

GWh (รวมพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานน้ำและพลังงานความร้อนใต้พิภพ) เชื้อเพลิงเมื่อเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์จะได้ CO_2 ๓.๑๓ ตัน/ตัน น้ำมันเชื้อเพลิง CO_2 ๓.๑๗ ตัน/ตัน น้ำมันดีเซล CO_2 ๒.๓๖ ตัน/ตัน แก๊สธรรมชาติ และ CO_2 ๑.๒๑ ตัน/ตัน ลิกไนต์ คิดเป็นค่าการปล่อย CO_2 ดังนี้ (Table 1)

(๑) CO_2 ที่เกิดจากน้ำมันเชื้อเพลิง จำนวน ๑๔.๕๔ ล้านตัน หรือ ๐.๗๕ CO_2 กิโลกรัม/kWh

(๒) CO_2 ที่เกิดจากน้ำมันดีเซล จำนวน ๑.๓๖ ล้านตัน หรือ ๐.๕๕ CO_2 กิโลกรัม/kWh

(๓) CO_2 ที่เกิดจากแก๊สธรรมชาติ ๑๒.๘๓ ล้านตัน หรือ ๐.๕๕ CO_2 กิโลกรัม/kWh

(๔) CO_2 ที่เกิดจากลิกไนต์ ๑๔.๘๗ ล้านตัน หรือ ๑.๐๕ CO_2 กิโลกรัม/kWh

ถ้าคิดจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตทั้งหมดจากเชื้อเพลิงทั้ง ๔ ชนิดและพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานน้ำและพลังงานความร้อนใต้พิภพจะได้ CO_2 ๐.๖๓ Kg/kWh

แนวทางในการลดปริมาณ CO_2 จะใช้วิธีปลูกป่าถาวร ประมาณในการปลูกป่าของกรมป่าไม้เท่ากับ ๕,๔๓๖ บาท/เฮกตาร์/ปี ต้นไม้ทั่วไปมีอัตราการใช้ CO_2 ในการสังเคราะห์สัทธา คิดเป็นปริมาณการใช้คาร์บอน ๒.๕ ตัน C/เฮกตาร์/ปี ต้องปลูกป่า ๕.๕๓ ล้านเฮกตาร์ จึงสามารถลดปริมาณ CO_2 ที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงทั้ง ๔ ชนิดได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (Table 1)

(๑) เชื้อเพลิงน้ำมันเชื้อเพลิง ต้องปลูกป่า จำนวนประมาณ ๑.๕๕ ล้านเฮกตาร์ คิดเป็น ๐.๔๕ บาท/kWh หรือ ๕๕๓ บาท/ตัน CO_2

(๒) เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลต้องปลูกป่า จำนวนประมาณ ๐.๕๐ ล้านเฮกตาร์ คิดเป็น ๐.๕๐ บาท/kWh หรือ ๕๕๓ บาท/ตัน CO_2

(๓) เชื้อเพลิงแก๊สธรรมชาติ ต้องปลูกป่า จำนวนประมาณ ๑.๔๘ ล้านเฮกตาร์ คิดเป็น ๐.๒๖ บาท/kWh หรือ ๕๕๓ บาท/ตัน CO_2

(๔) เชื้อเพลิงลิกไนต์ ต้องปลูกป่า จำนวนประมาณ ๑.๖๒ ล้านเฮกตาร์ คิดเป็น ๐.๖๒ บาท/kWh หรือ ๕๕๓ บาท/ตัน CO_2

ในการผลิตไฟฟ้า ๑ kWh จากแหล่งพลังงานทั้งหมด ทำให้เกิดการปล่อย CO_2 ๐.๖๓ กิโลกรัม ดังนั้นเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทางอากาศ ควรปลูกป่าเพื่อลดปริมาณ CO_2 ซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่ายเฉลี่ยประมาณ ๐.๓๘ บาท/kWh หรือ ๕๕๓ บาท/ตัน CO_2

สรุป

การผลิตไฟฟ้าโดยใช้สารไฮโดรคาร์บอนจำพวกน้ำมันเชื้อเพลิง น้ำมันดีเซล แก๊สธรรมชาติ และลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง ทำให้เกิดการปล่อย CO_2 ๕๓.๕๔ ล้านตัน/ปี (ปีงบประมาณ ๒๕๓๗) จากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิต ๖๕,๔๔๐ GWh (เชื้อเพลิง ๔ ชนิด) หรือพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตทั้งหมด ๖๙,๖๕๐ GWh (รวมพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานน้ำและพลังงานความร้อนใต้พิภพ) คิดเป็น CO_2 เท่ากับ ๐.๖๓ กิโลกรัม/kWh

ในการลดปริมาณ CO_2 โดยใช้วิธีปลูกป่าถาวรจะต้องปลูกป่าประมาณ ๕.๕๓ ล้านเฮกตาร์ จึงสามารถลดปริมาณ CO_2 ที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงทั้ง ๔ ชนิดในแต่ละปีได้ ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการลดปริมาณ CO_2 ประมาณ

๐.๓๘ บาท/kWh หรือ ๕๕๓ บาท/ตัน CO₂ ค่าใช้จ่ายนี้จะทำให้ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่ง กฟผ. ยังไม่ได้คิดถึงจุดนี้ ในปัจจุบันรัฐบาลสนับสนุนให้เอกชนผลิตไฟฟ้าขายกลับให้การไฟฟ้าได้ เพื่อหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้างโรงไฟฟ้า และสนับสนุนให้เอกชนใช้เชื้อเพลิงชีวมวลผลิตไฟฟ้า เช่น แกลบ ชานอ้อย ฯลฯ เชื้อเพลิงชีวมวลเหล่านี้เมื่อ

เผาไหม้จะเกิด CO₂ แต่ CO₂ ที่เกิดขึ้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (ต้นไม้拿去ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง) จึงไม่ทำให้เกิดปริมาณ CO₂ สะสมในชั้นบรรยากาศ ดังนั้นการไฟฟ้าควรจะเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้าจากเอกชนที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอีกประมาณ ๐.๓๘ บาท/kWh จากราคารับซื้อเดิม

เอกสารอ้างอิง

๑. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. ประมวลผลการใช้เชื้อเพลิงประจำปีงบประมาณ ๒๕๓๗, ๒๕๓๘.
๒. Atipanumpai L. Photosynthesis and respiration of ACACIA MANGIUM wild. 1. Effect of temperature and light. วารสารวนศาสตร์ 1990; 9 : 1-10.
๓. Somthawin Sungsuwan-Patanavanich. Carbon emissions and sequestration in Thailand's forest (draft), 1991.
๔. สันหัต สมชีวิตา. ผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหินลิกไนต์และการให้สัตยาบันอนุสัญญาว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ. สำนักวิทยาศาสตร์ราชบัณฑิตยสถานร่วมกับสมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, การสัมมนาทางวิชาการเชิงโต้เถียงเรื่องอนาคตการผลิตไฟฟ้าทางเลือกของประเทศไทย โรงแรมโซลทวินทาวเวอร์, ๒๕๓๘.
๕. Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD). Energy policies of IEA countries. international energy agency, 1991.

Table 1. ค่าใช้จ่ายในการกำจัด CO₂ ที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลผลิตไฟฟ้าโดยการปลูกป่า

	Fuel oil (tons)	Diesel (tons)	Natural gas (tons)	Lignite (tons)	Hydro	other	Total (tons)
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิต (1000 GWh)	19.29	1.63	30.39	14.06	3.43	0.85	69.65
อัตราส่วนการเกิด CO ₂ /Fuel	3.13	3.17	2.36	1.21	0	0	0
ปริมาณ CO ₂ (M tons) ที่เกิดจาก การเผาไหม้เชื้อเพลิง	14.54	1.36	12.83	14.87	0	0	43.60
CO ₂ (M tons) ที่แทนเจาะ 12.81%	0	0	0.70	0	0	0	0.70
CO ₂ ที่เกิดต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิต (kg/kWh)	0.75	0.84	0.45	1.06	0	0	0.63
ปริมาณ Carbon ที่ใช้ต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิต (kg/kWh)	0.21	0.23	0.12	0.29	0	0	0.17
ปริมาณการสะสมคาร์บอนของพืช (C-tons/hectare/year)	0	0	0	0	0	0	2.50
พื้นที่ปลูกป่าเพื่อลดปริมาณ CO ₂ (M hectare)	1.59	0.15	1.48	1.62	0	0	4.83
ค่าใช้จ่ายในการปลูกป่า Baht/hectare/year	0	0	0	0	0	0	5,436
ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (1000 M Bahts)	8.62	0.81	8.02	8.82	0	0	26.27
ค่าใช้จ่ายในการลด CO ₂ ต่อพลังงานไฟฟ้า ที่ผลิตขึ้น (Baht/kWh)	0.45	0.50	0.26	0.63	0	0	0.38
ค่าใช้จ่ายในการลด CO ₂ (Baht/ton CO ₂)	593	593	593	593	0	0	593

Table 2 Carbon or CO₂ Taxes in OECD Member Countries (1)

Country	Tax in Original Units		Fuel Covered	Effective Date	Exceptions	Effects on Fuel Prices		Comments
	for Main/Products	\$/TC (2)						
Finland	Mk 24.50/TC	6.8	Fossil fuel	01/01/1990	*Motor fuel *Products used as raw materials in industrial production *Fuel in overseas planes and vessels	*+1.2% for electricity, light fuel oil and natural gas *+5.8% for coal, gasoline and heavy fuel oil *+10% for diesel	1991 all fuels taxes increased by 5% except those on motor fuel which increased 20%	
Sweden	SKr250/t of CO ₂	166	Fossil fuel	01/01/1991	*Industrial sector *Electricity sector *International sea and air traffic	With accompanying tax changes and include oil prices, gasoline and diesel remains roughly the same	Major tax reform in January 1991 Sulphur and nitrogen taxes are also in effect	
Norway	Nkr 0.81 of gasoline Nkr 0.31 of diesel and fuel oil Nkr 0.8/m ³ of natural gas Nkr 0.3% of coal (3)	196 (gasoline) 66 (diesel) 196 (natural gas) 47.70 (coal)	Oil products natural gas and coal (3)	01/01/1991 Revised 01/01/1992 except coal 07/01/1992	*Fuels in all air and sea transport *Coal used as input to industrial processes	*+10-14% for gasoline, diesel and light fuel oil *+15% for heavy fuel oil	Diesel and fuel oil tax not increased in 1992	
Netherlands	Gld 5.70/tonne CO ₂ Gld 0.44/GJ	Up to 3	Fossil fuel	1992	None except non-energy uses	Modest	Previous general environmental tax restructured to 50 CO ₂ and 50% energy-based and raised in 1992	
Denmark	Private DKr 242/t of coal DKr 0.10/kWh DKr 320/t of fuel oil DKr 270/m ³ of heating oil DKr 170/t of diesel oil	Private 15.8 Industry 7.9	Private Coal Oil but not gasoline Electricity	Private 15/5/92 Industry 01/01/1993	For energy intensive industry, refunds up to 100% if reasonable conservation projects have been carried through	Private Coal up 3% Electricity up 3% Industry Coal up 16% Electricity up 12% Fuel oil up 18%	CO ₂ taxes shown are part of an integrated CO ₂ and energy tax system	

Country	Tax in Original Units for Main/Products	tax in \$/TC [2]	Fuel Covered	Effective Date	Exceptions	Effects on Fuel Prices	Comments
	Industry		Industry				
	DKr 12/t of coal		Coal				
	DKr 0.05/kWh		Oil but not gasoline				
	DKr 160/t of fuel		Electricity				
	DKr 135/m ³ of heating oil						
	DKr 0.85/l of diesel						

TC = metric of carbon.

t = metric ton

Sources : Country submissions.

1. Carbon taxes imposed have to be seen in the context of the sizeable taxes such as excise tax and VAT already imposed for fiscal or other policy reasons.
2. Finland, Sweden and Netherlands based on first quarter 1991 exchange rate, Norway and Denmark based on last quarter 1991 exchange rates.
3. Coal covered by tax only after 1 July 1992

บทคัดย่อ

ในการศึกษาการอบแห้งข้าวโพดในที่เก็บขนาด 5x5x1.5 เมตร (กว้าง x ยาว x สูง) ความจุ 30 ตัน ได้ทำการทดลองที่สามกรณีการเกษตรบริเวณสร้างตม เองพระพุทธรูปจำกัด โดยใช้อัตราการไหลอากาศ แวดล้อม 5.44 m³/min-m³ ข้าวโพด ผ่านกองข้าวโพดในที่เก็บ โดยเก็บตัวอย่างข้าวโพดที่ระดับความสูง 30 เซนติเมตร, 75 เซนติเมตร และ 1.2 เมตร ตามลำดับ ในการลดความชื้นข้าวโพดจาก 19 % มาตรฐานเปียก เหลือ 12.5 % มาตรฐานเปียก ใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 20 วัน สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าคิดเป็นเงิน 22.50 บาท/ตันข้าวโพด หรือ 15 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตันข้าวโพด ปริมาณ Aflatoxin B-1 ที่พบไม่เพิ่มจากค่าเริ่มต้นและเปอร์เซ็นต์เมล็ดข้าวโพดที่ติดเชื้อรา *Aspergillus flavus* เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าทั้งกรณีการตากและกรณีการอบแห้งในที่เก็บไม่มีความเหมาะสม และต้นทุนของระบบมีผลกระทบอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ

คำนำ

พืชเศรษฐกิจที่สำคัญของชาวนาคือข้าวโพด ปริมาณการผลิตประมาณ 4-5 ล้านตัน/ปี โดยทั่วไปมักพบว่าเมล็ดข้าวโพดที่เก็บเกี่ยวแล้วนำมาเก็บรักษานั้นมีเชื้อราชนิด *Aspergillus flavus* ซึ่งสร้างสารพิษ Aflatoxin เจริญเติบโตอยู่เสมอ วิธีการเก็บเกี่ยวและเก็บรักษาไม่ถูกต้องโดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาวะอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงอย่างเช่นประเทศไทย ทำให้เชื่อว่ามีเชื้อราเจริญเติบโตและแพร่พันธุ์ไปได้อย่างรวดเร็ว สารพิษ Aflatoxin เป็นพิษต่อคนและสัตว์เลี้ยงแทบทุกชนิด และอาจก่ออันตรายถึงชีวิตได้ ใน

สหรัฐอเมริกาขึ้นยอมน้ำมัน Aflatoxin เจือปนอยู่ในอาหารสัตว์ได้ไม่เกิน 20 ไมโครกรัมต่อ 1 กิโลกรัม ข้าวโพดที่มีปัญหาการติดเชื้อรามากนั้น ส่วนใหญ่เป็นข้าวโพดที่เก็บเกี่ยวในช่วงเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ฝนตกชุก การลดความชื้นในข้าวโพดลงจาก 23 % มาตรฐานเปียก ให้เหลือเพียง 13-14 % มาตรฐานเปียก โดยการตากแดดบนลานตากนั้นไม่อาจทำได้เนื่องจากฝนตกชุก จึงต้องอาศัยเครื่องอบแห้งในการลดความชื้นในเมล็ดข้าวโพด หรืออีกแนวทางหนึ่งคือการใช้ที่เก็บข้าวโพดซึ่งใช้เป่าแห้งที่อบแห้งและเก็บรักษาข้าวโพดไปในตัว

Morey et al. (1978) ศึกษาความสัมพันธ์พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งเมล็ดพืช โดยทำการอบแห้งข้าวโพดในถังอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เมตร ความสูงประมาณ 4.5 เมตร จำนวน 6 ถัง แต่ละถังบรรจุข้าวโพดประมาณ 106 ลูกบาศก์เมตร ความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดก่อนการอบแห้งเท่ากับ 28% มาตรฐานเปียก ความชื้นข้าวโพดหลังการอบแห้งเท่ากับ 15% มาตรฐานเปียก พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 °C อัตราการไหลของอากาศ 120 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพด ลดความชื้นจาก 28% เหลือ 24% มาตรฐานเปียก แล้วอบแห้งต่อด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมประมาณ 1.5°C) โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 1.7 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพด สิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งน้อยที่สุด

Kalchick et al. (1981) รายงานผลการทดสอบการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดในฟาร์มที่รัฐมิชิแกน ซึ่งอยู่ทางตอนเหนือของสหรัฐอเมริกา เป็นเวลา 3 ปี พบว่าการอบแห้งแบบในถังเก็บด้วยอากาศแวดล้อม โดยใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำ สิ้นเปลืองพลังงานประมาณ 3.2 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และการอบแห้งแบบเป็นงวดโดยกวนอากาศให้ร้อนขึ้น สิ้น

เปลืองพลังงานเพิ่มเป็น 6.6 เมกะจูลต่อกิโลกรัมไถ่ที่
ระยะ

Shove (1984) ศึกษาความสัมพันธ์พลังงาน
ที่ใช้ในการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดโดยใช้อุณหภูมิต่ำ
อบแห้งข้าวโพดความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 22 %
มาตรฐานเปียก จนมีความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 15 %
มาตรฐานเปียก พบว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิ
อากาศแวดล้อมและอัตราการไหลของอากาศ 2-4.5
ลูกบาศก์เมตรต่อเมตริกตัน ใช้พลังงานในการอบแห้ง
เฉลี่ย 6 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันต่อเปอร์เซ็นต์ของ
ความชื้นที่ระเหย ส่วนการอบแห้งโดยอุ่นอากาศ
แวดล้อมประมาณ 2-3 °C และอัตราการไหลของอากาศ
0.8-2.2 ลูกบาศก์เมตรต่อเมตริกตันต่อตันของข้าวโพด สิ้น
เปลืองพลังงานในการอบแห้ง 12 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อ
ตันต่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ระเหย

Eckhoff *et al.* (1984) ทดลองใช้ก๊าซ
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อถ่วงดุลการเจริญเติบโตของ
จุลินทรีย์ขณะอบแห้งเมล็ดข้าวโพดโดยใช้อากาศ
แวดล้อมผ่านถังอบแห้งขนาดความจุ 5 ตัน ความ
ชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดเท่ากับ 29.8 % มาตรฐานเปียก
แห้งการทดลองออกเป็น 3 วิธี ดังนี้

1. ใส่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ผสมกับอากาศ
หลังพัดลมก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง

2. ให้อากาศหมุนกลับทาง เพื่อให้อากาศ
ไหลย้อนกลับจากทางด้านบนลงสู่ด้านล่างของถังอบ
และฉีดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ด้านบนของถังอบ

3. ใส่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ลงไปยังเมล็ด
ข้าวโพดในระหว่างบรรจุเมล็ดข้าวโพดลงถังอบแห้ง

วิธีที่ 1 และ 2 ใช้ความเข้มข้นของก๊าซ
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 0.12 % โดยน้ำหนัก ทั้ง
ไว้ 2 ชม. ก่อนเริ่มเดินพัดลมอบแห้ง และใช้อีก 0.05
% โดยน้ำหนัก ในวันที่ 28 และ 128 ของการอบแห้ง
โดยทิ้งไว้ 1 ชม. ก่อนเริ่มเดินพัดลมอบแห้ง ส่วนวิธีที่
3 ใช้ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ขึ้นบนและชั้น

กลางของชั้นข้าวโพด 0.38 % และ 0.10 % โดยน้ำ
หนักตามลำดับ ทั้งไว้ 20 นาทีก่อนเริ่มเดินพัดลมอบ
แห้ง การทดลองพบว่าวิธีที่ 2 มีปริมาณจุลินทรีย์เกิด
ขึ้นในระหว่างการอบแห้งต่ำมาก ส่วนวิธีที่ 1 มี
ปริมาณจุลินทรีย์ที่ด้านบนของชั้นข้าวโพดในช่วงเริ่ม
ต้นการอบแห้ง เนื่องจากในระยะเริ่มแรก ข้าวโพด
ชั้นบนมีความชื้นสูง และได้รับก๊าซซัลเฟอร์ไดออก
ไซด์น้อยกว่าบริเวณชั้นล่าง ส่วนวิธีที่ 3 ไม่เหมาะที่
จะนำมาใช้เนื่องจากจุลินทรีย์ที่เกิดในระหว่างการอบ
แห้งมีปริมาณมาก นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ก๊าซ
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีเมล็ดแตกร้าว 6.9 % ซึ่งมีค่า
ต่ำกว่าการใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ซึ่งมี
เปอร์เซ็นต์เมล็ดแตกร้าวมากถึง 31.5%

อนุรักษ์ (2533) ศึกษาแนวทางการอบแห้งข้าว
โพดแบบเป็นวงรีที่เหมาะสม โดยพิจารณาความ
สัมพันธ์พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งข้าวโพดและคุณภาพ
ของเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้ง อัตราการไหลของ
อากาศแปรหว่าง 5.50-45.0 ลูกบาศก์เมตรต่อเมตริกตันต่อ
ลูกบาศก์เมตรข้าวโพด และอุณหภูมิอากาศ 45-90 °C

การอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การอบ
แห้งแบบเป่าอากาศต่อเนื่อง และการอบแห้งแบบเป่า
อากาศไม่ต่อเนื่อง ซึ่งทั้ง 2 แบบนี้ยังแบ่งออกเป็น 3
วิธี คือ การอบแห้งโดยใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำ
อุณหภูมิสูง (H.F.H.T, อัตราการไหลของอากาศ 5.50-
25.95 ลูกบาศก์เมตรต่อเมตริกตันต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพด
อุณหภูมิ 60-90 °C) การอบแห้งโดยใช้อัตราการไหล
สูง อุณหภูมิต่ำ (H.F.L.T, อัตราการไหลของอากาศ 30.0-
45.0 ลูกบาศก์เมตรต่อเมตริกตันต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพด
อุณหภูมิ 45-55 °C) การอบแห้งโดยใช้อัตราการไหล
ของอากาศต่ำ อุณหภูมิต่ำ (L.F.L.T, อัตราการไหลของ
อากาศ 5.50-25.95 ลูกบาศก์เมตรต่อเมตริกตันต่อลูกบาศก์
เมตรข้าวโพด อุณหภูมิ 45-55 °C) ความชื้นเริ่มต้น
ของเมล็ดข้าวโพด 15-26 % มาตรฐานเปียก ความ
ชื้นสุดท้ายเฉลี่ยของเมล็ดข้าวโพด 14 % มาตรฐานเปียก

ผลการทดลองพบว่าในการป้องกันการอบแห้งแบบเป่าอากาศต่อเนื่อง วิธีการอบแห้งแบบ HFLT และ LFHT ปริมาณ Aflatoxin ไม่เพิ่มขึ้น แต่วิธี LFHT ปริมาณ Aflatoxin มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีที่มีการอบแห้งแบบเป่าอากาศไม่ต่อเนื่องนั้น ปริมาณ Aflatoxin มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกกรณี เปอร์เซนต์เมล็ดข้าวมีค่าสูงเมื่อความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวโพดสูงกว่า 18 % มาตรฐานเปลือก และอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งไม่มีผลต่อเปอร์เซนต์เมล็ดข้าว แต่ที่ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวโพดต่ำกว่า 18% มาตรฐานเปลือก เปอร์เซนต์เมล็ดข้าวจะลดลง แต่จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งแบบเป่าอากาศต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง พบว่าแบบเป่าอากาศไม่ต่อเนื่องจะมีเปอร์เซนต์เมล็ดข้าวน้อยกว่า และไม่พบเมล็ดแตกจากการอบแห้งทั้ง 2 แบบ สำหรับความสิ้นเปลืองพลังงานสุทธิสุดท้าย วิธี LFHT และ HFLT จะใกล้เคียงกัน และต่ำกว่าวิธี LFHT เมื่อพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานป้อนภูมิการอบแห้งวิธี LFHT จะสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าที่สุด และวิธี HFLT จะสิ้นเปลืองพลังงานมากที่สุด

Wongurui et al. (1992) ศึกษาอิทธิพลของแอกติวิตีของน้ำ สำหรับข้าวโพดที่มีต่อการเจริญของเชื้อรา *Aspergillus flavus* พบว่าในช่วงแอกติวิตีของน้ำเป็น 1-0.94 ที่อุณหภูมิ 28°C ตรงกับความชื้นสมดุลข้าวโพด 41-22% มาตรฐานเปลือก มีการเจริญของเชื้อ *Aspergillus flavus* ก่อนข้างสูง และในช่วงที่แอกติวิตีของน้ำน้อยกว่า 0.85 ซึ่งเป็นช่วงที่ความชื้นสมดุลน้อยกว่า 18 % มาตรฐานเปลือก ไม่มีการเจริญของเชื้อ *Aspergillus flavus*

วิรัตน์ และคณะ (2537) ศึกษาอัตราที่เหมาะสมในการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รมข้าวโพด ความชื้นสูงเพื่อป้องกันการเจริญของเชื้อราและการเกิดสารพิษ Aflatoxin เป็นการชั่วคราว โดยทดลองใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รมกองข้าวโพดที่คลุมด้วย

ผืนพลาสติกในอัตรา 0.5, 0.75, 1.0 และ 2.0 กิโลกรัมต่อ 1 ตันข้าวโพด เป็นเวลา 4 วัน ผลการทดลองพบว่าการรมด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราตั้งแต่ 0.5 กิโลกรัมต่อตันข้าวโพด สามารถป้องกันการเจริญของเชื้อรา *Aspergillus flavus* และการเกิดสารพิษ Aflatoxin ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคุณภาพของเมล็ดและอุณหภูมิในกองข้าวโพดไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ข้าวโพดที่กองไว้ในสภาพบรรยากาศปกติถูกเชื้อรา *Aspergillus flavus* เข้าทำลายเกือบทั่วทั้งกอง ปริมาณการปนเปื้อนของสารพิษ Aflatoxin และอุณหภูมิภายในกองข้าวโพดเพิ่มสูงขึ้น เมล็ดจับตัวเป็นก้อนและมีกลิ่นเหม็นหืน

สมเกียรติ และคณะ (2538) ศึกษาการป้องกันการเกิด Aflatoxin B-1 ในข้าวโพดโดยการอบแห้งในที่เก็บ พบว่าระบบหม้อลมที่ออกแบบให้การกระจายลมสม่ำเสมอตลอดพื้นที่อบแห้ง ควรลดความชื้นข้าวโพดให้เหลือ 18-19 % มาตรฐานเปลือก ภายในเวลา 2 วัน หลังจากนั้นควรลดให้เหลือ 12 - 13 % ภายในเวลา 14 วัน เพื่อป้องกันการเกิด Aflatoxin B-1 การลดความชื้นข้าวโพดจากความชื้น 19% มาตรฐานเปลือก เหลือ 12-13 % มาตรฐานเปลือก โดยการเป่าอากาศแวดล้อม อัตราการไหลอยู่ในช่วง 3.6-4.6 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพด สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.46-0.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย หรือคิดเป็นค่าใช้จ่าย 16-17 บาทต่อตันข้าวโพด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าการเจริญของเชื้อ *Aspergillus flavus* และการสร้างสาร Aflatoxin B-1 มีปริมาณสูงเมื่ออากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูงและข้าวโพดมีความชื้นสูง การป้องกันสามารถทำได้โดยการใช้สารเคมียับยั้งการเจริญของ *Aspergillus flavus* และในกรณีที่ความชื้นข้าวโพดไม่สูงกว่า 20 % มาตรฐานเปลือก มีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูงที่จะนำระบบอบแห้งในที่เก็บโดยใช้อากาศแวดล้อมลดความ

ขึ้นและป้องกันการเกิด Aflatoxin ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาคุณภาพของข้าวโพดหลังการอบแห้ง และความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบอบแห้งในที่เก็บ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ที่เก็บที่ใช้ในการทดลองอบแห้งข้าวโพดมีขนาดกว้าง 5 เมตร ยาว 5 เมตร สูง 1.5 เมตร สามารถจุข้าวโพดได้ 30 ตัน ผ่างทำจากระบบบรรจุข้าวโพดแห้งเรียงซ้อนกัน ด้านบนมีหลังคาคลุมอากาศสามารถถ่ายเทได้ดี ระบบท่อลมดังแสดงใน Figure 1 ประกอบด้วยท่อลมหลัก (หมายเลข 1, 2, 3, 4, 5, และ 6) มีรูปทรงแปดเหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 40 เซนติเมตร X 40 เซนติเมตร ทำด้วยสังกะสีแผ่นเรียบหนา 1.5 มิลลิเมตร ท่อย่อย (หมายเลข 7-9, 10-12 และ 13-15) ทำด้วยแผ่นเหล็กเจาะรูหนา 1.5 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกระจายลม 1.5 มิลลิเมตร ท่อวัดของท่อย่อยเป็นรูปครึ่งวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 เซนติเมตร ยาวท่อละ 1.20 เมตร พัดลมที่ใช้เป็นแบบแบริ่งใบพัดโค้งงอ กำลังเป็นมอเตอร์ขนาด 3.7 kW

การทดลอง

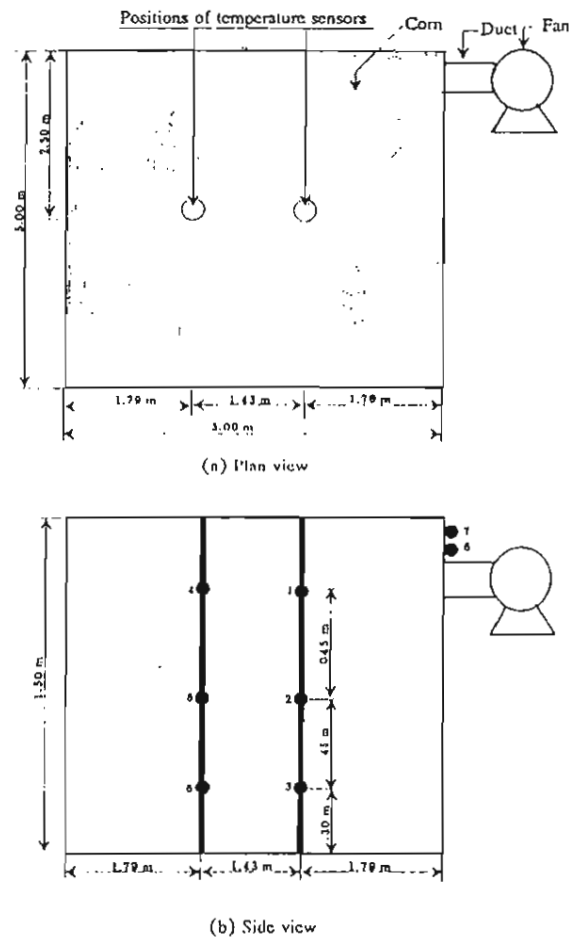
นำข้าวโพดที่มีความชื้นเฉลี่ย 19 % มาตรฐานเทียบ น้ำหนักประมาณ 30 ตัน มาเก็บไว้ในที่เก็บเป่าอากาศแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 35 °C และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 55 % เข้าไปในกองข้าวโพดเกือบทุกวัน ระหว่างเวลา 8.00-16.00 น. (8 ชม.) ด้วยอัตราการไหลของอากาศประมาณ 5.44 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพด บันทึกข้อมูลของอุณหภูมิในกองข้าวโพดขณะเป่าอากาศ 2 จุด จุดละ 3 ตำแหน่ง (Figure 2) โดยแต่ละจุดจะห่างกัน

2 เมตร และวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อมและอุณหภูมิกระเปาะเปียกด้วย การวัดอุณหภูมิในกองข้าวโพดและอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม ใช้สายเทอร์โมคัปเปิล type K ต่อเข้ากับ data logger ที่มีความถูกต้อง ± 1 °C เก็บตัวอย่างข้าวโพดที่ผิวบนของกองข้าวโพด ที่ระดับความลึก 0.3 เมตร, 0.75 เมตร และ 1.20 เมตร เพื่อนำมาหาความชื้นของข้าวโพด นอกจากนี้ยังเก็บตัวอย่างข้าวโพด 2 จุด ที่ระดับความลึก 0.30 เมตร 0.75 เมตร และ 1.20 เมตร จำนวน 1,500 กรัม ดัง Figure 3 นำไปตรวจสอบหาปริมาณ Aflatoxin B-1 โดยวิธี Thin Layer Chromatography (TLC) และนำไปเพาะเชื้อเพื่อตรวจนับจำนวนข้าวโพดที่ติดเชื้อรา *Aspergillus flavus*

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนในระบบอบแห้งนั้นพิจารณา 2 กรณีคือ กรณีที่สหกรณ์หรือโรงสีที่มีเก็บเมล็ดพืชอยู่แล้ว และลงทุนเพิ่มเฉพาะระบบท่อลม (รวมพัดลม) และในกรณีที่มีการลงทุนใหม่ทั้งหมัด โดยเปรียบเทียบระหว่างตากกลางแจ้งกับระบบอบแห้งในที่เก็บ การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์นี้ใช้วิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) โดยใช้อัตราส่วนลด 10 % และ 15 % ชั่งน้ำหนักในการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้

1) กรณีที่มีที่เก็บอยู่แล้ว และลงทุนเพิ่มเฉพาะระบบท่อลม อายุของระบบท่อลม 10 ปี เงินลงทุนแรกเริ่มสำหรับระบบท่อลม 225,000 บาท และมูลค่าซากในปีที่ 10 เท่ากับศูนย์ ต้นทุนที่เป็นพลังงานสำหรับการระบายอากาศคิดเป็นเงิน 45,000 บาท/ปี (ผลจากการทดลอง และสมมติค่าไฟฟ้า 1.50 บาท/kW-h) ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา (0.5 % ของต้นทุนของระบบท่อลม) 1,125 บาท/ปี ในเวลา 1 ปีสามารถอบแห้งข้าวโพดได้ทั้งหมด 2000 ตัน/ปี ฉะนั้นผู้ประกอบการจะมีรายได้เพิ่มเนื่องจากการไม่ถูกหัก



1,2,3,4,5,6 = Positions of temperature sensors in corn bulk

7,8,9 = Positions of dry bulb and wet bulb temperature sensors

Figure 2 Plan of temperature sensors and electrical fan in a warehouse.

