

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760175

研究課題名（和文） 自己熱再生方式を用いた省エネルギーバイオマス乾燥

研究課題名（英文） Energy Efficient Biomass Drying using Self-Heat Recuperation

研究代表者 伏見 千尋 (FUSHIMI CHIHIRO)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50451886

研究成果の概要（和文）：

自己熱再生 (SHR) 乾燥プロセスの実現化と更なるエネルギー消費の削減を目的として、これまでの SHR 乾燥プロセスを簡略化したプロセスを提案した。各空気流量において、自己熱再生プロセスのエネルギー消費量 ($\text{kJ/kg-H}_2\text{O}$ evaporated) を算出し、過熱水蒸気を用いた蒸気再圧縮法 (MVR) による乾燥プロセスと比較した。SHR 乾燥プロセスでは、試料の予熱に用いる熱交換器を削除することで、エネルギー消費を 474 から 147 $\text{kJ/kg-H}_2\text{O}$ evaporated に削減することに成功した。これは、通常の熱回収型乾燥プロセスのエネルギー消費 (2410 $\text{kJ/kg-H}_2\text{O}$ evaporated) と比較してわずか 1/16、MVR による乾燥プロセスと比較して 3/5 であった。

研究成果の概要（英文）：

Simplified drying process based on self-heat recuperation (SHR) has been proposed to reduce energy consumption. Specific energy consumption (SEC: $\text{kJ/kg-H}_2\text{O}$ evaporated) of SHR drying process was evaluated at various air flow rates and compared with mechanical vapor recompression (MVR) drying process with superheated steam. Results show SEC of SHR can be reduced from 474 to 147 $\text{kJ/kg-H}_2\text{O}$ evaporated by removing heat exchangers for sample preheating. The SEC of the simplified SHR process was only 1/16 of conventional drying process with heat recovery (2410 $\text{kJ/kg-H}_2\text{O}$ evaporated) and 3/5 of MVR process.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：熱工学

科研費の分科・細目：機械工学、熱工学

キーワード：乾燥、省エネルギー、自己熱再生

1. 研究開始当初の背景

バイオマス資源は、化石資源によらない持続可能な循環型社会の構築に向けて今後重要な役割を担うものであるため、その利活用の促進が強く期待されている。しかし、バイオマスは木質系や農作物系においても、生産時には湿潤基準で 50-80%程度と含水率が高いため、熱化学変換効率の低下や輸送費用の増大、安定な保存の困難などの問題を引き起こしている。この問題の解決のために、バイ

オマスの乾燥が行われているが、乾燥では熱交換時に温度差が必要であったため、従来は灯油などを燃焼する乾燥方式が一般的であった。これらの乾燥方式では一部顕熱の回収が行われてきたにすぎないため、熱効率が低い。また、近年水蒸気の潜熱を回収する乾燥技術が開発されつつあるが[1]、もし顕熱と潜熱の両方を回収する技術があれば、従来に比べて大幅な燃料消費量減少につながる。

これまで研究代表者らは、流体の状態変化

(圧縮・膨張)により、流体の質を熱的に再生し、熱交換器にて熱交換を行って流体自身の熱で流体を加熱・冷却する「自己熱再生方式による顕熱と潜熱の回収方法」を提案してきた[2]。さらに、自己熱再生方式を乾燥プロセスに適用することにより、従来の熱回収を行っていない乾燥プロセスに比べて13.7%の大幅な省エネルギーが達成できることを示した[3]。また、このプロセスでは水分の潜熱交換が最重要であるため、乾燥器としては、装置内伝熱速度の大きい流動層を選定した[4]。

このプロセスの実現のためには、伝熱管を用いて加圧水蒸気の凝縮熱回収量を最大化することが重要である。しかし、既往の流動層乾燥プロセスでは、ほとんどが伝熱管を用いず熱風や過熱水蒸気を層内に導入する直接乾燥方式であり、本プロセスで想定している伝熱管内での凝縮熱を用いた間接加熱方式のバイオマス流動層乾燥に関する研究は、まだほとんど行われていない。

