

일정온도로 가열되는 원통 형상 슬러지 박막의 건조에 대한 3차원 해석

이 공 훈[†], 김 옥 중

한국기계연구원 에너지플랜트연구본부

Three-Dimensional Analysis on Drying Process of a Cylindrical Thin Film Layer of Sludge under Uniform Heating

Kong Hoon Lee, Ook Joong Kim

Energy Plant Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

ABSTRACT: Drying process in the cylindrical thin film layer of sludge with the thickness less than a few millimeters has been investigated. Thin film drying is specially designed and used to dry the viscous materials like sewage sludge. The thin film layer of sludge is dried on the metallic cylindrical surface through which thermal energy is supplied to the layer during drying. The wall temperature is assumed to be constant during drying in the present study for the simplification. In order to solve the equations, the mass transfer rate on the drying surface should be determined. The mass flux of evaporated water vapor on the surface is estimated with the formulation given in the literature. The effect of some physical parameters on drying has been examined to figure out the drying characteristics of the sludge layer.

Key words: Thin film drying (박막 건조), Sludge(슬러지), Moisture content(함수율), Rotational speed (회전속도)

— 기 호 설 명 —

| | |
|---|--|
| <p>a_w : 수분 활성도</p> <p>c : 수분 농도 (m^3/kg)</p> <p>c_p : 비열 (J/kgK)</p> <p>D_{AB} : 물질확산계수(m^2/s)</p> <p>h_{air} : 대류 열전달계수(W/m^2K)</p> <p>h_{fg} : 수분 증발 잠열 엔탈피(J/kg)</p> <p>h_m : 물질전달계수 (m/s)</p> <p>h_{vap} : 총 증발엔탈피 (J/kg)</p> | <p>h_w : 습윤엔탈피(J/kg)</p> <p>J_m : 표면의 수분 증발율(kg/m^2s)</p> <p>k : 열전도율 (W/mK)</p> <p>M_w : 물의 분자량 ($kg/kmol$)</p> <p>n : 단위 수직 벡터</p> <p>$P_{v,sat}$: 포화 수증기 분압 (Pa)</p> <p>R : 기체상수 ($J/kmolK$)</p> <p>r_w : 원통 내벽의 반경(m)</p> <p>X : 수분 함수율 ($kgH_2O/kgDS$)</p> <p>T : 온도 (K)</p> <p>t : 시간 (s)</p> <p>v : 속도 벡터 (m/s)</p> <p>v : 속도 (m/s)</p> |
|---|--|

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-42-868-7291; fax: +82-42-868-7335
 E-mail address: konghoon@kimm.re.kr

x, y, z : 좌표 (m)

그리스 문자

ϕ : 상대습도 (%)
 ρ : 밀도 (kg/m^3)
 ω : 각속도 (rad/s)
 φ : 블레이드 경사각

하첨자

air : 공기
DS : 건 슬러지
s : 박막의 증발 표면
v : 증기 상태
w : 수분
wall : 벽면
 x, y, z : 좌표에 따른 성분
0 : 초기 상태

1. 서 론

생활수준의 향상에 따라 환경오염과 에너지 소비량의 증가하고 있고, 이는 산업체 및 도시 슬러지 발생량의 증가로 이어지고 있다. 그리하여 슬러지 관리는 현대 사회의 중요한 현안이 되고 있다.⁽¹⁾ 국내의 하수 슬러지 발생량은 방류수 수질기준 강화 및 하수처리장의 정비에 따라 계속적으로 증가하여 1997년 148 만톤에서 2006년에는 274 만톤으로 계속 증가하고 있다.⁽²⁾ 2003년 7월부터 유기성 슬러지의 직매립이 금지되어 슬러지의 육상 매립은 상당히 감소되었으나, 해양 배출은 계속 증가하고 있다. 1997년 약 30 만톤이던 해양 배출은 2006년에 200 만톤으로 증가하였는데, 2001년 이후에 슬러지 발생량의 73~77%의 슬러지가 해양에 배출되고 있다. 그러나, 국제 협약에 따라 해양배출이 금지되므로 환경부에서는 유해물을 함유한 정도에 따라 기준을 정하여 2008년 2월부터 기준을 초과한 하수슬러지의 해양 배출을 금지하고, 2012년 1월부터는 하수슬러지의 해양 배출을 전면 금지할 예정이다. 이에 따라 슬러지는 적절한 처리를 통하여 재이용하기 위한 기술 개발 및 보급이 시급한 실정이고, 슬러지 건조는 슬러지 재이용을 위한 중요한 수단

