

과열 증기 이용 친환경 건조기술

김옥신 · 이동현* · 전원표*

성균관대학교 화학공학과
440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300
*한국에너지기술연구원 폐열에너지연구센터
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
(2007년 9월 11일 접수, 2008년 1월 12일 채택)

Eco-Friendly Drying Technology using Superheated Steam

Og Sin Kim, Dong Hyun Lee[†] and Won Pyo Chun*

Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, 300 Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi 440-746, Korea

*Waste Heat Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 11 September 2007; accepted 12 January 2008)

요 약

최근 고유가 시대를 맞이하여 에너지 다소비 공정한 건조 공정의 에너지 효율을 향상시키기 위한 방법으로 과열증기를 이용한 건조방식이 많은 관심의 대상이 되고 있다. 이 기술은 과열증기를 건조매체로 사용하여 피건조물을 건조하는 방식으로써 고온의 증발 증기를 재활용함으로써 에너지를 절약할 수 있고 건조된 제품의 품질이 향상되며 환경 오염 물질의 배출을 최소화 할 수 있는 등의 장점이 있다. 본고에서는 과열증기를 이용한 건조기술의 원리와 관련 연구들을 소개한 후 건조기 형태에 따른 과열증기의 이용 사례 및 산업적 응용분야에 대하여 중점적으로 소개하고자 한다.

Abstract – For being recent high oil price age, the interest in superheated steam drying technology is increasing as the method to enhance the energy efficiency of drying process consuming a lot of energy. This technology uses the superheated steam as drying medium to dry the materials and has advantages that can save the energy by recycling the evaporated high-temperature steam, enhance the quality of dried products, and minimize the exhaust of environmental pollution materials. In this work, it has been introduced from general drying principle to the principle and related studies of drying technology using superheated steam, using examples of superheated steam with dryer types, and industrial applications.

Key words: Superheated Steam, Mathematical Model, Energy Efficiency, Eco-Friendly, Superheated Steam Dryer

1. 서 론

오늘날 유가 상승에 따른 고유가 문제와 산업의 환경오염 물질 배출 문제가 국내외적으로 가장 큰 사회적인 이슈로 대두되고 있다. 이러한 문제의 해결을 위해 대체 에너지 개발과 같은 연구가 진행 중이며 각 산업의 단위공정에서도 에너지 절약과 환경오염 방지라는 전 지구적인 문제를 해결하기 위한 노력들이 다각도로 이루어지고 있다.

건조란 열풍, 스팀, 가스 및 전자기파 등의 직간접 에너지를 투입하여 피 건조물에 함유된 수분이나 용체를 제거하는 단위 조작이다. 건조공정은 화공, 섬유, 식품, 의약, 분체, 제지목재, 전자, 금속부품 및 폐기물 처리 등 전 산업 영역의 최종제품, 중간가공품, 후처리, 저장 및 수송과정 시에 필수적인 공정에 해당한다. 현재 각 산업 공

정에서 다양한 형태의 건조기가 사용 중에 있으며 건조 공정을 통해 다량의 에너지가 소비되고 있는데 국내 산업용 건조기의 연간 에너지 소비량은 6,600천 TOE로 추정되고 국내 산업부문 에너지 소비량의 약 7%가 산업용 건조기에서 소비되고 있다. 또한 건조기 보 유업체의 건조공정 에너지 사용 비중은 약 29% 정도를 차지하고 있으며, 특히 섬유 및 제지업종의 건조공정에서 에너지 소비비중은 30~50% 정도로 매우 높은 실정이다[1]. Table 1은 국내 건조기 보 유업체의 건조기 형식별 운전현황 및 에너지원단위를 나타낸다[1]. 건조기의 가열 온도는 피 건조물의 건조방식에 따라 차이가 있으나 100~200 °C 정도의 범위이고 국내에서 가동중인 건조기 효율은 불과 50% 정도이다.

이와 같이 건조공정은 액체를 증기로 바꾸는 잠열(latent heat)이 필요한 에너지 다소비형 공정으로써 투입된 다량의 에너지 중 일부만 건조에 사용하므로 에너지 효율이 낮고 산업용 건조기의 가동 시 많은 연료가 소모되어 CO₂와 같은 온실 가스를 배출시키거나 건

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: dhlee@skku.edu

Table 1. Operating situation and energy source unit of dryer types [1]

Drying type	Operating temperature (°C)		Efficiency (%)	Unit of energy source (kcal/kg-H ₂ O)
	Heating	Exhaust		
Box dryer	100 ~ 150	60 ~ 90	49	920 ~ 2,280
Band dryer	120 ~ 180	70 ~ 100	44	2,200 ~ 4,650
Tunnel dryer	150 ~ 200	90 ~ 120	43	1,680 ~ 3,672
Drum dryer	100 ~ 180	70 ~ 110	43	880 ~ 2,280
Rotary dryer	150 ~ 200	90 ~ 120	51	920 ~ 2,400
Spray dryer	100 ~ 180	60 ~ 120	43	912 ~ 2,850
Fluidized bed dryer	110 ~ 180	60 ~ 110	51	892 ~ 2,200

조 과정에서 다양한 종류의 환경오염 물질이 배출되고 있어 이를 극복하기 위한 관련 연구가 진행되고 있다. 과열 증기 건조 기술은 이러한 맥락에서 에너지 효율의 향상을 도모하고 환경오염 물질 배출을 최소화할 수 있는 건조 공정의 한 분야로 오늘날 큰 주목을 받고 있다.

과열 증기를 이용한 건조 방식은 다양한 건조 방식 중에서 대류에 의한 직접 건조 방식에 해당한다. 기존의 열풍이나 연소 가스에 의해 건조열이 공급되던 것과 달리 과열 증기를 건조 매체로 사용하여 피 건조물을 건조하는 방식으로 고온의 증발 증기를 재활용함으로써 에너지를 절약할 수 있고 건조 후 건조 제품의 품질이 향상되며, 환경오염 물질 배출도 최소화 할 수 있는 등의 큰 장점을 가지고 있다. 이런 고효율 에너지 건조 방식에 의한 높은 에너지 효율, 고품질, 친환경성 등은 더 적은 화석연료의 사용을 가져옴과 동시에 경제적인 이득을 보장할 것이다. 또한 과열 증기 건조 기술을 이용하면 기존의 열풍 건조에 비해 건조 속도가 빨라지게 되어 건조 시간을 단축할 수 있는 특징도 있다.

그러나 이 기술이 현재 다양한 제품의 건조에 이용될 수 있고 기존의 유동층 건조기 및 플래시, 회전식, 충돌 세트 건조기 등과 결합하여 쓰일 수 있지만 상업적으로 이용 가능한 과열 증기 건조기의 종류와 수는 아직 제한적이며 상업적으로 이 기술이 적용된 영역과 제품도 한정적이다.

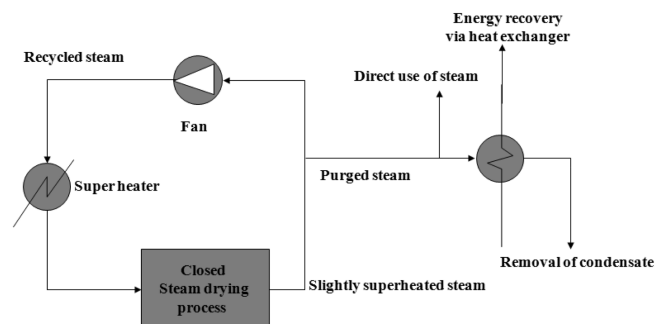
본고에서는 과열 증기 건조 기술의 원리와 관련 연구 동향, 장단점, 과열 증기 건조 기술이 적용된 영역에 대한 전반적인 내용을 다루고자 하며 지금까지 과열증기 건조 기술에 관해 정리하여 발표한 몇몇의 논문들[2-5]과 달리 과열 건조 기술이 적용된 몇 개의 건조기 입장에서 조금 더 면밀히 살펴본 후, 마지막으로 과열 증기 건조 기술의 미래에 대해 살펴봄으로써 과열 증기 건조 기술에 생소하거나 그와 관련된 연구를 하고자 하는 연구자들에게 참고가 되고자 한다.

2. 과열 증기 건조(superheated steam drying)

2-1. 건조 원리 및 적용

과열 증기 건조는 100여 년의 오랜 역사를 갖는 건조의 한 방식으로써 60여 년 전 독일에서 처음으로 산업에 적용되었다. 과열 증기 건조는 대류 작용을 이용한 직접 건조 방식으로써 건조 열을 공급하고 증발된 수분을 운반하는 건조 매체로 사용되던 기존의 열풍, 연도 가스를 대신해 과열 증기를 사용하는 방식이며 직접 또는 직/간접 혼합 건조기에서 이용될 수 있다[2].

과열 증기 건조는 과열 증기와 피 건조물 사이의 직접적인 접촉을 통해 건조가 이루어진다[6]. 건조 매체인 과열증기가 수분 증발

**Fig. 1. Schematic diagram of a superheated steam drying process [6].**

을 위한 열을 피 건조물에 제공하고 그 증발된 증기를 외부로 이송시키며 전 건조 공정 동안 증기는 항상 응축 온도 이상에 머물러 있게 된다.

Fig. 1은 과열 증기 건조 공정의 기본적인 개략도이다[6]. 과열 증기는 닫힌 루프에서 순환되고 재가열되며 피 건조물에서 증발된 수분 양에 상응하는 약하게 가열된 증기가 닫힌 루프에서 제거된다. 이 때 과열 증기를 응축시켜 에너지를 회수하거나 공정과 플랜트 곳곳에서 열원으로 재사용함으로써 효율적인 에너지 회수가 가능하다[3, 6]. Mujumdar[2]는 열풍 건조 과정에서 4,000~5,000 kJ/kg H₂O의 에너지가 소비되지만 과열 증기를 재사용하면 에너지 소비에 있어서 1,000~1,500 kJ/kg H₂O 정도의 에너지 절약이 있다고 발표하였다.

과열 증기 건조 공정은 건조기 내의 공기가 모두 제거되어야 하기 때문에 일단 건조기에 직접적으로 증기를 주입하여 주고 주입된 후부터는 건조 과정에서 수분 증발로 인해 추가적인 증기가 생성되므로 더 이상 새 증기를 주입하지 않아도 된다. 증기를 발생시키는 또 다른 방법은 닫힌계인 건조기 내부의 간접 열 교환기 위쪽 공기를 재순환시킴으로써 재순환 매체인 공기-증기 혼합물이 100 °C 이상으로 가열되면서 증발 수분이 점점 증가하여 공기를 대체하고 짧은 시간에 전체 계는 과열 증기가 된다[6].

전통적인 기류건조에서는 “확산”이 건조 속도의 지배 요소이지만 증기 건조에서는 건조기 내 공기가 없어 증기와 물질 내에서 확산 저항이 없게 되므로 “열전달”이 속도 지배 요소가 된다. 따라서 증기 건조 과정에서 건조 속도가 더 빨라지고 임계 수분 함량은 작아지며 건조 시간이 짧아질 수 있다[4].

Fig. 2는 열풍 건조와 과열 증기 건조 시 건조 시간에 따른 피 건조물의 온도변화와 항울 건조 기간 동안 증기 압력에 따른 건조물 온도의 변화를 나타낸다. 피 건조물은 과열 증기와 접촉하면 급격히 물의 습구온도인 100 °C로 상승하여 항울 건조 기간이 된다. 이

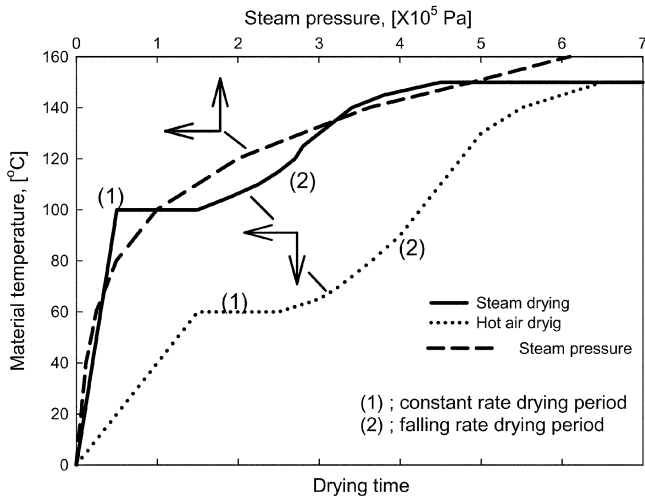


Fig. 2. Material temperature with drying time and material temperature with steam pressure at constant rate drying period.

기간 동안 피 건조물은 습윤한 상태를 유지하며 온도도 일정하다. 반면에 기류건조에서는 피 건조물의 온도가 습구온도까지 상승하지 못하고 40~70 °C 정도 낮은 온도로 항률 건조 기간이 된다. 표면의 수분이 증발된 후 확산에 의해 내부 수분이 건조물 표면으로 전달 되기 시작하면 감율 건조 기간이 되고 이 기간 동안 건조물 온도는 결국 과열 증기 온도까지 상승한다. 항율 건조 기간 동안 피 건조물 온도는 증기 압력과 관계가 있는데 증기 압력이 증가할수록 건조물의 온도는 상승한다. 과잉증기로부터 회수되는 열의 입장에서는 증기의 온도가 고온일수록 더 유용하지만 피 건조물 중에 고온을 견디지 못하는 종류도 있으므로 감안하여 건조물의 온도를 낮게 유지할 수 있다[3, 6].