5,250 บาท ค่าซ่อมบำรุงรถดัก รถแทรกเตอร์ และรถ
เกี่ยย ต่อปี 80,000 บาท ในหนึ่งปีสามารถอบแห้ง
ข้าวโพดได้ 3,000 ตัน ซึ่งคิดเทียบเป็นรายได้จากการ
ไม่ถูกหักน้ำหนักเนื่องจากความชื้นเกิน 14 %
มาตรฐานเปลือก (ความชื้นเริ่มต้น 19% มาตรฐานเปลือก)
เป็นเงิน 99,994 บาท/ปี

จากข้อกำหนดดังกล่าวเมื่อนำมาวิเคราะห์ทาง
เศรษฐศาสตร์โดยวิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present
Value) โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$NPV = \sum_{i=1}^n B_i / (1+i)^i - \sum_{i=1}^n C_i / (1+i)^i$$

เมื่อ NPV = มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

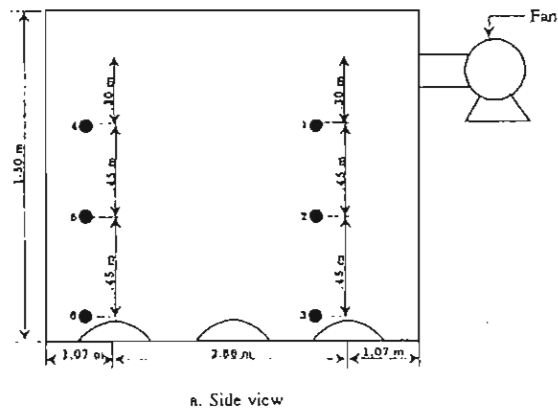
B_i = ผลตอบแทนในปีที่ i

C_i = ต้นทุนในปีที่ i

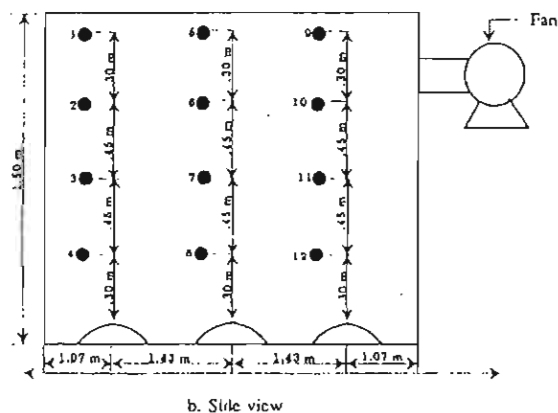
i = ปีของโครงการคือ 1,2,3,...,n

i = อัตราดอกเบี้ย

n = อายุของโครงการ



1, 2, 3, 4, 5, 6 = Positions of sample collection in corn bulk for testing quality.



1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 = Positions of sample collection in corn bulk for determining moisture content.

Figure 3 Positions of sample collection in a warehouse.

ผลและวิจารณ์

Aspergillus flavus (Koehler et al., 1985)

อุณหภูมิ

Figure 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมและอุณหภูมิของกองเมล็ดข้าวโพดกับเวลา ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในกองข้าวโพดมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมตลอดช่วงของการอบแห้ง และอุณหภูมิภายในกองค่อนข้างสม่ำเสมอ อยู่ในช่วง 26-28 °C ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมกับการสร้าง Aflatoxin โดย

ความชื้นข้าวโพด

เมื่อนำข้าวโพดบรรจุในที่เก็บ ข้าวโพดมีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 19 % มาตรฐานเปียก และเมื่อเป่าอากาศแวดล้อมผ่านกองข้าวโพดนานประมาณ 20 วัน ความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยของข้าวโพดลดลงเหลือ 12.5 % มาตรฐานเปียก จาก Figure 5 พบว่าความชื้นข้าวโพดที่ระดับความลึกมากกว่าจะมีความชื้นต่ำกว่าที่ระดับความลึกน้อยกว่า เช่น ที่ระดับความลึก 1.2 m

จะมีความชื้นต่ำกว่าที่ระดับความลึก 0.75 m เนื่องจากอากาศที่ไหลผ่านจากบริเวณด้านล่างของที่เก็บขึ้นไปยังบริเวณชั้นบน มีปริมาณไอน้ำในอากาศค่อนข้างสูงทำให้อัตราการถ่ายเทความชื้นลดลง ส่งผลให้ความชื้นลดลงได้น้อยเมื่อเทียบกับบริเวณด้านล่างของการอบแห้ง อย่างไรก็ตามที่เวลาสุดท้ายของการอบแห้งความชื้นของข้าวโพดในแต่ละระดับความลึกจะต่างกันเล็กน้อย ซึ่งเป็นเพราะเกิดการเคลื่อนย้ายของไอน้ำการอบแห้งจากด้านล่างไปยังด้านบนจนถึงส่งผลให้ความชื้นบริเวณส่วนบนลดลง

การใช้พลังงาน

การเป่าอากาศแวดล้อมผ่านกองข้าวโพดวันละ 8 ชั่วโมงนาน 20 วัน เพื่อลดความชื้นข้าวโพดจาก 19% มาตรฐานเปียก ลงเหลือ 12.5% มาตรฐานเปียก โดยใช้อัตราการไหลของอากาศแวดล้อม 5.44 ลูกบาศก์เมตร/นาที-ลูกบาศก์เมตรข้าวโพด สัมประสิทธิ์พลังงานไฟฟ้า 15 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตันข้าวโพด คิดเป็นเงิน 22.50 บาท/ตันข้าวโพด หรือ 0.32 บาท/กิโลกรัม น้ำที่ระเหย

คุณภาพ

โดยทั่วไปคุณภาพของข้าวโพดพิจารณาจากการแตกแ้ว การแตก ถี การเกิดเชื้อรา บนกองข้าวโพด และ Aflatoxin B-1 แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการอบแห้งในที่เก็บ โดยใช้อากาศแวดล้อม ดังนั้นสิ่งที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของข้าวโพดได้แก่ การเกิด Aflatoxin และการเกิดเชื้อรา

การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวโพดและปริมาณ Aflatoxin B-1 กับเวลาและการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวโพดและปริมาณเมล็ดข้าวโพดที่ติดเชื้อรา *Aspergillus flavus* กับเวลาแสดงใน Figures 6 และ 7 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของ Aflatoxin B-1 ที่เวลาเริ่มต้นอบแห้งและเวลาสุดท้าย

ของการอบแห้งไม่เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณเมล็ดข้าวโพดที่ติดเชื้อรา *Aspergillus flavus* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณเมล็ดข้าวโพดที่ติดเชื้อราร่วมกับ Aflatoxin B-1 ที่พบในเมล็ดข้าวโพดสามารถอธิบายได้ว่า แม้ว่าเชื้อราจะมีการเจริญเติบโตอยู่ก็ตาม แต่ก็ยังไม่มีความพร้อมในการที่จะสร้างสารพิษได้ ดังนั้นการอบแห้งโดยใช้อากาศแวดล้อมที่ช่วงความชื้นข้าวโพด 19 % มาตรฐานเปียก สามารถลดความชื้นจนถึงระดับความชื้นที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาและสามารถป้องกันการผลิตสาร Aflatoxin B-1 จากเชื้อรา *Aspergillus flavus*

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

กรณีที่ผู้ประกอบการมีที่เก็บอยู่แล้ว และลงทุนเพิ่มเฉพาะระบบท่อลม พบว่าเมื่อสิ้นสุดโครงการผู้ลงทุนจะมีเงินสุทธิที่มีมูลค่าเทียบเท่ากับปัจจุบันเท่ากับ -98,803 บาท และ -121,924 บาท เมื่อคิดอัตราดอกเบี้ย 10 % และ 15 % ตามลำดับ และสำหรับกรณีที่มีการลงทุนใหม่ทั้งสองระบบคือแบบตากลานและแทนที่เก็บพบว่า

แบบที่เก็บ เมื่อผู้ลงทุนใช้งานจนหมดอายุโครงการ ผู้ลงทุนจะมีเงินสุทธิที่มีมูลค่าเทียบเท่ากับปัจจุบันเท่ากับ -1,636,908 บาท และ -1,652,066 บาท เมื่อคิดอัตราดอกเบี้ย 10 % และ 15 % ตามลำดับ

แบบตากลาน เมื่อผู้ลงทุนใช้งานจนครบอายุการใช้งาน ผู้ลงทุนจะมีเงินสุทธิที่มีมูลค่าเทียบเท่ากับปัจจุบันเท่ากับ -3,131,206 บาท และ -2,762,926 บาท เมื่อคิดอัตราส่วนลด 10 % และ 15 % ตามลำดับ

จากผลการคำนวณดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการลงทุนระบบอบแห้งในที่เก็บเฉพาะในส่วนของบริษัทท่อลม การลงทุนใหม่ทั้งหมดทั้งในระบบอบแห้งในที่เก็บและแบบตากลาน ไม่มีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ที่จะลงทุนสำหรับการอบแห้งข้าวโพด แต่หากพิจารณาในแง่ของการป้องกันความเสียหายที่

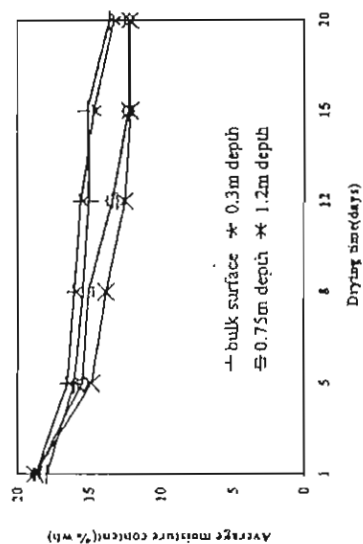


Figure 5 Evolution of corn moisture content at different depths during drying.

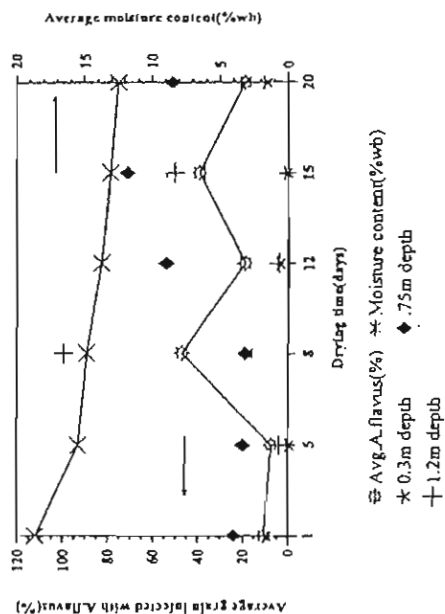


Figure 7 Evolution of average moisture content and average grain infected with A.flavus at different depths.
(moisture content of corn reduced from 19 to 12.5 % wet-basis)

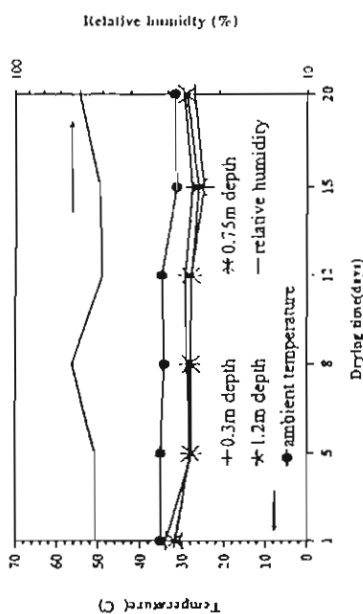


Figure 4 Evolution of temperature in corn bulk and ambient air temperature.

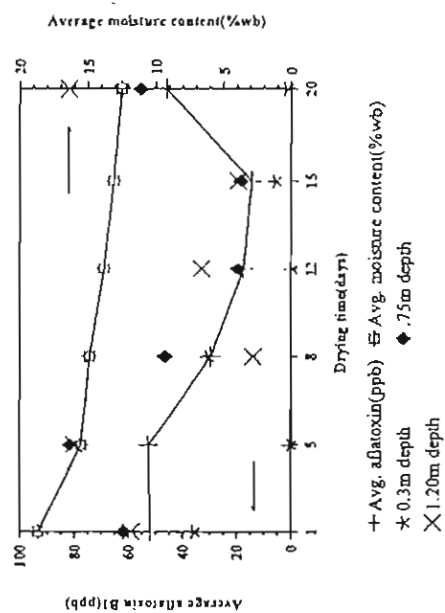


Figure 6 Evolution of average aflatoxin B1 and average moisture content of corn.
(moisture content of corn reduced from 19 to 12.5 % wet-basis)

อาจจะเกิดขึ้นกับกองข้าวโพดซึ่งก็อาจมีความเหมาะสม ปัจจุบันสุทธิ ดัง Figures 8-11

ในการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity) เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมูลค่าปัจจุบันสุทธิของระบบอบแห้งที่มีการลงทุนใหม่ทั้งหมดทั้งในระบบอบแห้งในที่เก็บและแบบตากลาน พบว่าต้นทุน

สรุป

ในการอบแห้งข้าวโพดในที่เก็บโดยการใช้

เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมูลค่า : อากาศแวดล้อมที่ผ่านกองข้าวโพด สามารถสรุปได้

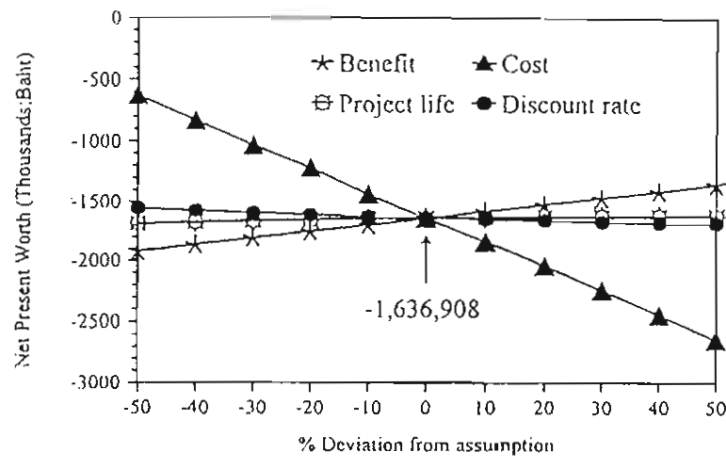


Figure 8 Effect of benefit, cost, project lift and discount rate on the net present worth.

[The assumptions; 10% discount rate, 20 years project life, salvage value = 0, benefit 66,663 baht/year, in-store corn drying]

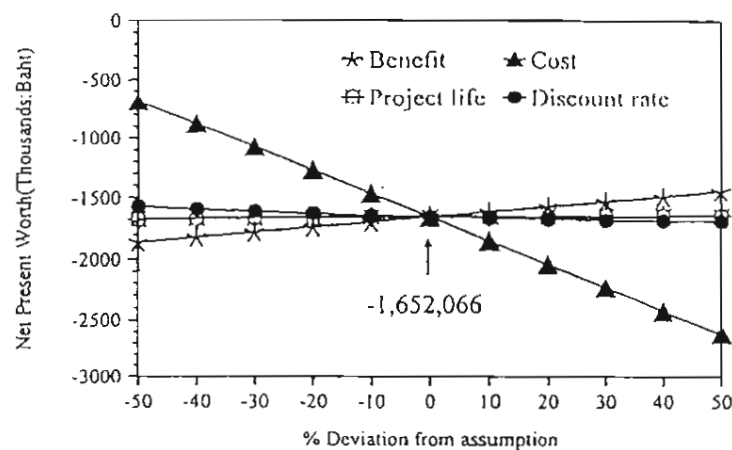


Figure 9 Effect of benefit, cost, project lift and discount rate on the net present worth.

[The assumptions; 15% discount rate, 20 years project life, salvage value = 0 benefit 66,663 baht/year, cost = 46,125 baht/year, in-store corn drying]

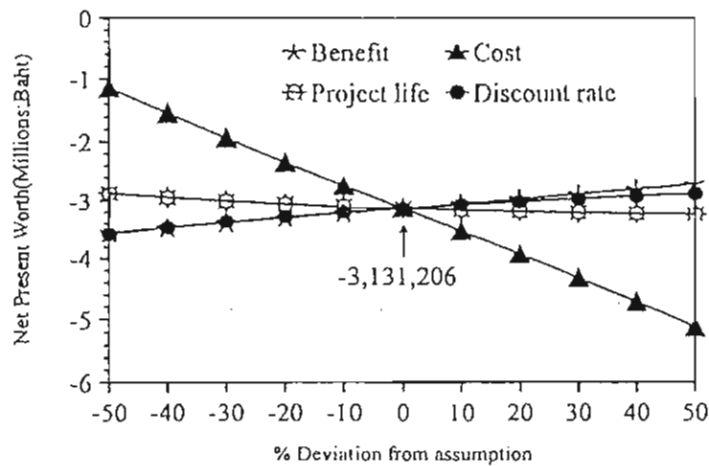


Figure 10 Effect of benefit, cost, project lift and discount rate on the net present worth.

[The assumptions; discount rate 10%, project life 20 years, salvage value = 0 benefit 99,994 baht/year, cost = 214,250 baht/year, sun drying]

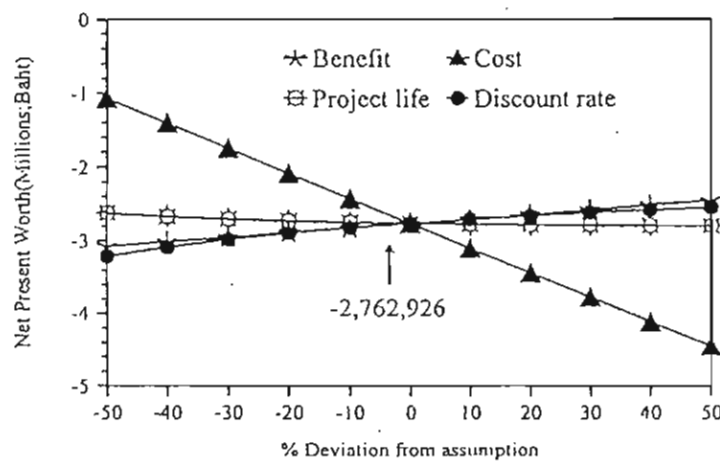


Figure 11 Effect of benefit, cost, project lift and discount rate on the net present worth.

[The assumptions; 15% discount rate, 20 years project life, salvage value = 0 benefit 99,994 baht/year, cost = 214,215 baht/year, sun drying]

ดังนี้

1. สามารถอบแห้งข้าวโพดในที่เก็บได้จนถึงความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาและป้องกันการเกิด Aflatoxin B-1 เนื่องจากเชื้อรา *Aspergillus flavus*

2. การลดความชื้นข้าวโพดจากความชื้น 19 % มาตรฐานเปียก เหลือ 12.5 % มาตรฐานเปียก สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้า 22.50 บาท/ตันข้าวโพด หรือ 15 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตันข้าวโพด

3. การลงทุนระบบอบแห้งในที่เก็บเฉพาะในส่วนของบริษัท และการลงทุนในระบบอบแห้งใหม่ทั้งหมด แบบที่เก็บและแบบตากกลางแจ้งเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ และต้นทุนของโครงการเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิ แต่หากพิจารณาในด้านการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับกองข้าวโพดชื้น ก็อาจจะมีที่เหมาะสม

คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย Australian Centre for International Agricultural Research และกองส่งเสริมเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ใคร่ขอขอบคุณต่อสหกรณ์การเกษตรนิคมสร้างตนเองพระพุทธรบาทจำกัด ที่ให้ความร่วมมือในการดำเนินโครงการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

วิรัตน์ นิรัตนกุล, วันเพ็ญ ศรีทองชัย, อาคม สุ่มมาตย์, อำนวย ชินเชษฐ และ อำนวย ทองดี. 2537. "การป้องกันสารพิษแอฟลาทอกซินในข้าวโพดความชื้นสูง โดยการรมด้วยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์" วารสารวิชาการเกษตร. 12 : 58-65.

สมเกียรติ ปรังญาวรรณ, สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, อติศักดิ์ นาดกรณกุล, และ สิริรัชช อินทร์จันทร์. 2538. "การป้องกันการเกิดแอฟลาทอกซินในข้าวโพดโดยการอบแห้งในถางเก็บ." ว. เกษตรศาสตร์ (วิทย์). 29 : 404-415.

อนุรักษ์ ครอบทรัพย์ และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์. 2533. "การศึกษาแนวทางการอบแห้ง แบบเป็นวงจรที่เหมาะสม:การทดลองและการจำลองแบบปัญหาทางคณิตศาสตร์." วิศวกรรมสาร. 43: 80-87.

Fickhoff, S.R., J.Tuite, G.H. Foster, R.A. Anderson, and M.R. Okos. 1984. "Inhibition of microbial growth during ambient air corn drying using sulfur dioxide." Transactions of the ASAE, 27 : 907-914.

Kalchick, S.L., J.Silva, J.C. Radriquez, and F.W.Bakker-Arkema. 1981. On Farm Corn Drying Comparison. Paper No. 81-3011, American Society of Agricultural Engineers, Michigan.

Kochler, P.E., L.R. Beuchat, and M.S.Chinnan. 1985. "Influence of temperature and water activity on aflatoxin production by *Aspergillus flavus* in cowpea *Vigna unguiculata* seeds and meal". Journal of Food Protection. 48 : 1040-1043.

Morey, R.V., R.J.Gustafson, and H.A.Cloud. 1978. "Energy requirement for high-low temperature drying". Transactions of the ASAE. 21 : 562-567.

Shove, G.C. 1984. "Energy consumed in low temperature corn drying." Drying Technology. 2 : 503-511.

Wongurai, A., O.Tsuruta, and K.Arai. 1992. "Water activity of Thai maize and growth of *Aspergillus -flavus*," pp.7-9. In Research Report, Maize Quality Improvement Research Centre Project.

การอบแห้งข้าวเปลือกในที่เก็บและการเก็บรักษา ในสถานที่ใช้งานจริง

Field Trial of In-store Paddy Drying and Storage

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์¹ พัทธน์ อมตฉายา²
สมเกียรติ ปรัชญาวารากร³ อติศักดิ์ นาถกรณกุล¹ สิทธิชัย อินทร์จันทร์¹

Somchart Soponronnarit, Pipatana Amatachaya,
Somkiat Prachayawarakorn, Adisak Nathakaranakule, and Sitthichai Inchan

ABSTRACT

The aim of this paper is to investigate the field trial of in-store paddy drying and storage. Both paddy quality and economics were taken into consideration. Ambient air flow rate of $0.57 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$ of paddy was blown through the paddy bulk with 105 ton capacity. The experimental results revealed that moisture reduction at deeper depth from surface was faster than that at lower depth from surface. Moisture content of paddy was reduced from 17 % wet-basis to 11.6 % wet-basis within 9 weeks and then paddy bulk was continually stored within 19 weeks. Paddy qualities in terms of whiteness and head yield were still maintained as compared to reference sample. Electricity consumption during drying stage was 14 kW-h/ton of paddy (US\$ 0.84 /ton of paddy). For storage, electricity consumption for ventilation, 2 h each time in a week, was 1.31 kW-h /ton of paddy (US\$ 0.08/ton of paddy). The economics analysis by present worth method showed that in the case of in-store drying with only additional investment in air ducts, payback periods were 1.5 years and 1.6 years for discount rates of 10 % and 15 % respectively (for once a year of paddy drying). However, for twice a year of paddy drying, payback periods reduced to be 0.6 year and 0.7 year at discount rates as mentioned before. Moreover, both income and project life were sensitive to net

¹ คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Suksawat 48 Rd., Bangkok 10140, Thailand.

² สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา

Rajmangala Institute of Technology, North-Eastern Campus, Ratchasima 30000, Thailand.

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Suksawat 48 Rd., Bangkok 10140, Thailand.

present worth. From comparison between the investment cost of in-store paddy drying and that of sun drying on a concrete pad during term of 20 year project life, it was found that payback periods for the in-store paddy drying were 6 and 7.5 years for discount rates of 10 % and 15% respectively but there were no payback periods for the sun drying. Income, cost and discount rate for in-store paddy drying were very sensitive to net present worth while only cost in sun drying was significant to net present worth.