이 된다. 슬러지는 건조를 통하여 농업용 퇴비, 탄화 연료, 골재, 시멘트 재료 등으로 활용이 가능하다. 또한 건조 후 소각을 하는 것도 매립 또는 해양 배출을 줄이기 위한 수단이 된다. 2006년의 경우에 하수 슬러지 발생량의 약 12%가 재이용되었고, 약 11%가 소각에 의하여 처리되었다.⁽²⁾

현재 건조 전에 배출되는 슬러지는 대부분 탈수 케이크 (함수율 약 80% w.b.)의 형태로 건조에 의하여 함수율, 중량 및 부피가 크게 감소하면 수송, 저장, 소각 또는 재이용이 용이하게 된다.⁽³⁾ 따라서 슬러지의 재이용을 위해서는 효율적인 건조기술의 개발이 필요하고 디스크, 드럼, 패들, 과열증기 등을 이용하는 다양한 건조 방법에 대한 연구들이 진행되어 왔다.⁽¹⁾

본 연구에서는 건조 효율을 높이고, 건조시간을 단축하는 데 효과적인 슬러지 박막건조기(Fig. 1 참조)의 건조현상을 예측하기 위하여 원통형상의 슬러지 박막에 대한 3차원 해석을 수행하였다. 박막건조기에서는 블레이드가 장착된 로터의 회전에 의하여 원통 내벽에 슬러지 박막이 형성되어 원통 벽으로 전달된 열에 의하여 건조가 진행된다. 로터 블레이드는 박막의 형성과 함께 회전 방향으로 슬러지를 이동시키는 역할을 한다. 수 mm 이하의 두께를 가지는 슬러지 박막은 빠른 시간 내에 건조가 이루어지는데, 이러한 건조현상을 분석하기 위하여 원통형상의 슬러지 박막에 대하여 로터의 회전속도와 로터 블레이드의 경사각을 파라미터로 하여 건조 과정에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

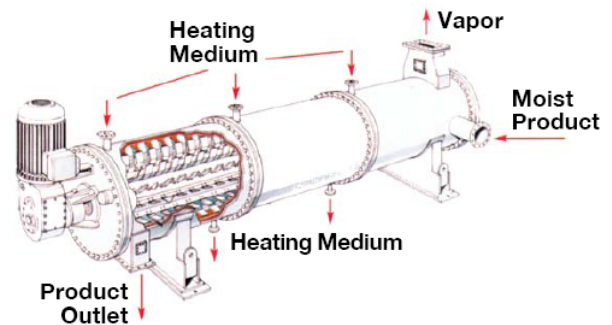


Fig. 1 Horizontal thin film dryer for sewage sludge (LCI Corp.)

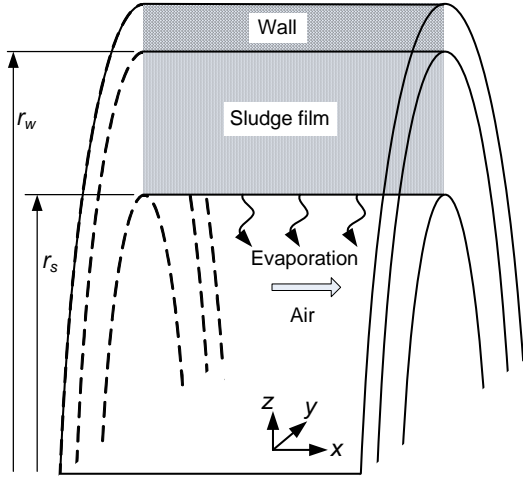


Fig. 2 Schematic of a physical model for drying

2. 해석 방법

2.1 해석 모델

건조 과정에서 슬러지에 함유된 수분은 슬러지 박막의 노출된 표면에서 공기 중으로 증발한다. 표면에서 수분의 증발이 먼저 이루어지면 박막 내부의 수분이 표면 근처로 확산되어 이동하게 된다. 수분 증발에 필요한 열은 Fig. 2에 보인 바와 같이 원통 형상의 벽을 통하여 공급된다.