また、水蒸気中に非凝縮ガスを導入すると、乾燥速度が速くなるため装置の小型化も期待できる。一方、非凝縮ガスにより水蒸気分圧が低下するので、圧縮動力の増加や凝縮伝熱速度の低下も考えられる。そのため、非凝縮ガスの量を適切に保つ必要があるが、プロセスでの非凝縮ガスの影響の検討を調べた研究はほとんどない。また、既往の研究では、非凝縮ガスの存在下での水蒸気の凝縮伝熱速度を調べた研究は数多く行われているが、そのほとんどが垂直管を用いた実験であり、本研究で想定している水平管での凝縮伝熱速度を調べた研究は極めて少ない[5]。

参考文献

- [1] 日野俊之, 日本エネルギー学会誌, 84, 353-358, 2005
- [2] Yasuki Kansha, Naoki Tsuru, Kazuyoshi Sato, Chihiro Fushimi, Atsushi Tsutsumi, Industrial & Engineering Chemistry Research 48, 7682-7686, 2009
- [3] Chihiro Fushimi, Yasuki Kansha, Muhammad Aziz, Kazuhiro Mochidzuki, Shozo Kaneko, Atsushi Tsutsumi, Keigo Matsumoto, Katsuhiko Yokohama, Kenichiro Kosaka, Noboru Kawamoto, Koji Oura, Yoshiki Yamaguchi, Masaaki Kinoshita, Drying Technology, 29, 105-110, 2011
- [4] Muhammad Aziz, Chihiro Fushimi, Yasuki Kansha, Kazuhiro Mochidzuki, Shozo Kaneko,

Atsushi Tsutsumi*, Keigo Matsumoto, Takao Hashimoto, Noboru Kawamoto, Koji Oura, Katsuhiko Yokohama, Yoshiki Yamaguchi, Masaaki Kinoshita, Innovative Energy-Efficient Biomass Drying Based on Self-Heat Recuperation Technology, Chemical Engineering Technology 34 1095-1103, 2011

[5] T. Wu, K. Vierow, Experimental Heat Transfer 19, 1-14, 2006

2. 研究の目的

本研究では、過熱水蒸気と非凝縮ガス(空気)との混合気体での自己熱再生法と、非凝縮ガスを含まない過熱水蒸気での蒸気再圧縮法の乾燥プロセスにおいて、1) 物質・熱収支計算及びエクセルギー解析を行い、非凝縮ガスの流量における、エネルギー削減効果について詳細に検討することと、2) 水蒸気の水平伝熱管内での凝縮熱を利用した流動層乾燥器での伝熱速度と乾燥速度の測定を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) プロセスシミュレーション

- プロセスのエネルギー消費量についてはプロセスシミュレータのPROII ver9.0(インベシス社)を用いて計算を行った。シミュレーションの条件は下記のとおりとした。
- ① 湿量基準の含水率50 wt%の木材チップ試料5000 kg/hを湿量基準の含水率20 wt%まで乾燥する。
 - ② 乾燥器の部分は循環空気および循環水蒸気とバイオマスサンプルを混合するMIX, 圧縮水蒸気の潜熱を交換する熱交換器HX-2とする。
 - ③ MVR乾燥システムは凝縮した熱水の熱交換を行うMVR-aと、凝縮した熱水の熱交換を行わないMVR-bの二つを想定した。
 - ④ SHR乾燥システムは既往の研究[4]で報告したSHR-a, 予熱器とバイオマス顕熱回収器を削除したSHR-cについて検討した。
 - ⑤ 乾燥は大気圧101.3 kPaで行う。
 - ⑥ 断熱圧縮用の圧縮機, 乾燥システムの圧力損失を補填するためのブロー, 圧縮仕事を回収するための膨張器の各断熱効率それぞれ80, 80, 90%とした。
 - ⑦ 熱損失, 物質移動・伝熱抵抗は無視した。
 - ⑧ MVR乾燥では循環水蒸気を1000 kg/h, SHR乾燥では循環空気量を100-3000 kg/hとした。このときの空気流量における圧縮空気-水蒸気混合物中の空気の質量分率を X_{air} とした。
 - ⑨ 周囲温度は20℃とし、シミュレーションのプロセス流れが20℃以下になる場合にはその結果を棄却した。
 - ⑩ HX-2の最小接近温度差はできる限り10 K