비록 과열 증기 건조와 열풍 건조가 건조 원리적으로 비슷한 면이 있으나 습구온도가 양쪽이 서로 다른 것처럼 몇 가지 차이점이 분명히 존재한다. 과열 증기와 달리 열풍 건조에서는 공기 속의 증발된 수분이 건조 공기 자체를 습윤하게 만들어 건조물의 상태에 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있다. 또한 열풍과 과열 증기는 비엔탈피, 비열, 점도, 열전도도와 같은 물리적 성질에도 차이가 있는데 과열 증기의 비열이 열풍보다 크고 이는 건조속도를 더 빠르게 만드는 한 가지 원인이 된다[6].

항율 건조 기간 동안 과열 증기에서의 습구온도가 열풍보다 더 커서 증기와 피 건조물 사이의 온도 차이는 작아진다. 그로 인해 증기와 열풍에서 물의 증발 속도(=물질 흐름 속도)가 같아지는 “역전 온도(inversion temperature)”가 발생하며 이 온도 이상에서 과열 증기의 건조 속도가 열풍보다 더 빠르다. 보통 역전 온도의 범위는

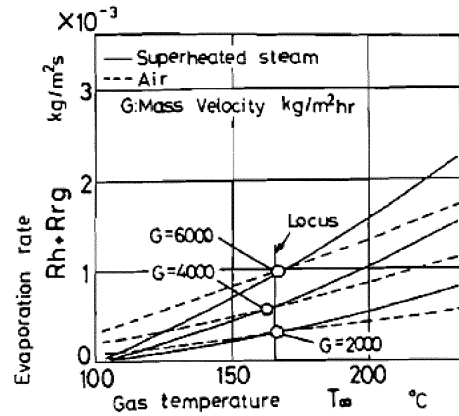


Fig. 3. Locus of the inversion temperature at superheated steam and air [7].

150~200 °C이다[6]. 역전 온도는 간접적인 방식(전도나 복사)으로 열 공급이 이루어지면 더 낮아지기도 하는데 Nomura 등[7]은 증기와 공기의 층류 흐름을 가진 평판 표면으로부터 물의 증발속도를 측정하여 1,000 kg/m²h에서 8,000 kg/m²h까지의 기체 질량 흐름 속도 범위에서 대류 및 기체-복사 열전달의 혼합 작용에 의해 역전온도가 250 °C에서 170 °C로 낮아진 것을 확인하였다. Fig. 3은 Nomura 등[7]이 발표한 과열 증기와 공기에서의 역전 온도 궤적을 나타낸다.

역전 온도 이상에서 과열 증기의 건조 속도가 열풍 건조보다 더 빠르다고 과열 증기 건조기를 역전 온도 이상에서만 가동시킬 필요는 없다. 건조기를 선택할 때에는 건조 속도나 에너지 소비뿐만 아니라 품질이나 운전의 안전성 등을 모두 고려해야 한다. 또한 Shibata와 Mujumdar[4]가 밝혔듯이 역전온도 이상이든지 이하이든지 상관없이 결국 과열 증기를 이용하면 열풍 건조보다 건조 시간이 단축될 수 있다. 건조기가 보통 운전 연속성에 따라 “회분식” 또는 “연속식”으로 구분되듯 과열 증기 건조기에도 동일한 갖대가 적용된다. 과열 증기 건조기는 현재 파일럿 크기에서 성공적으로 실험을 마쳤거나 상업화되어 몇몇의 제품에 적용되기도 하였다. Table 2는 이러한 과열 증기 건조기 형태를 나타낸다[2].

Table 3은 현재 상업화를 통해 과열 증기를 이용한 건조가 적용된 산업 영역과 제품군을 나타낸다[6]. 대략 100여개 정도의 과열 증기 건조기 관련 시제품이 존재하지만 현재 전 세계적으로 상업적인 크기의 과열 증기 건조 기술을 제공할 수 있는 회사는 단지 10여개 정도이다[2, 6]. Table 3에서 보듯이 과열 증기 건조 기술이 적용된 산업 영역도 식품과 제지 영역 쪽에 국한되어 있어서 과열 증기를 이용한 건조 분야는 아직도 연구대상 분야이며 많은 잠재력이

Table 2. Types of superheated steam dryers [2]

Dryer type	Characteristics
Flash dryer	with or without indirect heating of dryer walls with high-pressure steam
Fluidized bed dryer	operated at low, atmospheric, high pressures (~5 bar) with or without immersed heat exchangers
Spray dryer	operated at atmospheric pressure
Impinging jet dryer	for newspaper, tissue paper and so on
Conveyor dryer	operated atmospheric or high pressures
Agitated bed dryer	operated at atmospheric pressures
Impinging stream dryer	opposing jet concept
Vibrated fluid bed dryer	with immersed heat exchangers

Table 3. Applications of superheated steam drying technologies [6]

Industrial part	Products
Food	Sugar beet pulp, starch, distillers grain, pork, bone meal, shrimps, bamboo shoot, paddy/rice, herbs, tobacco, cacao
Biomass	Sawdust, wood fiber, pulverized coal, wood chips, wood pulp
Chemical	Powder, pigments, powdery chemicals, catalysts, colouring agent
Laundry	Laundry
Paper & Pulp	Paper, sheet, pulps, fiber sludge from waste water treatment
Feed	Hog fuel, corn fibers, soy bean, rape seed, soy meal, okara, etc.
Textile	Textile
Waster materials	Industrial wastes, fiber cakes, municipal sludge
Agriculture	Vegetables, fruits, potato products - fries
Building material	Wood, lime mud, mineral wool, fibers

남아있다. 특히 관심 있는 입자의 크기가 나노크기의 미세영역으로 확장되고 있는 만큼 그러한 입자에 적용하기 위한 연구가 활발해질 것이며 과열증기를 이용한 직접 건조방식과 간접 건조 방식의 혼합 방식을 이용한 건조 방식에 대한 연구도 활발히 진행되리라 본다.

2-2. 기술의 장단점

과열 증기 건조는 에너지 절약과 배출물질 감소, 안전성, 제품 품질 등의 측면에 큰 강점이 있다. 이 기술의 강점은 다음과 같이 요약할 수 있다[2-4, 6].

① 에너지 절약; 증발된 과열의 수분은 증기 응축에 의해 에너지가 쉽게 회수되는데 이때 증기의 온도가 높을수록 더 유효하다. 건조 과정 중 발생하는 압력 손실과 주위로의 증기 손실을 보상하는 정도의 에너지만을 건조기로 투입한다. 산업적인 타 건조에 비해 50~75%의 순 에너지 절약이 가능하다.

② 유해 배출물질의 감소; 건조 공정 시 배출되는 먼지나 유해 화합물과 용매, 혹은 휘발성 물질 등은 과열 증기 건조 공정에서 생긴 증기가 응축되면서 생기는 응축액 형태로 제거된다.

③ 안전성 및 품질 향상; 산화나 연소 반응이 불가능하므로 화재나 폭발 위험성이 없고 산화 반응 등이 없으므로 품질 향상에 도움이 된다.

④ 건조 속도 향상과 건조 시간 단축, 장비의 간소화; 과열 증기를 이용하면 전 건조 기간 동안 빠른 건조 속도가 가능하여 건조 시간이 단축되고 따라서 장비의 크기를 줄일 수 있다.

⑤ 살균, 탈취; 과열 증기의 고온을 이용하면 많은 식품산업 등에서 동시에 살균, 멸균, 탈취 등이 가능하다.

⑥ 단위 공정의 조합; 산화 반응이 필요한 제품과 같이 과열 증기로 건조될 수 없는 제품에 대해 2-단 건조 공정과 같은 공정의 조합이 가능하다.

⑦ 입자 크기의 다변화; 현재 이 기술은 더 작은 크기의 입자 건조에 적용하는데 제한적이거나 앞으로 이런 쪽의 연구 개발이 활발해질 가능성이 매우 크다.

과열 증기 건조 기술이 많은 강점이 있음에도 불구하고 다음과 같은 사항들이 공정 중 발생할 수 있다[3].

① 밀폐문제; 연속 공정이나 가압/감압 시 증기의 누출이 발생할 수 있기 때문에 증기 건조 공정과정에서 장치의 밀폐에 많은 주의가 요한다.

② 액적발생; 건조물이나 건조기 내 표면 온도가 응축 온도(100℃, 대기압) 이하 일 때 과열 증기의 응축이 발생하여 액적이 생성될 수 있다.

③ 단열필요; 건조기 내부가 응축 온도 이상으로 유지되기 위해 적절한 단열이 필요하다.

④ 건조 전 응축 발생; 실제 건조가 시작되기 전에 건조기에 투입되는 차가운 피 건조물 상에 약간의 응축이 되는 경우가 있다.

⑤ 적정 온도 및 압력 보장; 과열 증기의 재사용을 이용하여 에너지 효율을 극대화하기 위해서는 올바른 온도와 압력 수준이 보장되어야 한다.

2-3. 과열증기 건조동향

과열 증기 건조에 관한 연구가 오랜 역사만큼 꾸준히 진행되어져오고 있으나 파일럿 크기의 건조기 개발과 실질적인 산업에의 적용을 위한 연구 노력은 역사가 짧은 편이다[8-10]. Mujumdar[8]는 일찍이 과열 증기 건조 기술에 대한 원리와 산업적인 이용, 응용 잠재력, 시장 잠재력, 연구개발의 필요성에 대해 밝힌 바 있다. Shibata와 Mujumdar[4]는 1994년까지 일본에서 발표된 연구 논문들 중 증기 건조 기술의 기본적인 실용적인 측면에 관하여 정리하였는데 제품 품질 향상 측면, 건조 동역학, 건조기 선택, 열 회수 측면에 관한 연구 결과들을 종합하고 분석하였다. 또한 그들은 표면 수분 제거와 내부 수분 제거를 위해 2개로 연결된 증기 건조기 사용을 새로이 제안하기도 하였다.

과열 증기 건조 시 역전 온도를 전후로 과열 증기에서의 증발 속도가 열풍의 증발 속도를 역전하게 된다. 건조 속도와 건조 시간의 관계를 고려하였을 때 역전 온도 이하에서 총 건조 시간이 더 길어질 것으로 예상할 수 있으나 과열 증기 건조시 감열 건조 기간 동안 피 건조물의 온도가 높고 물 증발을 위한 확산 저항이 존재하지 않아 빠른 건조 속도가 유지되기 때문에 역전 온도 이하에서도 총 건조 시간은 단축된다[2, 4]. 건조시간의 단축에 따라 건조기 용적이 줄어들며 건조시간 단축으로 불필요한 에너지 소비를 막을 수 있다. 이러한 역전 온도를 실험이나 이론적으로 결정된 많은 연구들이 있었다[7, 11-22]. Table 4는 Schwartze[20]가 역전 온도에 관한 몇몇의 연구들을 정리한 것을 바탕으로 하여 만들어진 과열 증기를 이용한 건조의 역전 온도에 관한 조사 자료이다.