슬러지 박막의 건조 해석을 위하여 슬러지 박막은 내부에 공극이 없는 균일한 매질로 가정하였고, 수 mm 이하의 박막에 대하여 3차원 해석을 수행하였다. 박막 내부의 온도와 함수율은 초기에 균일하고, 수분의 증발은 노출된 표면에서만 일어나는 것으로 가정하였다. 편의상 건조 과정에서 박막의 두께 변화는 고려하지 않았다. 초기에 슬러지 박막 내에 자유수가 존재하지 않는 것으로 가정하면 슬러지 내의 수분의 수증기 분압은 순수한 물의 수증기 분압보다 낮게 된다.⁽⁴⁾

피건조물 내부의 확산에 의한 수분의 이동은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{AB} \nabla c) \quad (1)$$

건조 과정에서 피건조물 필름의 수축을 무시하면 수분 농도를 함수율로 나타낼 수 있고 ($c = \rho_{DS} X$), 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

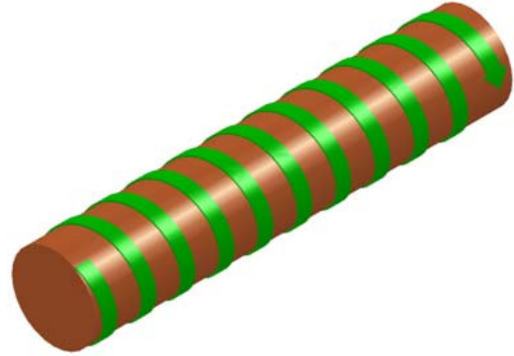


Fig. 3 Illustration for the movement of drying material

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{AB} \nabla X) \quad (2)$$

에너지방정식은 슬러지 박막 내의 전도에 의한 열전달을 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

건조 과정은 정상상태에 이르면 식 (2)과 (3)으로 정의되는 지배방정식에서 시간에 따른 변화량을 나타내는 항을 무시할 수 있다. 본 연구에서는 시간에 따른 변화보다는 원통의 길이 방향을 따라서 Fig. 3에 보인 바와 같이 피건조물의 건조 상태가 달라지는데, 이를 해석하는데 주안점을 두었다. Fig. 3의 화살표는 피건조물의 이동 경로를 설명하는 것이다. 길이 방향에 따른 건조 상태의 변화를 해석하기 위하여 건조 과정에 대하여 준정상상태 모델을 도입하였다.

$$\mathbf{v} \cdot \nabla X = \nabla \cdot (D_{AB} \nabla X) \quad (4)$$

$$\rho c_p \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (5)$$

여기에서 속도 \mathbf{v} 는 원통의 회전수와 피건조물의 진행 방향에 의하여 결정되는 상수 값이다.

$$v_x = r_w \omega \tan \varphi$$

$$v_y = -\omega z$$

$$v_z = \omega y$$

여기에서 각속도 ω 는 원통 내부의 로터 블레이드의 회전수(rpm)으로부터 계산된다.

슬러지 필름의 밀도 ρ 와 열전도율 k 은 함수율에 따라 달라지고 수분의 확산율은 함수율과 온도의 함수로 표현된다.⁽⁴⁾ 슬러지 필름의 비열은 일반적으로 수분과 건슬러지의 비열 질량 평균으로 다음과 같이 표현된다.⁽⁵⁾

$$c_p = \frac{X}{1+X}c_{p,w} + \frac{1}{1+X}c_{p,DS} \quad (6)$$

건조가 시작되는 초기에 슬러지 필름은 균일한 분포의 온도와 초기 함수율을 가지는 것으로 가정하면 초기 조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$X|_{t=0} = X_0, \quad T|_{t=0} = T_0 \quad (7)$$

건조에 필요한 열에너지는 원통 벽으로부터 공급받으며 건조과정 동안 일정온도로 유지되는 것으로 가정하여 다음과 같은 경계조건을 사용하였다.

$$T|_{wall} = T_0 \quad (8)$$

열에너지가 공급되는 금속에 접하는 박막의 경계면은 금속으로 수분 침투가 불가능하므로 수분 이동에 대한 다음의 경계 조건을 사용한다.

$$\mathbf{n} \cdot \nabla X|_{wall} = 0 \quad (9)$$

수분은 슬러지 필름이 공기 흐름에 노출된 표면($r = R_f$)에서 발생하며, 여기에서 질량 유속은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{n} \cdot (-D_{AB}\nabla X + X\mathbf{v})|_s = \frac{J_m}{\rho_{DS}} \quad (10)$$