に近づけることとし、それ以下になる場合にはその結果を棄却した。

① 各熱交換器は向流とした。
ここで SHR 乾燥におけるエネルギー消費量は以下の式で求めた。

$$W_{net,SHR} = W_{co} + W_{bl} - W_{ex} \quad (1)$$

ここで、 $W_{net,SHR}$ は SHR 乾燥における総エネルギー消費量 [kW]、 W_{co} が圧縮機の動力 [kW]、 W_{bl} がブローアの動力 [kW]、 W_{ex} が膨張機での回収動力 [kW] である。また MVR 乾燥の総エネルギー消費量 $W_{net,VRC}$ [kW] は以下の式で求めた。

$$W_{net,VRC} = W_{co} + W_{bl} \quad (2)$$

そして、乾燥に必要なエネルギー (SEC: specific energy consumption) については、以下の式で求めた。

$$SEC = \frac{W_{net,SHR} \text{ or } W_{net,VRC}}{\frac{M_{steam}}{3600}} \quad (3)$$

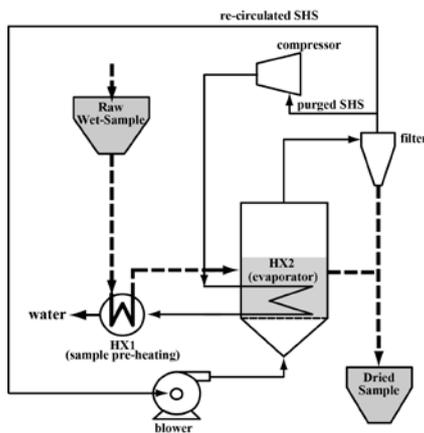


図1 MVR 乾燥システム概念図

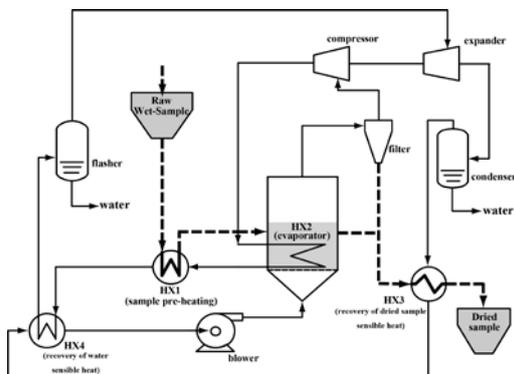


図2 SHR-a 乾燥システム概念図

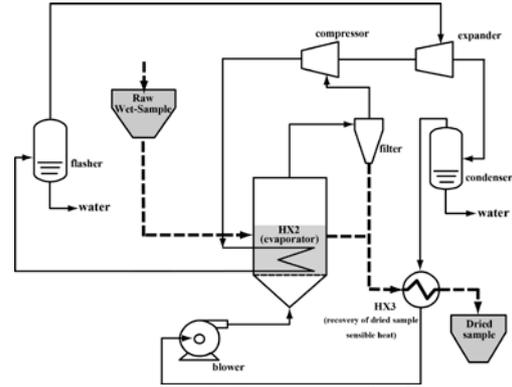


図3 SHR-c 乾燥システム概念図

(2) エクセルギー解析

次に、エクセルギー E [kW] を次式を用いて求めた [6]。

$$E = (mH - m_0H_0) - T_0(mS - m_0S_0) \quad (4)$$

ここで H はエンタルピー [kJ/kg]、 S はエントロピー [kJ/(kg K)]、 m は質量流量 [kg/s]、 T は温度 [K] である。下付き記号 0 は基準状態を示す。今回、基準状態は 1 atm, 293 K とした。 S は次式で求めた。