현재, 과열 증기는 펄프, 제지, 식품, 의약품, 목제품, 연료, 슬러지, 미세입자 등등의 많은 산업의 건조에 이용된다. Douglas[23]는 과열 증기로 제지(paper, sheet)류를 건조하여 습윤한 제지의 열역학적 특성, 제지의 성질과 건조 공정 관련성, 공정 엔지니어링 측면에서 발표되었던 그간의 연구 결과들을 조사하여 정리하였다. 또한 과열 증기를 이용하여 식품류의 성공적인 건조를 위한 다양한 연구가 있어 왔다[24-26]. 상압 과열 증기 건조가 많은 장점이 있음에도 식

Table 4. Summary for inversion temperatures [20]

Researcher	Type	Description	T_{inv} (°C)
Yoshida and Hyodo[15]	Experiment	wetted wall column	160-176
Chow and Chung[16]	Theory	Flat plate, laminar	250
Chow and Chung[17]	Theory	Flat plate, turbulent	190
Faber et al.[18]	Both	Fluidized bed	160
Al-Taleb et al.[19]	Theory	Moving flat surface	225
Haji and Chow[20]	Experiment	Flat plate, turbulent	170-220
Wu et al.[21]	Theory	Wedge, turbulent	200
Nomura et al.[11]	Experiment	Flat plate, laminar	170-275
Ramamurthy[22]	Experiment	Impinging jets, laminar	218-230
Bond et al.[23]	Experiment	Impinging jets, turbulent	175
Schwartz and Broker[25]	Theory	Wetted wall column	199
Schwartz and Broker[25]	Theory	Flat plate, turbulent	200
Costa and Silva[26]	Theory	wetted (liquid) surface	140-200

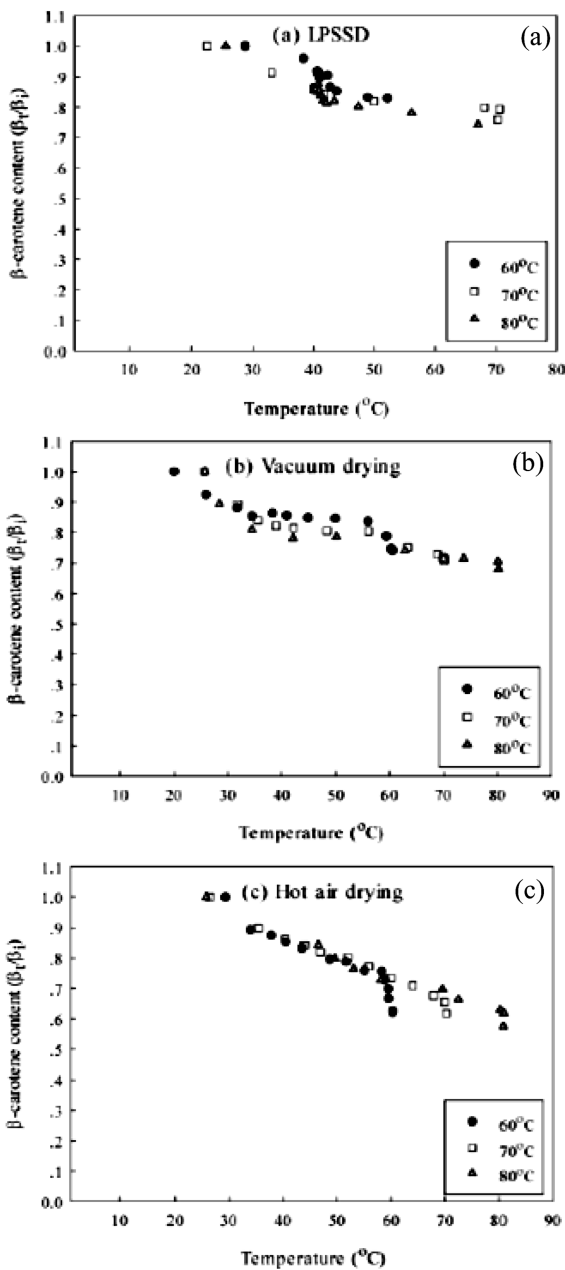


Fig. 4. Relation between β -carotene content and temperature of carrot at (a) LPSSD, (b) vacuum drying and (c) Hot air drying [271].

폼이나 바이오 제품 같은 열 민감성 물질을 건조하는 데는 적절하지 않기 때문에 감압하여 건조기를 운전하는 방법이 제안되었다[27]. Elustondo 등[28]은 새우, 바나나, 감자 등의 저압 과열 증기 건조에 관하여 연구했고, Devahastin 등[29]은 저압 과열 증기와 진공 건조를 이용하여 실험적으로 당근의 건조를 연구했다. Suvamakuta 등[27]은 저압 과열 증기 건조(LPSSD), 진공건조, 열풍 건조가 당근의 β -carotene의 분해에 미치는 영향을 조사하여 저압 과열 증기 건조가 전통적인 열풍 건조보다 당근의 β -carotene을 20~25%까지 덜 분해시킨다는 것을 확인하였다. Fig. 4에 Suvamakuta 등[27]의 실험 결과가 나타나있다.

Hirose와 Hazama[30]는 증기 유동층을 이용하여 하수 슬러지(수분함량 80 wt%)를 건조 처리하기 위한 과일 및 플랜트에 관하여 보고했다. Woods 등[10]은 석탄과 목재에 대한 증기 건조 기술을 검토했으며 Faber 등[14]은 분쇄된 석탄을 공기와 증기 유동층에서 건조 속도를 비교하였다.

과열 증기 건조를 이용하여 피 건조물의 행동을 실험적으로 파악하는 연구와 더불어 이를 이론적으로 최적화하여 시뮬레이션하거나 모델링을 하기 위한 연구가 또한 진행되고 있다. Chen 등[31]은 석탄의 과열 증기 건조 시 과립체의 건조를 시뮬레이션하기 위한 단일 입자 모델을 개발하였다. 이 모델의 계산식을 세라믹 구체와 액

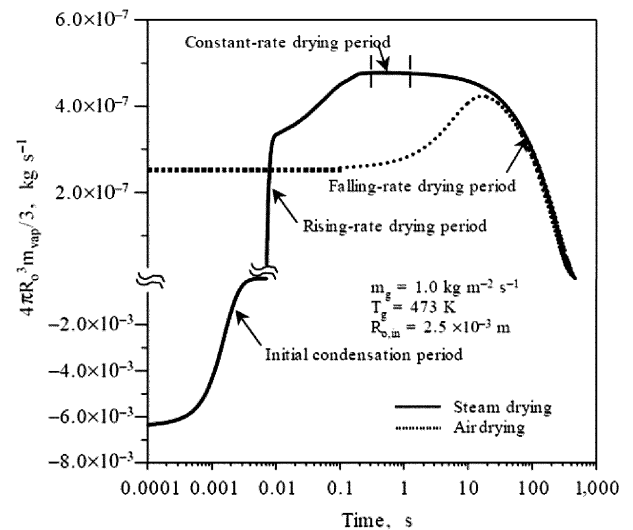


Fig. 5. Evaporation and condensation rates of the droplet with drying time[31].

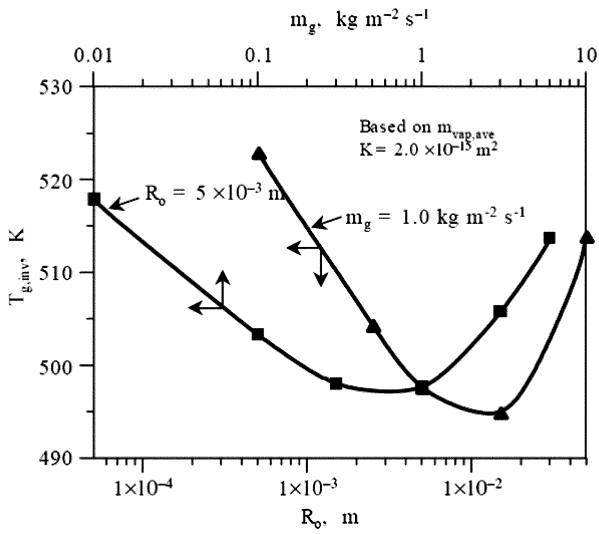
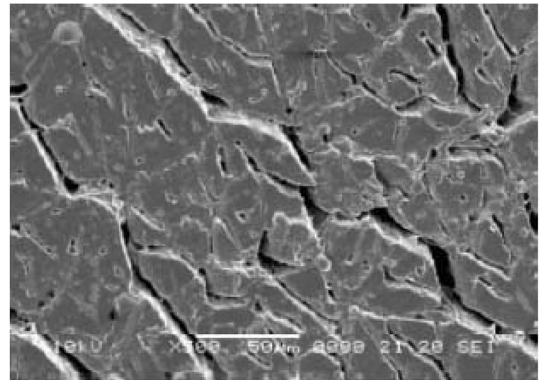


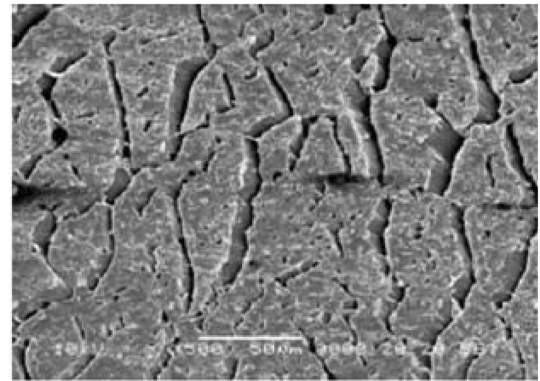
Fig. 6. Effects of gas mass flux and particle size on the inversion temperature for the drying of coal [31].

적에 관한 문헌들의 실험 데이터와 비교하였으며 열적 성질과 운전 변수가 역전온도에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Fig. 5는 증기와 공기에 노출된 액적의 시간에 따른 증발/응축 속도의 변화 그래프이고, Fig. 6은 석탄의 건조 시 역전온도에 미치는 기체 유속과 입자크기의 영향을 나타낸다[31].

과열 증기 건조 공정과 다른 건조 공정이 결합된 다단계 건조 공정에서 건조 특성 및 품질 측정에 관한 연구도 진행 중에 있다. Namsangan 등[32]은 새우를 건조하기 위하여 먼저 140 °C의 과열 증기 건조(superheated steam drying, SSD)를 이용하고 두 번째 단



(a)



(b)

Fig. 8. Effects of different drying processes on microstructure of dried shrimp. (a) SSD and (b) SSD/HPD (IMC=40%) [32].

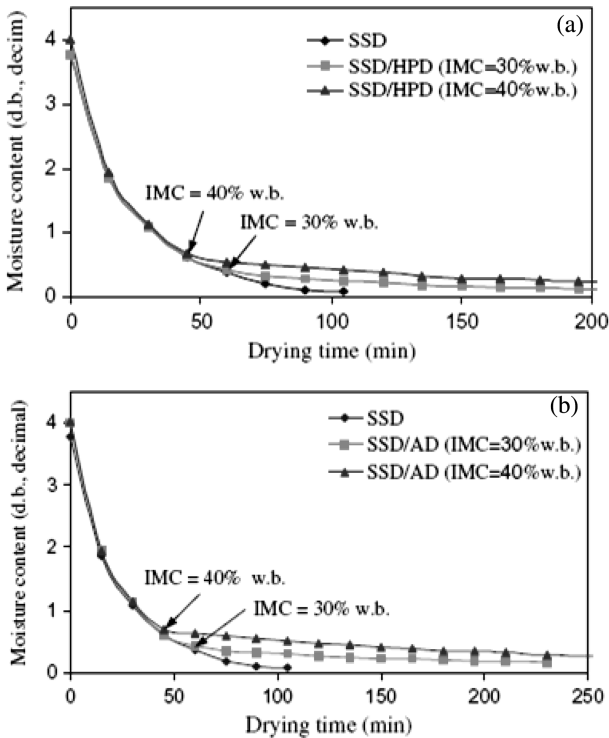


Fig. 7. Drying curves of the shrimp undergoing (a) SSD and SSD/HPD, and (b) SSD and SSD/AD[32]. *IMC=intermediate moisture content.

계로 50 °C의 열펌프 건조(heat pump drying, HPD) 또는 열풍 건조(air drying, AD)를 이용하였다. 과열 증기 공정 단계에서 최종적으로 새우의 수분 함량은 습식 기준으로 30~40%였으며 각각의 공정에 따른 건조된 새우의 수축, 변색, 거칠기, 미세구조 등을 측정하여 과열 증기 건조와 열펌프 건조가 결합된 2단 건조에서 건조 제품의 품질이 더 좋아졌음을 보고하였다. Fig. 7은 서로 다른 건조 공정에서 새우의 건조 시간에 따른 수분함량의 변화 그래프이고, Fig. 8은 각 건조 공정 후의 건조 새우의 미세구조를 보여주는 SEM 사진이다.

장치의 밀폐 정도, 단열성과 더불어 과열 증기 건조기를 선택하는데 있어 중요한 점 중의 하나는 증기의 압력이다[6, 38]. 증기의 압력에 따라 항을 건조와 증기의 재사용(에너지 회수)이 가능해진다. 건조 목적에 따라 고려할 압력 조건은 ① 대기압, ② 대기압 이상의 압력(에너지 회수가 가장 중요할 때), ③ 대기압 이하의 압력(온도에 민감한 제품 건조 시)이다[6]. 현재 대부분의 산업용 과열 증기 건조기는 상압 이상에서 운전되고 몇 개만이 상압에서 운전되고 있다. 따라서 적절한 운전을 위해 과열 증기와 압력의 상관관계에 관한 연구를 살펴볼 필요가 있다.

과열 증기 건조기에서 압력이 중요한 변수인 만큼 상압 이외의 압력의 영향에 관한 많은 연구들이 있다[33-37]. Hosseinipour와 Mujumdar[33]는 충돌 증기 건조기를 이용하여 고체입자의 과열 증기 건조에 대한 운전 압력의 영향을 연구했다. Elustundo 등[34]은 과열 증기로 식품을 건조하는데 있어 압력의 영향에 대해 고찰하였고 최적 압력에 대한 수학적 모델을 개발하였다. Sano 등[35]은 감압

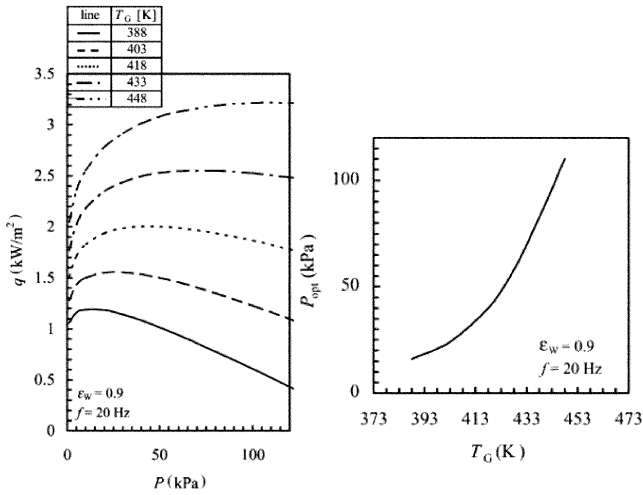


Fig. 9. (a) Effect of drying pressure on combined heat flux for different temperatures of drying gas and (b) plot of optimum pressure against drying gas temperature (calculated results) [35].

