o funcionamento de um processo, tem-se a criação dos modelos matemáticos, ou seja, quanto mais desenvolvidos estes modelos, melhor será a descrição e o controle do processo (LIMA, 2019).

Esses modelos matemáticos podem ser classificados em estruturalistas e globalistas. Os estruturalistas ou teóricos utilizam modelos físicos conhecidos e bem estabelecidos que impactam na dinâmica do processo, porém nem sempre se consegue obter um modelo de comportamento dinâmico, devido às variáveis que influenciam no resultado (LIMA, 2019).

Os modelos globalistas, empíricos ou semi-empíricos diferentemente dos teóricos não levam em conta os fenômenos que ocorrem durante o processo, pois a operação de secagem envolve um grande número de variáveis. Os modelos empíricos ou semi-empíricos são comumente utilizados e estão descritos no Quadro 1 (LIMA, 2019).

Quadro 1 – Modelos matemáticos que descrevem uma curva de comportamento para secagem de materiais.

Nome do modelo	Equação
Lewis	$RX = e^{-kt}$
Henderdson e Pabis	$RX = ae^{-kt}$
Logarítmica	$RX = ae^{-kt} + c$
Dois termos	$RX = ae^{-k_1t} + be^{-k_2t}$
Henderson e Pabis modificado	$RX = ae^{-kt} + be^{-gt} + ce^{-ht}$
Dois termos exponencial	$RX = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kat}$
Abordagem por difusão	$RX = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kbt}$
Verma	$RX = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-gt}$
Page	$RX = e^{-kt^n}$
Page modificado	$RX = e^{-(kt)^n}$
Midilli	$RX = e^{-(kt)^n} + bt$
Wangh e Sigh	$RX = 1 + at + bt^2$



Semi-estacionário	$RX = \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{x}\right)^y}$
-------------------	---

Fonte: adaptado de LIMA, 2019.

onde,

- RX: razão de teor de água;
- $a, b, c, x, y, g, h, k, k_1, k_2$: coeficientes que compõem as equações de secagem;
- t : tempo.

2 MÉTODO

A princípio seriam analisados modelos matemáticos na secagem em leito fluidizado, sendo que os experimentos seriam conduzidos no Laboratório de Sistemas Particulados da UTFPR- PG, mas por motivos do agravamento da Covid-19 e do reduzido espaço físico do laboratório, não se pode realizar a parte experimental devido às recomendações de distanciamento mínimo nos ambientes. Por esse motivo foi realizada apenas revisão bibliográfica sobre modelos matemáticos de secagem em leito fluidizado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Madhiyanon et al. (2009) desenvolveram seus experimentos em um secador de leito fluidizado utilizando coco picado com diâmetro médio de 2,28 mm. A velocidade de fluidização manteve-se em 2,5 m/s, e as temperaturas de secagem de 60 a 120 °C (com incremento de 10 °C). O secador possui diâmetro interno de 0,210 m e altura de 1,2 m. Um eixo rotativo de lâminas para promover a agitação da amostra foi instalado acima da placa distribuidora de ar. Os autores justificam que o experimento foi conduzido nesta velocidade, pois encontrou dificuldades na fluidização do coco picado para valores abaixo de 2,5 m/s e também para velocidades mais altas começa a ocorrer a elutriação das partículas, ou seja, inviabilizando o experimento. Foi adicionado a câmara de secagem $10 \pm 0,1$ g da amostra, e realizado a secagem do coco picado até atingir um teor de umidade de 3% em base seca. Os autores constataram que é notório as mudanças na taxa de secagem quando se utiliza temperaturas mais elevada. De acordo com os autores, fazendo o ajuste dos modelos nos dados experimentais, o modelo de Henderson e Pabis modificado descreveu de forma mais precisa da taxa de secagem do coco picado.

Khanali et al. (2012) realizaram experimentos para a secagem de casca de arroz em leito fluidizado e utilizou os treze modelos citados no Quadro 1. As temperaturas do ar de fluidização foram de 50, 60 e 70 °C, e as velocidades superficial do ar de 2,3, 2,5 e 2,8 m/s. O secador foi construído em aço inoxidável, com um diâmetro interno de 0,25 m e altura 0,7 m. Com o intuito de selecionar o modelo de secagem que apresentou os melhores resultados, os autores utilizaram o valor de R^2 , valores de RMSE e χ^2 . Através dos resultados obtidos e por comparação entre os modelos, os pesquisadores concluíram que o modelo de Midilli apresenta os melhores valores dos quesitos analisados, isso pode ser explicado através da origem deste modelo, que é uma versão modificada da solução simplificada da equação de difusão, pois a casca de arroz apresenta uma baixa porosidade que justifica o fenômeno da difusão sendo o principal transporte. Os autores verificaram em suas análises que a taxa de secagem aumenta com o incremento da temperatura e da velocidade de fluidização, porém diminui com o aumento da altura do leito. De acordo com os autores, a temperatura possui



maior influência no aumento da taxa de secagem, a velocidade também possui sua contribuição, porém de forma mais amena.

Kaleta et al. (2013) realizaram seus experimentos em um secador de leito fluidizado utilizando maças em cubos com tamanho de 10 mm. A câmara de secagem possui 0,12 m de diâmetro e 1,80 m de altura, foram realizadas análises em diferentes temperaturas (40, 50, 60, 70 e 80 °C) e a velocidade de fluidização foi mantida em 6 m/s. Segundo os autores, supõe-se que todo o processo é isotérmico devido à alta taxa de transferência de calor durante a fluidização por se conseguir alcançar um bom contato entre as partículas e o gás de secagem. Para efeito de comparação, de forma a selecionar o modelo que melhor descreve a secagem, foram utilizados alguns parâmetros como R^2 , valores de RMSE e χ^2 , e de acordo com os autores, todos os modelos apresentaram resultados satisfatórios, porém o modelo de Page e o modelo desenvolvido pelos autores tiveram uma descrição mais adequada para a secagem.