$$S = m \int \frac{C_p}{T} \Delta T \quad (5)$$

C_p は定圧熱容量 [J/(kg K)] である。水、空気、木材チップについては次式を用いて算出した。

$$C_p = 0.1037 + 0.003867T \quad (6)$$

また、熱交換器などのエクセルギー損失 E_{loss} [kW] は次式で求めた。

$$E_{loss} = \Sigma E_{in} - \Sigma E_{out} \quad (7)$$

ただし、in は入ってくる流れ、out は出ていく流れを示す。そして、次式でプロセスにおけるエクセルギー損失を求めた。

$$\Delta E_{loss} = \Sigma (m_{in} H_{in} - m_{out} H_{out}) - T_0 (m_{in} S_{in} - m_{out} S_{out}) \quad (8)$$

今回、熱交換器 HX と混合器 MIX で主なエクセルギー損失が発生すると考えられるため、この二つのプロセスにおけるエクセルギー解析を行った。

(3) 実験

シミュレーションで想定した条件における、実際の試料の乾燥速度と伝熱速度を求めするために、図 4, 5 に示す実験装置を用いて乾

燥実験を行った。図中 1 は空気圧縮機(日立産機システム製, POD-1.5GX), 2 は水蒸気発生装置(大阪電機工業製, OSG-90S), 3 は乾燥器, 4 はフィルターハウジング(住友スリーエム製, 1BS1-T-25), 5 は減圧弁, 6 は流量制御計(コブロック製, 200SLM), 7 は熱電対, 8 はフレキシブルリボンヒーターである。空気圧縮機により発生した空気は減圧弁, 質量流量計によってそれぞれ圧力, 流量を調整した。そして圧縮空気は二分され, フレキシブルリボンヒーターによりそれぞれ加熱した。一方はそのまま乾燥器に通し, もう一方は水蒸気発生装置から発生した水蒸気と混合し, 凝縮管に通し, 乾燥器内を加熱した。水蒸気-空気混合物は最終的にフィルターハウジングに通され, 水蒸気は凝縮させた。

試料は木材チップ(針葉樹チップ, 長さ約 25-40mm)及びおが粉(長さ約 3-6mm)を用いた。

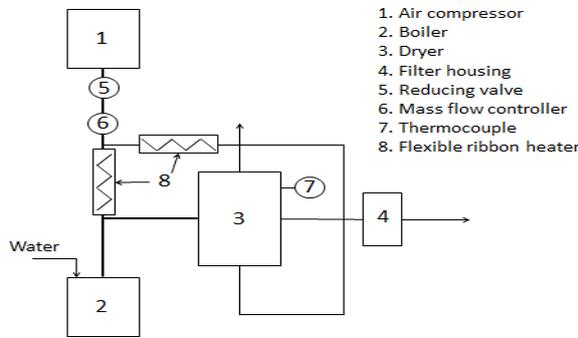


図 4 乾燥・伝熱実験装置概略図

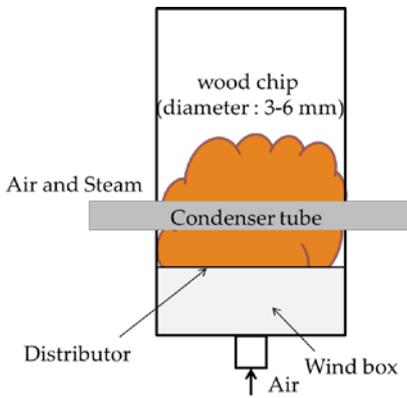


Fig. Detail of dryer
図 5 乾燥器内概略図

参考文献

[6] I. Dincer, M. A. Rosen, EXERGY-Energy, Environment and Sustainable Development, Elsevier, 2007