과열 증기 건조 공정에서 건조 압력(10~100 kPa)과 온도 (363~388 K) 등의 운전 조건들이 건조 속도와 열 flux 등과 같은 건조 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 이 실험에서 건조 기체인 수증기는 fan에 의해 밀폐된 건조 chamber 내에서 순환된다. Fig. 9는 (a) 각각의 건조 기체 온도에 대하여 열 flux에 미치는 건조 압력의 영향과 (b) 최적 건조 압력과 건조 기체 온도와의 관계를 나타낸다. 그림에서 ϵ_w 는 벽 복사능이고 f 는 fan의 주파수이다. 건조 기체가 고온일수록 열 flux는 크고 최대 열 flux 값을 갖게 되는 최적 건조 압력도 증가한다. Shibata[36,37]는 상압보다 다소 낮은 압력[36]과 저압 조건[37]에서 증기와 공기에서 다공성 고체입자(sintered glass beads, baked clay, cemented glass balloons)의 건조속도를 비교하는 실험을 실시하였다. 상압보다 다소 낮은 압력에서 실시된 이전의 연구[36]에서는 1 micron부터 수십 micron 정도의 다공 크기를 가진 다공성 입자들에 대해 각 항를 건조 동안 비슷한 물질 온도 조건에서 전통적인 기류의 일반화된 건조 속도와 상압보다 다소 낮은 압력을 가진 증기의 일반화된 건조 속도 커브 사이에 뚜렷한 차이가 있었다. 그러나 저압 조건에서 실시된 연구[37]에서는 기류(0.71~1.19 kPa)와 증기(0.97~0.99 kPa) 건조에서 관측된 일반화된 건조 속도 커브 사이에 차이가 없었다는 것이 확인되었다.

이외에도 각 산업분야에서 과열 증기를 이용한 건조 방법을 적용시키기 위한 연구들이 많이 진행되고 있다. Mujumdar[2]는 증기 건조 기술의 형태를 간략히 소개하였으며 몇몇의 기술적 문제점들을 해결하기 위해서라도 과열 증기 건조 기술은 아직도 많은 연구 개발이 필요하다고 보고했다.

2-4. 수학적 모델

Elustondo 등[34]은 과열증기로 식품을 건조하기 위한 최적의 운전 조건을 구하기 위한 수학적 기준을 마련했다. 이를 위해 물질 및 에너지 식으로부터 초기 건조 속도 식을 유도하여 어떤 건조기에도 쉽게 적용할 수 있는 최적 운전 조건을 얻을 수 있는 식을 개발했다. 과열 증기 건조에서 운전 변수는 과열 증기의 압력과 온도, 속도로 간주하여 수학적으로 건조 속도는 온도나 속도의 증가에 따라 증가함을 보였다. 이 두 변수에 대해 건조 속도가 최대값에 도달하

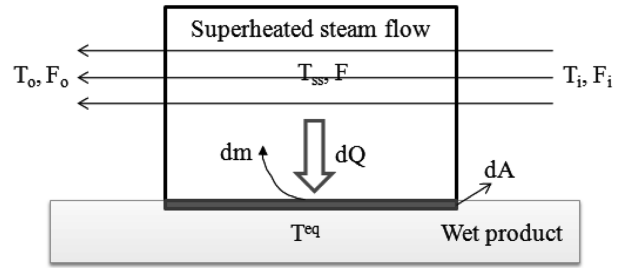


Fig. 10. Mass and energy balance over a portion of total food external area [34].

게 하는 압력은 최소한 하나는 존재함을 보였다. 그들은 수학적 모델을 제안하기 위해 다음과 같은 가정들을 제안하였다[34].

- 1) 공정은 정상상태이고 1차원적이다. 이것은 과열 증기 조건이 한 방향으로만 변하고, 단면적 상에 조건들은 균일함을 의미한다.
- 2) 건조기는 단열 상태이다.
- 3) 과열 증기 압력은 모든 건조 영역에 걸쳐 일정하다.
- 4) 모든 건조 고체의 초기 평형 온도는 동일하다.
- 5) 온도에 따른 증기의 열용량 변화는 무시된다.
- 6) 과열 증기는 이상기체이다.
- 7) 복사에 의한 열전달은 2% 이하로 추정되므로 무시한다.

Fig. 10은 식품의 총 외부 면적에 걸쳐서 물질 및 에너지 수지를 설명하기 위한 개략도이다. 과열 증기가 시료를 지날 때 증기 온도는 열전달로 인해 감소되고 질량 흐름은 증발된 수분에 의해 증가한다. 시료 면적이 dA 라면 유입 과열 증기의 온도와 질량 흐름은 각각 T_o 와 F_o 이고 유출 과열 증기의 온도와 질량 흐름은 각각 T_i 와 F_i 이다. dm 은 단위 시간당 증발되는 물의 질량이다.

증발 시, 과열 증기로부터 식품 외부 표면으로 상당한 열이 전달된다. 단위 시간당 전달되는 열량(dQ)은 다음과 같다.

$$dQ = dAh(T_{ss} - T^{eq}) \tag{1}$$

식 (1)에서 T_{ss} 는 과열 증기 온도, T^{eq} 는 물 평형 온도, dA 는 단면적, h 는 외부 열전달계수이다.

정상상태에서 건조 면적은 고정되며 이 조건하에서 물질 수지는 다음과 같다.

$$F_o = F_i + dm \tag{2}$$

에너지 수지는 각 질량 흐름과 상대적인 엔탈피로부터 다음과 같이 표현된다.

$$F_i H_i + dm H^{eq} = F_o H_o + dQ \tag{3}$$

식 (3)에서 H 는 각 흐름의 엔탈피이다. 전달되는 열 dQ 는 증발 잠열(ΔH)과 관계가 있다.

$$dQ = dm \Delta H \tag{4}$$

과열 증기 압력이 전체 건조 영역에서 일정하게 유지된다고 하면 증기 엔탈피 변화는 증기의 열용량 C_p 와 온도 차이에 의해 계산된다.

$$H_i - H_o = C_p(T_i - T_o) \quad (5)$$

발생된 증기에 동일한 관계가 적용되지만 그 증기는 평형 조건에서 생겨난다. 일반적인 경우에 대해, 과열 증기 엔탈피(H_{ss})와 평형 증기 엔탈피(H^{eq}) 사이의 차이는 발생된 증기 열용량의 평균값(C_p^v)에 의해 구해진다.

$$H_{ss} - H^{eq} = C_p^v(T_{ss} - T^{eq}) \quad (6)$$

식 (2)-(4)를 묶고 식 (5)와 (6)을 사용하여 간단히 하면 F_i 를 기준으로 한 물질 및 에너지 수지에 대한 다음과 같은 표현이 얻어진다.

$$F_i C_p(T_i - T_o) = dQ(1 + C_p^v(T_o - T^{eq})/\Delta H) \quad (7)$$

F_o 에 대해서도 동일한 절차에 따라,

$$F_o C_p(T_i - T_o) = dQ(1 + C_p^v(T_i - T^{eq})/\Delta H) \quad (8)$$

식 (7)과 (8)을 풀기 위해 유입과 유출 온도가 정해져야 하며 물질 및 에너지 수지는 실험상의 열전달 식 (1)로 묶인다. 식 (7)에 식 (1)의 미소 면적을 적용하고 온도 차이($T_i - T_o$)는 온도 미분 ($-dT_{ss}$)로 써주며 증기 온도와 질량 흐름에 대하여 포괄적인 값인 T_{ss} 와 F 를 사용한다. 그 다음 dQ 를 식 (1)로 치환하고 식을 재배열하면,

$$\frac{h}{FC_p} dA = \frac{-dT_{ss}}{(T_{ss} - T^{eq})(1 + C_p^v(T_{ss} - T^{eq})/\Delta H)} \quad (9)$$

온도에 따른 열용량 변화를 무시하고, 식 (9)를 유입(T_i)과 유출(T_o) 증기 온도 범위에서 총 외부 면적(A)에 대해 적분하면 다음과 같이 된다.

$$\int_0^A \frac{h}{FC_p} dA = \ln \left(\frac{1 + C_p^v(T_o - T^{eq})/\Delta H}{1 + C_p^v(T_i - T^{eq})/\Delta H} \frac{T_i - T^{eq}}{T_o - T^{eq}} \right) \quad (10)$$

식 (10)을 단순화시키기 위해 3가지 무차원 수가 정의된다. 첫 번째 무차원 수(N_q)는 대류 열전달 용량과 과열 증기의 열전달 용량 사이의 비로써,

$$N_q = \int_0^A \frac{h}{FC_p} dA \quad (11)$$

두 번째 무차원 수(N_i)는 유입 유출 과열 증기 온도와 시료 평형 온도 사이의 상대적인 차이 비이다.

$$N_i = \frac{T_o - T^{eq}}{T_i - T^{eq}} \quad (12)$$

마지막으로, 세 번째 무차원 수(N_c)는 방출된 수증기의 온도를 상승시키기 위해 사용된 열과 그 증기를 형성하는 데 요구된 잠열 사이의 비이다.

$$N_c = \frac{C_o^v(T_i - T^{eq})}{\Delta H} \quad (13)$$

식 (7)로 식 (8)을 나뉘주면 유입과 유출 과열 증기 흐름 사이의 무차원 관계식이 얻어진다.

$$\frac{F_o}{F_i} = \frac{1 + N_c}{1 + N_i N_c} \quad (14)$$

이때 식 (14)에서 N_c 는 보통 매우 작고 N_i 는 0에서 1사이에서 변하므로 이 식은 대략 1과 같고 따라서 과열 증기 질량 흐름은 일정하다고 가정할 수 있다.

식 (10)의 오른쪽 부분에 무차원 수를 도입하고 N_q 로 정의하면,

$$N_q = \ln \left(\frac{1 + N_i N_c}{1 + N_c} \frac{1}{N_i} \right) \quad (15)$$

건조 속도는 식 (7)을 식 (4)로 치환하여 계산된다.

$$F_i C_p(T_i - T^{eq})(1 - N_i) = m_o \Delta H(1 + N_i N_c) \quad (16)$$

식 (4)에 초기의 전체 면적이 적용되므로 dm 을 대신하여 m_o 가 사용된다. 마지막으로 F 가 일정 질량 흐름 속도를 나타낸다는 것을 고려하여, 식 (15)와 (16)으로부터 총 초기 건조 속도를 예측할 수 있는 일반 표현식이 얻어진다.

$$m_o = \frac{FC_p(T_i - T^{eq})}{\Delta H} (1 - e^{-N_q}) \quad (17)$$

온도에 따라 C_p 가 일정하다고 가정하면 무차원 수 N_q 는 식 (11)로부터 열전달 계수의 평균값(h_m)을 사용하여 다시 쓰일 수 있다.

$$N_q = \frac{h_m A}{FC_p} \quad (18)$$

증기 질량 흐름 (F)는

$$F = Sv_p \quad (19)$$

다음 단계는 최적 운전 조건을 찾는 단계이고 운전 변수의 함수로써 초기 건조 속도를 최대화하는 단계이다. 이 운전 변수들 중의 하나는 전체 건조 영역 내에서 일정하다고 가정된 과열 증기 압력 (P_{ss})이고 다른 것들은 증기 속도와 온도으로써 운전 중 변하는 값이므로 측정 가능한 한계 점을 선택한다. 초기 운전 변수 T_i 와 v_i 이상 기체 법칙에 의해 구해진 증기 밀도(ρ)와 유입 단면적 S_i 에 대해 식 (19)는 다음과 같이 된다.

$$F = S_i v_i \frac{W P_{ss}}{R T_i} \quad (20)$$

식 (20)에 식 (17)과 (18)을 대입하고 온도에 따른 C_p 의 변화는 무시하면서 운전 변수에 관하여 m_o 를 편미분하면, v_i 와 T_i , P_{ss} 에 관한 초기 건조 속도 변화는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{v_i}{m_o} \frac{\partial m_o}{\partial v_i} = \{1 - k_{(N_q)}(1 - N^v)\} \quad (21)$$

$$\frac{T_i}{m_o} \frac{\partial m_o}{\partial T_i} = \frac{T_i}{T_i - T^{eq}} - \{1 - k_{(N_q)}(1 - N^T)\} \quad (22)$$

$$\frac{P_{ss}}{m_o} \frac{\partial m_o}{\partial P_{ss}} = \{1 - k_{(N_q)}(1 - N^P)\} - \frac{P_{ss}}{(T_i - T^{eq})} \frac{\partial T^{eq}}{\partial P_{ss}} - \frac{P_{ss}}{\Delta H} \frac{\partial \Delta H}{\partial P_{ss}} \quad (23)$$

여기서,

$$k_{(N_q)} = \frac{N_q e^{(-N_q)}}{1 - e^{(-N_q)}}; \quad (0 \leq k_{(N_q)} \leq 1) \quad (24)$$