Key words : paddy drying, storage, quality, economics.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในที่เก็บและการเก็บรักษาในสถานที่ใช้งานจริง โดยพิจารณาคุณภาพของข้าวเปลือกและความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ต่อการลงทุนระบบอบแห้งในที่เก็บโดยใช้อากาศแวดล้อมเป่าผ่านกองข้าวเปลือกขนาด 105 ตัน ด้วยอัตราการไหล $0.57 \text{ m}^3/\text{min-m}^2$ ข้าวเปลือกพบว่าในการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยเฉลี่ย 17% มาตรฐานเปียก ให้เหลือ 11.6% มาตรฐานเปียก จะใช้เวลาอบแห้ง 9 สัปดาห์ โดยชั้นที่มีความลึกมากกว่าจะให้อัตราการลดความชื้นเร็วกว่าชั้นที่มีความลึกน้อย หลังจากที่ยอบแห้งแล้วก็เก็บรักษาต่อไปอีก 19 สัปดาห์ พบว่าความชื้นเฉลี่ยในแต่ละระดับความลึกอยู่ในเกณฑ์ดี และการอบแห้งโดยวิธีนี้สามารถรักษาเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดให้อยู่ในสถานะคงเดิม ในช่วงของการอบแห้งให้ความร้อนเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้า 14 kW-h/ตันข้าวเปลือก หรือเสียค่าไฟฟ้า 21 บาท/ตันข้าวเปลือก สำหรับในช่วงการเก็บรักษานั้นจะเป่าอากาศสัปดาห์ละ 2 ชั่วโมง ซึ่งให้ความร้อนเปลี่ยนแปลงพลังงาน 1.31 kW-h/ตันข้าวเปลือก หรือ เสียค่าไฟฟ้า 1.97 บาท/ตันข้าวเปลือก

จากการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์โดยวิธีมูลค่าปัจจุบัน ใช้อัตราส่วนลด 10 % และ 15 % พบว่าการลงทุนในระบบอบแห้งเฉพาะในส่วนระบบท่อลมจะคืนทุนภายในเวลา 1.5 และ 1.6 ปี เมื่ออบแห้งข้าวเปลือก 1 ครั้ง/ปี, จะคืนทุนภายในเวลา 0.6 และ 0.7 ปี เมื่ออบแห้งข้าวเปลือก 2 ครั้ง/ปี จากการวิเคราะห์

ความไวพบว่ารายได้และอายุโครงการมีผลกระทบอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงเงินปัจจุบันสุทธิ จากการเปรียบเทียบระหว่างการลงทุนใหม่ทั้งหมดในฉางเก็บและลานตาก โดยใช้อัตราส่วนลด 10 % และ 15% พบว่าการลงทุนในฉางเก็บจะคืนทุนภายในเวลา 6 ปี และ 7.5 ปี ส่วนการลงทุนในลานตากไม่มีระยะเวลาคืนทุน และสำหรับในกรณีการลงทุนใหม่ทั้งหมดในฉางเก็บ ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเงินปัจจุบันสุทธิได้แก่ รายรับ รายจ่าย และอัตราดอกเบี้ย ของโครงการ แต่ในกรณีลานตากกลับพบว่าเฉพาะค่าใช้จ่ายเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อเงินปัจจุบันสุทธิ

คำนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีอาชีพเกษตรกรรมเป็นอาชีพหลัก โดยมีพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจหลายชนิด เช่น ข้าวและข้าวโพด สำหรับข้าวประเทศไทยสามารถผลิตข้าวเปลือกได้ประมาณปีละ 20 ล้านตัน และเหลือส่งออก 5 ล้านตันข้าวสาร คิดเป็นมูลค่าที่ส่งออกประมาณ 33,000 ล้านบาท/ปี ปัจจุบันประเทศไทยสามารถปลูกข้าวได้ 2 ช่วงต่อปี คือ ข้าวนาปี และข้าวนาปรัง ปัญหาที่พบส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับข้าวนาปรัง เนื่องจากในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงฤดูฝนทำให้ข้าวที่เก็บเกี่ยวมีความชื้นค่อนข้างสูง ทำให้เกิดเชื้อราได้ง่าย และเมื่อนำมากองรวมกันโดยไม่มี การเป่าอากาศเป็นเวลาประมาณ 1- 2 วัน จะเกิดความร้อนภายในกองข้าว อันเนื่องมาจากการหายใจของเมล็ดพืช ทำให้อุณหภูมิในกองข้าวสูงขึ้น เมื่อสูงถึง

ระดับหนึ่งจะทำให้เมล็ดข้าวหลังการสีมีสีเหลือง มีผลให้คุณภาพของข้าวสารหลังการสีต่ำลง ขยายไม่ได้ราคา

ปัจจุบันมีการเก็บเกี่ยวข้าว 2 วิธี คือ การเกี่ยวมือแล้วทิ้งข้าวเปลือกให้แห้งในท้องนา ซึ่งวิธีนี้จะทำให้คุณภาพข้าวสารภายหลังการสีต่ำลง เนื่องจากการทำให้แห้งโดยตากแดดนั้น เมล็ดจะแห้งในเวลากลางวัน และดูดความชื้นกลับในเวลากลางคืนหรือเวลาฝนตก มีผลทำให้เมล็ดข้าวแตกร้าว เมื่อนำไปสีจะได้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดต่ำ วิธีการเก็บเกี่ยวอีกวิธี คือการใช้รถเกี่ยวเกี่ยวข้าวและแฉกในตัว วิธีนี้จะเก็บเกี่ยวขณะที่ข้าวเปลือกมีความชื้นประมาณ 20-25 % มาตรฐานเปลือก การนำข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวโดยวิธีดังกล่าวมาเก็บเป็นกองภายในโรงเรือนหรือยุ้งเก็บที่ไม่มีการระบายอากาศ อาจมีปัญหาเรื่องคุณภาพอันเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิในกองข้าวสูงขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดความชื้นลงอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปพ่อค้าข้าวหรือโรงสีจะใช้วิธีตากข้าวเปลือกบนลาน หรือใช้เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบไหลขวางหรือ LSU ซึ่งใช้ลมร้อนจากการเผาถ่านหรือน้ำมันดีเซล เพื่อทำให้ข้าวเปลือกแห้งอย่างรวดเร็วจนเหลือความชื้นประมาณ 14 % มาตรฐานเปลือก แล้วนำไปเก็บรักษาต่อไป แต่วิธีการดังกล่าวจะทำให้คุณภาพของข้าวสารภายหลังการสีต่ำลง กล่าวคือเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดที่ได้จะลดลง

Soponronnarit et al. (1995), Driscoll and Szrednicki (1989) ได้เสนอแนวทางที่เหมาะสมในการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกในเขตร้อนชื้น โดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วงคือ ในช่วงแรกอบแห้งแบบเร็วโดยใช้เครื่องอบแบบใช้อากาศร้อน หรือตากบนลาน เพื่อลดความชื้นลงเหลือ 18 % มาตรฐานเปลือก แล้วนำมาอบแห้งต่อในช่วงที่ 2 ในโรงเรือนเก็บข้าวเปลือก เพื่อลดความชื้นลงจนถึงระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาประมาณ 13-14 % มาตรฐานเปลือก สำหรับการอบแห้งในช่วงที่ 2 นั้นเป็นการอบแห้ง

เมล็ดพืชในถังเก็บ ซึ่งจะใช้โรงเรือนเก็บข้าวในการอบแห้ง เนื่องจากการอบแห้งแบบนี้ไม่มีการเคลื่อนย้ายเมล็ดพืชระหว่างการอบแห้งและการเก็บรักษา จึงต้องอบแห้งโดยให้เกิดความแตกต่างความชื้นของชั้นเมล็ดพืชในถังเก็บน้อยที่สุดและความชื้นในแต่ละชั้นจะต้องต่ำพอที่จะเก็บรักษาไว้ได้อย่างปลอดภัย (ประมาณ 12-14 % มาตรฐานเปลือก) การอบแห้งโดยวิธีนี้จึงใช้อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิต่ำใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อมหรือใช้อากาศแวดล้อม เพราะการใช้อากาศร้อนจะทำให้เมล็ดพืชชั้นล่างสุดแห้งเกินไป ขณะที่เมล็ดพืชชั้นบนได้ความชื้นตามต้องการ ส่งผลให้มีการสูญเสียน้ำหนัก นอกจากนี้อากาศที่ใช้ในการอบแห้งควรใช้อัตราการไหลต่ำ เนื่องจากเมล็ดพืชที่กองในโรงเรือนส่วนใหญ่สูงประมาณ 3 - 4 เมตร ดังนั้นถ้าใช้อัตราการไหลอากาศสูงเกินไปจะทำให้เกิดความดับเลดในกองข้าวเปลือกสูงตามไปด้วย ซึ่งส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานสูง อย่างไรก็ตาม การอบแห้งโดยใช้อากาศที่มีอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศต่ำนี้ จะใช้เวลาอบแห้งค่อนข้างนานเมื่อความชื้นเริ่มต้นสูง ดังนั้นจึงมีโอกาสนำไปใช้ที่ข้าวเปลือกที่อบแห้งโดยวิธีนี้อาจจะเสียหายเนื่องจากเชื้อรา หรือข้าวเปลือกมีคุณภาพต่ำลง แต่จากการศึกษาวิธีการอบแห้งแบบนี้โดยสมชาติ และเพชร (2533) พบว่าในกรณีที่ความชื้นข้าวเปลือกไม่สูงมากนัก การอบแห้งวิธีนี้สามารถรักษาข้าวเปลือกอยู่ในเกณฑ์ดีและจากการทดสอบโดยสมชาติ และสมชาย (2533) พบว่าการอบแห้งโดยใช้อัตราการไหลอากาศต่ำจะให้ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศสูง นอกจากนี้จากการศึกษาการรักษาคุณภาพข้าวเปลือกโดยการเป่าอากาศอย่างเหมาะสม โดยสมเกียรติ และคณะ (2538) พบว่าการอบแห้งโดยวิธีนี้จะให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสูงกว่าวิธีตากแดด และภายหลังจากลดความชื้นจนถึงระดับ

ที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาแล้วควรต้องมีการเป่าอากาศแวดล้อมเป็นระยะ ๆ เพื่อระบายความร้อนในกองข้าวเปลือก Phillips et al. (1988) ศึกษาลักษณะและเงื่อนไขที่ทำให้เกิดสีเหลืองในข้าวตลอดเวลาที่มีการอบแห้งและเก็บรักษา พบว่าการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 22 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ลงเหลือ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ต้องใช้เวลาในการอบแห้งมากกว่า 8 สัปดาห์ นอกจากนี้ยังพบว่ามีความเป็นไปได้ที่การเกิดสีเหลืองในข้าวจะมาจากสาเหตุที่ข้าวมีความชื้นสูง และการเจริญเติบโตของเชื้อราทั้งก่อนและตลอดช่วงที่มีการอบแห้ง Noomhorm and Chen (1991) ศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมและความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดในช่วงการสีข้าว พบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของอากาศแวดล้อมสูงขึ้น สภาพที่เหมาะสมในการสีข้าวควรมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 70-80 % ที่อุณหภูมิระหว่าง 20-35 °C

จากงานวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการที่ผ่านมาจะเห็นว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพข้าวเปลือกได้แก่ ความชื้นข้าวเปลือก และวิธีการจัดการเกี่ยวกับการอบแห้งเมล็ดพืช สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นที่น่าสนใจที่ได้ศึกษามาจากห้องปฏิบัติการมาใช้เป็นเงื่อนไขในการทดสอบในสถานที่ใช้งานจริงโดยศึกษา คุณภาพข้าวเปลือกหลังอบแห้ง และความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบอบแห้งข้าวเปลือกในที่เก็บ

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการทดลอง

วางเก็บข้าวเปลือกมีความจุประมาณ 100 ตัน ขนาดกว้าง 5 เมตร ยาว 10 เมตร สูง 4 เมตร ระบบอบแห้งประกอบด้วยท่อลมหลักซึ่งมีลักษณะเป็นท่อ

กลมทำด้วยสังกะสีแผ่นเรียบหนา 2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 เซนติเมตร ยาวประมาณ 16 เมตร และท่อย่อยมีหน้าตัดเป็นรูปครึ่งวงกลม ทำด้วยแผ่นเหล็กเจาะรูหนา 1.5 มิลลิเมตร พัดลมที่ใช้เป็นแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง มีมอเตอร์ขนาด 3.7 kW เป็นต้นกำลัง ดังแสดงใน Figure 1 ค่าก่อสร้างระบบท่อลมโดยประมาณ 49,208 บาท (กรณีต่อท่อหลักเป็นเส้นตรง) ระบบท่อลมดังกล่าวได้รับการออกแบบให้สามารถอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเฉลี่ย 20% มาตรฐานเปียก ลงเหลือ 14 % มาตรฐานเปียก และนอกจากนี้ยังใช้ระบายความร้อนในกองข้าวเปลือกระหว่างการเก็บรักษา เพื่อรักษาคุณภาพของข้าวเปลือก

ในการทดลองนี้ ได้นำข้าวเปลือกที่มีความชื้นเฉลี่ย 17 % มาตรฐานเปียก น้ำหนักประมาณ 105 ตัน แล้วเป่าอากาศแวดล้อมที่มีอุณหภูมิโดยเฉลี่ย 27.7°C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 67% ระหว่างเวลา 8.30-17.00 น. ($8\frac{1}{2}$ ชม.) สำหรับในช่วงเก็บรักษานั้น จะทำการเป่าอากาศครั้งละ 2 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ ด้วยอัตราการไหลประมาณ 0.57 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ต่อลูกบาศก์เมตรข้าวเปลือก บันทึกข้อมูลของ อุณหภูมิในกองข้าวเปลือกขณะเป่าอากาศ 2 จุด จุดละ 3 ตำแหน่งดัง Figure 2 โดยแต่ละจุดห่างกัน 2 เมตร นอกจากนี้ยังวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อม และอุณหภูมิกระเปาะเปียกด้วย ในการวัดอุณหภูมิ ทั้งในกองข้าวเปลือกและอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม ได้ใช้สายเทอร์โมคัปเปิล type k ต่อเข้ากับ data logger ที่มีความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ทำการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผิวบนของกองข้าวเปลือกที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร 2 เมตร และ 4 เมตร เพื่อนำมาทดสอบคุณภาพการสี และหาความชื้นของข้าวเปลือก โดยที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร 2 เมตร และ 4 เมตร จะเก็บตัวอย่าง 2 จุด ซึ่งจุดที่ 1 จะตรงกับท่อกระจายลม ส่วนจุดที่ 2 จะอยู่ระหว่างท่อกระจายลม ดัง

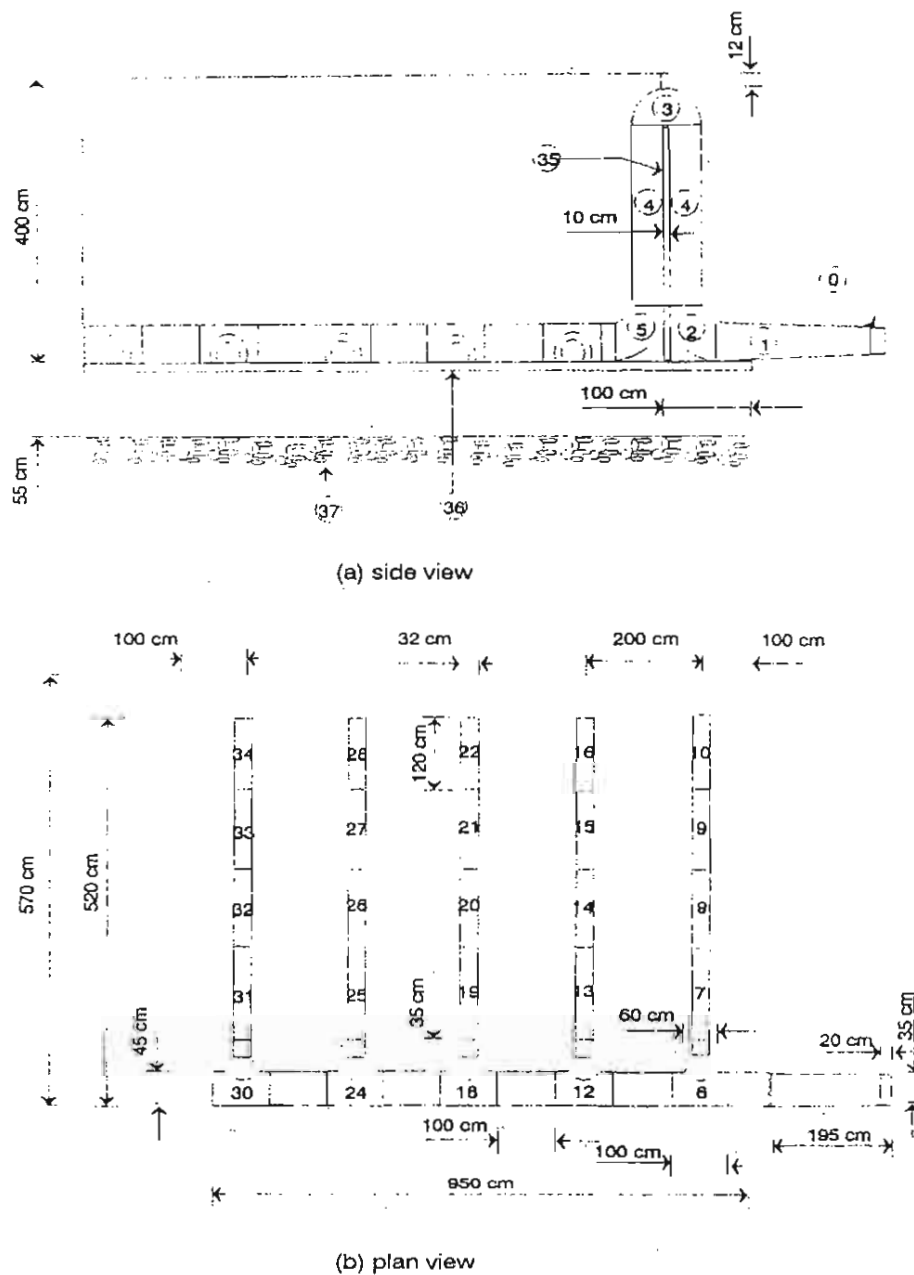
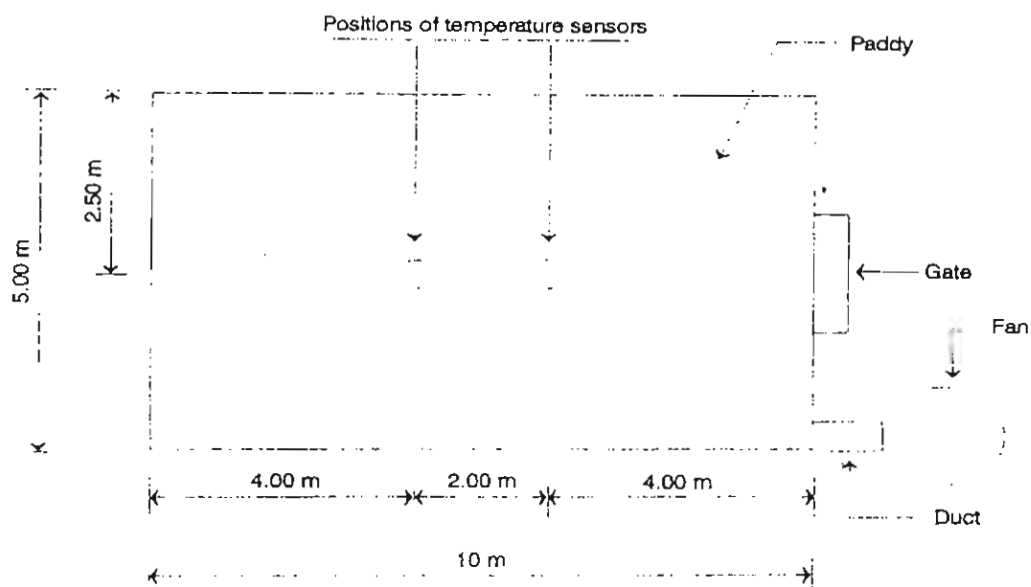
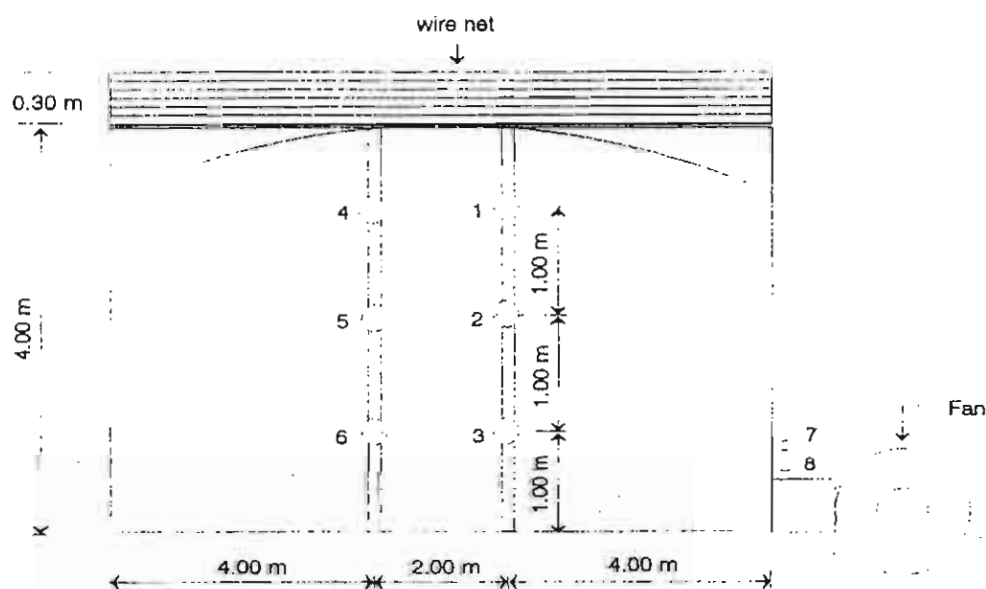


Figure 1 Detail of duct on floor of in-store drying system.

0 = flexible duct 2,3,5, = bended duct 1,4,11,17,23,29 = straight duct 6,12,18,24,30 = tee wye
 7-10,13-16,19-22,25-28,31-34 = perforated plate 35 = wood wall 36 = floor 37 = ground



(a) Plan view



(b) Side view

1,2,3,4,5,6 = Positions of temperature sensors in paddy bulk

7,8 = Positions of dry bulb and wet bulb temperature sensors

Figure 2 Positions of temperature sensors and electric fan in a warehouse.

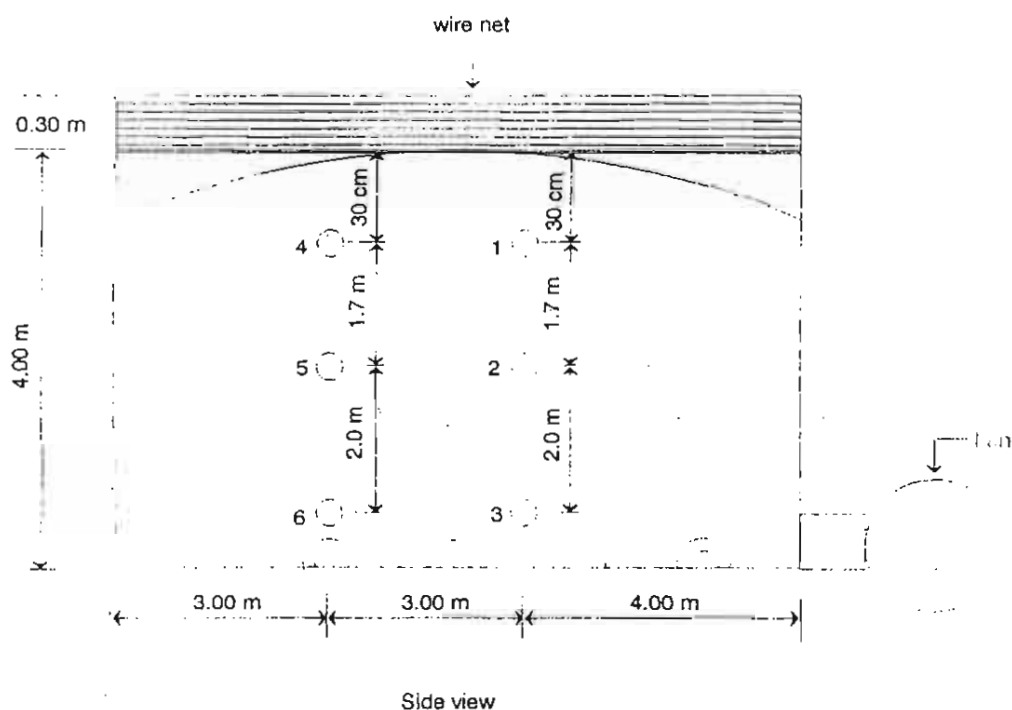
Figure 3 นอกจากนั้นที่ระดับผิวบนและ 30 เซนติเมตร ยังเก็บตัวอย่างเพิ่มเติมจาก 2 จุดดังกล่าวอีกอย่างละ 5 ตัวอย่าง เพื่อนำมาทดสอบเช่นเดียวกันอีกด้วย ข้าวเปลือกที่นำมาทดสอบการสีจะพิจารณาคุณภาพในรูปเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ด และสีของข้าวสารหรือความเหลืองของข้าว หลังจากอบแห้งและเก็บรักษานาน 28 สัปดาห์ จะนำข้าวเปลือกที่เก็บในถังเก็บมาทำการสี

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนในระบบอบแห้ง วิเคราะห์โดยวิธีมูลค่าปัจจุบัน (Present Worth) ใช้อัตราส่วนลด 10 % และ 15 % โดยพิจารณา 2 กรณีคือ กรณีที่มีถังเก็บอยู่แล้ว ซึ่ง

จะลงทุนเฉพาะการเดินท่อลม และกรณีที่ต้องลงทุนใหม่ทั้งหมดในฉางเก็บกับการสร้างลานตากใหม่ ข้อกำหนดที่ใช้ในการวิเคราะห์มีดังนี้

1. กรณีที่มีถังเก็บขนาด 105 ตัน อยู่แล้ว การลงทุนขั้นต้นจะเป็นการเดินท่อลม เป็นเงิน 49,208 บาท, อายุการใช้งานของท่อลม 10 ปี, มูลค่าซากปีที่ 10 เท่ากับศูนย์, ต้นทุนที่เป็นค่าพลังงานคิดเป็นเงิน 2,415 บาท/105 ตันข้าวเปลือก/ปี ซึ่งหาได้จากผลการทดสอบ กล่าวคือต้องใช้ไฟฟ้า 15.31 kW-h ในการลดความชื้นและเก็บรักษาข้าวเปลือก 1 ตัน คิดราคาไฟฟ้า 1.50 บาท/kW-h (สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกปีละ 1 ครั้ง) และ 4,830 บาท/210 ตันข้าวเปลือก/ปี (สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกปีละ 2 ครั้ง) ค่าซ่อมบำรุงคิด 0.5%



1,2,3,4,5,6 = Positions of sample collection in paddy bulk.

Figure 3 Positions of temperature sensors and electric fan in a warehouse.

ของราคาระบบบอบแก้ง เป็นเงิน 246 บาท/ปี

รายได้จากการใช้ระบบบอบแก้งประกอบด้วย รายได้จากการได้ข้าวคืนเพิ่มขึ้น 8% เมื่อเทียบกับลานตาก (จากผลการทดลอง) และรายได้จากการไม่ถูกหักน้ำหนักเนื่องจากความชื้นเกิน 14% มาตรฐานเปียก (ความชื้นเริ่มต้น 17% มาตรฐานเปียก) เป็นเงิน 40,349 บาท/ปี แยกเป็นรายได้จากข้าวคืนเพิ่ม 35,827 บาท และจากการไม่ถูกหักน้ำหนัก 4,522 บาท (อบแห้งข้าวเปลือกได้ปีละ 1 ครั้ง) และ 80,698 บาท/ปี (อบแห้งข้าวเปลือกได้ปีละ 2 ครั้ง) แยกเป็นรายได้จากข้าวคืนเพิ่ม 71,654 บาท และจากการไม่ถูกหักน้ำหนัก 9,044 บาท

2. กรณีที่ลงทุนใหม่ทั้งหมด

2.1 กรณีที่สร้างถางเก็บขนาด 500 ตัน พร้อมกับมีการติดตั้งระบบท่อลม กำหนดให้อายุโครงการและอายุการใช้งานของโรงเรือน 20 ปี, อายุการใช้งานของระบบท่อลม 10 ปี, ปริมาณข้าวเปลือกที่สามารถลดความชื้นได้ 1000 ตัน/ปี (อบแห้งข้าวเปลือกได้ปีละ 2 ครั้ง), ข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 17% มาตรฐานเปียก เงินลงทุนเริ่มต้น 1,546,000 บาท ค่าใช้จ่ายในด้านความสิ้นเปลืองพลังงาน และค่าซ่อมบำรุง 24,230 บาท/ปี รายได้จากการได้คืนข้าวเพิ่ม และการไม่ถูกหักน้ำหนักเนื่องจากความชื้นเกิน 14 % มาตรฐานเปียก คิดเป็นเงิน 340,660 และ 43,000 บาท ตามลำดับ รวมแล้วเท่ากับ 383,660 บาท/ปี

2.2 กรณีที่สร้างลานตาก กำหนดให้อายุโครงการ และอายุการใช้งานของลานตาก 20 ปี, อายุการใช้งานของรถดัก รถเกลี่ย 10 ปี, ปริมาณข้าวเปลือกที่สามารถลดความชื้นได้ 15,000 ตัน/ปี, เงินลงทุนแรกเริ่มประกอบด้วยค่าก่อสร้างลานคอนกรีตขนาด 8,000 ตารางเมตร 2,000,000 บาท รถดักจำนวน 2 คัน คิดเป็นเงิน 960,000 บาท และรถเกลี่ยคันละ 100,000 บาท, ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษาลานคอนกรีต

(0.5 % ของราคาก่อสร้างลานคอนกรีต) 10,000 บาท/ปี ค่าซ่อมแซม และบำรุงรักษารถดัก และรถเกลี่ย (10% ของราคารถ) 106,000 บาท/ปี ค่าดำเนินการ (80 บาท/ตันข้าวเปลือก) คิดเป็นเงิน 1,200,000 บาท/ปี รายได้เพิ่มขึ้นเฉพาะจากการไม่ถูกหักน้ำหนักเนื่องจากความชื้นเกิน 14% มาตรฐานเปียก (ความชื้นเริ่มต้น 17% มาตรฐานเปียก) คิดเป็นเงิน 653,600 บาท/ปี

จากข้อกำหนดดังกล่าวจะนำมาวิเคราะห์ เศรษฐศาสตร์โดยวิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$NPV = \sum_{i=1}^n B_i / (1+i)^i - \sum_{i=1}^n C_i / (1+i)^i$$

เมื่อ NPV = มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

B_i = ผลตอบแทนในปีที่ i

C_i = ต้นทุนในปีที่ i

i = ปีของโครงการคือ 1,2,3...n

i = อัตราดอกเบี้ย

n = อายุของโครงการ

ผลและวิจารณ์

อุณหภูมิ

ในการอบแห้งแบบถึงเก็บ ตัวแปรที่สำคัญอันหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพข้าวเปลือกได้แก่ อุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิในกองข้าวเปลือกมีความแตกต่างกันค่อนข้างสูง ทำให้เกิดการหมุนเวียนของกระแสอากาศภายในกองข้าวเปลือก เมื่อกระแสอากาศดังกล่าวไปกระทบกับบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จะทำให้อิอน้ำซึ่งอยู่ในอากาศเกิดการกลั่นตัว ส่งผลให้ข้าวเปลือกบริเวณนั้นมีความชื้นสูงขึ้นซึ่งจะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดลดลง และข้าวบริเวณนั้นค่อนข้างจะมีสีเหลืองเข้มกว่าบริเวณที่ไม่มีมีการกลั่นตัวของไอน้ำ นอกจากนี้การที่อุณหภูมิในกองข้าวค่อนข้างสูงยังส่งผลให้ข้าวมีสีเหลืองเร็วขึ้นอีกด้วย จากผล

การทดลองดัง Figure 4 จะเห็นว่าอุณหภูมิภายในกองค่อนข้างใกล้เคียงกัน และมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 5 - 7 °C ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการหายใจของเมล็ดพืช

ความชื้นข้าวเปลือก

จากการนำตัวอย่างข้าวเปลือกที่เก็บจากจุดที่กำหนดไว้เบื้องต้น ในแต่ละระดับความลึกมาหาค่าเฉลี่ยดัง Figure 3 พบว่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกโดยเฉลี่ยตลอดทั้งกองประมาณ 17 % มาตรฐานเปียกและเมื่อเป่าอากาศแวดล้อมเข้าไปในกองข้าวเปลือกนานเป็นเวลา 9 สัปดาห์ พบว่าเมื่อหลังสิ้นสุดการอบแห้ง บริเวณด้านล่างมีความชื้นข้าวเปลือกต่ำมาก (Figure 5) ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุ 2 ประการคือ เพื่อที่ต้องการลดความชื้นข้าวเปลือกบริเวณที่ชั้นบนสุดซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับด้านล่างให้เหลือ 14% มาตรฐานเปียก และเนื่องจากการเดินท่อลมกำแพงของราง (Figure 1a.) ทำให้เกิดความดันตกในท่อเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิอากาศที่เข้าห้องอบแห้งมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นความชื้นของข้าวเปลือกบริเวณด้านล่างจึงต่ำกว่าปกติ

การใช้พลังงานไฟฟ้า

จากการเป่าอากาศเป็นเวลา 9 สัปดาห์ โดยใช้อัตราการไหลอากาศ 0.57 m³/min-in³ of paddy สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจากความชื้นเฉลี่ย 17% มาตรฐานเปียก เหลือ 11.2% มาตรฐานเปียก สิ้นเปลืองไฟฟ้า 21 บาท/ตันข้าวเปลือก (ใช้ไฟฟ้า 14 kW-h ราคาไฟฟ้า 1.50 บาท/kW-h) หรือ 0.31 บาท/กิโลกรัม น้ำที่ระเหย และเมื่อทำการเก็บรักษาต่อในโรงเก็บโดยเป่าอากาศเพื่อระบายความร้อนออกจากกองสัปดาห์ละ 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 19 สัปดาห์ สิ้นเปลืองไฟฟ้า 1.97 บาท/ตันข้าวเปลือก (ใช้ไฟฟ้า 1.31 kW-h ราคาไฟฟ้า 1.50 บาท/kW-h)

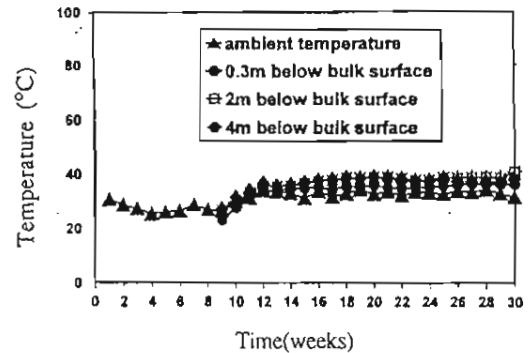


Figure 4 Evolution of temperature in paddy bulk and ambient air temperature.