[7] Olaf Hoehne, Stefan Lechner, Matthias Schreiber & Hans Joachim Krautz, Drying of Lignite in a Pressurized Steam Fluidized Bed-Theory and Experiments, Drying Technology, 28, 2010, 5-19

4. 研究成果

(1) プロセスのエネルギー消費

図 6 に, MVR と SHR 各プロセスにおけるエネルギー消費量のシミュレーション結果を示す。横軸が空気流量 [kg/h], 縦軸がエネルギー消費量(SEC) [kJ/kg-H₂O evaporated] である。

図に示す通り, MVR-a において SEC は 248.9 kJ/(kg-H₂O), MVR-b においては 502.1 kJ/(kg-H₂O)であった。このことから, MVR 乾燥においては凝縮した熱水の顕熱の回収が有効であると考えられる。SHR-a 乾燥プロセスにおいては, 473.5-529.4 kJ/(kg-H₂O)の範囲であった。この値は MVR-a よりも大きく, VRC-b とほぼ同等の値となった。SHR-b でエネルギー消費は 225.1-261.2 kJ/(kg-H₂O)の範囲であり, SHR-a 及び MVR-b と比較すると大幅に小さく, MVR-a と比較するとほぼ同等であった。また, SHR-a 及び SHR-b においては空気流量の増加とともにエネルギー消費量の増加がみられたが, これは空気流量が増加することによってブロワーの動力が増加し, 更に膨張機で回収できない動力があるためであると考えられる。SHR-c において, エネルギー消費量は 147.3-260.2 [kJ/(kg-H₂O)]であり, これら5つのプロセスで最も小さかった。最小のエネルギー消費量で比較すると, SHR-c (空気流量 1000 kg/h) は従来の乾燥法でのエネルギー消費量 (2410 kJ/kg-H₂O evaporated [発表論文(2)参照]) の 1/16, SHR-b の 13/20, MVR-a の 3/5 にまで削減することができた。従ってこれらの結果から, SHR 乾燥においては予熱器を凝縮した熱水の顕熱を交換する熱交換器を減らした方がエネルギー消費量は減少することがわかった。これは, 予熱器で熱交換のための温度差をつけるために, 過剰に圧縮機で動力を加えていたためであることも分かった。

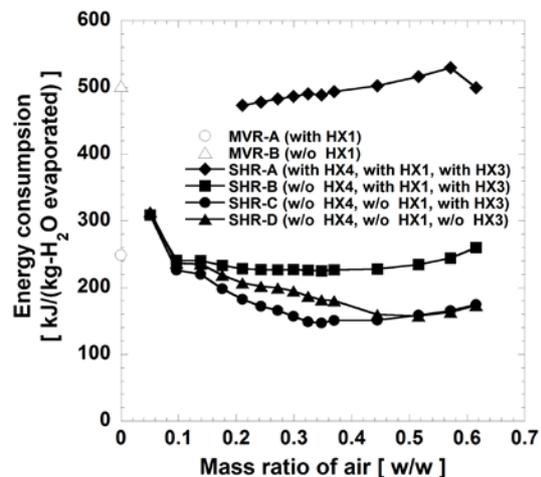


図 6 各空気流量におけるエネルギー消費量の変化

(2) エクセルギー解析結果

表 1 に SHR-c 乾燥プロセスと、MVR-a 乾燥プロセスでのエクセルギー解析の結果を示す。この表からも SHR-c の方が MVR-a よりエクセルギー損失は少ないことが分かる。また HX-2 におけるエクセルギー損失も SHR-c の方が小さく、効率的に熱交換が行われていることが分かる。更に、MIX の部分を比較しても SHR-c の方がエクセルギー損失は小さかった。これは混合する空気が水蒸気よりも低温で、よりバイオマス試料の温度に近いためだと考えられる。