이고, 남아있는 새로운 변수(N^v, N^T, N^P)는 세 가지 운전 변수에 관한 평균 외부 열전달 계수의 상대적인 변화로써 다음과 같다.

$$N^v = \frac{v_i \partial h_m}{h_m \partial v_i} \quad (25)$$

$$N^T = \frac{T_i \partial h_m}{h_m \partial T_i} \quad (26)$$

$$N^P = \frac{P_{ss} \partial h_m}{h_m \partial P_{ss}} \quad (27)$$

레이놀즈수($Re = \frac{D_H v \rho}{\mu}$)와 식 (19)를 결합하면 Re 는 F 의 함수가 된다.

$$Re = \frac{D_H F}{S \mu} \quad (28)$$

식 (18)과 Nusselt 수($Nu = \frac{h_m D_H}{k}$), Prandtl 수($Pr = \frac{C_p \mu}{k}$), 식 (31)을 사용하면 N_q 는 다음과 같다.

$$N_q = \frac{A Nu}{S Pr Re} \quad (29)$$

N^v 와 N^T, N^P 는 Nu 와 Re 의 함수로 표현된다. Nu 수에서 chain rule에 의해 P_{ss} 에 관해 h_m 과 편미분하자.

$$\frac{\partial h_m}{\partial P_{ss}} = \frac{\partial h_m}{\partial Nu} \left(\frac{\partial Nu \partial Re}{\partial Re \partial P_{ss}} + \frac{\partial Nu \partial Pr}{\partial Pr \partial P_{ss}} \right) + \frac{\partial h_m}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial P_{ss}} \quad (30)$$

Pr 과 k 는 압력에 따라 많이 변하지 않기 때문에 다음과 같이 간단히 된다.

$$\frac{\partial h_m}{\partial P_{ss}} = \frac{\partial h_m}{\partial Nu} \frac{\partial Re \partial Re}{\partial Nu \partial P_{ss} \partial Nu} \quad (31)$$

식 (31)과 Nu 수, 식 (20), (28)에 의해 N^P 는 Nu 수와 Re 수의 형태로 결합된다.

$$N^P = N = \frac{Re \partial Nu}{Nu \partial Re} \quad (32)$$

동일한 방식으로 N^v 와 N^T 에 대해 수행하면 식 (32)와 비슷한 꼴을 얻는다. 이때, 점도와 열전도도, 열용량의 온도 의존성은 무시한다.

$$N^T \approx N^v = N^P = N \quad (33)$$

식 (33)에서 N 은 보통 $Nu=f(Re)$ 관계식의 Re 의 지수 값과 일치하고 양수이며 1보다 작다.

$$0 < N \leq \{1 - k_{(N_q)}(1 - N)\} \leq 1 \quad (34)$$

$T_i/(T_i - T^{eq})$ 가 항상 1보다 크므로 식 (34)에 의해 식 (21)과 식 (22)에서

$$\frac{\partial m_o}{\partial v_i} > 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial m_o}{\partial T_i} > 0 \quad (36)$$

P_{ss} 에 대해서는 다소 다르다. 물리적인 관점에서 $P_{ss}=0$ 일 때, 어떤 증기 질량 흐름이 없으므로 $m_o=0$ 이다. $P_{ss}=P^{eq}$ 일 때, 열적 구동력이 없으므로 $T^{eq}(P^{eq})=T_{ss}$ 이고 $m=0$ 이다. $0 < P_{ss} < P^{eq}$ 를 만족시키는 P_{ss} 의 특정 값이 존재할 때, m_o 는 최대가 된다. 이런 경우에 식 (23)의 왼쪽 편은 0과 같고 따라서 최적의 운전 조건은 다음 조건에 의해 표현된다.

$$\{1 - k_{(N_q)}(1 - N)\} - \frac{P_{ss}}{(T_i - T^{eq})} \frac{\partial T^{eq}}{\partial P_{ss}} - \frac{P_{ss}}{\Delta H} \frac{\partial \Delta H}{\partial P_{ss}} = 0 \quad (37)$$

Chain rule을 증발 잠열에 적용하면 식 (37)은

$$\frac{\partial \Delta H}{\partial P_{ss}} = \frac{\partial \Delta H \partial T^{eq}}{\partial T^{eq} \partial P_{ss}} \quad (38)$$

이상 기체 거동이라고 가정하여 압력에 관한 평형 온도 편미분은 Clapeyron 식으로 표현될 수 있다[38].

$$\frac{dT^{eq}}{dP_{ss}} = \frac{R}{W \Delta H} \frac{(T^{eq})^2}{P_{ss}} \quad (39)$$

온도에 대한 증발 편미분은 평형 조건 ΔC_p^v 하에서 증기와 물 열용량 사이의 차이와 같다[38].

$$\frac{\partial \Delta H}{\partial T^{eq}} = \Delta C_p^v \quad (40)$$

마지막으로 식 (37)에 식 (40)을 결합하고 재배열하면 최적의 운전 조건을 포함하는 표현식을 얻을 수 있다. 주어진 v_i 와 P_{ss} 값에 대해 m_o 를 최대로 만드는 최적의 증기 유입 온도 $T_{i,op}$ 는 다음과 같다.

$$T_{i,op} = \left(\frac{R}{W \Delta H} \right) \left(\frac{1 + N_c^*}{1 - k_{(N_q)}(1 - N)} \right) + T^{eq} \quad (41)$$

$$N_c^* = \frac{\Delta C_p^v (T_i - T^{eq})}{\Delta H}$$

여기서 N_c^* ; 잠열과 증기-물의 온도 차이로 인한 열과의 비이다.

3. 과열 증기를 이용한 건조기

3-1. 유동층 건조기

과열 증기 유동층 건조기는 기존의 유동층 건조 방식과 과열 증기 건조가 적절히 결합된 시스템이다. 유동층만이 가지고 있는 장점과 과열 증기 건조 기술이 결합함으로써 훨씬 더 긍정적인 효과를 발휘할 수 있다.

과열 증기 만큼 오래된 연구 대상이 유동층 분야이며 이미 산업 곳곳에서 많이 이용되고 있으면서 아직까지도 꾸준히 개발이 진행되는 분야이기도 하다.

유동층이란 고체 입자 층 내 고체 입자들이 기체나 액체에 부유하여 유동 상태로 변환되는 작용을 말한다. 이러한 유동층의 장점은 다음과 같다.

- ① 입자 조각이 간편하고 연속적이며 자동적인 조절이 가능하다.
- ② 입자 혼합이 빨라 열용량 조절이나 급격한 발열반응에 안정성이 있다.
- ③ 유동층 사이의 입자 순환이 가능하므로 생성된 막대한 열을

제거할 수 있다.

④ 대규모 조업에 적합하며 기체와 고체 사이의 열 및 물질전달이 상당히 크다.

⑤ 유동층과 열전달 면적과의 높은 열전달 속도로 인해 열교환기의 표면적을 작게 하고 반응기 크기를 줄일 수 있다.

이러한 유동층 공정은 건조, 흡착, 코팅, 먼지여과, 석탄연소, 석탄 가스화, 폐기물 소각로 및 열 교환기, 촉매반응, 합성 반응, 고분자 중합 공정 등에 응용되며, 유동층 건조기는 액상의 용액이나 슬러리, wet cakes, 고체상 파우더나 granule, pellet 등의 건조에 이용된다.

Kondo 등[39]은 회석상 슬러리의 증기 유동층 건조기에 관한 연구를 실시했다. 유동층에서 115 °C에서 137 °C의 증기를 건조 매체로 사용하여 증기와 공기 사이의 flow regime에 차이가 없음을 확인하였다 Hirose와 Hazama[30]는 증기 유동층을 사용하여 하수 슬러지를 건조 처리하는 파일럿 플랜트에 관한 연구를 발표했다. 초기에 80 wt% 이상(wet basis)의 수분함량을 가진 하수 슬러지가 기계적인 탈수과정 후 증발기를 거치게 되면 수분함량이 73.2 wt%가 되고 증기 유동층에서 5 wt%(wet basis)까지 건조된다. 건조된 하수 슬러지의 발열량은 8.4 MJ/kg에서 18.9 MJ/kg 이었다. 슬러지의 소각에 요구되는 열 또는 과잉 열은 슬러지의 수분함량과 선형 관계가 있는데 이는 Fig. 11에 잘 나타나 있다. 초기 수분함량이 80 wt%이고 12.6 MJ/kg의 발열량을 가지고 있는 슬러지를 소각할 경우 420 kJ/kg의 보조 에너지가 필요하다. 건조기에서 증발된 증기가 증발기에서 열원으로써 재사용되며 건조기를 위한 열은 건조된 슬러지를 소각시킴으로써 얻어질 수 있다. 게다가 이 공정에서 건조된 슬러지는 다른 공정에 열을 공급하기 위한 연료로 사용될 수 있다.

Faber 등[14]은 증기 유동층과 공기에서 분쇄된 석탄의 건조 속도를 비교하였으며 Takahashi 등[40]은 층 물질이 매체 입자인 증기 유동층에서 건조된 미세 실리카(0.1~5 μm) 입자가 열풍 건조에서 상업적으로 생산되는 실리카 입자의 품질과 차이가 없음을 밝혔다. 스웨덴의 헬싱키 기술 대학교는 토탄(peat)을 파일럿 플랜트 수준(100 kg/h, 수분 증발)의 증기 유동층에서 성공적으로 건조하였다.

또한 1992년 미국에서 개발되었지만 일본에서 상업적으로 사용되고 있는 용매 증기를 사용하는 진공 유동층도 있다[4]. 이 건조기

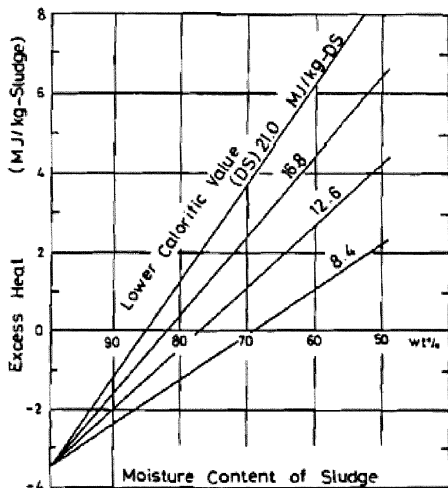


Fig. 11. Heat balance chart of sewage sludge incineration [30].

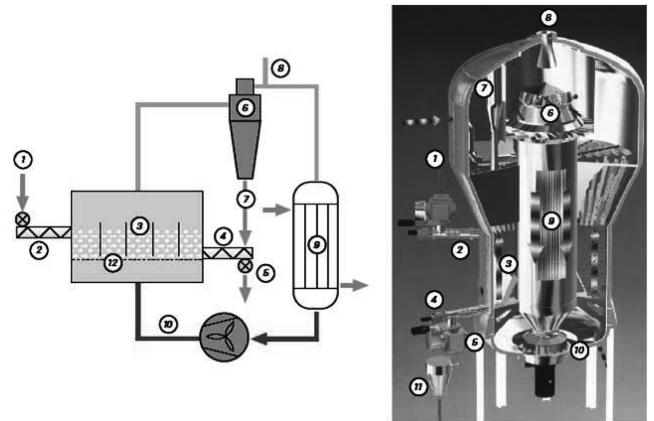


Fig. 12. Internal structure and operating principle of a BMA/NIRO fluid bed superheated steam dryer [41].

의 장점은 건조 시간이 단축된다는 점과 발생된 작은 양의 용매 증기도 쉽게 회수 되어 대기 오염을 방지할 수 있다는 점이다.

실제로 상업적으로 사용되는 과일 증기를 이용한 유동층 건조기도 있다[6]. BMA/NIRO 유동층 과일 증기 건조기[41]는 De Danske Sukkerfabrikken에 의해 설탕 산업용으로 덴마크에서 처음 개발되어 Stage Sugar Factory에 설치되었다. 이후 NIRO 회사에 의해 이 장치는 beet pulp 건조용으로 상업화되었다[6]. Fig. 12는 고압 증기로 간접 가열되는 상업화된 가압 유동층 건조기의 내부와 구동 원리를 나타낸다[41]. 이 건조기는 수직 구획을 가진 큰 수직 실린더로 구성되며 피 건조물은 과일 증기에 의해 한 수직 구획에서 유동되고 다음 구획에서 아래로 떨어진다. 이런 방식으로 피 건조물은 모두 14개의 구획을 통과하면서 건조된다. 저압 과일 증기는 fan에 의해 순환되고 내부 열교환기에 의해 가열되어 고압 가열 증기가 된다. 건조기 내부 압력은 대략 3bar이고 피 건조물인 sugar beet pulp의 체류 시간은 대략 8분 정도이다[6]. Mujumdar[2]는 전통적인 회전식 건조기와 비교하여 90%까지 에너지 절약이 가능하고 제품의 질도 더 좋다고 발표하였다.

Fig. 12와 같은 장치는 현재 beet pulp의 건조용으로 운전되지만 beet pulp 이외에도 목초, 생선 고기, 사과 짠 찌꺼기, 나무껍질, 도시 하수 슬러리 등의 건조에 이용될 수 있다[2].