Arrotéia et al. (2017) utilizaram três modelos matemáticos para avaliar a secagem em sementes de linhaça em leito fluidizado e em leito de jorro. Os experimentos foram conduzidos em temperaturas de secagem de 30, 40, 50 e 60 °C e a velocidade superficial do ar foi mantida em 1,567 m/s (leito fluidizado) e 3,318 m/s (leito de jorro). Os autores realizaram os ajustes dos dados experimentais com os modelos de Henderson e Pabis, Midilli e Henderson. De acordo com os pesquisadores, os modelos de Henderson e Midilli apresentaram os melhores perfis de secagem para os sistemas de leito fluidizado e leito de jorro, respectivamente. Os autores mencionam que o tempo de secagem é menor quando se tem temperaturas altas, assim também observado nas taxas de secagem. De acordo os autores, o experimento realizado na temperatura de 60 °C demonstrou os melhores resultados, com um menor tempo de secagem e um gasto energético menor, e comparando os sistemas estudados, o leito fluidizado teve o menor custo energético, porém um tempo mais longo de secagem e já o leito de jorro um tempo menor, porém um consumo maior de energia no processo devido à necessidade de uma maior vazão de ar para realizar a movimentação das sementes de linhaça no leito.

Lima (2019) realizou experimentos em leito fluidizado para a secagem de placebo. Os experimentos foram conduzidos em temperaturas de secagem de 30, 35, 40 e 45 °C e vazões volumétricas de ar de 37,5, 40 e 42,5 m³/min. A fim de validar o modelo que melhor descreve a secagem, o autor utilizou os valores de erro quadrático e qui-quadrado, e através de testes de regressão não linear dos dados também possibilitou a análise do modelo que descreve melhor os resultados. Com isso o autor observou que o modelo de Henderson e Pabis foi o que melhor descreveu a taxa de perda de umidade, a partir da regressão não linear em todas as condições experimentais estudadas.

O Quadro 2 mostra um resumo dos trabalhos abordados anteriormente.

Quadro 2. Resumo de alguns trabalhos sobre modelos matemáticos em secador de leito fluidizado e de jorro.

Referência	Operação	Material do leito	Condições experimentais	Modelo selecionado
Madhiyanon <i>et al.</i> (2009)	Leito Fluidizado	Coco picado	- Temperaturas de secagem: 60 a 120°C (com incremento de 10 °C); - Velocidade superficial do ar: 2,5 m/s.	Henderson e Pabis Modificado
Khanali <i>et al.</i> (2012)	Leito fluidizado	Casca de arroz	- Temperaturas de secagem: 50, 60 e 70 ° C; - Velocidade superficial do ar: 2,3, 2,5 e 2,8 m/s.	Midilli



Kaleta <i>et al.</i> (2013)	Leito Fluidizado	Maça em cubos	- Temperaturas de secagem: 40, 50, 60, 70 e 80 °C; - Velocidade superficial do ar: 6 m/s.	Modelo de Page
Arrotéia <i>et al.</i> (2017)	Leito Fluidizado e Leito de Jorro	Linhaça	- Temperaturas de secagem de 30, 40, 50 e 60 °C; - Velocidade superficial do ar: 1,567 m/s (leito fluidizado) e 3,318 m/s (leito de jorro).	Modelo de Henderson e Midilli
Lima (2019)	Leito Fluidizado	Placebo	- Temperaturas de secagem: 30, 35, 40 e 45 °C; - Vazão volumétrica do ar: 37,5 , 40 e 42,5 m ³ /min.	Henderson e Pabis

Fonte: Autoria própria (2021).

4 CONCLUSÃO

Como abordado nos estudos citados neste trabalho, utilizar temperaturas do ar de secagem mais elevadas durante o processo se tem um aumento na taxa de secagem e um menor tempo de operação, assim como, um maior contato entre as fases, o que irá contribuir para a melhoria da secagem. Entre os experimentos realizados pelos autores, o modelo de Henderson e Pabis foi utilizado de forma mais frequente para a descrição dos estudos sobre modelos de secagem, apresentando resultados satisfatórios em diferentes tipos de partículas sólidas.

REFERÊNCIAS

- ARROTÉIA, D. R. et al. **Estudo do processo de secagem da linhaça em leito fluidizado e em leito de jorro.** The Journal of Engineering and Exact Sciences - JCEC, 2017.
- KALETA, Agnieszka et al. **Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in a fluidized bed dryer.** Energy Conversion and Management, 2012.
- KHANALI, M. et al. **Mathematical modeling of fluidized bed drying of rough rice (Oryza sativa L.) grain.** Journal of Agricultural Technology, 2012.
- LIMA, MARLON PETRI. **Desenvolvimento de controlador e modelo de secagem em leito fluidizado para indústria farmacêutica.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.
- MADHIYANON, T. et al. **Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut.** Applied Thermal Engineering, 2009.
- OLIVEIRA, D. E. C. et al. **Cinética de secagem dos grãos de milho.** Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.11, n.2, 2012.
- ZHAO, Y.; LU, B.; ZHONG, Y. **Euler-Euler modeling of a gas-solid bubbling fluidized bed with kinetic theory of rough particles.** Chemical Engineering Science, 2013.