表 1 SHR-c, MVR-a 乾燥プロセスにおける各機器のエクセルギー損失

エクセルギー 一損失[kW]	MIX	HX-2	HX-3	HX-1	合計
SHR-c	3.5	40.8	11.3	-	55.6
MVR-a	80.3	64.5	-	47.8	192.6

(3) 実験結果

おが粉を乾燥させた場合は、空気流量の増加とともに乾燥の進行が速くなることが確認された。また温度の経時変化においても、木材チップと同様に空気流量の増加とともに温度の上昇速度が増加することがわかった。おが粉の実験結果をもとにして求めた総括伝熱係数 (U : $W/(m^2 K)$) を表 2 に示す。この結果から、実験結果においても総括伝熱係数は理論値とほぼ同等の値であり、層内伝熱律速であることが確認できた。

表 2 各条件での総括伝熱係数の理論値と実験値の比較

単位	w_{air}	u	l_0 (実験値)	l_0 (理論値)
	-	$m s^{-1}$	$W m^{-2} K^{-1}$	$W m^{-2} K^{-1}$
条件①	0.37	0.017	28.8	25.4
条件②	0.57	0.040	16.9	22.4
条件③	0.68	0.065	11.3	16.8

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) Yuping Liu, Muhammad Aziz, Chihiro Fushimi, Yasuki Kansha, Kazuhiro Mochidzuki, Shozo Kaneko, Atsushi Tsutsumi, * Katsuhiko Yokohama, Kazuyuki Myoyo, Koji Oura, Keisuke Matsuo, Shogo

Sawa, Katsuhiko Shinoda, Exergy Analysis of Biomass Drying Based on Self-Heat Recuperation Technology and its Application to Industry—a Simulation and Experimental Study, Industrial & Engineering Chemistry Research, 査読有, 51, 9997-10007, 2012

DOI: 10.1021/ie2027298

(2) 伏見千尋, 菅 蔗寂樹, アズイッツ ムハンマッド, 劉 玉平, 望月和博, 金子祥三, 堤 敦司, 自己熱再生方式による省エネルギーバイオマス乾燥プロセス、分離技術、査読無、41, 29-35, 2011

[学会発表] (計 4 件)

(1) *伏見千尋, 福井啓祐, 自己熱再生乾燥プロセスの簡略化と省エネ, 第 22 回日本エネルギー学会大会, 2013 年 8 月 5-6 日, 工学院大学 (発表確定), 東京

(2) *劉玉平, アズイッツ ムハンマッド, 甘蔗寂樹, 伏見千尋, 堤敦司, 自己熱再生技術の乾燥プロセスへの適用化検討, 第 21 回日本エネルギー学会大会, 2012 年 8 月 6-7 日, 工学院大学, 東京

(3) *Yuping Liu, Muhammad Aziz, Chihiro Fushimi, Yasuki Kansha, Kazuhiro Mochidzuki, Shozo Kaneko, Atsushi Tsutsumi, Keigo Matsumoto, Takao Hashimoto, Shogo Sawa, Keisuke Matsuo, Katsuhiko Shinoda, Koji Oura, Katsuhiko Yokohama, Yoshiki Yamaguchi, Masaaki Kinoshita, Exergy recuperative fluidized bed drying of rice straw, 14th Asia Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress, February 21-24, 2012, Singapore

(4) *伏見千尋, Muhammad Aziz, 甘蔗寂樹, 望月和博, 金子祥三, 堤敦司, 澤 昇吾, 松尾啓介, 松本啓吾, 横濱克彦, 早田泰雄, 篠田克彦, 明用和幸, 大浦康二, 山口啓樹, 木下正昭, 橋本貴雄, 自己熱再生方式によるバイオマス乾燥の省エネルギー化, 第 20 回日本エネルギー学会大会, 2011 年 8 月 9-10 日, 関西大学, 大阪

[その他]

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~cfushimi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伏見千尋 (FUSHIMI CHIHIRO)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 50451886

- (2) 研究分担者 該当なし
- (3) 連携研究者 該当なし