식품, 의약, 전자재료, 세라믹 등 많은 산업에서 점차 그 쓰임이 증가하고 있는 Geldart group C 입자[42]인 수 nm에서 수십 μm크기의 미세 입자(fine powder)는 종종 액체용매 안에서 생성되므로 후처리 공정으로서 건조 과정이 필수적으로 필요하다. Group C 입자들의 일반 건조 방법인 교반형 건조기, 기류건조기, 회전식 건조기, 분무 건조기 등은 많은 단점들을 가지고 있어서[43] 유동층 건조기가 이용 가능 하지만 미세 입자들은 유동화가 잘 되지 않기 때문에 유동화 및 열전달 매체로 사용되는 매체 입자를 이용한 유동층 건조기가 이용된다[44-47].

3-2. 총돌 제트 건조기

총돌 제트 기류(impinging jet)의 원리는 Fig. 13(a)에 나타난 바와 같이 고속의 제트기류를 피 건조물 표면에 충돌하게 함으로써 국소적으로 높은 열전달율을 얻는 것이다[48]. 수분과 공기의 경계층이 쉽게 사라지고 대류 전열 및 물질 확산 속도가 빨라지기 때문에 기존의 통기 건조 방식에 비해 건조 속도가 크게 증가한다. 이런

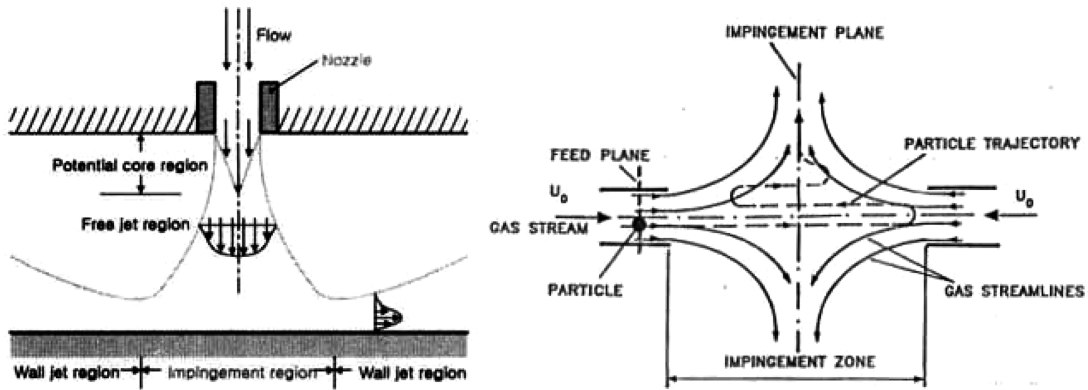


Fig. 13. (a) Flow regime of the impingement jet[48] and (b) Principle of the impingement steam dryer [49].

이유로 제지, 섬유나 필름 등 판형 물질의 가열, 냉각, 건조 등에 사용될 수 있으며 슬러리나 입자의 건조에 과열 증기 충돌 제트를 적용하기 위한 연구가 진행 중에 있다. 충돌 제트 건조의 특징은 다음과 같다[48].

- ① 국소적으로 높은 열전달율을 얻을 수 있으며, 시스템의 구성에 따라 균일한 가열이 가능하여 제품의 품질이 향상된다.
- ② 재료층의 수분과 공기의 경계층이 쉽게 파괴되어 경막전열계수의 값이 크게 증가되므로 항을 건조 기간이 증가한다.
- ③ 열전달계수의 증기뿐만 아니라 재료층 표면과 내부의 압력차가 커져 내부수분의 확산속도가 빨라지며 감을 건조 기간이 짧아진다.
- ④ 온습도 제어가 용이하고, 배기 순환 시스템의 적용이 유리하며, 기존 시스템에 비해 열효율을 20~30% 향상시킬 수 있다.

과열 증기를 이용한 충돌 제트 건조 방식은 흐름 방향, 충돌 흐름의 수, 흐름 특성에 따라 분류될 수 있고[49] 유동층 건조기, 드럼식 건조기, 분무식 건조기 등과 결합하여 사용될 수도 있으나 여기서는 이런 점을 고려하지 않고 통상적인 과열 증기 충돌 제트 건조기에 관하여 살펴보고자 한다. Fig. 13(b)는 충돌 증기 건조기의 원리를 나타낸다[49]. 충돌 증기 건조기는 충돌 제트 건조기의 새로운 통칭적인 용어로서 두 개의 반대방향 고속 기체 흐름의 충돌에 의해 발달된 충돌 영역에서 젖은 입자나 액적으로부터 수분 증발이 일어나는 건조기이다. 이 반대 방향의 두 흐름 중 적어도 하나는 건조될 분산 물질을 포함하고 있다.

과열 증기를 이용하여 제지를 건조하는 연구가 50여 년 전에 본격적으로 시작된 이래로 Dungal[50]은 1952년도에 과열 증기를 이용한 종이 건조에 관한 특허를 출원하였다. 충돌 제트 과열 증기 건조의 연구가 시작되기 이전에 이미 종이를 건조하기 위해 열풍을 이용하는 충돌 제트 건조가 산업에서 쓰여 왔으나 과열 증기의 충돌 제트를 이용하여 종이를 직접적으로 건조하면 매우 빠른 속도로 수분을 제거할 수 있다는 사실을 알게 되었다[23]. Mujumdar[51]는 과열 증기를 사용하여 종이를 직접적으로나 직접/간접적으로 건조하기 위해 충돌 제트를 포함하는 다양한 가능성 있는 조합을 제안하기도 하였다.

현탁액과 용액의 건조 기술 중 가장 최신 기술 중 하나가 충돌 증기 건조이며 이 기술은 특히 액상 생물공학 제품의 건조에 적합하다[52]. 방법은 노즐을 통해 분사 되는 발효액과 고속으로 유입되는 건조 주체가 다중 상호 충돌이 일어나며 건조가 이루어진다. 과열 증기를 이용한 슬러지 건조용 충돌 흐름 건조기도 러시아에서 성공

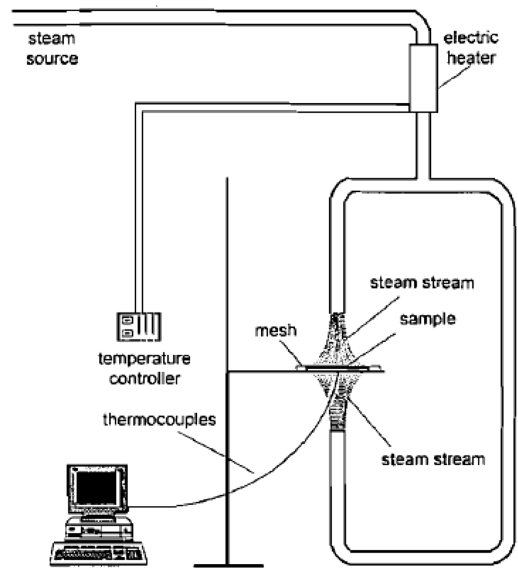


Fig. 14. Schematic diagram of an impingement jet steam dryer [54].

적으로 파일럿 크기까지 운전되었다[2]. 또한 중국에서 최근에 많은 연구들이 입자와 슬러리용 충돌 증기 건조기의 설계에 관하여 수행되었으나 이 연구의 대부분은 아직 초기단계에 불과하며 실험실적인 크기의 충돌 증기 건조기를 효과적으로 scale-up하기 위한 방법을 개발하는 것이 필요하고 벽 침전물과 마찰, 덩어리짐과 같은 문제에 많은 주의를 필요로 한다[53].

Li 등[54]은 Fig. 14의 장치를 이용하여 옥수수 토르티야의 충돌 기류건조와 충돌 과열 증기 건조를 비교하였다. 그들은 실험을 통하여 증기 온도와 열전달계수 중에서 증기 온도가 건조 특성에 더 큰 영향을 미치고 증기 온도가 건조 공정 동안 기류건조보다 토르티야의 품질에 더 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 또한 기류와 과열 증기 충돌 제트 건조를 비교했을 때 높은 온도(145 °C)에서 과열 증기 충돌 제트가 기류 충돌 제트 보다 더 빠른 건조 속도를 나타내었다.

Hosseinipour와 Mujumdar[33]는 CFD 모델링과 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 과열 증기를 사용하는 새로운 충돌 증기 건조를 실험하였는데 과열된 정도와 운전 압력, 제트 레이놀즈수의 영향을 감을 건조 동역학에 대한 멱급수 모델로 가정하였다.



Fig. 15. Moenus textile dryer [6].

독일의 Moenus Artos Textilmaschinen GmbH는 표면에 충돌하는 과열 증기 제트를 가진 직물 시트용 건조기를 생산하고 있다[6]. Fig. 15는 직물 건조용 과열 증기 충돌 제트 건조기를 나타낸다. 공기보다 더 작은 비중을 가지고 있는 과열 증기에서 상부는 닫혀 있고 하부는 열려 있는 증기 공동(cavity)을 얻을 수 있다. 직물 섬유는 증기의 손실 없이 하부에서 닫힌 증기 공동으로 유입되고 유출된다.

3-3. 플래시 건조기

플래시 건조기는 입자 부유식 건조기의 대표적인 예이다. Fig. 16은 플래시 건조기의 전형적인 모습을 나타낸다. 플래시 건조기의 운전 원리는 매우 단순한데 미세한 젖은 입자는 건조물 수집 장치로 건조 매체와 함께 투입되고 매우 짧은 체류 시간(0.5~3.5초)안에 플래시 건조가 일어난다[55]. 플래시 건조기의 주요한 장점은 열 및 물질 전달을 위한 큰 접촉 표면적을 가지고 있다는 점이며 또 다른 장점은 이상적인 혼합에 근접할 정도로 고체 물질의 순환 강도가 크기 때문에 균일한 제품 수분 농도를 제공한다는 점이다[55]. 이런 플래시 건조기는 슬러지나 wet cakes, 상대적으로 자유로이 흘러가는 조립체 등의 건조에 사용된다.

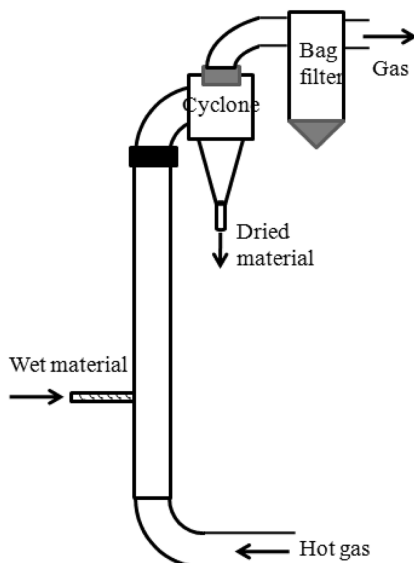


Fig. 16. Conventional flash dryer.

플래시 건조기로 잘 알려져 있는 기류 컨베이어 건조기(pneumatic conveying dryer)는 산업용 건조기의 가장 흔한 형태 중 하나이며 세계적으로 크기가 가장 큰 건조기들은 대부분 플래시 건조기이다[56]. 이 건조기는 높은 열전달 속도와 짧은 체류 시간을 가지고 있다[47]. 기류 컨베이어 건조기에서 건조 속도를 제어하는 외부 요소는 크게 3가지가 있다. 첫째는 기체와 벽 사이 마찰과 입자들의 가속에 의해 야기된 운동량 손실 때문에 건조 매체의 압력은 감소하고, 둘째로 온도는 입자로의 열전달과 벽에서의 열전달에 영향을 미친다. 셋째로 입자와 기체 사이 미끄러짐 속도는 입자와 벽사이의 마찰과 계면 drag에 의해 제어된다[56].

과열 증기를 이용한 플래시 건조기에 대한 제품의 건조 특성이나 동역학 특성, 압력 관계 등에 관한 기초적인 연구에서부터 건조에 대한 수학적 모델링과 시뮬레이션과 같은 전산유체역학 측면 등에 관한 연구가 진행되고 있다[56-61]. 물고기 밥을 건조하는데 있어서 칠레의 Espinoza[57]는 실험실 수준에서 Haemmerli[58]는 파일럿 플랜트 수준에서 이송 기체를 과열 증기로 바꿔 플래시 건조를 성공적으로 적용하였다. Blasco와 Alvarez[59]는 파일럿 기류건조기에서 물고기 밥을 과열 증기 건조하면서 획득한 실험 데이터를 사용하여 산업적인 기류건조기의 운전에 관한 모델링 결과를 발표하였다.

Hilmart와 Gren[60]은 과열 증기 기류건조기에서 나무 조각의 건조 실험을 실시하였다. 건조 매체는 유입 온도가 200 °C 이상이고 2에서 6 bar 압력의 과열 증기였다. Fyhr와 Rasmuson[56]은 기류 컨베이어 건조기에서 나무 조각의 과열 증기 건조 실험에 바탕을 두고 다른 다공성 물질에도 적용할 수 있는 건조 모델링을 제시하였다. 이외에도 Pakowski 등[61]은 과쇄 담배의 공정 데이터에 기초한 과열 증기 플래시 건조기의 모델을 제시하였는데 담배의 과열 증기 플래시 건조의 시뮬레이션에서 일차원 단일 입자 건조 모델에 의한 모델식이 만족스러운 결과를 나타냄을 보고하였다.