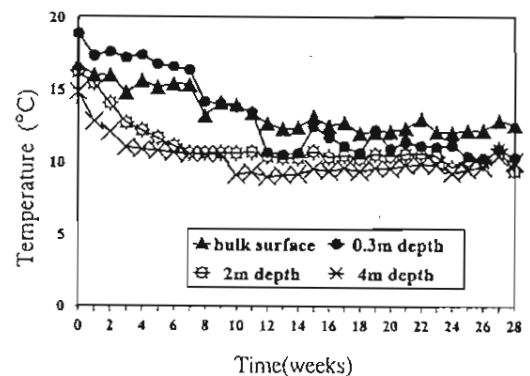


Figure 5 Evolution of moisture content of paddy.

คุณภาพ

เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อความชื้นข้าวเปลือกมีค่าสูงจะทำให้ข้าวมีสีเหลืองเร็ว ถ้าไม่มีการระบายอากาศจากผลการทดลองจะเห็นว่าในช่วงความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 15 - 19% มาตรฐานเปียก ความขาวของข้าวโดยเฉลี่ยลดลงเล็กน้อยหลังการอบแห้งและเก็บรักษา (Figure 6) แม้ว่าจะใช้เวลาในการลดความชื้นค่อนข้างนานซึ่งเป็นผลเนื่องจากในช่วงความชื้นดังกล่าวอัตราการหายใจของเมล็ดพืชค่อนข้างน้อย และอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกไม่สูงนัก สำหรับเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดนั้นพบว่าจะขึ้นอยู่กับคุณภาพเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่เข้าห้องอบแห้ง กล่าวคือถ้าข้าวเปลือกที่

เข้าห้องอบแห้งมีคุณภาพดี ภายหลังการอบแห้งและเก็บรักษาจะได้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสูง ในทางกลับกันถ้าข้าวเปลือกมีคุณภาพเริ่มต้นไม่ดี ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดที่ได้หลังการอบแห้งและเก็บรักษาลดด้วย (Figure 7)

เมื่อนำข้าวเปลือกที่อบแห้งและเก็บรักษามาทำการสี พบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดที่ได้จากการอบแห้งโดยวิธีนี้จะให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสูงกว่าวิธีการตากแดดถึง 8%

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์

กรณีที่มีงานเก็บข้าวเปลือกขนาด 105 ตัน อยู่

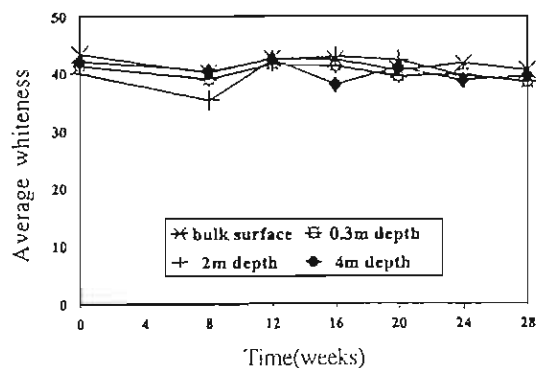


Figure 6 Evolution of whiteness during drying and storage.

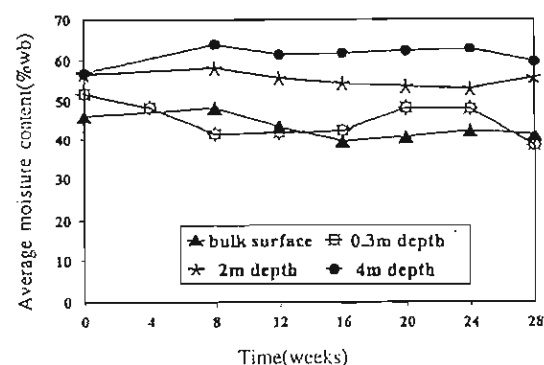


Figure 7 Evolution of thead yield during drying and storage.

แล้วและลงทุนเพิ่มเฉพาะระบบทอลม พบว่าในกรณี ที่อบแห้ง 1 ครั้งต่อปี ผู้ลงทุนจะคืนทุนในเวลา 1.5 และ 1.6 ปี เมื่อคิดอัตราส่วนลด 10% และ 15% ตามลำดับ แต่เมื่อทำการอบแห้ง 2 ครั้งต่อปี พบว่าระยะเวลาคืนทุนลดลงเป็น 0.6 และ 0.7 ปี ที่อัตราส่วนลดเดียวกันกับที่กล่าวมาข้างต้น (Figures 8-11) สำหรับการวิเคราะห์ความไวของการลงทุนในระบบอบแห้งนี้ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ ได้แก่ รายรับที่ได้จากการได้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดเพิ่มและอายุการใช้งานของระบบอบแห้งข้าวเปลือก ในขณะที่รายจ่ายและอัตราส่วนลดจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมูลค่าสุทธิน้อย (Figures 12-15)

กรณีต้องสร้างงานเก็บหรือลานตากใหม่ทั้งหมด พบว่าการลงทุนในการอบแห้งแบบงานเก็บจะมีระยะเวลาคืนทุน 6 ปี และ 7.5 ปี เมื่อคิดอัตราส่วนลด 10%, 15% ตามลำดับ (Figures 16-17) สำหรับการลงทุนในการอบแห้งแบบตากลานพบว่าแม้ว่าจะใช้งานจนหมดอายุ ก็ยังไม่คืนทุน จากการวิเคราะห์ความไวของการลงทุนในกรณีนี้ พบว่าในกรณีที่สร้างงานเก็บรายรับและรายจ่ายของโครงการเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดต่อการเปลี่ยนแปลงมูลค่าปัจจุบันสุทธิ แต่สำหรับการลงทุนแบบตากลานนั้นพบว่ารายจ่ายจะมีผลกระทบมากที่สุดต่อการเปลี่ยนแปลงมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Figures 18 - 21)

สรุป

ในการอบแห้งและเก็บรักษาข้าวเปลือกในทางเก็บ โดยการใช้อากาศแวดล้อมเป่าผ่านกองข้าวเปลือก สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตลอด 7 เดือนที่ทำการอบแห้งและเก็บรักษาข้าวเปลือก ที่ช่วงความชื้นเริ่มต้นโดยเฉลี่ยทั้งกอง 17% มาตรฐานเปียก ลดลงเหลือ 11.6% มาตรฐานเปียก

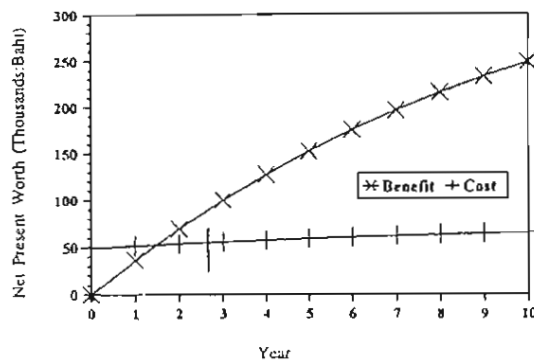


Figure 8 Payback period analysed by present worth method using 10% discount rate.
[In-store dryin only additional investment in air ducts and other facilities, 1 drying per annum]

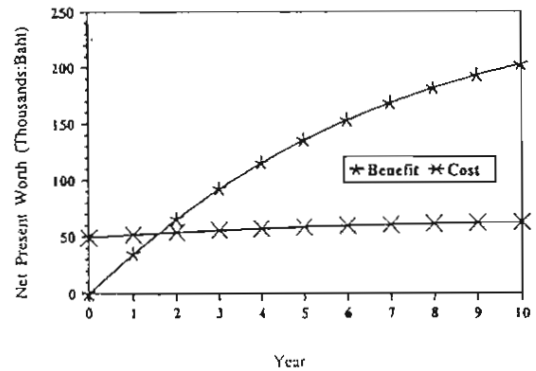


Figure 9 Payback period analysed by present worth method using 15% discount rate.
[In-store dryin only additional investment in air ducts and other facilities, 1 drying per annum]

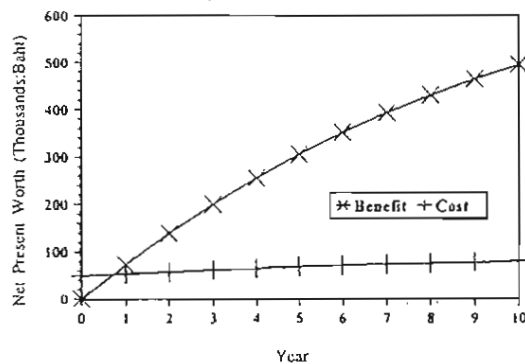


Figure 10 Payback period analysed by present worth method using 10% discount rate.
[In-store dryin only additional investment in air ducts and other facilities, 2 drying per annum]

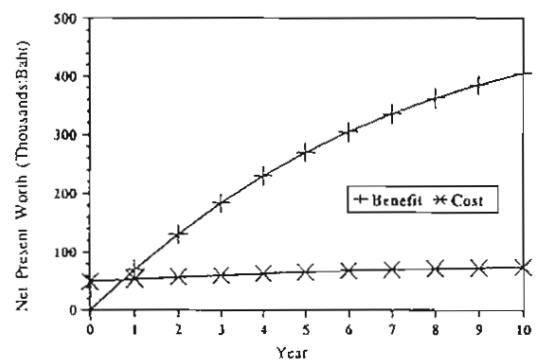


Figure 11 Payback period analysed by present worth method using 15% discount rate.
[In-store dryin only additional investment in air ducts and other facilities, 2 drying per annum]

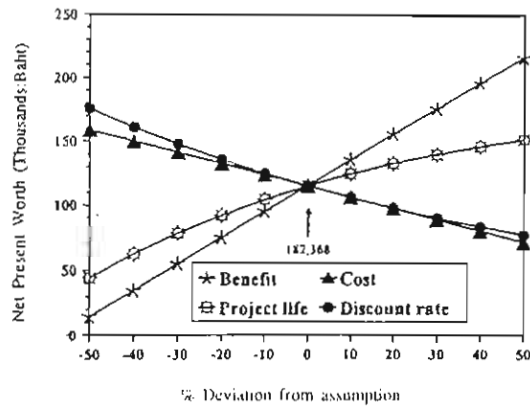


Figure 12 Effects of benefit, cost, project life and discount rate on the net present worth.

{The assumptions; 10% discount rate, 10 year project life, salvage value = 0, benefit = 40,349 baht/year, cost = 2,661 baht/year, 1 drying/year}

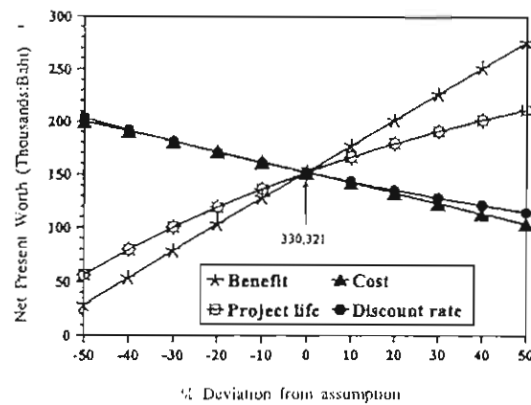


Figure 13 Effects of benefit, cost, project life and discount rate on the net present worth.

{The assumptions; 15% discount rate, 10 year project life, salvage value = 0, benefit = 40,349 baht/year, cost = 2,661 baht/year, 1 drying/year}

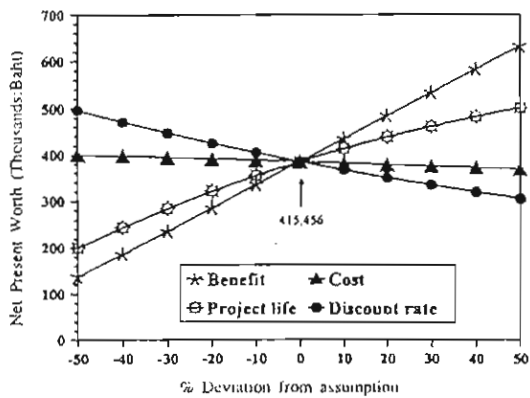


Figure 14 Effects of benefit, cost, project life and discount rate on the net present worth.

{The assumptions; 10% discount rate, 10 year project life, salvage value = 0, benefit = 80,698 baht/year, cost = 5,076 baht/year, 2 drying/year}

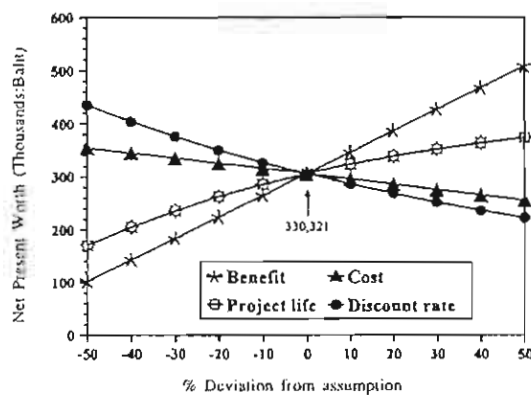


Figure 15 Effects of benefit, cost, project life and discount rate on the net present worth.

{The assumptions; 15% discount rate, 10 year project life, salvage value = 0, benefit = 80,698 baht/year, cost = 5,076 baht/year, 2 drying/year}

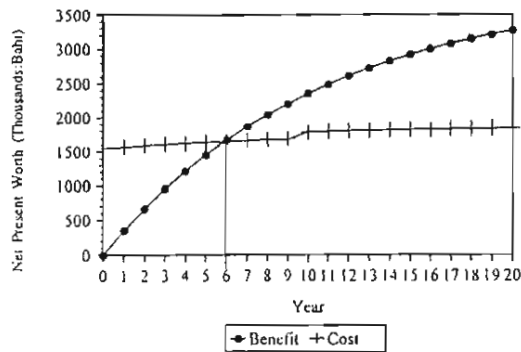


Figure 16 Payback period analysed by present worth method using discount rate of 10%.
[In-store drying including the investment of a warehouse air ducts]

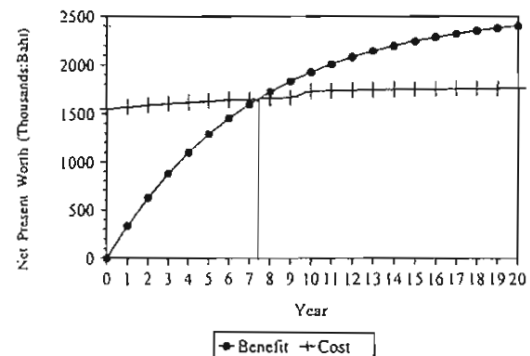


Figure 17 Payback period analysed by present worth method using discount rate of 15%.
[In-store drying including the investment of a warehouse air ducts]

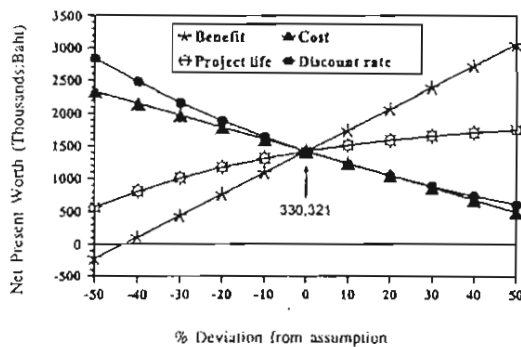


Figure 18 Effects of benefit, cost, project life and discount rate on the net present worth.
(The assumptions; 10% discount rate, 20 year project life, salvage value = 0, benefit = 383,660 baht/year, cost = 24,230 baht/year, in-store paddy drying)

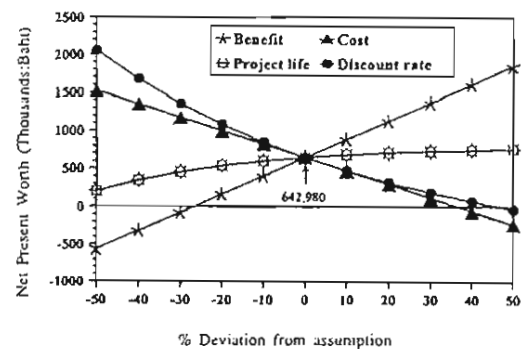


Figure 19 Effects of benefit, cost, project life and discount rate on the net present worth.
(The assumptions; 15% discount rate, 20 year project life, salvage value = 0, benefit = 383,660 baht/year, cost = 24,230 baht/year, in-store paddy drying)

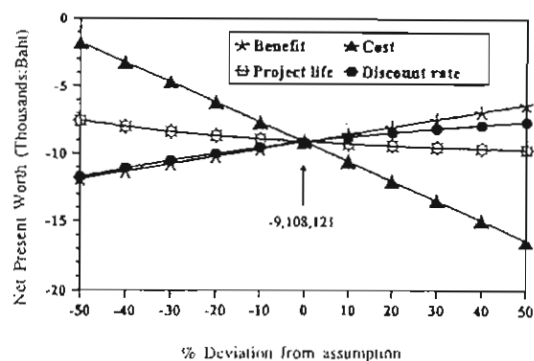


Figure 20 Effects of benefit, cost, project life and discount rate on the net present worth.
(The assumptions; 10% discount rate, 20 year project life, salvage value = 0, benefit = 635,600 baht/year, cost = 1,316,000 baht/year, in-store paddy drying)

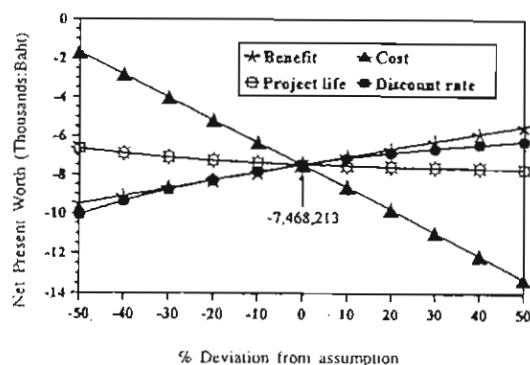


Figure 21 Effects of benefit, cost, project life and discount rate on the net present worth.
(The assumptions; 15% discount rate, 20 year project life, salvage value = 0, benefit = 635,600 baht/year, cost = 1,316,000 baht/year, in-store paddy drying)

โดยใช้อัตราการไหลอากาศ $0.57 \text{ m}^3/\text{min} - \text{m}^3$ ข้าวเปลือก และสำหรับในช่วงเก็บรักษานั้นจะระบายอากาศเป็นระยะ ๆ ประมาณ 2 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ โดยอุณหภูมิในกองข้าวอยู่ในช่วง $35 - 40^\circ\text{C}$ พบว่าคุณภาพข้าวเปลือกหลังสิ้นสุดการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีทั้งในด้านความขาวและเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ด ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสำหรับในช่วงการอบแห้ง 21 บาทต่อตันข้าวเปลือก หรือประมาณ 0.31 บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย สำหรับในช่วงการเก็บรักษาให้ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 1.97 บาทต่อตันข้าวเปลือก

2. การลงทุนในระบบอบแห้งเฉพาะในส่วนระบบท่อลมจะคืนทุนภายในเวลา 1.5 ปี, 1.6 ปี (กรณีอบแห้งข้าวเปลือกได้ปีละ 1 ครั้ง) และคืนทุนภายใน 0.6 ปี และ 0.7 ปี (กรณีอบแห้งข้าวเปลือกได้ปีละ 2 ครั้ง) เมื่อคิดอัตราส่วนลด 10 % และ 15 % รายได้และอายุการใช้งานของระบบอบแห้งเป็นปัจจัย

ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมูลค่าปัจจุบันสุทธิ

3. การลงทุนในระบบอบแห้งใหม่ทั้งหมดในแบบจางเก็บจะคืนทุนภายใน 6 ปี และ 7.5 ปี เมื่อคิดอัตราส่วนลด 10% และ 15% ส่วนการลงทุนแบบลานตากไม่สามารถคืนทุน และในกรณีอบแห้งแบบจางเก็บ ปัจจัยที่มีความไวมากที่สุดคือ ปัจจัยที่เป็นรายรับ รายจ่าย และ อัตราดอกเบี้ยของโครงการ สำหรับแบบตากลานปัจจัยที่มีความไวมากที่สุดได้แก่ รายจ่ายของโครงการ

คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย Australian Centre for International Agricultural Research และกองส่งเสริมเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ก็ขอขอบคุณต่อชุมชน

สหกรณ์การเกษตรจะเชิงเทราจำกัด และศูนย์วิจัยข้าว
ปทุมธานี ที่ให้ความร่วมมือในการดำเนินโครงการวิจัย
ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบคุณภาพ
การสีและความขาว

เอกสารอ้างอิง

- สมเกียรติ ปรัชญาวารกร, สมชาติ โสภณธนฤทธิ์,
อดิศักดิ์ นาดกรณกุล และ สิทธิชัย อินทร์จันทร์.
2538. "การรักษากุณภาพข้าวเปลือกโดยมีการ
ระบายอากาศเป็นระยะๆ". *ว.เกษตรศาสตร์ (วิทย)*
29 : 486-493.
- สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และ เพชร ปรินากุล. 2533.
การทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกแบบในถังเก็บ
และแบบเป็นงวด : คุณภาพผลิตภัณฑ์". *ว.เกษตร
ศาสตร์ (วิทย)* 24 : 367-377.
- สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และ สมชาย จินตกลธนกร.
2533. "การศึกษากการอบแห้งข้าวเปลือกแบบใน
ถังเก็บและแบบเป็นงวด: ความสิ้นเปลืองพลังงาน"
ว.เกษตรศาสตร์ (วิทย) 24 : 92-101.
- Driscoll, R.H. and G.S. Srzednicki. 1989. "Design for
a complete grain drying system under Southeast
Asian climates, In J.O.Naewbanij (ed.). *Proc.
12th ASEAN Seminar on Grain Post-Harvest
Technology*.
- Noomhorm, A. and Y. Chen. 1991. "Effect of tropical
environmental condition on rice kernel breakage
during milling." *Jour. of the science of Food and
Agri*. 55 : 521-528.
- Phillips, S., S. Widjaja, A. Wallbridge, and R.
Cooke. 1988. "Rice yellowing during post-
harvest drying by aeration and during storage."
Jour. Stored Product. 24 : 173-181.
- Soponronnarit, S., P. Wongvirojtana, A.
Nathakaranakule, and S. Chinsakolthanakorn.
1995. "Design charts for in-store paddy drying
under hot and humid climates." *Agri. Engineering
Jour*. 4 : 147-162.

การอบแห้งด้วยพลังงาน รังสีอาทิตย์ในประเทศไทย*

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทบทวนงานวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ในประเทศไทยในช่วง ๑๕ ปีที่ผ่านมา ผลการวิจัยทางด้านวิชาการและเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งธัญพืช เช่น ข้าวเปลือก พืชหมุนเวียน และผลไม้แห้งได้ผลดี อย่างไรก็ตาม จำเเนกษตรกรและพื้นที่ที่ยอมรับการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์นั้นยังมีอยู่น้อยมาก ซึ่งอาจเนื่องมาจากระยะเวลาคืนทุนนานและเงินลงทุนสูง นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาทบทวนงานวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ด้วย ส่วนใหญ่ติดตั้งบนหลังคาของโรงเรือน ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ทั้งแบบมีกระจกปิดและแบบไม่มีกระจกปิดนั้น เมื่อเทียบกับการทำอากาศร้อนด้วยกระแสไฟฟ้านับว่ามีความเหมาะสม แต่ไม่สามารถเทียบได้กับการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ดังนั้น วารจะมุ่งงานวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติมต่อไป เพื่อลดค่าใช้จ่ายและควรมีการพัฒนามาตรฐานการทดสอบของตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ด้วย

ABSTRACT : SOLAR DRYING IN THAILAND*

Somchart Soponronnarit**

** Associate Member of the Royal Institute, Professor, School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok.

* Paper presented at the Royal Institute, Bangkok, March 19, 1997.

Research and development work in solar drying conducted in Thailand during the past 15 years is reviewed. Technical and economic results indicate that solar drying

* บรรยายในการประชุมราชบัณฑิตและภาคีสมาชิก สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน เมื่อวันที่ ๑๙ มีนาคม ๒๕๔๐

** ภาควิชาฟิสิกส์ สำนักวิทยาศาสตร์ ประเภทวิทยาศาสตร์ประยุกต์; ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

for some crops such as paddy, multiple crops and fruit is feasible. However, both the farmers who accept solar drying and the places where it is accepted are still very few. This may be due to the long payback period and high initial investment cost. Research and development work on solar air heaters is also reviewed. Most of the solar air heaters developed in Thailand have used modifications to the roofs of buildings. Both bare and glass-covered solar air heaters have been found technically and economically feasible when compared to electricity but have not been able to compared with fuel oil. Further research and development work should be continued in order to reduce costs. A standard test for solar air heaters should also be developed.

บทนำ

การอบแห้งเป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมที่สุดในการรักษาคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตร การตากแห้งนั้นได้ทำกันมาตั้งแต่สมัยโบราณ แต่ไม่สะอาดเพียงพอสำหรับผลิตผลบางชนิดซึ่งเน่าเสียได้ง่าย นอกจากนี้การตากยังต้องขึ้นกับสภาพอากาศเนื่องจากไม่มีหลังคากำบังเมื่อฝนตก ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาและนำวิธีการอบแห้งที่ใช้แหล่งความร้อนในแบบมาใช้เพื่อแก้ปัญหานี้ เนื่องจากในกระบวนการอบแห้งดังกล่าวมีความสิ้นเปลืองพลังงานอย่างมาก จึงได้มีการศึกษาการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แทนการใช้พลังงานในแบบอย่างกว้างขวางในประเทศต่าง ๆ ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งซึ่งได้มีการศึกษาเรื่องการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์มาเป็นเวลากว่า ๒๐ ปีแล้ว ผลปรากฏว่ามีเกษตรกรจำนวนหนึ่งยอมรับเครื่องอบแห้งด้วยพลังงาน รังสีอาทิตย์แบบง่ายนี้ แม้ว่าจะยังเป็นจำนวนน้อยก็ตาม

ได้มีการศึกษาทบทวนงานวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ในประเทศไทย^(๑,๒) นอกจากนี้ ยังมี การเสนอ

รายงานความก้าวหน้าเกี่ยวกับการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ในกลุ่มประเทศอาเซียน^(๓) เนื่องจากการวิจัยและพัฒนาในด้านนี้ยังคงก้าวหน้าต่อไปอีก จึงควรต้องมีการศึกษาทบทวนต่อไป

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาทบทวนงานวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ รวมทั้งตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ในประเทศไทย ซึ่งได้มีการนำผลงานที่สำคัญจากภายนอกมากล่าวไว้ด้วย แต่ไม่ได้รวมถึงการอบแห้งไม้เนื่องจากมีความแตกต่างกับผลิตผลทางการเกษตรส่วนใหญ่ในวิธีปฏิบัติระหว่างกระบวนการอบแห้ง

ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์

ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนรังสีแสงอาทิตย์ให้เป็นความร้อนในแง่ของการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศ อุปกรณ์นี้เป็นอุปกรณ์แบบง่าย ๆ ประกอบด้วยตัวดูดกลืนรังสีซึ่งเป็นตัวเปลี่ยนพลังงาน ช่องอากาศ และฝาปิดซึ่ง

อาจมีหรือไม่มีก็ได้ ขณะที่อากาศไหลผ่านช่องอากาศในตัวอุปกรณ์ ความร้อนจะถูกดึงออกจากตัวดูดกลืนรังสีทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น อากาศร้อนนี้จะใช้สำหรับการทำความร้อนหรือการอบแห้ง เนื่องจากประเทศไทยมีอากาศร้อนและชื้น การทำความร้อนให้แก่พื้นที่จึงจำกัด แต่ถ้าใช้ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์สำหรับการอบแห้ง จะไม่มีปัญหาในเรื่องนี้ ศักยภาพในการยอมรับตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ในอนาคตนั้นมีค่อนข้างสูง และอาจเป็นที่นิยมเช่นเดียวกับเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ซึ่งปัจจุบันมีในตลาดในประเทศแล้ว

การสรุปเกี่ยวกับงานวิจัยและพัฒนาทางด้านการอบแห้งเมล็ดพืชด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ในสหรัฐอเมริกา^[๑๗] ซึ่งได้มีการพัฒนาและทดสอบตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์หลาย ๆ ชนิด โดยอาจแยกได้เป็น ๓ ชนิดคือ ๑) ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ๒) ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบแผ่นไม่เรียบ และ ๓) ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนร่วมกับตัวเก็บความร้อน

ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ประกอบด้วยตัวดูดกลืนรังสีสำหรับเปลี่ยนรังสีแสงอาทิตย์เป็นความร้อนในแง่ของการเพิ่มเอนทัลปีของอากาศช่องอากาศซึ่งอากาศจะไหลผ่านและดึงความร้อนออกจากตัวดูดกลืนรังสี ฝาปิดใส และฉนวนด้านล่าง เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนทั้ง ๒ อย่างนี้ อาจมีหรือไม่มีก็ได้ รูปที่ ๑ แสดงชนิดของตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วย

พลังงานรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบทั่วไป คือ ก) แผ่นเรียบเปล่า ข) แผ่นเรียบแบบมีฝาปิดโปร่งใสโดยไม่มีช่องว่างอากาศนิ่ง ค) แผ่นเรียบแบบมีฝาปิดโปร่งใสโดยมีช่องว่างอากาศนิ่ง ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบเปล่า รูปที่ ๑ ก เป็นแบบที่ง่ายที่สุดและมีราคาถูกที่สุด แต่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะต่ำสุด เนื่องจากต้องขึ้นกับความเร็วลมเหนือตัวรับรังสี ได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยการสร้างตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบมีฝาปิดโปร่งใสโดยไม่มีช่องว่างอากาศนิ่ง รูปที่ ๑ ข ซึ่งจะค่อนข้างยุ่งยากกว่าและมีราคาสูงกว่า และเมื่อมีการสร้างแบบที่มีช่องว่างอากาศนิ่ง (รูปที่ ๑ ค) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจึงมีประสิทธิภาพสูงกว่า อย่างไรก็ตามการสร้างในแบบสุดท้ายนี้จะยุ่งยากมากที่สุด และมีราคาแพงที่สุด

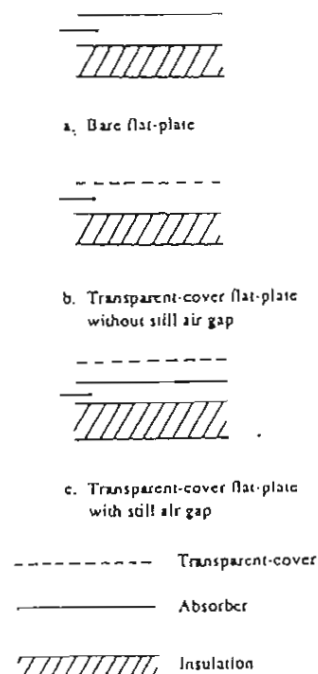


Fig. 1. Section in profile of typical flat-plate solar air heaters.