여기에서 J_m 은 표면의 수분 증발률이다.^(4,8)

$$J_m = h_m \frac{M_w}{R} \left[\frac{a_w P_{v,sat}(T_s)}{T_s} - \frac{\phi P_{v,sat}(T_{air})}{T_{air}} \right]$$

건조 공기의 물질전달계수 h_m 은 실험적 상관

식으로 구할 수 있다.⁽⁶⁾ 수분의 활성도(water activity)는 피건조물 내에 함유된 수분의 자유수에 대한 활동성을 나타내는 값으로 온도와 함수율에 따라 변하나 여기에서는 함수율에 따른 변화만을 고려한 값을 사용하였다.⁽¹⁾

수분 증발은 공기에 의한 대류 열전달 및 증발 잠열이 관련된다.

$$\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T)|_s = h_{air}(T_s - T_{air}) + J_m h_{vap} \quad (11)$$

공기와 증발 표면 사이의 대류열전달 계수는 Dittus-Boulter 상관식으로 구하였고,⁽⁶⁾ 공기의 물성치들은 습도를 고려한 값을 사용하였다.⁽⁷⁾ 수분 증발에 대한 총 엔탈피는 증발 엔탈피와 습윤 엔탈피(Enthalpy of wetting) h_w 로 구성된다.

$$h_{vap} = h_{fg}(T_s) + h_w \quad (12)$$

습윤엔탈피는 슬러지 내부에 고착되어 있는 수분을 제거하는데 필요한 엔탈피를 의미하고, 건조가 진행되면서 함수율이 감소할수록 증가하여 증발엔탈피보다 더 커질 수도 있다.⁽⁵⁾

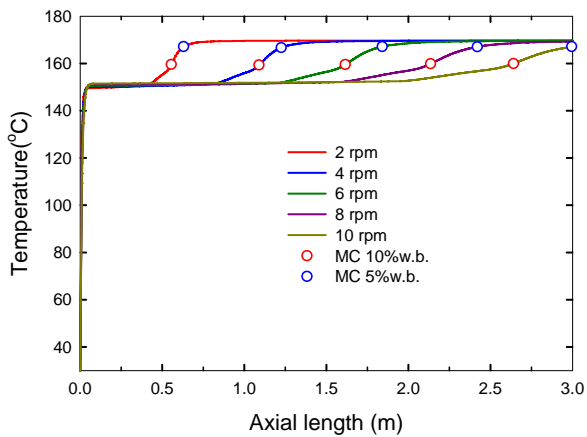
2.2 해석 방법

해석 모델에 주어진 확산 방정식과 에너지방정식을 풀기 위하여 상용 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics를 사용하였다. 건조 온도는 170°C로 고정하였고, 슬러지 필름의 초기 온도는 30°C, 초기함수율은 습량 기준 80%w.b.에 해당하는 4.0 kgH₂O/kgDS를 사용하였다. 증발 표면에 흐르는 공기의 온도는 30°C를 가정하였고, 상대습도는 50%로 일정한 값을 사용하였다. 공기의 유동은 실제 건조기의 공기 유동 속도를 고려하여 약 22,500의 Reynolds 수를 사용하였다. 슬러지 박막의 두께는 1 mm를 기준으로 사용하였다. 건조기 형상은 지름 0.6 m, 길이 3 m의 원통 형상으로 고정하였고, 건조기 내부의 슬러지 이송을 위한 로터의 회전수를 파라미터로 사용하였다. 건조기 설계에 활용 가능한 결과를 얻기 위하여 주어진 건조기 길이에 대하여 로터 회전수와 로터 블레이드 각도의 영향을 분석하였다.