Brammer와 Bridgwater[62]는 통합 가스화 생물에너지 발전소(integrated gasification bio-energy plant)에서 가스화를 위해 투입되는 바이오매스의 건조에 적합한 건조기 형태로 과열 증기를 이용한 가압 유동층 건조기와 가압 기류식 컨베이어 건조기 등을 언급하였다.

제품의 건조에 사용되는 산업용 과열 증기 플래시 건조기도 있다. Fig. 17은 GEA가 개발한 Exergy Barr-Rosin dryer의 장치도이다[63]. Fig. 17의 전체 시스템은 끈적끈적한 슬러지 같은 피 건조물의 건조를 위한 것이며 그러한 물질의 건조를 위해 역혼합 공정과 re-boiler

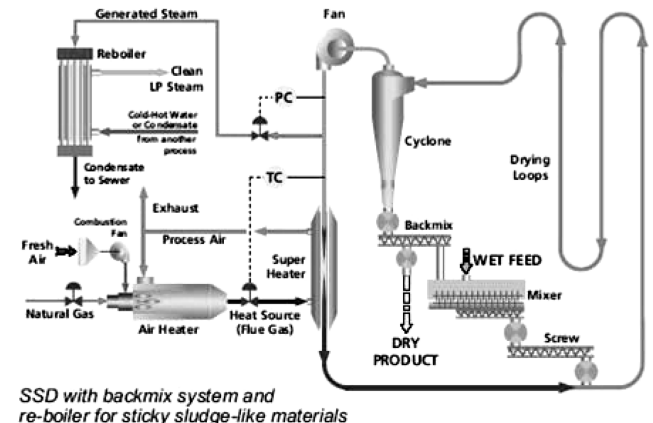


Fig. 17. Scheme of a Exergy Barr-Rosin dryer system by GEA [63].

를 갖춘 닫힌 루프 기류 컨베이어 건조 시스템이다. 피 건조물에 따라 전체 시스템이 조금씩 달라질 수 있으나 기본적인 건조 시스템과 원리는 변하지 않는다. 젖은 고체 입자는 압력 밀폐 회전 밸브나 플러그 스크류에 의해 가압된 과열 이송 증기의 흐름에 의해 투입된다. 이송 증기는 매체 압력 증기나 연도 가스, 가열 기름을 사용하는 통 모양의 열교환기를 통하여 과열된다. 시스템에서 체류시간은 보통 50~60 초이다. 이송 증기와 건조된 물질은 고효율 사이클론에서 분리되고 피 건조물은 또 다른 압력 밀폐 회전 밸브에 의해 건조기로부터 배출된다. 사이클론으로부터 이송된 증기는 fan에 의해 열교환기로 순환되고 발생된 과잉 증기는 0~4 barg의 압력에서 연속적으로 배출된다. 증기는 스크류나 터보 증기 압축기를 사용하여 10~20 bar로 재압축될 수 있고 과열기에서 열원으로 사용될 수 있다. 이런 형태의 에너지 회수 방식을 기계적 증기 재압축 (mechanical vapor recompression) 방식이라 부른다. 이 장치의 전력 소비량은 증발되는 물 1 ton 당 보통 150~200 kWh이다[63].

일본 Hosokawa가 개발한 pneumatic flash superheated steam 건조기[64]는 공기나 질소로 운전되던 상업적인 기류 플래시 건조기에 기초로 하여 제작된 과열 증기 건조기이다. 기존에 개발된 Hosokawa의 플래시 건조기에 증기 건조를 위해 재순환하는 증기 루프가 추가되어 사용된다. 기존 장치에서 인공의 증발에너지를 제공하는 것이 열풍이나 질소였던 점과 비교하여 증기를 이용하는 것에 차이가 있다. 이 장치는 특히 젖은 파우더나 슬러리 같이 균일한 입자 크기 분포를 가진 건조 미세 입자를 얻는데 적합한 장치이다. 이 장치는 시간당 1 kg의 물을 증발시키는데 3,600 kJ보다 훨씬 적은 양의 에너지를 소비한다[64].

4. 과열 증기 건조 기술의 미래

과열 증기 건조에서 건조 공정은 뜨겁고 습윤한 증기의 누출을 막기 위해 닫힌계로 운전되어야 하며 과잉 증기에서 열을 회수하는 것도 닫힌계에서 이루어진다. 또한 start up과 shut down 시 약간의 증기 응축이 일어나기도 한다. 따라서 고온의 증기 누출을 막고 부식과 충격에도 강한 구조물이 건조기 입구와 출구, 건조기와 각 연결 배관에 요구되는 만큼 이런 구조물 장비의 연구와 개발이 필요하다. 부식을 막기 위해 스테인리스 스틸 장치가 설치될 수 있다[6].

항을 건조 기간 동안 제품의 온도는 습구온도만큼 상승하게 되고 증기 압력에 따라 증기 온도는 더 상승한다[2]. 그러나 식품이나 열에 민감한 고분자와 같이 고온의 환경이 적절하지 않은 경우가 있다. 이런 경우 제품의 품질이 떨어지거나 품질을 유지하기 위해 감압하여 이용함으로써 에너지 회수의 효율성이 떨어지게 된다. 따라서 제품의 품질 향상을 도모하고 에너지 효율도 극대화할 수 있는 연구들이 더 진행될 수 있을 것이다.

과열 증기 건조가 많은 장점이 있기 때문에 산업에 응용되고 있지만 아직 상업적으로 이용 가능한 제한된 수의 과열 증기 건조기가 존재할 뿐이며 그 적용 영역도 현재는 한정적이다[6]. 다양한 산업에 걸맞은 다양한 건조 형태와 다양한 처리 용량이 필요하다. 따라서 장치 개발과 공정 및 운전 성능 개선, 장치의 scale up과 scale down과 같은 영역의 개발 필요성이 있다. 또한 과열 증기를 이용하여 여러 단계의 건조기를 조합하는 복합 건조 장치도 연구 대상이다.

오늘날 사회적으로 가장 큰 이슈가 환경문제와 에너지 절약 문제인 만큼 환경오염 물질이나 온실 가스(CO₂)의 직접적인 배출이 없

고 발생된 증기의 재사용을 통한 에너지 절약이 가능한 과열 증기 건조 기술의 사회적 이슈 해결에 대한 연구들은 아직도 충분히 매력적이다. 또한 과열 증기 건조를 통해 대부분의 배출 물질이 증기 응축물의 형태로 존재하게 되므로 이에 대한 처리 문제도 아직 남아있는 부분이다.

지금까지 과열 증기를 이용한 건조에 관한 연구가 기초적인 실험이나 응용 측면에서 이루어져 왔다면 최근에는 컴퓨터의 발달로 인해 실험에서는 할 수 없는 영역에 대한 연구와 최적 운전 조건 확립 등의 연구에 컴퓨터를 활용한 시뮬레이션 연구가 이루어지고 있으므로 더 다양한 시뮬레이션 연구 결과물들이 발표될 것이다.

5. 결 론

오늘날 고유가 문제와 환경오염 문제가 사회적으로 큰 문제로 인식되고 있기 때문에 각 산업공정에서는 이러한 문제를 해결하고자 다양한 연구가 진행되고 있으며 에너지 다소비형 공정인 건조 공정에서도 에너지 절약과 환경오염 방지를 위한 연구가 다각도로 진행되고 있다. 그러한 일환의 한 예로써 에너지 절약 및 배출물질 저감 등의 강점을 갖고 있는 과열 증기 건조 방식에 대한 관심이 증가하고 있다.

본고에서는 과열 증기 건조 기술에 관한 일반적인 내용, 산업에 적용된 과열 증기 건조기 등을 살펴보았다. 과열 증기를 이용한 건조 기술은 오랜 역사를 바탕으로 많은 연구가 진행되어 왔고 현재 몇몇의 산업 영역에 적용되었으며 이 기술로 생산되는 제품들도 존재하고 있다.

과열 증기 건조 방식은 대류를 이용한 직접 건조 방식으로서, 건조를 위한 열을 공급하고 증발된 수분을 운반하기 위한 건조 매체로 사용되던 기존의 열풍이나 연도 가스를 대신하여 과열 증기를 사용하여 피 건조물을 건조하는 방식이다. 과열 증기는 큰 열용량과 열전도도, 작은 비중 등의 독특한 물리적인 특성으로 인해 기존의 열풍 건조에 비해 건조 속도가 빠르고 건조 시간을 단축할 수 있기 때문에 건조기 용적을 줄일 수 있다. 과열 증기 건조에 있어 중요한 영향 인자는 다른 공정에서처럼 증기 온도와 압력이며 증기 온도와 압력은 서로 상관관계가 있다.

과열 증기 건조 기술에 있어서 몇 가지 중요한 장점은 다음과 같다. 과열 증기를 이용한 건조에서 회수된 고온의 증발된 증기를 재활용함으로써 에너지 절약이 가능하고 품질(제품 수축, 거칠기, 미세구조 변화 등) 향상이 가능하며 먼지 같은 유해 물질을 배출하지도 않고 무산소 공정인 만큼 폭발 등에 대한 안정성이 확보된다.

이 과열 증기 건조 기술은 현재 펄프, 제지, 식품, 의약품, 목제품, 연료, 슬러지, 미세입자 등등의 건조에 이용될 수 있고 기존의 유동층 건조기 및 플래시, 회전식, 충돌 제트 건조기 등의 건조 방식과 결합하여 사용이 가능하지만 아직 상업적으로 이용 가능한 과열 증기 건조기의 수는 제한적이며 현재 적용된 분야와 제품도 일부에 불과하다. 또한 과열 증기 건조 기술을 이용하는데 몇 가지 제한 사항도 분명히 존재한다.

그러나 이런 점들이 오히려 과열 증기 건조 관련 연구의 미래에 대한 청사진들이며 과열 증기 건조가 커다란 잠재력과 성장 가능성이 내재된 기술임을 분명하게 보여주는 것이다. 마지막으로 다시 한번 짚고 넘어가야 할 점은 과열 증기 건조 기술이 에너지 절약에 좋

은 강점이 있다는 점이며 이는 오늘날과 같은 고유가 시대에 특히 상기해야 할 좋은 기술이라는 점이다.

사용기호

A	: total food external area [m ²]
C _p	: mean value of superheated steam heat capacity [J/kg·K]
C _p ^v	: mean value of generated vapor heat capacity [J/kg]
D _H	: characteristic length [m]
f	: frequency of electric power input to fan motor [Hz]
F	: superheated steam mass flow [kg/s]
F _i	: inlet superheated steam mass flow [kg/s]
F _o	: outlet superheated steam mass flow [kg/s]
G	: mass flux of gas, [kg/m ² ·h]
h	: superheated steam heat transfer coefficient [W/m ² ·K]
h _m	: mean value of superheated steam heat transfer coefficient [W/m ² ·K]
H _i	: inlet superheated steam mass enthalpy [J/kg]
H _o	: outlet superheated steam mass enthalpy [J/kg]
H _{ss}	: superheated steam mass enthalpy [J/kg]
H ^{eq}	: vapor mass enthalpy in equilibrium conditions [J/kg]
IMC	: intermediate moisture content [%]
k	: thermal conductivity [W/m·K]
K	: permeability [m ²]
m	: drying rate, amount of evaporated water per unit time [kg/s]
m _g	: gas mass flux, [kg/m ² ·s]
m ₀	: total initial drying rate [kg/s]
m _{vap,ave}	: average volumetric vaporization rate [kg/m ³ ·s]
N	: Nusselt relative variation with respect to Reynolds
N _c	: relation between sensible heat and latent heat of evaporation
N _c [*]	: relation between sensible heat and latent heat of evaporation
N _q	: relation between heat transferable and heat available in superheated steam
N _t	: relation between inlet and outlet temperature difference
Nu	: Nusselt number
N ^P	: relative variation of heat transfer coefficient with respect to pressure
N ^T	: relative variation of heat transfer coefficient with respect to temperature
N ^V	: relative variation of heat transfer coefficient with respect to velocity
P _{opt}	: optimum drying oressure [N/m ²]
P _{ss}	: superheated steam pressure [N/m ²]
Pr	: Prandtl number
q	: combined heat flux [W/m ²]
Q	: amount of heat transferred per unit time [W]
Re	: reynolds number
R _{o,in}	: initial radius [m]
S	: cross sectional area perpendicular to superheated steam flow [m ²]
S _i	: inlet cross sectional area [m ²]

T ^{eq}	: initial food equilibrium temperature (K)
T _g	: drying gas temperature [K]
T _{g,inv}	: inversion temperature of drying gas [K]
T _i	: inlet superheated steam temperature [K]
T _{i,opt}	: optimum steam inlet temperature for v _i and P _{ss} given [K]
T _o	: outlet superheated steam temperature [K]
T _{ss}	: superheated steam absolute temperature [K]
v	: superheated steam velocity [m/s]
v _i	: inlet superheated steam velocity [m/s]
W	: water molecular weight [kg/mol]
ΔC _p ^v	: heat capacity difference between vapor and water in equilibrium [J/kg·K]
ΔH	: food latent heat of evaporation [J/kg]
ε _w	: wall efficiency [-]
ρ	: superheated steam density [kg/m ³]
k(N _q)	: dimensionless function of N _q