การสร้างตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบอาจสร้างเป็นชุด จากนั้นจึงติดตั้งบนพื้นดินหรือบนหลังคาอาคาร ซึ่งสามารถพัฒนาหลังคาและผนังอาคารให้เป็นตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ในกรณีนี้ทำให้ต้นทุนลดลงอย่างมาก ในภูมิภาคที่ตั้งอยู่ในละติจูดที่ต่ำ เช่นประเทศไทยนั้น การติดตั้งตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ผนังตั้งฉากคงไม่เหมาะสม เนื่องจากการส่งผ่านและการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำ สำหรับภูมิภาคที่อยู่ซีกโลกเหนือเส้นศูนย์สูตร การติดตั้งตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ควรหันไปทางทิศใต้ ความเบี่ยงเบนจากทิศใต้ประมาณ ± 30 องศาเซลเซียส โดยไม่สูญเสียรังสีแสงอาทิตย์ โดยเฉลี่ยมุมเอียงของตัวรับรังสีมักจะเท่ากับเส้นละติจูด หรือ 0.4 คูณละติจูด แต่อาจมีการเบี่ยงเบนจากละติจูดถึง ± 15 องศาเซลเซียส โดยไม่สูญเสียรังสีอาทิตย์โดยเฉลี่ย

ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบแผ่นไม่เรียบ เป็นตัวรับรังสีทำอากาศร้อนที่สร้างจากฟิล์มพลาสติก ซึ่งอาจมีการอัดลมหรือไม่ก็ได้ รูปที่ ๒ แสดงแบบของตัวรับรังสีทำอากาศร้อนแบบอัดลม ตัวรับรังสีชนิดนี้มีข้อดีคือ ราคาถูก สร้างง่าย และสามารถเก็บได้เมื่อไม่ใช้งาน แต่ปัญหาสำคัญคือฟิล์มพลาสติกเสื่อมเร็ว ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบอัดลม จะมีลักษณะเป็นช่องอากาศขนาดยาวและอาจติดตั้งในทิศตะวันออก-ตะวันตก หรือทิศเหนือ-ใต้ ได้

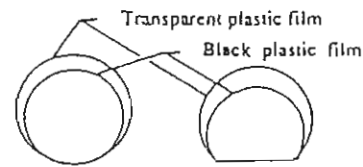
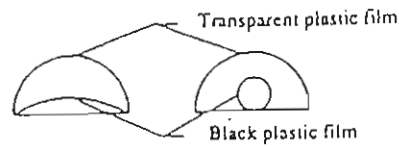


Fig. 2. Cross-section of typical inflated solar air heaters.

ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบสุดท้าย เป็นตัวรับรังสีอาทิตย์ร่วมกับตัวเก็บความร้อน ซึ่งประกอบด้วยตัวรับรังสีและหินเก็บความร้อนต่อกันเป็นชุด การเก็บความร้อนทำหน้าที่เป็นตัวรับอุณหภูมิเมื่อนำมาใช้กับการอบแห้งผลผลิตจะได้ผลไม่ดีขึ้นนัก ได้มีการทดลองเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวฟ่างทั้งแบบที่มีและไม่มีการใช้หินเป็นแหล่งเก็บความร้อน^[๓๐] ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราการอบแห้งของทั้งสองกรณีไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงไม่แนะนำการใช้การเก็บความร้อน นอกจากนี้ ยังมีข้อสรุปจากผู้เชี่ยวชาญที่เข้าร่วมประชุมในเรื่องการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ซึ่งจัดโดยองค์การอาหารและเกษตรกรรมแห่งสหประชาชาติจัดที่กรุงเทพมหานครว่า การใช้หินเป็นแหล่งเก็บความร้อนนั้นไม่เหมาะสม^[๓]

ในประเทศไทยได้มีการทำงานวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนที่พัฒนาขึ้นนั้นส่วนใหญ่เป็นแบบแผ่นเรียบ และมุ่งเน้นเพื่อประโยชน์ด้านการอบแห้งผลผลิตทาง

การเกษตร^[๔๑] ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์โดยการพาความร้อนแบบบังคับ ส่วนใหญ่ทำมาจากแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบลอน ซึ่งมักใช้บนหลังคาอาคาร^[๔,๑๔,๒๔,๒๗] นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดลองตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ซึ่งรวมอยู่ในเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนแบบนี้เป็นตัวรับรังสีแบบฟิล์มพลาสติกที่ใช้กับเครื่องอบแห้งข้าวด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ของ AIT^[๓๐] และตัวรับรังสีทำอากาศร้อนแบบแผ่นเรียบในเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบตู้^[๒๖,๓๑] อัตราการไหลของอากาศจะหลากหลาย ด้วยเหตุนี้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจึงแปรตลอดวัน ประสิทธิภาพในการรับรังสีจะน้อยกว่า ในกรณีของการพาความร้อนแบบบังคับ

ได้มีการศึกษาตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่มีฝากระจกและไม่มีฝา^[๒๔] โดยพัฒนาตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ด้วยการพัฒนาหลังคาของอาคาร (๓.๗ เมตร x ๕.๑ เมตร) และมีรูปแบบเหมือนในรูปที่ ๑ ก หรือ ๑ ค ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบเปล่าไม่มีฝาทำได้ในกรณีที่ความเร็วลมเหนือตัวรับรังสีต่ำ ความเร็วอากาศในตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ควรมีค่าประมาณ ๔-๖ m/s ซึ่งตรงกับอัตราการไหลของมวลอากาศจำเพาะ ๐.๐๑๕-๐.๐๒๓ กิโลกรัมต่อวินาทีต่อตารางเมตรของพื้นที่ตัวรับรังสี (รูปที่ ๓)

ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบมีฝาปิดโปร่งใสนั้นสามารถใช้ได้และมีประสิทธิภาพสูงกว่าในช่วงความเร็วลมเหนือตัวรับรังสีต่ำหรือสูง ควรใช้ความเร็วอากาศในตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์เช่นเดียวกับแบบแผ่นเรียบไม่มีฝา (รูปที่ ๔) การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่ามีศักยภาพการยอมรับสูงมากเมื่อเทียบกับการทำอากาศร้อนด้วยไฟฟ้า แต่ก็ไม่สามารถจะเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงได้ (รูปที่ ๕) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ทั้งสองแบบที่สถานะคงตัว มีความเที่ยงตรงพอที่จะทำนายประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้

การวิเคราะห์ทางทฤษฎีถึงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาในตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ (h) ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของมวลอากาศจำเพาะ (G) และ geometrical coefficient ของตัวรับรังสี (K) ซึ่งกำหนดได้ดังนี้^[๗]

$$K = (L/b) D^{0.25}$$

เมื่อ L, b และ D คือ ความยาว ความหนาของช่องอากาศ และเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (h) ได้จาก

$$h = 0.0158 k (GK/\mu)^{0.8}$$

เมื่อ k และ μ คือสภาพการนำความร้อนและความหนืดไดนามิกของอากาศตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ขึ้นกับ

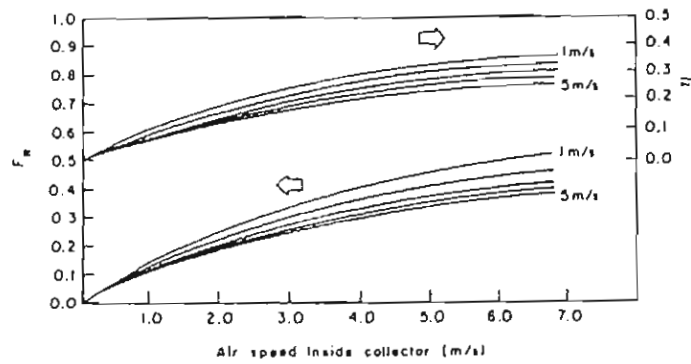


Fig. 3 Effect of air speed inside collector and wind speed above collector on F_a and thermal efficiency of bare flat-plate solar air heater. (Wind speed varies from 1 to 5 m/s from the top to bottom curves.)

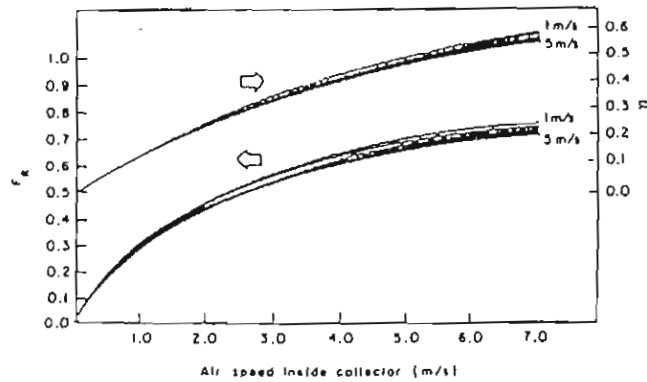


Fig. 4 Effect of air speed inside collector and wind speed above collector on F_a and thermal efficiency of glass-cover flat-plate solar air heater. (Wind speed varies from 1 to 5 m/s from the top to bottom curves.)

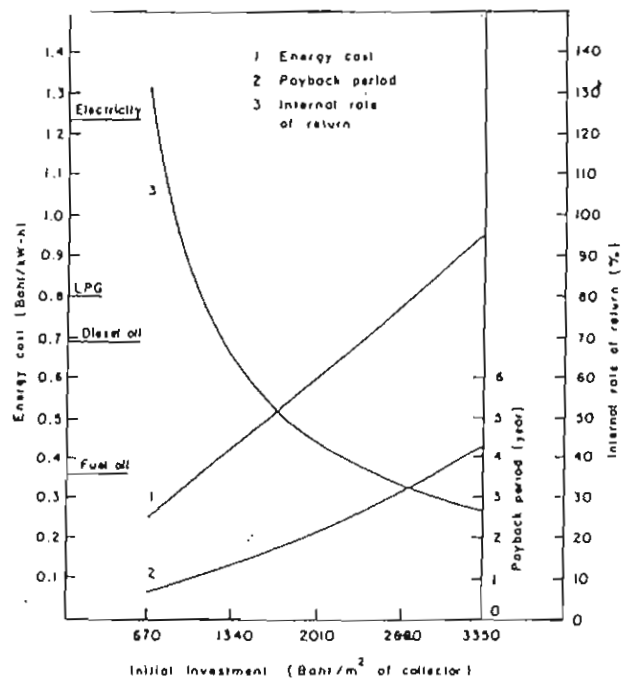


Fig. 5 Energy cost, payback period, and internal rate of return when compared to electricity, as a function of initial cost of glass-cover flat-plate solar air heater.

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา
รายละเอียดเกี่ยวกับทฤษฎีของเครื่องทำความ
ร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ปรากฏใน [๙]

การอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ โดยการพาความร้อนแบบบังคับ

การอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์
แบ่งเป็นการอบแห้งโดยการพาความร้อน
แบบบังคับและโดยการพาความร้อนแบบ
ธรรมชาติ หรือแบบใช้พลังงานรังสีอาทิตย์
โดยตรงและโดยอ้อม เครื่องอบแห้งแบบการ
พาความร้อนแบบธรรมชาติจะมีการลงทุน
น้อยกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งโดยการ
พาความร้อนแบบบังคับ นอกจากนี้ยังง่ายต่อ
การใช้งานและบำรุงรักษา แต่อัตราการอบแห้ง
จะช้ากว่าเพราะมีอัตราการไหลของอากาศต่ำกว่า
และคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาจไม่ดีในบางครั้ง
ถ้ามีฝนตกหรือไม่มีแสงแดด เครื่องอบแห้ง
แบบใช้แสงอาทิตย์โดยตรงจะมีประสิทธิภาพสูง
กว่าแบบใช้แสงโดยอ้อม แต่จะควบคุมอุณหภูมิ

การอบแห้งได้ยาก นอกจากนี้ยังไม่เหมาะ
สำหรับผลิตภัณฑ์ไวต่อรังสีอาทิตย์

ในประเทศไทยได้มีการศึกษาการอบ
แห้งเมล็ดพืชด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์โดยการ
พาความร้อนแบบบังคับ มาตั้งแต่ปี พ.ศ. ๒๕๒๖
ไปปลายปี พ.ศ. ๒๕๒๗ สำนักงานพลังงานแห่ง
ชาติได้มีโครงการวิจัยเกี่ยวกับการประเมินทาง
เศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วย
พลังงานรังสีอาทิตย์ ๒ โครงการ โครงการ
แรก^[๒๔,๒๕] ได้มีการสร้างและทดสอบโรงเก็บ
และอบแห้งข้าวเปลือกด้วยแสงอาทิตย์ซึ่งทำ
หน้าที่เป็นทั้งเครื่องอบแห้งและที่เก็บที่บ้าน
ของเกษตรกรในจังหวัดนครปฐม (รูปที่ ๖)
ในการทำงานอากาศจะถูกดูดจากตัวรับรังสี
ทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบ
แผ่นเรียบเปล่าบนหลังคาโดยพัดลมแบบเหวี่ยง
แล้วส่งผ่านห้องอากาศซึ่งอยู่ใต้แผ่นเหล็กเจาะรู
จากนั้นจะผ่านเข้าไปในชั้นของข้าวเปลือก ใน
การใช้เครื่องยนต์ขับเคลื่อนพัดลมจะสิ้นเปลือง
น้ำมันดีเซลโดยเฉลี่ย ๑.๖ ลิตรต่อตันข้าวเปลือก

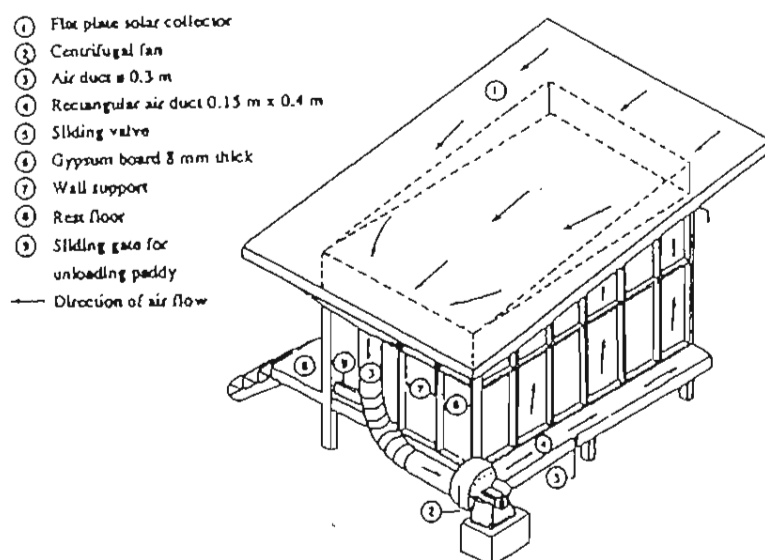


Fig. 6 Isometric 30° showing the solar hut, Soponronnarit *et al.* (1986)

การอบแห้งข้าวขึ้น ร้อยละ ๑ มาตรฐานเปียก
 ได้จากการอบแห้ง ร้อยละ ๐.๕ มาตรฐานเปียก/
 ดินขาวเปลือกแห้ง/ข้าวโม่ง ความจุสูงสุดในการ
 เปียกในนา ๑๐ ตัน จากผลการวิเคราะห์ทาง
 เศรษฐศาสตร์โดยตั้งสมมุติฐานว่าผลกำไรมา
 จากการลดการสูญเสีย และข้าวเปลือกที่มี
 ราคา ๒๒ บาท/ตัน โรงเก็บและอบแห้งข้าวเปลือก
 ด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์จะประหยัดเฉพาะใน
 กรณีที่มีการเพาะปลูกข้าวปีละ ๒ ครั้ง โดยมี
 พื้นที่เพาะปลูก ๑.๔๔ - ๔.๓๒ เฮกตาร์ ระยะ
 เวลาคุ้มทุน ๒.๓ - ๑๔.๘ ปี

การวิจัยโครงการที่สอง^(๒๗) ได้มีการ
 สร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งที่บ้านเกษตรกร
 ในจังหวัดปทุมธานี (รูปที่ ๗) แสดงแผนผัง
 ของระบบอบแห้ง ซึ่งประกอบด้วยตัวรับรังสี
 ทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ขนาด
 กว้าง ๓.๗๔ เมตร x ยาว ๔.๔๘ เมตร และ
 ถังอบแห้งซึ่งมีชั้นของข้าวเปลือกเป็นแนวตั้ง
 ความจุ ๑.๒ ตันข้าวเปลือก การทดสอบการ

อบแห้งแสดงให้เห็นว่าข้าวเปลือก ๑ ตัน ถูก
 ลดความชื้นจากร้อยละ ๑๗.๒ มาตรฐาน
 เปียกเหลือร้อยละ ๑๔ มาตรฐานเปียกใน
 ๑-๔ วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ ความ
 สิ้นเปลืองพลังงานโดยเฉลี่ยสำหรับพัดลม
 ประมาณ ๗ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อการอบแห้ง
 ๑ งด จากผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์
 พบว่าเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์
 จะเป็นที่น่าสนใจถ้าพิจารณาผลประโยชน์ที่ได้
 จากการลดการสูญเสียข้าวเปลือก แต่จะไม่
 ค่อยจุใจมากนักหากพิจารณาเฉพาะผล
 ประโยชน์ที่ได้จากราคาข้าวเปลือกแห้งที่มี
 ราคาสูงขึ้น

การยอมรับการอบแห้งเมล็ดพืชด้วย
 พลังงานรังสีอาทิตย์โดยการพาความร้อนแบบ
 บังคับนั้นมีข้อจำกัดเนื่องจากเหตุผลบาง
 ประการซึ่งจะได้อธิบายต่อไป การอบแห้ง
 ผลไม้เป็นที่น่าสนใจเนื่องจากจะได้ราคาเพิ่มขึ้น
 เมื่อมีการอบแห้งอย่างเหมาะสม ได้มีการ

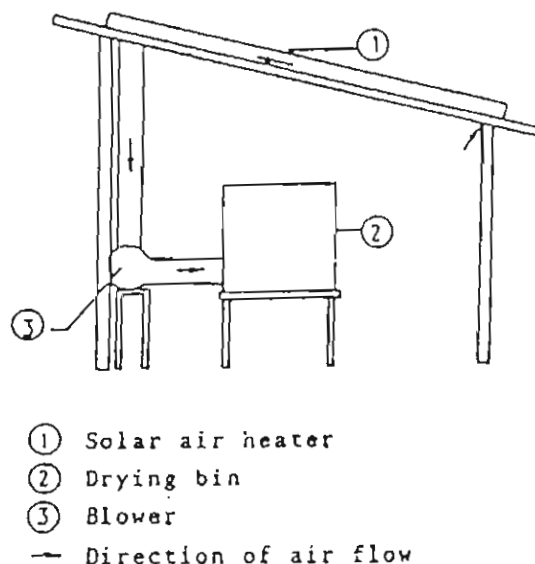


Fig. 7 Solar dryer developed by Thongprasert et al. (1985)

ทดลองวิจัยเครื่องอบแห้งกล้วยด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์โดยการพาความร้อนแบบบังคับในจังหวัดพิษณุโลก^(๖,๒๑,๒๓) เครื่องอบแห้งนี้ประกอบด้วยตู้อบปิดด้วยกระจกใสพื้นที่ ๑๒ ตารางเมตร และตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ พื้นที่ ๓๒ ตารางเมตร (รูปที่ ๘) ในการทำงานอากาศจะถูกดูดผ่านตัวรับรังสีอาทิตย์ก่อนที่จะเข้าสู่ตู้อบซึ่งรังสีแสงอาทิตย์จะถูกดูดกลืนโดยผลิตภัณฑ์ทำการอบแห้ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพกฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์เป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับความชื้นและมวลแห้งของกล้วยต่อพื้นที่รับแสงอาทิตย์ ๑ หน่วย ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณร้อยละ ๓๐ ที่ความชื้นเฉลี่ยร้อยละ ๒๒๐ มาตรฐานแห้งและมวลแห้งของกล้วยเท่ากับ ๓.๗ กิโลกรัมต่อตารางเมตรของพื้นที่รับแสงอาทิตย์ จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์อย่างง่ายพบว่า

ระยะเวลาคู่มือเป็น ๑.๕-๕.๔ ปี ได้มีการพัฒนาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ ความชื้น และมวลแห้ง ระยะเวลารอบแห้งของแต่ละงวดจะเท่ากับ ๗ วัน (๖ ชั่วโมงต่อวัน)

การศึกษาการอบแห้งกล้วยโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์^(๒๑) พบว่าตัวแปรที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ ๑๐ กิโลกรัม/ชั่วโมง-กิโลกรัมกล้วยแห้ง และสัดส่วนของอากาศที่นำมาใช้ใหม่ร้อยละ ๔๐ จากการทดลองพบว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะยังคงดีอยู่ถ้าอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งไม่สูงกว่า ๖๐ องศาเซลเซียส

การพัฒนาการบ่มใบยาสูบโดยใช้พลังงานรังสีอาทิตย์ช่วย^(๒) เครื่องต้นแบบในการทดลองประกอบด้วยโรงบ่มใบยาสูบขนาด ๓.๖ x ๓.๖ x ๔.๘ เมตร ขนาดย่อยส่วน (๑:๔) ซึ่งบรรจุใบยาสูบสดจำนวน ๑ ตัน (รูปที่ ๘) แกว

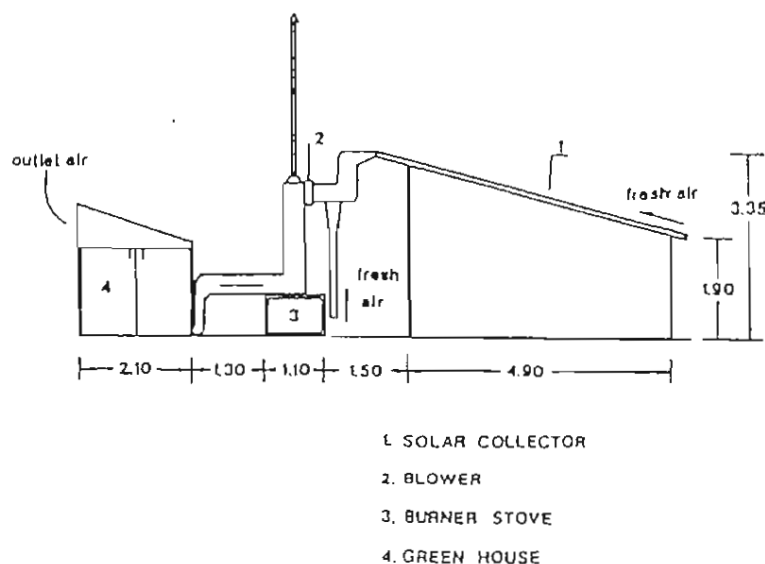


Fig. 8 Solar banana dryer, Assayo (1991)

ของตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ พื้นที่ ๓๘.๕ ตารางเมตร และชั้นหินขนาด ๖ ลูกบาศก์เมตร มีพัดลมขนาด ๑.๕ กิโลวัตต์ และขนาด ๐.๗๕ กิโลวัตต์ อย่างละ ๑ ตัว ทำหน้าที่พาความร้อนแบบบังคับเข้ามาในระบบ มีการใช้เชื้อเพลิง LPG โดยตรงเพื่อช่วยในการทำความร้อนพบว่าประหยัดเชื้อเพลิงโดยเฉลี่ยร้อยละ ๒๘ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยเฉลี่ยร้อยละ ๔๐.๕ แต่ยังไม่มีการสรุปเกี่ยวกับประโยชน์โดยรวมของตัวเก็บรักษาความร้อนโดยใช้ชั้นหิน

ได้มีการเปลี่ยนโรงอบใบยาสูบด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ซึ่งได้อธิบายไว้ข้างต้นให้เป็นเครื่องอบแห้งสำหรับพืชผลเกษตรอย่างอื่น^(๑๔) การทดลองการอบแห้งประกอบด้วย การทดลองกับพืชผล ๒ ชนิด คือ การอบใบยาสูบ ๕ ครั้ง และการอบแห้งลำไย ๒ ครั้ง เครื่องอบแห้งมีความจุใบยาสูบสด ๑ ตันหรือลำไยสด ๗๐๐ กิโลกรัม ผลการอบแห้งแสดงให้เห็นว่ามีการใช้พลังงานรังสีอาทิตย์ร้อยละ ๒๕-๓๐ ของพลังงานที่ใช้ไปทั้งหมด

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบใบยาสูบเท่ากับ ร้อยละ ๓๖-๔๐ และการอบแห้งลำไยร้อยละ ๒๓-๒๔ สัดส่วนผลกำไร/ต้นทุนของการอบใบยาสูบโดยใช้แสงอาทิตย์ช่วยจะเท่ากับ ๐.๖๓ เมื่อคิดจากผลกำไรที่ได้จากการประหยัดเชื้อเพลิง LPG สัดส่วนนี้จะเพิ่มเป็น ๑.๓๔ เมื่ออบแห้งลำไยในเครื่องอบแห้งเครื่องเดียวกัน การใช้ประโยชน์จากเครื่องอบแห้งจะเพิ่มจาก ๓ เดือน (ใช้อบใบยาสูบเพียงอย่างเดียว) เป็น ๖ เดือน (ใช้อบแห้งลำไยหลังจากหมดฤดูอบใบยาสูบ) กรณีหลังนี้จะมีระยะเวลาคุ้มทุน ๗ ปี

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์แบบอุโมงค์^(๑๕) โดยทำการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าภายในประเทศไทย เครื่องอบแห้งมีลักษณะเป็นอุโมงค์เดี่ยว กว้าง ๑.๘ เมตร ยาวรวม ๒๐ เมตร อากาศแวดล้อมถูกดูดโดยพัดลมซึ่งขับด้วยพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์สุริยะขนาด ๕๓ วัตต์ ผ่านตัวรับรังสีที่ปิดด้วยพลาสติกใสซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุโมงค์ พื้นที่ตัวรับรังสีมีขนาด ๑.๘ เมตร x

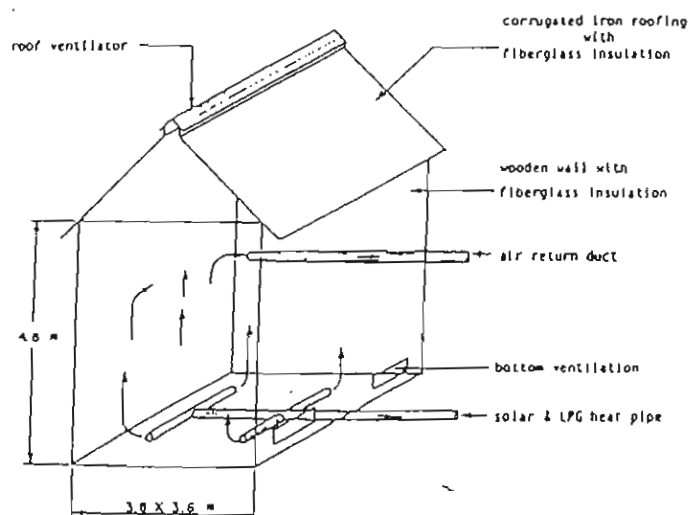


Fig. 9 The modified prototype tobacco curing barn, Boonlong et al. (1984)

๑๐ เมตร จากนั้นจึงไหลผ่านกล้วยซึ่งวางเรียง
อยู่บนตาข่ายพลาสติกภายในอุโมงค์ ซึ่งมี
ขนาดเดียวกันกับตัวรับรังสี ดังนั้นกล้วยจึงได้
ได้รับความร้อนจากลมร้อนและจากการดูดกลืน
แสงอาทิตย์โดยตรง เครื่องอบแห้งนี้สามารถ
อบแห้งได้ครั้งละ ๓๐๐ กิโลกรัม อุณหภูมิ
อากาศร้อนอยู่ในช่วง ๔๕-๖๕ องศาเซลเซียส
สามารถอบแห้งแล้วเสร็จภายใน ๓-๕ วัน
เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตากแดดจะใช้เวลา
๕-๗ วัน จากการประมาณเวลาคุ้มทุน พบว่า
ต้องใช้เวลา ๓ ปี

เครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

เครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์
โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ มีข้อดี
มากกว่าการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์
โดยการพาความร้อนแบบบังคับ คือ มีการลง
ทุนต่ำกว่า แม้ว่าการควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง
จะยาก และอัตราการอบแห้งจำกัด เครื่องอบ
แห้งชนิดนี้ได้รับความนิยมมากกว่าเนื่องจาก
มีราคาถูกและมีการทำงานและการบำรุง

รักษาง่าย

จากการศึกษาอัตราการอบแห้งผ้า
เปียกในตู้เครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์
โดยการพาความร้อนพบว่ามีความเท่ากับ ๔.๒
กิโลกรัม/ตารางเมตร-วัน^[๓๐] ประสิทธิภาพสูง
สุดของการอบแห้งจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วน
ของพื้นที่ทางออกต่อพื้นที่รับรังสีอาทิตย์เท่ากับ
ร้อยละ ๑๑ และกระจกฝาปิดเอียง ๑๔ องศา
(จะได้อัตราการอบแห้งประมาณ ๓.๒ กิโลกรัม/
ตารางเมตร-วัน (รูปที่ ๑๐) การอบแห้งกล้วย
ในตู้อบใช้เวลา ๓ วัน และได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ
ดีกว่าการตาก^[๓๑]

จากการทดสอบเครื่องอบแห้งด้วย
พลังงานรังสีอาทิตย์โดยการพาความร้อนตาม
ธรรมชาติแบบผสม^[๓๒] พบว่าอัตราการอบ
แห้งผ้าเปียกเท่ากับ ๕ กิโลกรัม/ตารางเมตร-
วัน (รูปที่ ๑๑) ประสิทธิภาพสูงสุดของการ
อบแห้งจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนของพื้นที่ทาง
ออกต่อพื้นที่ตัวรับรังสีเท่ากับร้อยละ ๐.๘ ได้
มีการทดลองการอบแห้งด้วยพลังงานรังสี
อาทิตย์ในสนามโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบเดียว
กับ [๓๑]^[๓๒] ผลผลิตที่นำมาอบแห้งคือ กล้วย

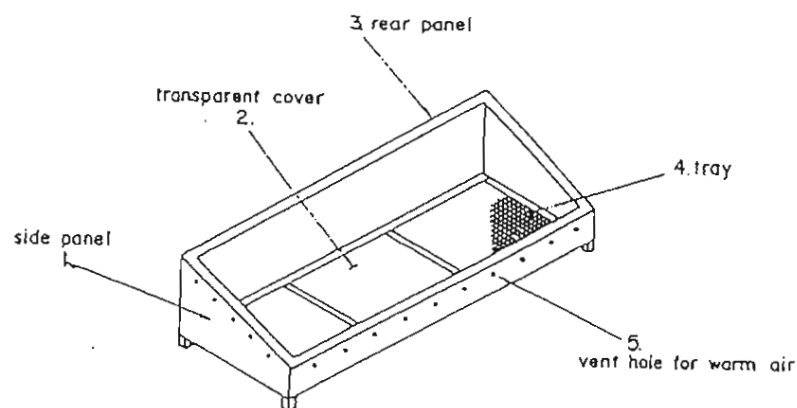


Fig. 10 Box dryer, Patranon (1984)

ปลา เนื้อ และเนื้อมะพร้าว และมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติแบบผสมราคาถูกซึ่งอบแห้งข้าวเปลือกได้อย่างดีในเวลา ๒-๓ วัน (รูปที่ ๑๒)^(๑๐)

การทดลองเปรียบเทียบการอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยรังสีอาทิตย์แบบการพาความร้อนตามธรรมชาติ (คล้ายเครื่องอบแห้งของ [๒๘]) และการพาความร้อนแบบบังคับ (คล้ายเครื่องอบแห้งของ [๒๑] แต่ผลิตผลไม่ได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรง) และการอบแห้งโดยใช้เชื้อเพลิง LPG แบบการพาความร้อนตามธรรมชาติที่

จังหวัดพิษณุโลก [๑๔] พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าร้อยละ ๑๑.๑, ๑๕.๘ และ ๓๐.๐ ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความคุ้มทุนพบว่ามีค่า ๓.๖, มากกว่า ๑๐ และ ๒ ปีตามลำดับ การอบแห้งโดยใช้เชื้อเพลิง LPG สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงใช้เวลาประมาณ ๔๕ ชั่วโมงต่อการอบ ๑ ครั้ง ส่วนการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์ใช้เวลา ๕ วันสำหรับการพาความร้อนแบบบังคับ และ ๖-๗ วันสำหรับการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ทำให้ระยะเวลาคุ้มทุนของเครื่องอบแห้งด้วยเชื้อเพลิง LPG สั้นกว่ามาก

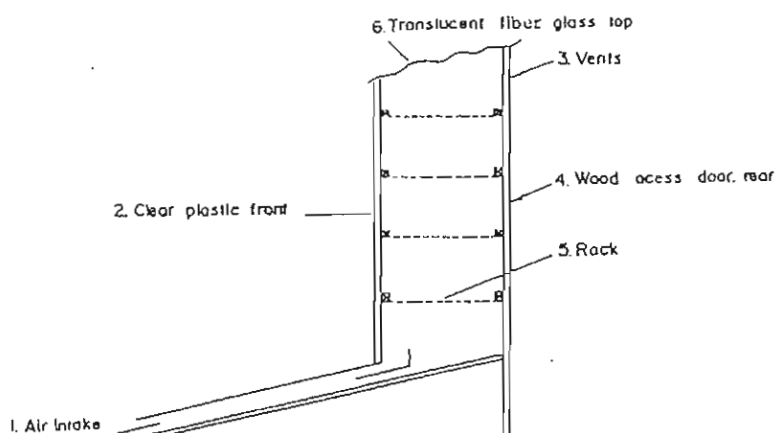


Fig. 11 Section view of the fruit and vegetable dryer, Pattnaik (1984)

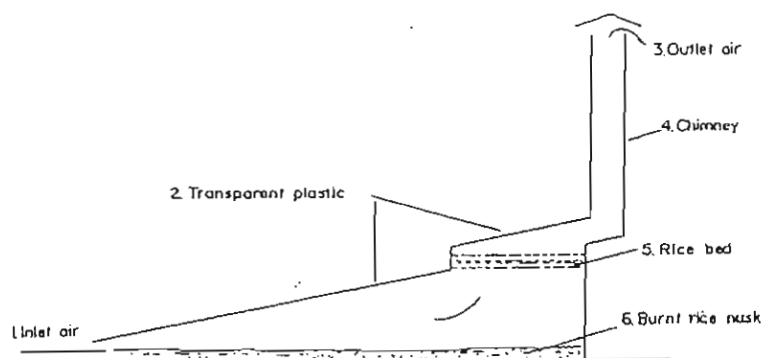


Fig. 12 ATT rice dryer, Pattnaik (1984)

งานพัฒนาและสาธิตเกี่ยวกับการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ภายใต้กรอบความร่วมมือของประเทศในกลุ่มอาเซียน

ได้มีการศึกษางานพัฒนาและสาธิตเกี่ยวกับการอบแห้งผลิตผลทางเกษตรด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์จำนวน ๕ โครงการในประเทศกลุ่มอาเซียน คือ ประเทศอินโดนีเซีย มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ และไทย งานวิจัยดังกล่าวประกอบด้วย เครื่องอบแห้งชาและเครื่องอบแห้งโกโก้ในประเทศอินโดนีเซีย เครื่องอบแห้งโกโก้ในมาเลเซีย เครื่องอบแห้งพืชมวนเวียนในประเทศฟิลิปปินส์ และเครื่องอบแห้งกล้วยและเครื่องอบแห้งผลไม้ในประเทศไทย รวมถึงการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์โดยตรงและโดยอ้อม ตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ประกอบด้วยตัวรับรังสีอาทิตย์แบบ front-pass และ back-pass พร้อมฝากระจก และตัวรับรังสีอาทิตย์แบบไม่มีกระจก โดยใช้แผ่นเหล็กเจาะรูเป็นตัวดูดกลืนรังสี^[๔] งานพัฒนาและสาธิตได้ดำเนินการแล้วเสร็จ และอยู่ในขั้นตอนของการพิสูจน์ว่าโครงการต่าง ๆ จะมีความยั่งยืนอย่างไร

อุปสรรคของการยอมรับการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์

ประเทศจีนเป็นประเทศหนึ่งที่มีการยอมรับการใช้เครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ในช่วงปี พ.ศ. ๒๕๑๘-๒๕๓๓ ได้มีการติดตั้งตัวรับรังสีอาทิตย์ที่มีพื้นที่รวม ๑๑,๘๐๐ ตารางเมตร^[๕] เครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์โดยตรงเป็นที่นิยมมากที่สุด เนื่อง

จากมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพสูง ได้มีการติดตั้งเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์โดยการพาความร้อนแบบบังคับแบบผสมซึ่งมีพื้นที่รับรังสี ๖๒๐ ตารางเมตร เพื่อใช้สำหรับการอบแห้งไส้กรอก^[๖] ในประเทศไทยการยอมรับการใช้เครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์นั้นมีจำกัดเฉพาะเกษตรกรบางกลุ่มในบางพื้นที่ จากข้อมูลของผู้เขียนพบว่ามีการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติสำหรับอบแห้งกล้วยในอำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก การยอมรับที่จะใช้เครื่องอบแห้งแบบนี้ เนื่องจากขายได้ราคาดีกว่ากล้วยที่อบแห้งในตู้อบ ได้มีการชี้แจงถึงเหตุผลที่ชาวนาในประเทศไทยไม่ยอมรับเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ^[๗] และในการประชุมการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ซึ่งจัดขึ้นที่สำนักงาน FAO กรุงเทพฯ ได้มีการชี้ให้เห็นถึงอุปสรรคที่ทำให้การใช้เครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ของเกษตรกรไม่เป็นที่แพร่หลาย คือ วัสดุต้นทุนสูง ไม่ทนทาน ใช้ไม่ถูกวิธี ใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้น้อย และยังคงงงใจไม่ได้ในช่วงหน้าฝน และเหตุผลด้านอื่น ๆ ที่ไม่ใช่เหตุผลทางด้านเทคนิค บัณฑิตของการออกแบบเพื่อให้ได้เครื่องอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมมีดังนี้^[๘]

๑. เครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ที่สามารถอบผลิตผลได้จำนวนเป็นตันนั้นดีกว่าเครื่องอบแห้งขนาดเล็กที่อบได้จำนวนเป็นกิโลกรัม

๒. เครื่องอบแห้งควรได้รับการออกแบบเพื่อให้ได้ประโยชน์การใช้งานสูงสุด คู่กับเงินลงทุน เช่น ควรจะอบแห้งผลิตผลและให้ใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย

๓. โดยทั่วไปควรมีแหล่งความร้อน
ง่าย เพื่อให้ความมั่นใจในการจัดการกับของ
ปริมาณมาก และเพื่อให้การอบแห้งเป็นไป
อย่างต่อเนื่องในกรณีที่ไม่มีแสงแดด การเก็บ
รักษาความร้อนด้วยชั้นหินนั้นได้ประโยชน์น้อย

๔. เครื่องอบแห้งโดยการพาความร้อน
แบบบังคับโดยอ้อมนั้นน่าใช้มากกว่า เนื่องจาก
ควบคุมง่ายกว่าการอบแห้งสม่ำเสมอ และมี
ประสิทธิภาพในการรวมความร้อนสูง แต่ควร
ใช้พลังงานประกอบด้านอื่น ๆ ให้น้อยที่สุด

๕. ควรมีการตรวจสอบความเป็นไป
ได้ของการติดตั้งระบบอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์
เข้ากับระบบเดิม

สรุป

การอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์
สำหรับผลิตผลทางการเกษตร เช่น ข้าวเปลือก
พืชหมุนเวียน และผลไม้ ได้รับการพิสูจน์

แล้วว่ามีความเหมาะสม แต่การยอมรับใน
กลุ่มเกษตรกรไทยยังจำกัด อุปสรรคที่สำคัญ
อาจมาจากระยะเวลาคู่ทุนที่ยาวนานและ
การลงทุนสูง

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อไป
งานวิจัยเกี่ยวกับตัวรับรังสีทำอากาศ
ร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์และเครื่องอบ
แห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ควรเน้นในเรื่อง
การลดต้นทุน และควรมีการพัฒนามาตรฐาน
การทดสอบของตัวรับรังสีทำอากาศร้อนด้วย
พลังงานรังสีอาทิตย์^๒

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอแสดงความขอบคุณต่อ
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การ
สนับสนุนโครงการกลุ่มวิจัยเทคโนโลยีการอบ
แห้งของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เอกสารอ้างอิง

1. Anon. Dehydration by a solar dryer. Science Journal 1979; 33(8) : 59-63
(in Thai).
2. Anon. Guidelines for research and development on thermal application of solar
energy. Report of the meeting of the Nonconventional Energy Coordination
Subcommittee, National Research Council, Bangkok, 1989.
3. Anon. Solar drying in ASEAN countries. RAPA Publication: 1986/27, FAO, Bangkok, 2-3.
4. Anon. ASEAN-Canada project on solar energy in drying processes. Proceedings
of the Workshop on Construction and Commissioning, Bundung, Indonesia,
1994.
5. Amyot J and Sirisambhand N. Social and economic factors in the process of
technology transfer. Social Research Institute, Chulalongkorn University,
Bangkok, 1981.

6. Assayo M. Performance evaluation of a solar banana dryer and development of a mathematical model. Master's thesis, School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok, 1991 (in Thai).
7. Biondi P, Licala L and Farina G. Performance analysis of solar air heaters of conventional design. *Solar Energy* 1988; 41(1) :101-107.
8. Boonlong P et al. Solar-assisted tobacco curing. Paper presented at the Regional Seminar on Solar Drying, Yogyakarta, Indonesia, 1984.
9. Duffie J A and Beckman W A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley and Sons, New York, 1980.
10. Exell R H B. Basic design theory for a simple solar rice dryer. *Renewable Energy Review Journal* 1980; 1(2) :1-14.
11. Foster G H and Peart R M. Solar grain drying : progress and potential. *Agri. Information Bulletin* No. 401, U.S.D.A., 1976.
12. Huang F , Zongnan Li and Lidun Li. Review of decadal solar drying in China. 1st World Renewable Energy Congress, 1990.
13. Liu S, Lidun Li, Ying Wu and Jianming Huang. The largest scale solar dryer in China. Paper presented at the Congress of the International Solar Energy Society, 1989.
14. Nathakaranakule S, Nathakaranakule A, Soponronnarit S and Limtrakool W. A comparative study of various methods of banana drying. *Proc. 34 Annual Conference of the Australian and New Zealand Solar Energy Society*, Darwin, Australia, 23-25 Oct., 1996.
15. Ong K S. State-of art report on solar drying in ASEAN countries. RAPA Publication: 1986/27, FAO, Bangkok.
16. Patrañon R. Solar thermal processes in Thailand : A study on natural convection cabinet drying, final report. USAID-Thai Renewable Non - Conventional Energy Cooperation Project, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok, 1984.
17. Schirmer P, Janjai S, Espu A, Smitabhindu R and Muhlbauer W. Experimental investigation of the performance of the solar tunnel dryer for drying bananas. *Renewable Energy* 1996; 7(2) : 119-129.
18. Sitthipong N, et al. Large-scale solar-assisted multiple-crop dryers. Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 1987.
19. Soponronnarit S. Review of research and development work on forced convection solar drying in Thailand. *RERIC International Energy Journal* 1988; 10(1) : 19-27.

20. Soponronnarit S and Peyre A.. Low temperature sorghum drying in the south of France. Proceedings of the 3rd International Drying Symposium, Volume 1, (Ed) J.C. Ashworth, Birmingham, 1982.
21. Soponronnarit S Assayo M and Rakwichien W. Performance evaluation of a solar banana dryer. RERIC International Energy Journal 1991; 13(2): 71-79.
22. Soponronnarit S, Dussadee N, Hirunlabh L, Namprakai R and Thepa M. Computer simulation of solar assisted fruit cabinet dryer. RERIC International Energy Journal 1992 ; 14(1) : 59-70.
23. Soponronnarit S, Rakwichien W, Sukchai S and Assayo M. Performance of a solar dryer for peeled bananas. Proceedings of International Workshop on Energy Perspectives in Plantation Industry, Coonor, Nilgiris, South India, 1993.
24. Soponronnarit S, Subannapong W and Tiansuwan J. Studies of bare and glass-cover flatplate solar air heaters. RERIC International Energy Journal 1990; 12(1) :1-19.
25. Soponronnarit S, Watabutr W, Therdyothin A. and Kunjara B. A drying- storage solar hut : The technical aspect. Renewable Energy Review Journal 1986; 8(1) :49-60.
26. Soponronnarit S, Watabutr W, Therdyothin A. and Kunjara B. Feasibility study of solar paddy drying. Final report submitted to National Energy Administration of Thailand, Bangkok, 1985 (in Thai).
27. Thongprasert S, Thongprasert M, Boonyavanichkul S and Mahittafongkul. An economic study on solar rice dryer. Report submitted to National Energy Administration of Thailand, Bangkok, 1985 (in Thai).
28. Watabutr W. Performance testing of a solar cabinet dryer. Master's thesis in Energy Technology Program, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok, 1981 (in Thai).
29. Wibulswas P. Recent developments on solar drying inThailand. Paper presented at the Regional Seminar on Solar Drying, Yogyakarta, Indonesia, 1984.
30. Wibulswas P, Opaskiatkul S and Hanpadungthum S. Performance of a solar cabinet dryer. Proceedings Renewable Energy and Application, Thai-Japanese Association of Technology Promotion, Bangkok, 1977.
31. Wibulswas P and Thaina S. Comparative performance of cabinet dryers with separate air heaters. Paper presented at the Workshop on Fuel and Power for Rural Communities in the Third World, CEGET, Domaine Universitaire de Bordeaux-Talence, France, 1980.

การอบแห้งมะละกอแช่เย็นโดยใช้ฮีตปั๊ม*

สมชาติ โสภณธนฤทธิ์**

ประธาน รักปรางค์

อดิศักดิ์ นาดกรณกุล และ สมบูรณ์ เวชกามา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการอบแห้งผลไม้โดยใช้ฮีตปั๊ม โดยทำการออกแบบ สร้าง ประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง และวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย เครื่องอบแห้งประกอบด้วยตู้อบแห้ง ซึ่งบรรจุผลิตภัณฑ์ได้จำนวน ๑๒ ถาด (น้ำหนักผลิตภัณฑ์ ๑๐๐-๑๓๒ กิโลกรัม) และฮีตปั๊มขนาด ๑ ตันความเย็น ทดลองอบแห้งมะละกอแช่เย็นแบบระบบปิด อุณหภูมิอบแห้ง ๕๐ องศาเซลเซียส อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ๐.๔๕ กิโลกรัมต่อวินาที สัดส่วนลมเลี้ยง (by pass air) ร้อยละ ๖๓ แบ่งการอบแห้งออกเป็น ๒ ช่วง คือ ช่วงแรก อบแห้งมะละกอชิ้นใหญ่ขนาด ๖.๓๕ x ๑.๕ x ๒.๕๕ ลูกบาศก์เซนติเมตร ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๗๔ ของมาตรฐานแห้ง และ ช่วงที่สอง นำมะละกอแช่เย็นอบแห้งจากช่วงแรกมาลดขนาดลงเป็น ๐.๔๘ x ๐.๔๘ x ๐.๔๘ ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วนำไปอบแห้งต่อให้เหลือความชื้นสุดท้ายร้อยละ ๒๓ ของมาตรฐานแห้ง จากการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งสามารถทำได้ถึง ๐.๖๔๖ กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อชั่วโมง อัตราการควบแน่นของน้ำจากเครื่องระเหยสามารถทำได้ถึง ๐.๗๘ กิโลกรัมน้ำควบแน่นต่อชั่วโมง เวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้ง ๒ ช่วงรวมกันประมาณ ๘๐ ชั่วโมง (ใช้เวลาช่วงละ ๔๐ ชั่วโมง) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบเท่ากับ ๔.๙๓ เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย หรือ specific moisture extraction rate (SMER) เท่ากับ ๐.๓๖๓ กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ ๒๑.๔๒ กิโลกรัมอากาศแห้งต่อชั่วโมง-กิโลกรัม มะละกอแห้ง สัมประสิทธิ์สมรรถนะฮีตปั๊ม (coefficient of performance for heat pump-COP_{hp}) มีค่าระหว่าง ๓.๗๑-๓.๘๕ คุณภาพของมะละกอแช่เย็นอบแห้งที่ได้จากการอบแห้งทั้ง ๒ ช่วง พบว่ามีสีส้มปนแดงค่อนข้างอ่อน (code ๓๔-C ตามมาตรฐานเทียบสีของ R.H.S colour chart)

จากการประเมินค่าใช้จ่ายในการอบแห้งมะละกอแช่เย็น พบว่าเท่ากับ ๑๒.๔ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย โดยแยกเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่ากับ ๕.๓ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย ค่าใช้จ่ายด้านการบำรุงรักษาเท่ากับ ๑.๔ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งเท่ากับ ๖.๑ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย

* บรรยายในการประชุมสำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน เมื่อวันที่ ๖ สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๔๐

** ภาควิชาชีว วิทยาศาสตร์ประยุกต์ สำนักวิทยาศาสตร์; ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ABSTRACT : PAPAYA GLACÉ DRYING USING HEAT PUMP*

Somchart Soponronnarit**, Prathan Rukprang,
Adisak Nathakaranakule and Somboon Wetchacama

* Paper Presented at the Royal Institute, Bangkok, August 6, 1997.

** Associate Fellow of the Royal Institute; Professor, School of Energy and Materials,
King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok.

The purposes of this research are to design, construct, evaluate performance and conduct cost analysis of heat pump fruit dryer. The dryer consists of cabinet dryer and heat pump. Product capacity of the cabinet is 100-132 kg with 12 trays and the capacity of the heat pump is 1 ton refrigeration. In this experiment, papaya glacé already is dried in close-loop air with drying temperature 50°C, air flow rate 0.45 kg/s and by pass air 63 %. Drying operation is divided into 2 steps. In the first step, papaya glacé with dimension $6.35 \times 15 \times 2.5 \text{ cm}^3$ and initial moisture content 74 % db. is dried. In the second step, papaya glacé already dried in the first step is cut into $0.98 \times 0.98 \times 0.98 \text{ cm}^3$ and dried to final moisture content 23 % db. The results are as follows: drying rate 0.686 kg water/h, moisture extraction rate from evaporator 0.78 kg water/h, drying time of two steps is approximately 80 h (40 h in each step). Energy consumption is 9.93 MJ/kW-h or SMER (Specific moisture extraction rate) is 0.363 kg water evap./kW-h at specific air flow rate 21.42 kg dry air/h-kg dry papaya glacé. The coefficient of performance of heat pump (COP_{hp}) varies between 3.71-3.85. For the quality of papaya glacé after drying in terms of color, it is found that color of papaya glacé is light orange-red (code 34-C from R.H.S colour chart).

For cost evaluation from this experiment, it is found that the cost of papaya glacé drying is 12.8 bath/kg water evap. of which 5.3 is energy cost, 1.4 is maintenance cost and 6.1 is fixed cost.

คำนำ

ผลไม้แห้งเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตรชนิดหนึ่งซึ่งตลาดทั้งภายในและภายนอกประเทศมีความต้องการสูง การอบแห้งเป็นกระบวนการผลิตขั้นต้นหนึ่งที่มีความสำคัญและเสียค่าใช้จ่ายสูง เครื่องอบแห้งแบบตู้เป็นเครื่องอบแห้งแบบหนึ่งซึ่งมีความเหมาะสมในการอบแห้งผลไม้ โดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิลมร้อนประมาณ ๖๐-๗๐ องศาเซล-

เซียส ถ้าใช้อุณหภูมิลมสูงกว่านี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีเข้ม ไม่สวย ผิวเหี่ยวยุบ พลังงานที่ใช้อุ่นอากาศในเครื่องอบแห้งขนาดเล็กมักได้จากไฟฟ้าและแก๊สแอลพีจี ส่วนพลังงานรังสีอาทิตย์ ใช้ในการอุ่นอากาศได้เช่นกัน แต่เนื่องจากพลังงานรังสีอาทิตย์มีข้อจำกัดด้านความไม่แน่นอนจึงมักใช้เป็นพลังงานเสริมเท่านั้น งานวิจัยนี้เสนอทางเลือกการใช้ความร้อนจากระบบฮีตปั๊ม การอบแห้งผลไม้โดยใช้

ฮีตปั๊มสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศที่ได้จากฮีตปั๊มไม่สูงมากนัก อีกทั้งความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไต่อบแห้งค่อนข้างต่ำ และเป็นการอบแห้งแบบระบบปิด ดังนั้น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้านสีและกลิ่นจึงไม่เปลี่ยนแปลง และอยู่ในเกณฑ์ดีเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

ปิยรัตน์ หนูสุก และคณะ^[๑] ได้ศึกษาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มในอุโมงค์ โดยแบ่งการอบแห้งเป็น ๒ ช่วง ช่วงแรกอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม ขนาด $๓.๑ \times ๗.๘ \times ๑.๕$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๖๐ ของมาตรฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้ง ๗๐ องศาเซลเซียส อบแห้งให้เหลือความชื้นร้อยละ ๓๘ ของมาตรฐานแห้ง และช่วงที่ ๒ นำมะละกอจากช่วงแรกมาลดขนาดลงเป็น $๐.๘๘ \times ๐.๘๘ \times ๐.๘๘$ ลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิอบแห้ง ๕๕ องศาเซลเซียส อบแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้ายร้อยละ ๒๓ ของมาตรฐานแห้ง จากการทดลองพบว่า มะละกอแช่อิ่มชิ้นใหญ่สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งสูงกว่ามะละกอแช่อิ่มชิ้นเล็ก คุณภาพมะละกอแช่อิ่มหลังอบแห้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานด้านความปลอดภัยและมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้ง

Chou et al.^[๒] ศึกษาการอบแห้งผลไม้โดยใช้ฮีตปั๊มซึ่งใช้เครื่องปรับอากาศแบบหน้าต่างขนาด ๑ ตัน พร้อมทั้งติดตั้งขดลวดความร้อน ทดลองอบแห้งกล้วยและสับปะรดในตู้อบแห้งแบบถาดอยู่กับที่ หั่นกล้วยและสับปะรดให้มีความหนาขึ้นละ ๑๐ เซนติเมตร ใช้เวลาอบแห้ง ๖ ชั่วโมง โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้

- ๑) อบแห้งผลไม้แบบระบบเปิด อุณหภูมิ ๖๑ องศาเซลเซียส
- ๒) อบแห้งผลไม้แบบระบบปิด

อุณหภูมิ ๕๕ องศาเซลเซียส

จากการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งผลไม้แบบระบบปิดสูงกว่าแบบระบบเปิด Clements et al.^[๓] ศึกษาการอบแห้งแบบสายพานต่อเนื่องโดยใช้ฮีตปั๊ม เครื่องมีกำลังการผลิตยางอบแห้ง ๒๐ กิโลกรัมต่อชั่วโมง ใช้สารทำความเย็น R-๑๒ อุณหภูมิอบแห้งสูงสุด ๗๐ องศาเซลเซียส พบว่า SMER มีค่าอยู่ระหว่าง ๑.๕-๒.๕ กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบคือ

- ๑) ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศผ่านเข้าเครื่องระเหยมีค่าสูง ค่า COP ก็เพิ่มขึ้นด้วย

- ๒) สัดส่วนลมเลี้ยงที่เหมาะสมมีค่าร้อยละ ๖๐-๗๐ ของอัตราการไหลรวมของอากาศ

Pendyala et al.^[๔] ศึกษาการอบแห้งโดยใช้ฮีตปั๊ม และใช้สารทำความเย็น R-๑๑ และ R-๑๒ ถ้าอบแห้งด้วยอุณหภูมิ ๑๒๐ องศาเซลเซียส ใช้ R-๑๑ ถ้าอบแห้งด้วยอุณหภูมิ ๗๕ องศาเซลเซียส ใช้ R-๑๒ จากการทดลองพบว่า ค่า COP ของ R-๑๑ เท่ากับ ๓.๕ ค่า COP ของ R-๑๒ เท่ากับ ๒.๕ ค่า COP จะต่ำลงเมื่อเปิดขดลวดความร้อน Rossi et al.^[๕] ศึกษาการอบแห้งผักโดยใช้ฮีตปั๊มอบแห้งผักแบบถาดอยู่กับที่ ใช้สารทำความเย็น R-๒๒ ตู้อบแห้งบรรจุผักจำนวน ๑.๓ กิโลกรัม อุณหภูมิอากาศร้อนในห้องอบแห้ง ๕๕ องศาเซลเซียส อบแห้งแบบระบบเปิด จากการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งโดยใช้ฮีตปั๊มคือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าเครื่องระเหย และอุณหภูมิของเครื่องระเหย และพบว่าเครื่องอบแห้งที่ใช้ฮีตปั๊มประหยัดพลังงานได้ร้อยละ

๓๐-๔๐ ผลิตรถยนต์ที่ผ่านการอบแห้งมีคุณภาพดี เวลาที่ใช้ในการอบแห้งต่ำ Young et al.^[๖] ศึกษาการอบแห้งโดยใช้ฮีตปั๊มแบบถาดอยู่กับที่ บรรจุมันได้จำนวน ๖๐-๑๐๐ กิโลกรัม ปริมาณน้ำที่ควบแน่นออกจากเครื่องระเหยสูงสุดเท่ากับ ๘ ลิตรต่อชั่วโมง ระบบประกอบด้วยเครื่องอัดไอขนาด ๑.๓ กิโลวัตต์ เครื่องควบแน่นจำนวน ๒ ตัว และเครื่องระเหยจำนวน ๒ ตัว พร้อมทั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอากาศกับอากาศ (recuperator) จากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิและความเร็วของอากาศร้อนในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น เวลาในการอบแห้งจะต่ำลง และเมื่อเพิ่มขนาดวัสดุจะทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นด้วย