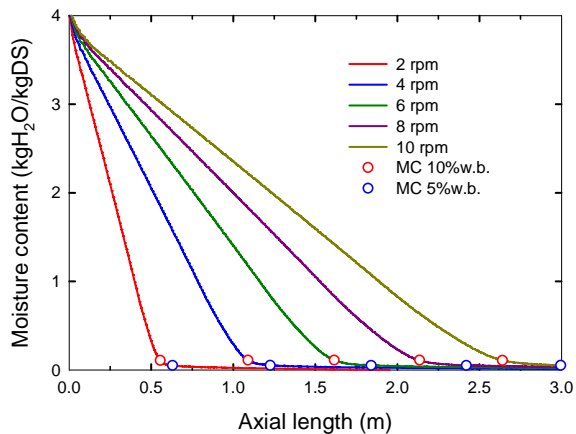
3. 해석결과

Fig. 6은 블레이드의 경사각이 1°일 때 로터의 회전 속도에 따른 온도 및 함수율의 변화를 보여 준다. 항률건조기간에는 Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이 함수율이 거의 선형적인 변화를 보인다.⁽⁸⁾ 회전속도가 2 rpm인 경우에는 건조기 전반부 약 0.63 m에서 5%w.b.이하의 함수율로 거의 건조가 완료된다. 회전 속도의 증가에 따라 건조가 완료되는 길이가 거의 선형적으로 길어진다. 10 rpm인 경우에는 거의 3 m에 이르러 건조가 완료되는 것을 볼 수 있다. 2 rpm인 경우에는 건조기 전반부에 건조가 완료되므로 0.63 m 이후는 피건조물이 불필요하게 가열되므로 건조기에 공급되는 열에너지가 많이 낭비되어 열효율이 크게 감소하게 된다.

Fig. 7은 로터의 회전속도가 2 rpm인 경우에



(a) Temperature of a sludge layer

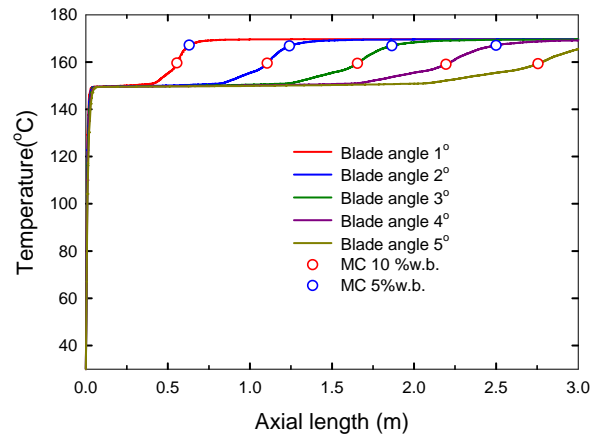


(b) Moisture content of a sludge layer

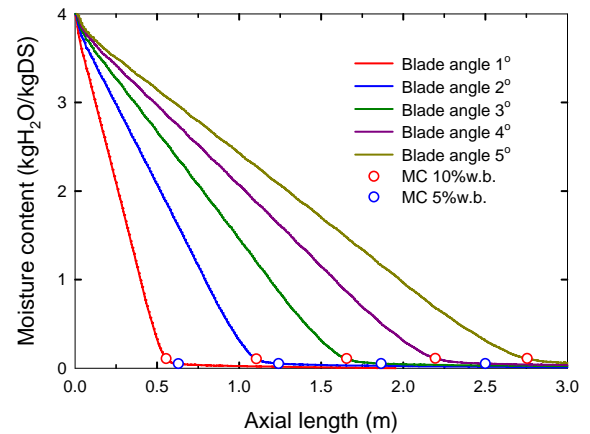
Fig. 6 Drying characteristics with rotational speed for the blade angle of 1°

블레이드의 경사각에 따른 건조 과정의 변화를 나타낸다. 예상할 수 있듯이 블레이드 경사각이 작을 때 건조 길이가 짧으며 경사각의 증가에 따라 건조 길이가 길어지는 것을 확인할 수 있다. 경사각이 5°인 경우에는 3m의 길이 내에서 함수율 10%w.b.에는 이르지만 5%w.b.에는 이르지 못하고 약 5.6%w.b.에서 건조 과정이 종료된다. 본 해석을 다소 이상적인 조건에 대하여 건조 과정을 해석한 것이므로 실제의 상황에서는 열손실 등 건조 속도를 늦추는 여러 가지 요인이 있으므로 해석 결과 보다 더 느린 건조 과정을 보여줄 것이므로 경사각 5°에서는 충분한 건조가 어려울 것이다.