참고문헌

1. Chun, W. P., Energy-Resource Technology Developments THE-7 Research Planning and Analysis Reports - Dryer Parts(2007).
2. Mujumdar, A. S., in A. S. Mujumdar(Ed.), *Handbook of Industrial Drying; Ch. 35*, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc., New York, NY(1995).
3. van Deventer, H. C. and Heijmans, R. M. H., "Drying with Superheated Steam", *Dry. Technol.*, **19**(8), 2033-2045(2001).
4. Shibata, H. and Mujumdar, A. S., "Steam Drying Technologies: Japanese R & D", *Dry. Technol.*, **12**(6), 1485-1524(1994).
5. Kumar, P. and Mujumdar, A. S., "Superheated Steam Drying-A Review", in A. S. Mujumdar(Ed.), *Drying of Solids*, Sarita, Meerut, India(1990).
6. van Deventer, H. C., "Industrial Superheated Steam Drying", TNO-report, R 2004/239(2004).
7. Nomura, T., Nishimura, N., Kashiwagi T. and Uemukai, T., "Characteristics of Evaporation Rate of Water in Superheated Steam and Air", in A. S. Mujumdar(Ed.), *Drying of Solids*, Sarita Prakashan, New Delhi, 221-221(1990).
8. Mujumdar, A. S., CEA Report, 816 U 671, Montreal, Canada (1990).
9. Mujumdar, A. S., "Drying Technologies of the Future", *Dry. Technol.*, **9**(2), 325-347(1991).
10. Woods, B., Hussain, H. and Mujumdar, A. S., "Technoeconomic Assessment of Potential Superheated Steam Drying Applications In Canada", Canadian Electrical Association Report, 913U888, 120 (1994).
11. Yoshida, T. and Hyodo, T., "Evaporation of Water in Air, Humid Air, and Superheated Steam", *Ind. Eng. Chem.: Proc. Des. Dev.*, **9**(2), 207-214(1970).
12. Chow, L. C. and Chung, J. N., "Evaporation of Water into a Laminar Stream of Air and Superheated Steam", *Int. J. Heat Mass Transfer*, **26**(3), 373-380(1983).
13. Chow, L. C. and Chung, J. N., "Water Evaporation Into a Turbulent Stream of Air, Humid air or Superheated Steam", in: Proceedings of the ASME National Heat Transfer Conference, publication no. 83-HT-2(1983).

14. Faber, E. F., Heydenrych, M. D., Seppa, R. V. I. and Hicks, R. E., "A Technoeconomics Compression of Air and Steam Drying," in A. S. Mujumdar(Ed.), *Drying '86* Vol 2, Hemisphere, New York, 588-594(1986).
15. Al-Taleb, M., Hasan, M. and Mujumdar, A. S., "Evaporation of Liquids from a Wet Stretching Surface Into Air, Unsaturated Air and Superheated Solvents," *Drying '87*, 261-269(1987).
16. Haji, M. and Chow, L. C., "Experimental Measurement of Water Evaporation Rates Into Air and Superheated Steam," *Trans. ASME J. Heat Transfer*, **110**(1), 237-242(1988).
17. Wu, C.-H., Davis, D. C. and Chung, J. N., "Simulated Dehydration of Wedge-Shaped Specimens in Turbulent Flow of Superheated Steam and Air," *Dry. Technol.*, **7**(4), 761-782(1989).
18. Ramamurthy, P., "Concentration of Black Liquor to High Solids," PhD. Thesis, McGill University, Montreal(1991).
19. Bond, J. F., Mujumdar, A. S., van Heiningen, A. R. P. and Douglas, W. J. M., "Drying Paper by Impinging Jets of Superheated Steam. Part 2. Comparison of Steam and Air as Drying Fluids," *Can. J. Chem. Eng.*, **72**(3), 452-456(1994).
20. Schwartz, J. P., "Evaluation of the Superheated Steam Drying Process for Wool," *Berichte aus der Verfahrenstechnik*, Shaker Verlag, Aachen(1999).
21. Schwartz, J. P. and Bcker, S., "A Theoretical Explanation for the Inversion Temperature," *Chemical Engineering Journal*, **86**(1-2), 61-67(2002).
22. Costa, V. A. F. and Silva, F. N., "On the Rate of Evaporation of Water Into a Stream of Dry Air, Humidified Air and Superheated Steam, and the Inversion Temperature," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **46**(19), 3717-3726(2003).
23. Douglas, W. J. M., "Drying Paper in Superheated Steam," *Dry. Technol.*, **12**(6), 1341-1355(1994).
24. Seyed-Yagoobi J., Li, Y. B., Moreira, R. G. and Yamsaengsung, B., "Superheated Steam Impingement Drying of Tortilla Chips," *Dry. Tehcnol.*, **17**(1-2), 191-213(1999).
25. Moreira, R. G., "Impingement Drying of Foods Using Hot Air and Superheated Steam," *J. Food Eng.*, **49**(4), 291-295(2001).
26. Caixera A. T., Moreira, R. G. and Castell-Perez, M. E., "Impingement Drying of Potato Chips," *J. Food Process Eng.*, **25**(10), 63-90(2002).
27. Suvarnakuta, P., Devahastin, S. and Mujumdar, A. S., "Drying Kinetics and β -Carotene Degradation in Carrot Undergoing Different Drying Processes," *J. Food Sci.*, **70**(8), 521-526(2005).
28. Elustondo, D. M., Elustondo, P. and Urbicain, M. J., "Mathematical Modelling of Moisture Evaporation from Foodstuffs Exposed to Subatmospheric Pressure Superheated Steam," *J. Food Eng.*, **49**(1), 15-24(2001).
29. Devahastin, S., Suvarnakuta, P., Soponnonnarit, S. and Mujumdar, A. S., "A Comparative Study of Low-Pressure Superheated Steam and Vacuum Drying of a Heat-Sensitive Material," *Dry. Technol.*, **22**(8), 1845-1867(2004).
30. Hirose, Y. and Hazama, H., "A Suggested System for Making Fuel from Sewage Sluds," *Kagaku-Kogaku Ronbunshyu*, **9**(5), 583-586(1983).
31. Chen, Z., Wu, W. and Agarwal, P. K., "Steam-Drying of Coal. Part 1. Modeling the Behavior of a Single Particle," *Fuel*, **79**(8), 961-973(2000).
32. Namsanguan, Y., Tia, W., Devahastin, S. and Soponnonnarit, S., "Drying Kinetics and Quality of Shrimp Undergoing Different Two-Stage Drying Processes," *Dry. Technol.*, **22**(4), 759-778(2004).
33. Hosseinalipour, S. M. and Mujumdar, A. S., "A Model for Superheated Steam Drying of Particles in an Impinging Stream Dryer," in Turner, I. W. and Mujumdar, A. S.(Ed.), *Mathematical Modeling and Numerical Technologies in Drying Technology*, Marcel Dekker, Inc., NY, 537-574(1997).
34. Elustondo, D. M., Mujumdar, A. S. and Urbicain, M. J., "Optimum Operating Conditions in Drying Foodstuffs with Superheated Steam," *Dry. Technol.*, **20**(2), 381-402(2002).
35. Sano, A., Senda, Y., Oyama, K., Tanigawara, R., Bando, Y., Nakamura, M., Sugimura, Y. and Shibata, M., "Drying Characteristics in Superheated Steam Drying at Reduced Pressure," *Dry. Technol.*, **23**(12), 2437-2447(2005).
36. Shibata, H., "Comparison of Drying Rate Curves of Porous Solids in Superheated Steam to Those in Air," *Drying Technology*, **23**(7), 1419-1434(2005).
37. Shibata, H., "Drying Rate Curves of Porous Solids in Steam and in Air Under Low-Pressure Conditions," *Drying Technology*, **24**(1), 37-43(2006).
38. Suvarnakuta, P., Devahastin, S. and Mujumdar, A. S., "A Mathematical Model for Low-Pressure Superheated Steam Drying of a Biomaterial," *Chem. Eng. and Processing*, **46**(7), 675-683(2007).
39. Kondo, T., Yoshida, K. and Kunii, D., "Basic Studies on Fluidized Beds Drying by Steam," *Kagaku-Kogaku*, **29**(12), 1016-1017(1965).
40. Takahasi, N., Sato, Y., Itoh, T., Kojima, T., Koya, T., Furusawa, T. and Kunii, D., "Drying of Slurry in Bed of Particles Fluidized by Pure Water Vapor," *Proc. Fourth International Drying Symposium IDS '84, Kyoto*, 693-700(1984).
41. http://www.bma-de.com/fileadmin/Templates/BMA/pdf/d/WVT_en_de.pdf.
42. Geldart, D., "Effect of Particle-size and Size Distribution on Behavior of Gas-Fluidized Beds," *Powder Technol.*, **6**(4), 201-215(1972).
43. Land, C. M., "Industrial Drying Equipment: Selection and Application," *Chem. Eng.*, 53-61(1984).
44. Nakagawa, N., Ohsawa, K., Takahara, T. and Kato, K., "Continuous Drying of a Fine Particles-Water Slurry in a Powder-Particle Fluidized Bed," *J. Chem. Eng. Japan*, **25**(5), 495-501(1992).
45. Lee, D. H. and Kim, S. D., "Drying Characteristics of Starch in an Inert Medium Fluidized Bed," *Chem. Eng. Technol.*, **16**(2), 263-296(1993).
46. Lee, D. H. and Kim, S. D., "Mathematical Model for Batch Drying in an Inert Medium Fluidized Bed," *Chem. Eng. Technol.*, **22**(5), 443-450(1999).
47. Kim, O. S., Lee, D. H. and Kim, S. D., "Drying Characteristics of Fine Powders in an Inert Medium Circulating Fluidized Bed," *The 10th Asian Conference on Fluidized-Bed and Three-phase Reactors*, November, Busan(2006).
48. Chun, W. P., Lee, K. W., Park, K. H., Lee, W. H. and Lee, K. J., "Experimental Study on the Air Drying Characteristics using the Impingement Jet Stream," *SAREK 2005 Summer Scientific Conference Journal*, 1107-1112(2005).
49. Kudra, T., Mujumdar, A. S. and Meltser, V., in A. S. Mujumdar(Ed). *Handbook of Industrial Drying.*; Ch.17, 2nd ed, Marcel Dekker, Inc., New York(1995).

50. Dugler, J., "Method for Drying Fibrous Sheet Material," U.S. Patent 2,590,849(1952).
51. Mujumdar, A. S., 100th Anniversary Issue : Titagarh Paper Mills, Calcutta, India. Plenary Lecture, Indian Institute of Chemical Engineering, Madras, India(1981).
52. Kudra, T. and Mujumdar, A. S., "Impingement Stream Dryers for Particles and Pastes," *Inter. J. Dry. Technol.*, **7**(2), 219-266 (1989).
53. Mujumdar A. S., "Research and Development in Drying: Recent Trends and Future Prospects," *Dry. Technol.*, **22**(1-2), 1-26(2004).
54. Li, Y. B., Seyed-Yagoobi, J., Moreira, R. G. and Yamsaengsung, R., "Superheated Steam Impingement Drying of Tortilla Chips," *Dry. Technol.*, **17**(1-2), 191-213(1999).
55. Kisakurek, B., in A. S. Mujumdar(Ed.), *Handbook of Industrial Drying: Ch.15*, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc., New York(1995).
56. Fyhr C. and Rasmuson, A., "Steam Drying of Wood Chips in Pneumatic Conveying Dryers," *Dry. Technol.*, **15**(6-8), 1775-1785 (1997).
57. Espinoza, A. and Jadue, P., "Secado Neumatico con Vapor Recalentado," *Chemical Engineering Thesis*, U. de Santiago, Chile(1995).
58. Haemmerli, R., "Oxidacih de Harina de Pescado Secada con Vapor Recalentado," *Chemical Engineering Thesis*, U. de Concepcion, Chile(1996).
59. Blasco, R. and Alvarez, P. I., "Flash Drying of Fish Meals with Superheated Steam: Isothermal Process," *Dry. Technol.*, **17**(4-5), 775-790(1999).
60. Hilmart, S. and Gren, U., "Steam Drying of Wood Residues - An Experimental Study," *Drying'87*, Hemisphere, P.C.(1987).
61. Pakowski, Z., Druzdzal, A. and Drwiega, J., "Validation of a Model of an Expanding Superheated Steam Flash Dryer for Cut Tobacco Based on Processing Data," *Dry. Technol.*, **22**(1-2), 45-57(2004).
62. Brammer, J. G. and Bridgwater, A. V., "Drying Technologies for an Integrated Gasification Bio-Energy Plant," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **3**, 243-289(1999).
63. http://www.barr-rosin.com/english/pdf/super_heated_steam_dryer_processor.pdf.
64. <http://www.hosokawamicron.nl/template.asp?paid=173>.