Strommen and Kraner^[๗] ศึกษาการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้ฮีตปั๊ม วัสดุที่อบแห้งได้แก่ กุ้งฝอย และปลาป่น เงื่อนไขการทดลองแบ่งเป็น ๒ ช่วง คือ ช่วงแรกอบแห้งด้วยอุณหภูมิ -๕ องศาเซลเซียส และช่วงที่ ๒ อบแห้งด้วยอุณหภูมิ ๒๐ องศาเซลเซียส และ ๓๐ องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าคุณภาพของวัสดุหลังการอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงและสูญเสียมวลน้อยมาก และจากการเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบอื่น ๆ พบว่าการอบแห้งโดยใช้ฮีตปั๊มใช้พลังงานต่ำกว่า

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาการอบแห้งโดยใช้ฮีตปั๊มมี ๓ แบบ คือ การอบแห้งแบบถาดอยู่กับที่ แบบต่อเนื่อง และแบบฟลูอิดไรซ์เบด ระบบอากาศมี ๒ แบบ คือ ระบบปิด (อากาศหมุนเวียนในระบบ) และระบบเปิด (อากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะถูกทิ้งไป) อุณหภูมิในห้องอบแห้งขึ้นอยู่กับสารทำความเย็น ถ้าต้องการให้อุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงขึ้นทำได้โดยเพิ่มชุดขดลวดความร้อนเข้าไป

ในระบบ แต่มีผลเสียคือค่า COP ของระบบจะลดลง การเพิ่มสมรรถนะของระบบอบแห้งโดยใช้ฮีตปั๊มทำได้โดยการแบ่งอัตราส่วนของอากาศที่เข้าเครื่องระเหยและสัดส่วนลมเลี้ยงที่เหมาะสม และเพิ่มเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอากาศกับอากาศ เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งและอากาศเย็นที่ออกจากเครื่องระเหย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งผลไม้โดยใช้ฮีตปั๊ม

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งผลไม้โดยใช้ฮีตปั๊มในงานวิจัยนี้เป็นแบบระบบปิด (close loop system) ดังแสดงในรูปที่ ๑ มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

ตู้อบแห้งขนาดปริมาตรภายใน ๐.๘๐ × ๐.๘๐ × ๐.๗๕ ลูกบาศก์เมตร

ถาดอบแห้งขนาดพื้นที่ ๐.๖๓ × ๐.๗๒ ตารางเซนติเมตร จำนวน ๑๒ ถาด

เครื่องอัดไอแบบสองลูกสูบขนาด ๑.๓ กิโลวัตต์

เครื่องควบแน่นตัวใน (internal condenser) และเครื่องควบแน่นตัวนอก (external condenser) ขนาด ๔.๕ กิโลวัตต์ จำนวน ๔ × ๑๓ แถว มีครีป (fins) จำนวน ๑๔ ครีปต่อนิ้ว

เครื่องระเหยขนาด ๓.๖๖ กิโลวัตต์ จำนวน ๓ × ๘ แถว มีครีปจำนวน ๑๔ ครีปต่อนิ้ว

วาล์วลดความดันชนิดหลอดรูเล็ก (capillary tube) ขนาด ๑๐๐ × ๐.๑๖๔ เซนติเมตร จำนวน ๒ วงจร

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอากาศกับอากาศ อัตราการไหลเชิงมวลของ

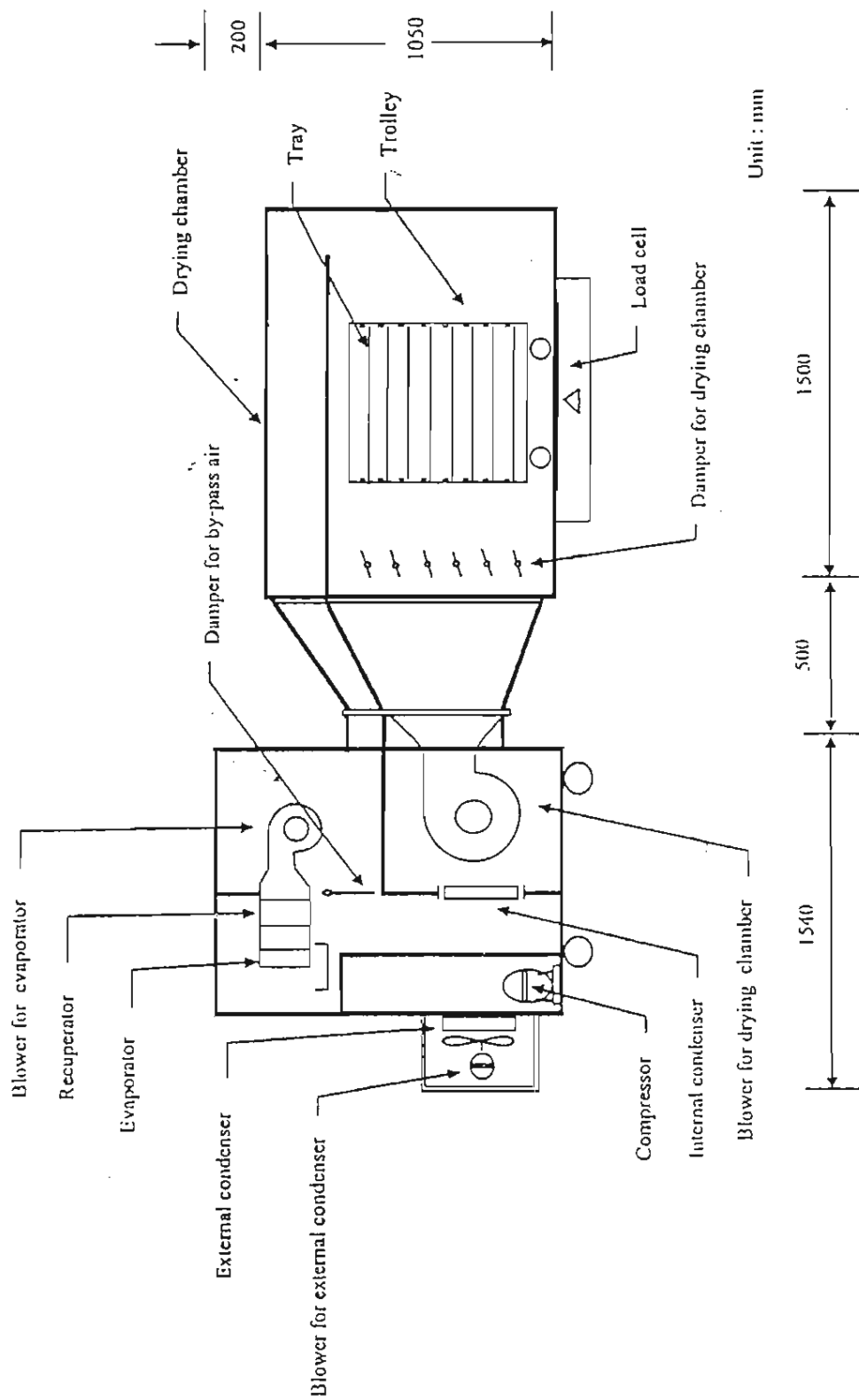


Figure 1 Heat pump fruit dryer

อากาศ ๐.๑๔ กิโลกรัมต่อวินาที ความแตกต่างอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและขาออกเท่ากับ ๖ องศาเซลเซียส

ขดลวดความร้อน ขนาด ๓ กิโลวัตต์

พัดลมแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหน้า อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ๐.๔-๐.๘ กิโลกรัมต่อวินาที ขนาดมอเตอร์ขับ ๐.๗๕ กิโลวัตต์ สามารถปรับความเร็วรอบได้

พัดลมสำหรับเครื่องควบแน่นตัวนอก เป็นแบบใบพัดไหลตามแกน อัตราการไหลของอากาศ ๐.๑๔ กิโลกรัมต่อวินาที ขนาดมอเตอร์ขับ ๕๐ วัตต์

พัดลมสำหรับเครื่องระเหยเป็นแบบใบพัดโค้งหน้า อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ๐.๑๔ กิโลกรัมต่อวินาที ขนาดมอเตอร์ขับ ๕๐ วัตต์

งานวิจัยนี้ใช้มะละกอแช่อิ่ม (ซึ่งมีกระบวนการผลิตตามโรงงานหลวงอาหารสำเร็จรูปที่ ๔) เป็นผลไม้สำหรับทดลอง โดยนำมะละกอแช่อิ่มวางเรียงในถาดอบแห้งที่วางอยู่ในรถเข็น การอบแห้งนี้เป็นการอบแห้งแบบเป็นงวด ทดลอง ๓ ครั้ง โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองดังนี้

๑) อบแห้งแบบระบบปิด

๒) ควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งให้เท่ากับ ๕๐ องศาเซลเซียส

๓) อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศคงที่เท่ากับ ๐.๔๕ กิโลกรัมต่อวินาที และสัดส่วนลมแห้งร้อยละ ๖๓ (อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศไหลผ่านเครื่องระเหย ๐.๑๗ กิโลกรัมต่อวินาที)

๔) เปลี่ยนปริมาณมะละกอแช่อิ่มอบแห้งจำนวน ๗๐-๑๓๒ กิโลกรัม การทดลองแบ่งการอบแห้งออกเป็น ๒ ช่วงคือ ช่วงแรกอบแห้งมะละกอชิ้นใหญ่ขนาด ๖.๓๕ × ๑๕ ×

๒.๕๔ ลูกบาศก์เซนติเมตร ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๗๕ ของมาตรฐานแห้ง (การทดลองที่ ๑/๑, ๒/๑ และ ๓/๑) และอบแห้งช่วงที่ ๒ นำมะละกออบแห้งจากช่วงแรกมาลดขนาดลงเป็น ๐.๘๘ × ๐.๘๘ × ๐.๘๘ ลูกบาศก์เซนติเมตร นำไปอบแห้งต่อไปจนเหลือความชื้นสุดท้ายร้อยละ ๒๓ ของมาตรฐานแห้ง (การทดลองที่ ๑/๒, ๒/๒ และ ๓/๒) ทำการวัดความเร็วของอากาศที่ท่ออากาศเวียนกลับ โดยใช้มาตรความเร็วลมแบบลวดร้อน (hot wire anemometer) วัดอุณหภูมิของวงจรอากาศตามตำแหน่งดังรูปที่ ๒ วัดอุณหภูมิของสารทำความเย็นตามตำแหน่งดังรูปที่ ๓ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ชนิด Chromel-Alumel type k ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) (วัดได้ละเอียด ± ๑ องศาเซลเซียส) สำหรับวงจรสารทำความเย็นเจาะฝังหัวเทอร์โมคัปเปิลในท่อ ทำการวัดความดันในวงจรสารทำความเย็นโดยใช้บูตดองเกจ ซึ่งน้ำหนักวัสดุในตู้อบแห้งโดยใช้เครื่องชั่งโหลดเซลล์ (load cell) ที่อ่านค่าความละเอียดได้ ๕๐ กรัม จำนวน ๑ ตัว รับน้ำหนักได้สูงสุด ๑๕๐ กิโลกรัม ซึ่งน้ำหนักน้ำที่ควบแน่นออกจากเครื่องระเหยโดยใช้เครื่องชั่งโหลดเซลล์ที่อ่านค่าความละเอียดได้ ๐.๐๑ กรัม จำนวน ๑ ตัว รับน้ำหนัก ได้สูงสุด ๓ กิโลกรัม วัดพลังงานที่ใช้ในระบบด้วยมาตรกิโลวัตต์ชั่วโมงและเครื่อง clip-on meter บันทึกผลอุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียก มวลมะละกอแช่อิ่ม มวลของน้ำที่ควบแน่นจากอากาศชื้นที่เครื่องระเหย และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานทุก ๆ ๒ ชั่วโมงตลอดการทดลอง สำหรับการหาความชื้นเริ่มต้นของมะละกอแช่อิ่มทำโดยเก็บตัวอย่างมาหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ซึ่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิทัล (อ่านค่าความละเอียดได้

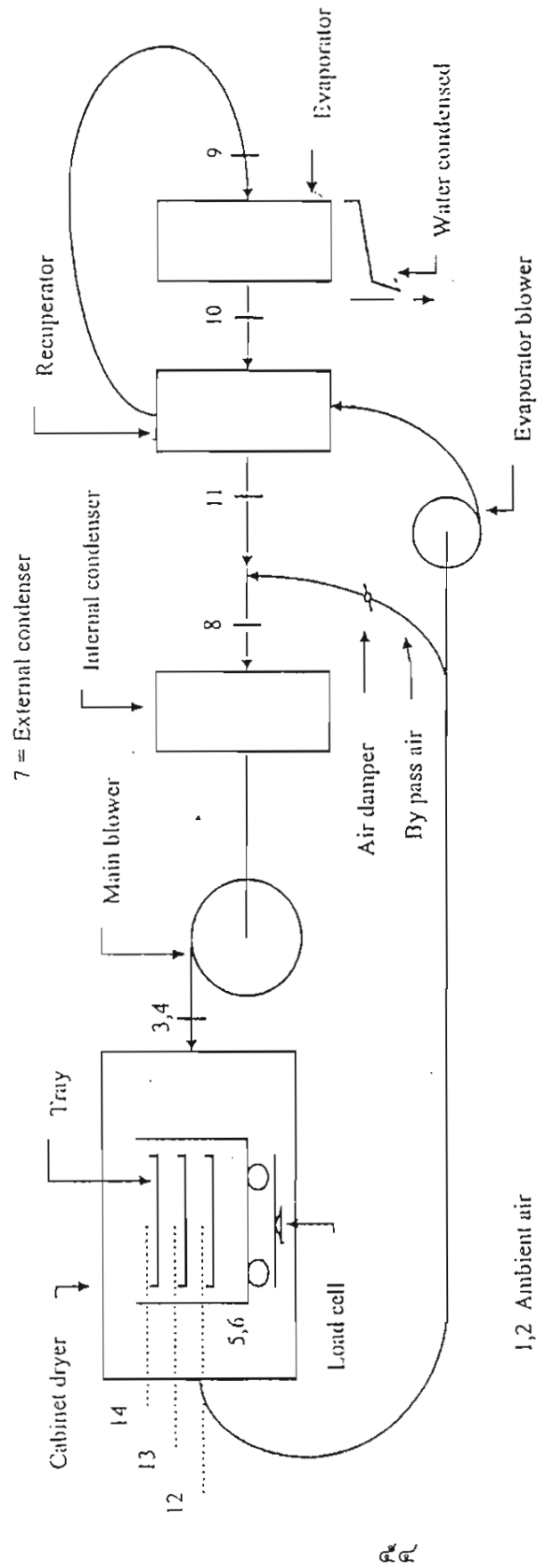


Figure 2 Temperature measurement for air loop

1 =	ambient, dry bulb	5 =	after drying, dry bulb	9 =	inlet of evaporator	13 =	sixth tray
2 =	ambient, wet bulb	6 =	after drying, wet bulb	10 =	outlet of evaporator	14 =	twelfth tray
3 =	before drying, dry bulb	7 =	outlet of external condenser	11 =	outlet of recuperator		
4 =	before drying, wet bulb	8 =	inlet of internal condenser	12 =	first tray		

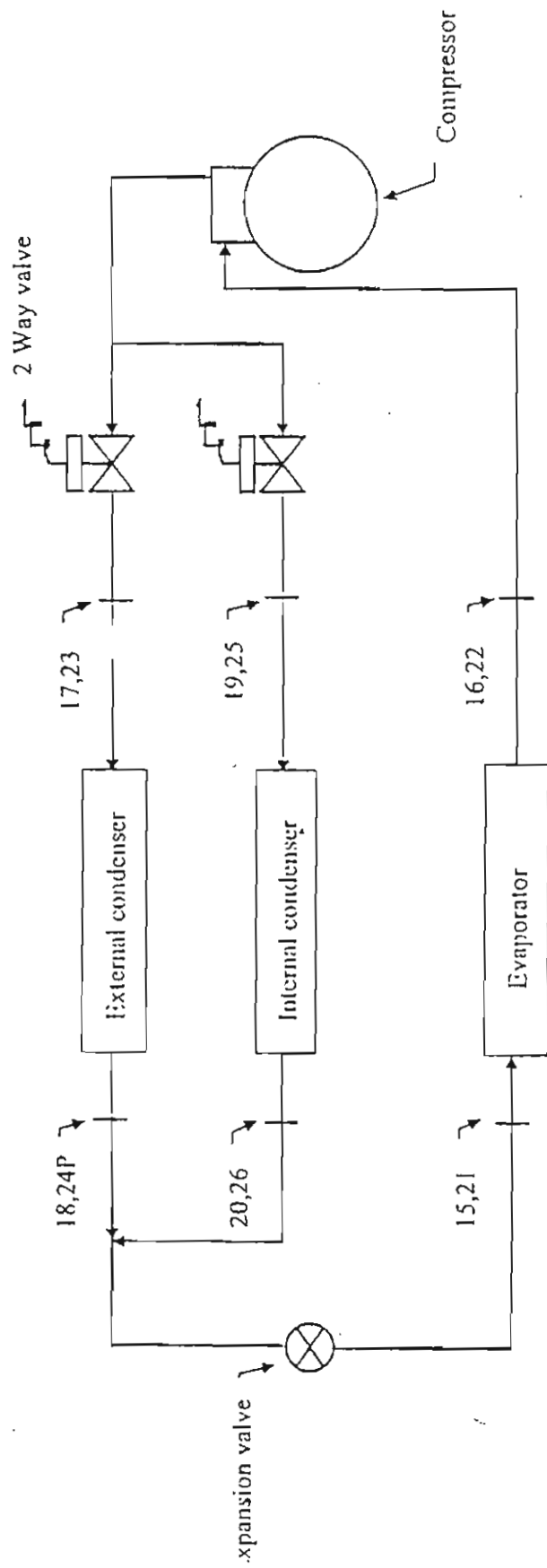


Figure 3 Temperature and pressure measurements for refrigerant loop

For temperature

- 15,16 = inlet and outlet of evaporator
- 17,18 = inlet and outlet of external condenser
- 19,20 = inlet and outlet of internal condenser

For pressure

- 21,22 = inlet and outlet of evaporator
- 23,24 = inlet and outlet of external condenser
- 25,26 = inlet and outlet of internal condenser

๐.๐๑ กรัม) แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ ๑๐๓ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๗ ชั่วโมง นอกจากนี้ ได้ศึกษาถึงคุณภาพของมะละกอแช่อิ่มหลัง อบแห้งด้วยการตรวจสอบสี โดยใช้ R.H:S colour chart

ผลและวิจารณ์

๑. ผลการทดลองอบแห้งมะละกอ แช่อิ่มโดยใช้ฮีตปั๊ม

๑.๑ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของอากาศตามจุดต่าง ๆ

จากการทดลองวัดและเก็บ ข้อมูลอุณหภูมิตามจุดต่าง ๆ ของวงจรอากาศ แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างอุณหภูมิของอากาศกับเวลาที่ใช้อบแห้ง พบว่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของ อากาศขาเข้าและออกจากเครื่องควบแน่นตัว ในเท่ากับ ๑๐ องศาเซลเซียส ความแตกต่าง

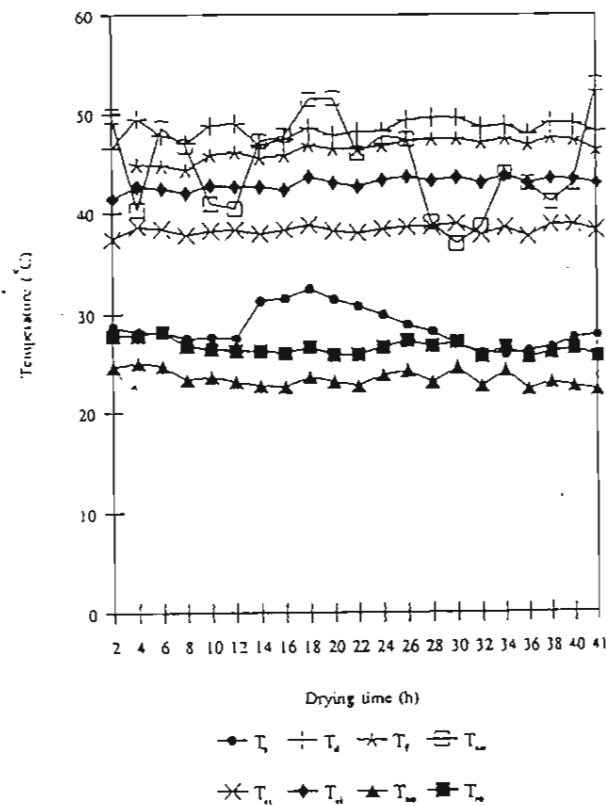


Figure 4 Evolution of temperatures in air loop for the 2nd test, 1st stage

T_a	=	ambient temperature
T_i	=	temperature after drying
T_d	=	temperature before drying
T_{co}	=	outlet temperature at external condenser
T_{ia}	=	inlet temperature at internal condenser
T_e	=	inlet temperature at evaporator
T_{eo}	=	outlet temperature at evaporator
T_{ro}	=	outlet temperature at recuperator

ระหว่างอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องระเหยเท่ากับ ๒๐ องศาเซลเซียส ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอากาศกับอากาศอยู่ระหว่าง ๓-๔ องศาเซลเซียส และความแตกต่างของอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและออกจากห้องอบแห้งอยู่ระหว่าง ๑-๕ องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ ๔-๕ อุณหภูมิของอากาศขาออกจากเครื่อง

ควบแน่นตัวนอกมีลักษณะกราฟกระโดดขึ้น ๆ ลง ๆ เนื่องจากถ้าอุณหภูมิในห้องอบแห้งได้ค่าตามที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมอุณหภูมิก็จะสั่งวาล์วโซลินอยด์ (solenoid valve) ตัวนอกให้ทำงาน ซึ่งเป็นผลทำให้อุณหภูมิของอากาศขาออกจากเครื่องควบแน่นตัวนอกสูงขึ้น และถ้าอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมอุณหภูมิก็จะสั่งวาล์วโซลินอยด์ตัวนอกให้หยุดทำงาน อุณหภูมิของอากาศขาออกจาก

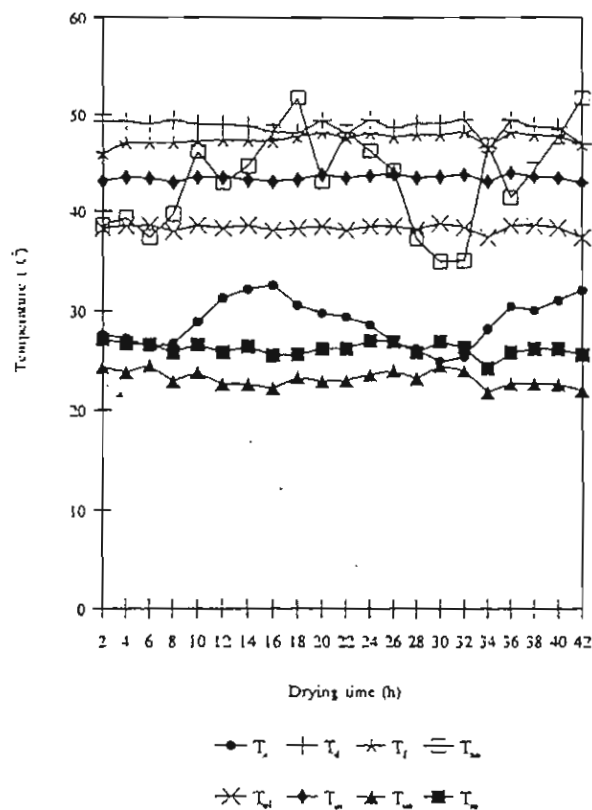


Figure 5 Evolution of temperatures in air loop for the 2nd test, 2nd stage

- T_a = ambient temperature
- T_d = temperature after drying
- T_f = temperature before drying
- T_{so} = outlet temperature at external condenser
- T_{ci} = inlet temperature at internal condenser
- T_{ce} = inlet temperature at evaporator
- T_{ev} = outlet temperature at evaporator
- T_{re} = outlet temperature at recuperator

เครื่องควบแน่นตัวนอกก็จะลดลง ส่วน
ลักษณะการกระจายอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง
บนรถเข็นพบว่าอุณหภูมิในถาดชั้นล่าง ชั้น
กลาง และชั้นบนของรถเข็นมีความแตกต่าง
กันน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ ๘-๙ โดยที่

อุณหภูมิในถาดชั้นบนสูงกว่าถาดชั้นล่าง

๑.๒ การเปลี่ยนแปลงความ ชื้นของมะละกอแช่อิ่ม

จากการทดลอง สามารถ
ทราบความชื้นที่เปลี่ยนแปลงจากการอ่านค่า

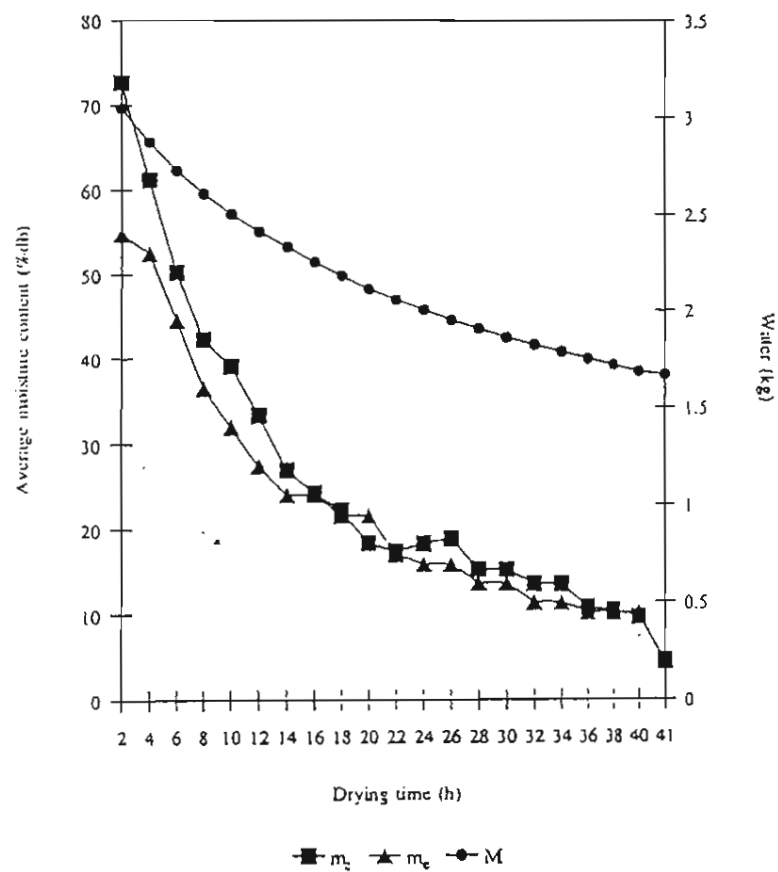


Figure 6 Evolution of average moisture content of papaya glacé, water condensed at evaporator and water evaporated from papaya glacé for the 2nd test, 1st stage

- m_e = water condensed at evaporator
- m_c = water evaporated from papaya glacé
- M = average moisture content of papaya glacé

น้ำหนักของมะละกอแช่จากเครื่องซึ่งโหลด-
เซลล์และจากการเก็บข้อมูลปริมาณน้ำที่ควบ
แน่นจากเครื่องระเหย แล้วนำมาเขียนกราฟ
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเฉลี่ยของ
มะละกอแช่ อัตราการระเหยของน้ำ (drying
rate) จากมะละกอแช่ และอัตราการควบ

แน่นของน้ำ (moisture extraction rate, MER)
จากเครื่องระเหย กับเวลาที่ใช้อบแห้ง พบว่า
MER มีค่าสูงกว่าอัตราการอบแห้ง ดังแสดงไว้
ในรูปที่ ๖-๗ สันนิษฐานว่าสาเหตุมาจากความ
ชื้นจากสิ่งแวดล้อมสามารถแทรกเข้าไปภายใน
ระบบอบแห้งได้

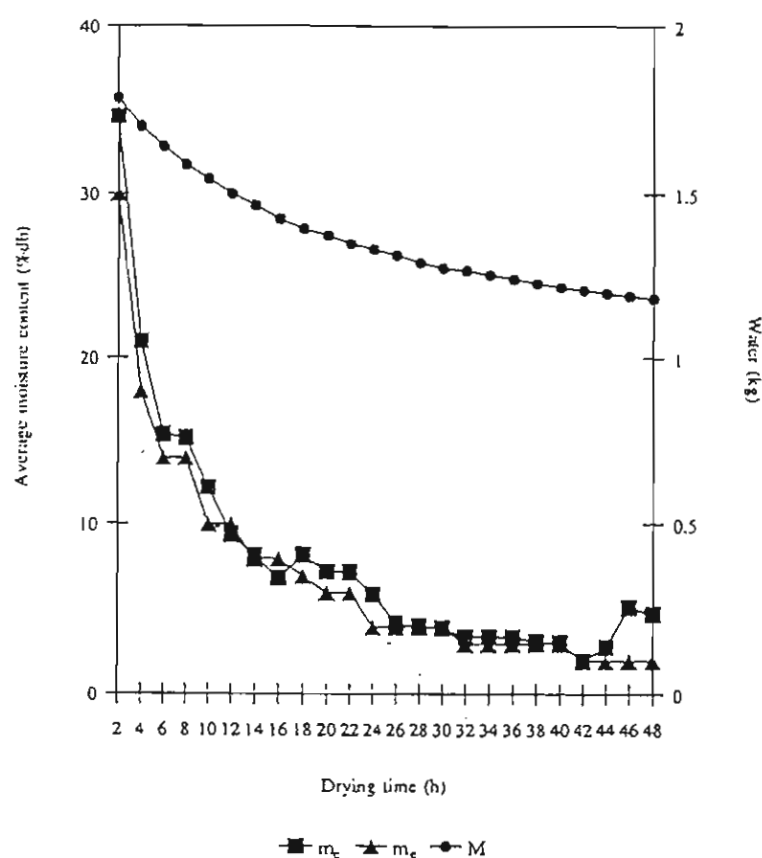


Figure 7 Evolution of average moisture content of papaya glacé, water condensed at evaporator and water evaporated from papaya glacé for the 2nd test, 2nd stage

- m_c = water condensed at evaporator
- m_e = water evaporated from papaya glacé
- M = average moisture content of papaya glacé

๒. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการอบแห้ง

ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องอบแห้งโดยใช้ฮีตปั๊ม ได้

วิเคราะห์อัตราการอบแห้ง อัตราการควบแน่นของน้ำจากเครื่องระเหย ความสิ้นเปลืองพลังงาน ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ (specific air flow