Fig. 8은 해석 결과를 요약하여 나타낸 것으로 해석에 사용된 회전속도와 경사각에 대하여 함수율 5%w.b.에 이르는데 필요한 건조 길이를 함께



(a) Temperature of a sludge layer



(b) Moisture content of a sludge layer

Fig. 7 Drying characteristics with blade angle for 2 rpm

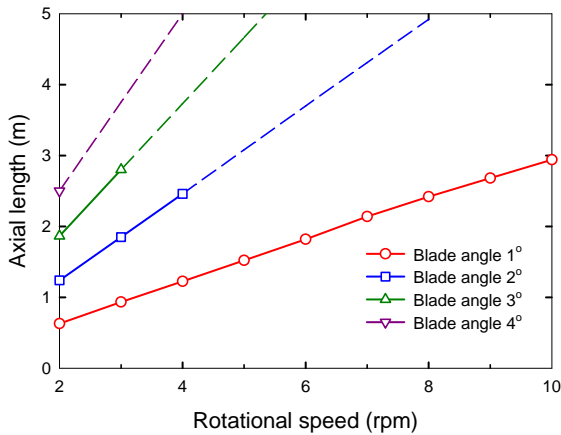


Fig. 8 Axial length to obtain the moisture content of 5% in wet basis

나타낸 것이다. Fig. 6에서 확인한 바와 같이 경사각이 1°인 경우에는 해석에 사용한 3 m의 길이 내에서 5%w.b.의 함수율을 얻을 수 있다. 그러나 경사각의 증가에 따라 길이 3 m 내에서 건조가 충분히 이루어지기 위해서는 로터의 회전 속도가 감소되어야 하는 것을 보여 준다. 경사각이 4°인 경우에는 로터의 회전속도가 약 2 rpm으로 제한된다. 그러나 로터의 회전속도가 작은 경우에는 피건조물에 가해지는 원심력이 작아지므로 슬러지 박막의 벽면 부착성이 감소하게 될 것이다. 이러한 부착성의 문제는 실험을 통하여 확인해야하므로 실제 건조에 사용할 수 있는 회전 속도의 최소값을 여기에서 제한할 수는 없다.

4. 결론

슬러지 박막에 대한 건조과정을 실제 건조기 형상과 유사한 3차원 형상에 대하여 해석을 하였다. 박막 건조기에 사용되는 로터의 회전수와 블레이드 경사각을 주요 파라미터로 사용하여 해석하였고, 해석 결과에 따라 회전속도와 경사각에 따른 건조과정을 분석하였다. 회전 속도의 증가 또는 블레이드 경사각의 증가는 건조가 완료되는 길이를 증가시켰다. 본 연구의 해석 방법 및 결과는 목표로 하는 함수율까지 건조하기 위한 박막건조기의 운전조건 결정 또는 건조기의 설계 기본 조건을 획득하는데 유용한 방법으로 사용될 것으로 기대한다.

후기

본 연구는 에너지관리공단의 지원으로 수행중인 에너지 절약기술 개발사업의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Arlabosse, P., Chavez, S., and Prevot, C., 2004, Drying of Municipal Sewage Sludge: from A Laboratory Scale Batch Indirect Dryer to the Paddle Dryer, Proc. of IDS2004, Vol. B, pp. 965-971.
2. http://www.me.go.kr/kor/info/info_10_08.jsp, Statics of Sewerage, Ministry of Environment.
3. Hayashi, N. and Shimada, S., 2006, Study on Drying Organic Sludges by Thermal Jet Dryer - Part 1: Drying Performance of Thermal Jet Dryer, Drying Technology, Vol. 24, pp. 1601-1607.
4. Islam, M. R., Thaker, K. S., and Mujumdar, A. S., 2007, "A Diffusion Model for a Drum Dryer Subjected to Conduction, Convection, and Radiant Heat Input, Drying Technology, Vol. 25, No. 6, pp. 1033-1043.
5. Arlabosse, P. and Chitu, T., 2007, Identification of the Limiting Mechanism in Contact Drying of Agitated Sewage Sludge, Drying Technology, Vol. 25, pp. 557-567.
6. Incropera, F. P., 1996, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th ed., John Wiley & Sons, New York.
7. Parsons, R. A., ed., 1997, ASHRAE Handbook: 1997 Fundamentals, SI ed., ASHRAE, Atlanta.
8. Lee, K. H. and Kim, O. J., 2008, Analysis on the Drying Characteristics for the Drying Process of a Thin Film Layer of Sludge, Proc. of SAREK 2008 Summer Annual Conference, pp. 1128-1133.