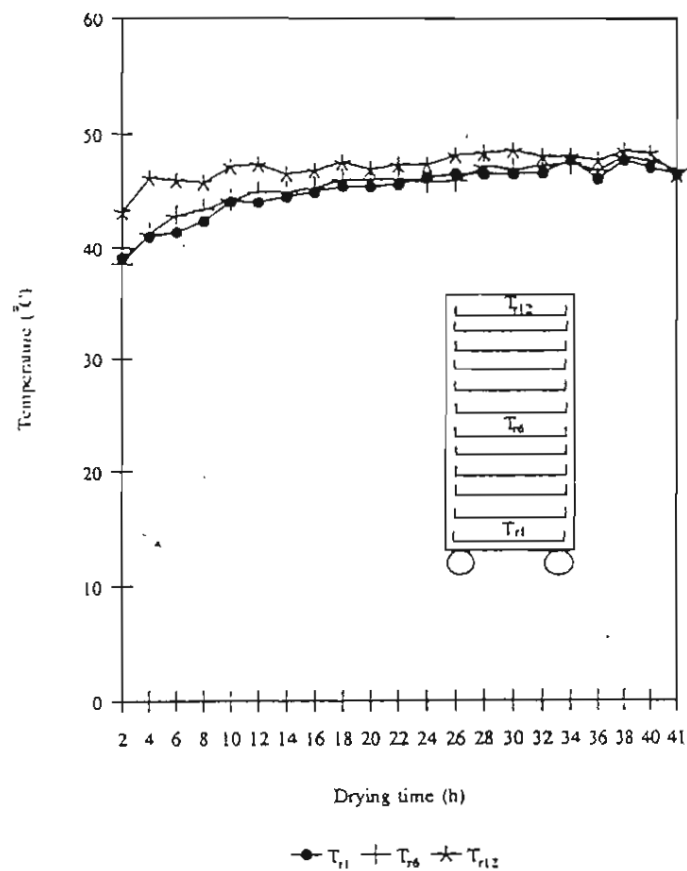


Figure 8 Evolution of air temperature at different trays for the 2nd test, 1st stage

rate) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง
แต่ละครั้งสรุปไว้ในตารางที่ ๑ ซึ่งค่าอัตราการ
ระเหยของน้ำ, MER และ SMER เพิ่มขึ้นเมื่อ

อัตราการไหลจำเพาะของอากาศลดลง ส่วน
ความสิ้นเปลืองพลังงานลดลงตามอัตราการ
ไหลจำเพาะของอากาศ

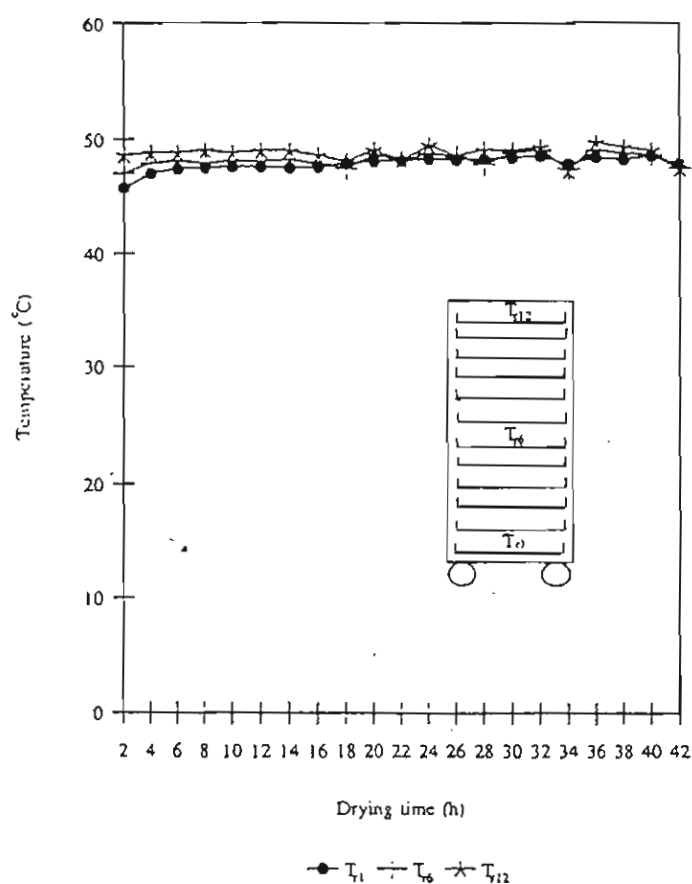


Figure 9 Evolution of air temperature at different trays for the 2nd test, 2nd stage

๓. การวิเคราะห์สมรรถนะของ ระบบฮีตปั๊มในงานวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์และ
ระบบฮีตปั๊ม เปรียบเทียบข้อมูลระหว่างวงจรอากาศกับ
สำหรับการหาสมรรถนะของ วงจรสารทำความเย็นโดยใช้ข้อมูลเฉลี่ยที่เก็บ

Table 1 Experimental drying results

Description	TEST No.					
	1/1	1/2	2/1	2/2	3/1	3/2
ambient condition						
average temperature (°C)	28.9	29.3	28.5	28.9	29.3	29.3
average relative humidity (%)	77.5	71.6	65.6	56.9	74.6	74.9
condition of papaya glacé						
average moisture before drying (% db)	74.8	40.4	73.8	38.3	74.8	36.7
average moisture final drying (% db)	40.4	23.2	38.3	23.6	36.3	19.1
initial weight (kg)	70.4	56.5	101.1	80.1	132.2	101.0
final weight (kg)	56.6	49.7	80.5	71.6	103.4	88.0
drying air condition						
temperature (°C)	50	50	50	50	50	50
specific air flow rate (kg dry air/h-kg dry papaya glacé)	40.3	40.2	27.9	29.8	21.4	21.9
by pass air (%)	63	63	63	63	63	63
energy consumption						
energy consumption (MJ/kg water evap.)	15.95	39.73	13.56	38.02	9.93	19.75
drying time (h)	42	40	41	48	42	38
performance of heat pump						
drying rate (kg water evap./h)	0.327	0.171	0.504	0.177	0.686	0.343
MER (kg water condensed/h)	0.541	0.316	0.578	0.195	0.780	0.544
SMER (kg water evap./kW-h)	0.172	0.091	0.266	0.095	0.363	0.182
COP _{hp}	3.82	3.76	3.85	3.73	3.83	3.81

Where MER = moisture extraction rate from evaporator
 SMER = specific moisture extraction rate
 COP_{hp} = coefficient of performance for heat pump

ทุก ๒ ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน
ตารางที่ ๒ พบว่าค่าร้อยละความผิดพลาดอยู่ใน
ในช่วงที่ยอมรับได้ สมรรถนะของระบบฮีตปั๊ม

ในรูปของสัมประสิทธิ์สมรรถนะฮีตปั๊ม มีค่าอยู่
ระหว่าง ๓.๗๑-๓.๘๕

Table 2 Comparative results analyzed from air and refrigerant loops

Description	Test No.					
	1/1	1/2	2/1	2/2	3/1	3/2
W_c	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31
m_i	0.02335	0.02424	0.02409	0.02350	0.02335	0.02266
m_a	0.02092	0.02320	0.02137	0.02244	0.02077	0.02090
m_b	0.00243	0.00104	0.00272	0.00106	0.00259	0.00176
$Q_{e,a}$	3.69	3.61	3.73	3.58	3.71	3.68
$Q_{e,r}$	3.64	3.85	3.81	3.68	3.69	3.54
% error of Q_e	1.23	6.51	2.14	2.74	0.44	3.89
$Q_{i,a}$	0.43	0.18	0.48	0.18	0.46	0.31
$Q_{i,r}$	4.57	4.74	4.56	4.72	4.56	4.68
$Q_{b,r}$	4.06	4.53	4.17	4.36	4.08	4.08
% error of Q_i	11.09	4.38	8.54	7.57	10.6	12.74
$COP_{hp,a}$	3.82	3.76	3.85	3.73	3.83	3.81
$COP_{hp,r}$	3.78	3.94	3.91	3.81	3.82	3.70
% error of COP_{hp}	1.34	6.35	2.04	2.84	0.37	3.92

Where W_c = power input at compressor, kW
 m_i = mass flow rate of refrigerant, kg/s
 m_a = mass flow rate of refrigerant in internal condenser, kg/s
 m_b = mass flow rate of refrigerant in external condenser, kg/s
 $Q_{e,a}$ = net cooling effect at evaporator calculated from air loop, kW
 $Q_{e,r}$ = net cooling effect at evaporator calculated from refrigerant loop, kW
 $Q_{i,a}$ = net heat rejected at internal condenser calculated from air loop, kW
 $Q_{i,r}$ = net heat rejected at internal condenser calculated from refrigerant loop, kW
 $Q_{b,r}$ = net heat rejected at external condenser calculated from air loop, kW
 $COP_{hp,a}$ = coefficient of performance for heat pump calculated from air loop
 $COP_{hp,r}$ = coefficient of performance for heat pump calculated from refrigerant loop

๔. คุณภาพผลิตภัณฑ์

ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพมะละกอแช่อิ่มอบแห้งที่ได้จากการอบแห้งทั้ง ๒ ช่วงดังกล่าว พบว่าให้สีส้มปนแดงค่อนข้างอ่อนตาม code ๓๔-C โดยมาตรฐานเทียบสีของ R.H.S Colour Chart ซึ่งเป็นสีอ่อนกว่าการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มแบบอุโมงค์ของปียรัตน์ หนูสุข และคณะ^[๑] ทั้งนี้ คงเนื่องจากอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้งต่ำกว่า

๕. การประเมินค่าใช้จ่าย

เงื่อนไขที่ใช้ในการประเมินผลมีดังนี้ กำลังผลิต ๑๓๒.๒ กิโลกรัมต่องวด ใน ๑ ปี เครื่องอบแห้งทำงาน ๔๘ งวด เวลาอบแห้งโดยเฉลี่ย ๘๐ ชั่วโมงต่องวด (ใน ๑ สัปดาห์จะใช้เวลาอบแห้งโดยเฉลี่ย ๔ วัน และอีก ๓ วันที่เหลือใช้เวลาในการเตรียมและหั่นมะละกอแช่อิ่ม) อบแห้งมะละกอแช่อิ่มได้ปีละ ๖,๓๔๖ กิโลกรัม ราคาต้นทุนในการสร้างเครื่องอบแห้ง ๕๙,๐๑๒ บาทอายุการใช้งานของเครื่องอบแห้ง ๑๐ ปี และ ๕ ปีในกรณีที่การบำรุงรักษาไม่ดี ค่าบำรุงรักษารายปีคิดเป็นร้อยละ ๕ ของต้นทุนการสร้างเครื่องอบแห้งมูลค่าซากคิดเป็นร้อยละ ๑๐ ของต้นทุนการสร้างเครื่องอบแห้ง ความสามารถในการระเหยน้ำ ๔๔.๒๕ กิโลกรัม น้ำระเหยต่องวด ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย ๑.๕๕ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง อัตราการใช้ไฟฟ้า ๑.๘๙ กิโลวัตต์-ชั่วโมงไม่คิดค่าแรงงานในการดำเนินการอบแห้ง อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ร้อยละ ๑๘ ต่อปี

๕.๑ กรณีที่คิดอายุการใช้งานของเครื่องอบแห้งเป็น ๑๐ ปีจะเป็นค่าใช้จ่ายดังนี้

ค่าใช้จ่ายรายปีรวมทั้งหมด ๒๗,๐๗๙ บาทต่อปี หรือคิดเป็น ๑๒.๘ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย แยกเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง ๖.๑ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย

ค่าไฟฟ้า ๕.๓ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย และค่าบำรุงรักษา ๑.๔ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย

๕.๒ กรณีที่คิดอายุการใช้งานของเครื่องอบแห้งเป็น ๕ ปีจะเป็นค่าใช้จ่ายดังนี้

ค่าใช้จ่ายรายปีรวมทั้งหมด ๓๒,๒๔๖ บาทต่อปี หรือคิดเป็น ๑๕.๒ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย แยกเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง ๘.๕ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย ค่าไฟฟ้า ๕.๓ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย และค่าบำรุงรักษา ๑.๔ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย

สรุป

จากการศึกษาการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มโดยใช้ฮีตปั๊ม สรุปได้ดังนี้

๑. อัตราการอบแห้งของเครื่องสามารถทำได้ถึง ๐.๖๘๖ กิโลกรัม น้ำระเหยต่อชั่วโมง

๒. อัตราการควบแน่นของน้ำจากเครื่องระเหยของระบบ สามารถทำได้ถึง ๐.๗๘ กิโลกรัม น้ำควบแน่นต่อชั่วโมง

๓. เวลาการอบแห้งทั้ง ๒ ช่วงรวมกันประมาณ ๘๐ ชั่วโมง โดยแบ่งเป็นการอบแห้งช่วงละประมาณ ๔๐ ชั่วโมง

๔. ความสิ้นเปลืองพลังงาน พลังงานที่ใช้ในระบบเท่ากับ ๙.๙๓ เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย หรือ specific moisture extraction rate (SMER) เท่ากับ ๐.๓๖๓ กิโลกรัม น้ำที่ระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงที่อัตราไหลเฉพาะของอากาศ ๒๑.๔๒ กิโลกรัมอากาศแห้งต่อชั่วโมง-กิโลกรัมมะละกอแช่อิ่ม

๕. สัมประสิทธิ์สมรรถนะฮีตปั๊มของระบบฮีตปั๊มมีค่าอยู่ระหว่าง ๓.๗๑-๓.๘๕ ซึ่ง

หมายความว่า ฮีตปั๊มให้ค่าการทำความเป็นของเครื่องระเหย ๓.๗ กิโลวัตต์ และให้ค่าการทำความร้อนที่เครื่องควบแน่น ๕.๐๔ กิโลวัตต์ แยกเป็นความร้อนที่เครื่องควบแน่นตัวใน ๔.๗๔ กิโลวัตต์ และความร้อน ที่เครื่องควบแน่นตัวนอก ๐.๓ กิโลวัตต์ โดยป้อนกำลังงานให้กับเครื่องอัดไอเท่ากับ ๑.๓๑ กิโลวัตต์

๖. จากการประเมินค่าใช้จ่ายในการทดลองของงานวิจัยนี้ พบว่ามีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้งมะละกอแช่แข็งทั้งหมดเท่ากับ ๑๒.๔ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย โดยแยกออกเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่ากับ ๕.๓ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย ค่าใช้จ่ายด้านการบำรุงรักษาเท่ากับ ๑.๔ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่

ระเหย และค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งเท่ากับ ๖.๑ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย

๗. มะละกอแช่แข็งที่ได้จากการอบแห้งให้สีส้มปนแดงค่อนข้างอ่อนตาม code ๓๔-C โดยมาตรฐานเทียบสีของ R.H.S colour chart ซึ่งเป็นสีอ่อนกว่าการอบแห้งมะละกอแช่แข็งแบบอุโมงค์ของ ปิยรัตน์ หนูสูก และคณะ^(๑) ซึ่งน่าจะเนื่องจากอุณหภูมิอบแห้งต่ำกว่า

คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่สนับสนุนโครงการวิจัยนี้ และบริษัทไรซ์เอ็นจิเนียริง ชัพพลาย จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านสร้างเครื่อง.

เอกสารอ้างอิง

๑. ปิยรัตน์ หนูสูก, สมชาติ โสภณวรรณฤทธิ์, ทิพาพร อยู่วิทยา และ อติศักดิ์ นาถกรณกุล. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้งมะละกอแช่แข็งในอุโมงค์. วิทยาศาสตร์เกษตรศาสตร์ (วิทยาศาสตร์) ๒๕๓๘; ๓๐ : ๗๔-๘๐.
๒. Chou SK, Hawlader MNA, Ho JC, Wijesundera NE and Rajasekar S. Heat pump in the drying of food products. International Journal of Energy Research 1993; 14: 397- 406.
๓. Clements S, Jia X and Jolly P. Experimental verification of a heat pump assisted continuous dryer simulation model. International Journal of Energy Research 1994; 17:19-28.
๔. Pendyala VR, Devotta S and Patwardhan VS. Heat pump assisted dryer, part 2 experimental study. International Journal of Energy Research 1990; 14: 493-507.
๕. Rossi SJ, Neves LC and Kieckbusch TG. Thermodynamic and energetic evaluation of a heat pump applied to the drying of vegetables. Drying Technology 1992; 10: 1458-1484.

- 6. Young GS, Birchall S and Mason RL. Heat pump drying of food products - prediction of performance and energy efficiency. In Proc. Fourth ASEAN Conference on Energy Technology, Bangkok, 28-29 August 1995, pp. 240-247.
- 7. Strommen I and Kraner K. New applications of heat pumps in drying processes. Drying '82, 1994, pp. 809-901.

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งข้าวโพดแบบ ฟลูอิดไคซ์เบดระดับอุตสาหกรรม Performance Testing of Industrial-Scale Fluidized Bed Corn Dryer

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์¹ สมบูรณ์ เวชกามา¹ คมกฤษ กิตติพร²
และ โชติวุฒิ วิสุทธิแพทย์¹

Somchart Soponronnarit, Somboon Wetchacama, Komkrit Kittiporn,
and Chotiwoot Vitsuttipat

ABSTRACT

Fluidized bed paddy dryer is commercially successful at present. The dryer is applied to be used with corn grain, another important crop in Thailand. The objective of this research is to investigate performance of industrial-scale fluidized bed corn dryer. Parameters affecting drying rate, energy consumption and product quality were considered. Experimental results showed that the rate of water evaporation increased with initial moisture content of corn and drying air temperature while specific energy consumption increased when initial moisture content decreased. Corn quality in terms of breakage and stress crack increased when drying air temperature increased or final moisture content decreased.

Key words : fluidized bed, drying, grain

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิค

ฟลูอิดไคซ์เบดประสบความสำเร็จอย่างสูง ทำให้มีการ
ประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในการอบแห้งข้าวโพด ซึ่งเป็น
พืชเศรษฐกิจที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทย

1 คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถนนสุขสวัสดิ์ 48 กรุงเทพฯ 10140

School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Suksawat 48 Rd., Bangkok 10140, Thailand.

2 ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตรศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตบางพระ ชลบุรี 20210

Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Rajamongkla Institute of Technology, Bangpra Campus, Chonburi 20210, Thailand.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งเมล็ดข้าวโพดแบบฟลูอิดไคซ์เบดระดับอุตสาหกรรม โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จากการทดลองพบว่า อัตราการระเหยน้ำเพิ่มขึ้นตามความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวโพดและอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเมื่อความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวโพดมีค่าสูงขึ้น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านการแตกและการร้าวของเมล็ด เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง และความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวโพดที่มีค่าลดลง

คำนำ

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญรองจากข้าว ผลผลิตของเมล็ดข้าวโพดมีมากในช่วงกลางเดือนกรกฎาคม-เดือนตุลาคม แต่ความต้องการบริโภคมีตลอดทั้งปี ดังนั้นการเก็บรักษาวินิจฉัยข้าวโพดภายหลังการเก็บเกี่ยวจึงเป็นสิ่งสำคัญ สำหรับประเทศไทยซึ่งมีลักษณะภูมิอากาศแบบร้อนชื้น การเก็บรักษามะลิข้าวโพดในที่เก็บอย่างปลอดภัยควรเก็บที่ความชื้น 14 %wb. เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของราและจุลินทรีย์ต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดผลเกิดการเสียหายแต่เมล็ดข้าวโพดที่ได้จากการเก็บเกี่ยวมักมีความชื้นสูงระหว่าง 20-30 %wb. จึงจำเป็นต้องมีการลดความชื้นก่อนเก็บรักษาปัจจุบันเครื่องอบแห้งมีบทบาทสำคัญเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้ง อากาศร้อนที่ใช้อยู่แห้งกับเมล็ดพืชมีการผสมกันอย่างทั่วถึง สามารถลดความชื้นลงได้มากภายในเวลาอันสั้นและให้ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่สม่ำเสมอ แต่การใช้อุณหภูมิสูงเกินไปมีผลทำให้เกิดการแตกและการร้าวของเมล็ดข้าวโพด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

เพื่อให้การใช้งานเครื่องอบแห้งมีประสิทธิภาพ โดยที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ดี

Abid *et al.* (1990) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวล ที่เกิดขึ้นในการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบด พบว่า อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งและเวลาในการอบแห้งมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งอย่างมาก ในขณะที่ความเร็วของอากาศที่ใช้อยู่แห้ง ขนาดของเมล็ดข้าวโพด และความชื้นของอากาศที่ใช้อยู่แห้งมีผลกระทบน้อยมาก

Dayanghirang *et al.* (1991) ศึกษาผลกระทบของความร้อนที่มีต่อคุณภาพในแง่ของการงอกของเมล็ดข้าวโพด เมื่อทำการอบแห้งโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดเมล็ดข้าวโพดมีความชื้นเริ่มต้น 24.5 %wb. ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 40-80°C และอัตราการไหลของอากาศ 0.03 kg/s พบว่า เมื่ออบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยอุณหภูมิในช่วง 40-55°C อัตราการงอกของเมล็ดข้าวโพดยังเป็นปกติ แต่เมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 55°C ขึ้นไป อัตราการงอกลดลงอย่างมาก

Satayaprasert and Vanishriwatana (1992) ศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบเป็นวง ใช้อุณหภูมิอากาศ 60-90°C ความเร็วของอากาศ 2.7-4.2 m/s และความสูงเบด 3-12 cm พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งอย่างมากคือ อุณหภูมิของอากาศและความสูงของเบดตามลำดับ โดยคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในแง่ของปริมาณไลซีนมีค่าลดลงเมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น

อนันต์ (2539) ศึกษาผลกระทบของการใช้อุณหภูมิสูง ในการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบเป็นวง โดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง 150-200°C ความเร็วลม 2.2-4.0 m/s ความสูงเบด 4-12 cm พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้อยู่แห้งและอัตราการไหลของอากาศจำเพาะ เมื่อลดความชื้นเมล็ดข้าวโพดจาก 43 %db. เหลือ 24 %db. โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 150-

170°C พบว่า การร้าวของเมล็ดน้อยกว่า 5% และไม่พบการแตกของเมล็ด โดยที่การเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ดสามารถอธิบายได้ในเชิงจุลศาสตร์เคมี ในรูปของสมการอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยา โดยตั้งสมมติฐานให้อันดับของปฏิกิริยาเท่ากับศูนย์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้ง โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชเบดระดับอุตสาหกรรม

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งและเครื่องมือวัด

Figure 1 แสดงไดอะแกรมของเครื่องอบแห้ง

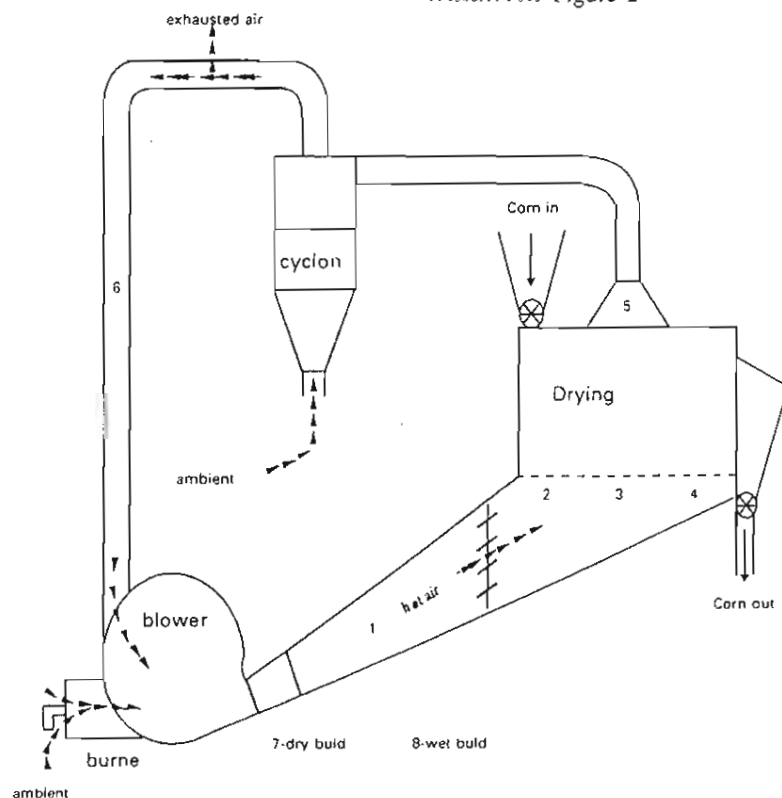
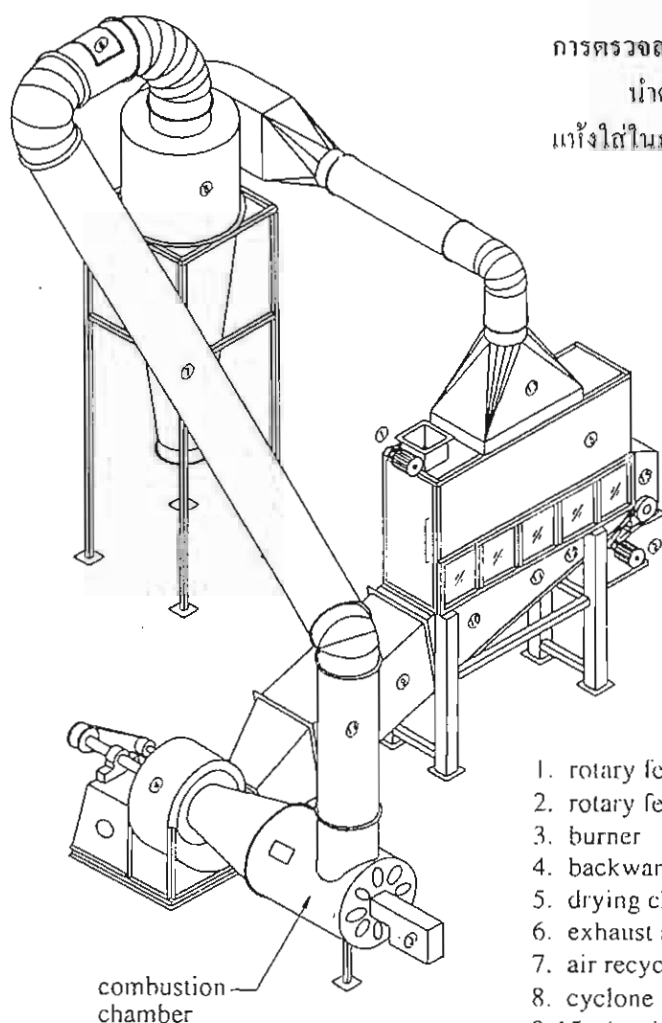


Figure 1 Diagram of fluidized-bed corn dryer (Numbers indicate where temperature measurements were taken).

ข้าวโพดแบบฟลูอิดไชเบด ซึ่งมีลักษณะการทำงานคร่าว ๆ ดังนี้ เมล็ดข้าวโพดจากถังพักถูกป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งโดย rotary feeder ภายในห้องอบแห้งมีกระแสน้ำวนอากาศร้อนไหลผ่าน โดยมีแผ่นกั้น (weir) เป็นตัวควบคุมความหนาของชั้นเมล็ดข้าวโพดในห้องอบแห้ง ซึ่งเกิดการถ่ายเทมวลสารและความร้อนระหว่างเมล็ดข้าวโพดกับอากาศร้อนที่ไหลผ่าน ทำให้เมล็ดข้าวโพดมีความชื้นลดลงและอุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่อากาศร้อนที่ไหลออกจากห้องอบแห้งมีอุณหภูมิลดลงและอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้น เมล็ดข้าวโพดที่ผ่านการอบแห้งถูกปล่อยออกจากห้องอบแห้งโดย rotary discharger อากาศร้อนจากห้องอบแห้งถูกทำความสะอาดโดยไซโคลน แล้วนำกลับมาใช้ใหม่บางส่วน เพื่อช่วยลดการใช้พลังงาน รายละเอียดดังแสดงใน Figure 2

การทดลองอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์แบบต่อเนื่องขนาดกำลังการผลิต 1.8-3.0 tons/h โดยใช้หัวเผาที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตอากาศร้อน และใช้พัดลมแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง ซึ่งขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาด 25 hp เป็นตัวผลักดันอากาศร้อน ความเร็วของอากาศร้อนในห้องอบแห้งคงที่ที่ 2.9 m/s ทำการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดที่ความชื้นเริ่มต้น 18-40 % db. ความสูงของชั้นข้าวโพด 13-20 cm อัตราการป้อนเมล็ดข้าวโพด 1600-3000 kg/

h มีอัตราการเวียนอากาศกลับ 78-84 % อุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้ง 119-188°C ความเร็วของอากาศวัดโดยใช้ hot wire anemometer และอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K และอ่านค่าจาก data logger ซึ่งมีความแม่นยำ 1°C อุณหภูมิเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้งวัดโดยนำไปใส่ไว้ในภาชนะหุ้มฉนวนแล้วอ่านค่าจากเทอร์โมมิเตอร์เก็บตัวอย่างเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้งทุก 20 นาที แล้วนำไปตรวจค่าความชื้นและคุณภาพในรูปของการแตก การร้าว และการเปลี่ยนแปลงสี



การตรวจสอบหาความชื้นของเมล็ดข้าวโพด

นำตัวอย่างเมล็ดข้าวโพดก่อนและหลังการอบแห้งใส่ในภาชนะประมาณ 30 กรัม เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ

1. rotary feeder, inlet
2. rotary feeder, outlet
3. burner
4. backward curved blade centrifugal fan
5. drying chamber
6. exhaust air
7. air recycled
8. cyclone
- 9-15. (positions of temperature measurement)

Figure 2 Fluidized bed dryer.

103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักเพื่อหาความชื้นก่อนและหลังการอบแห้ง

การตรวจสอบคุณภาพของเมล็ดข้าวโพด

- ตรวจสอบสีของเมล็ดข้าวโพด โดยเครื่องมือวัดสีมาตรฐานอินเตอร์ Minolta รุ่น CR-3000 อ่านค่า l (lightness), a (redness) และ b (yellowness) ที่ส่วนแสดงผล

- ตรวจสอบเปอร์เซ็นต์การแตกและร้าวของเมล็ดข้าวโพด สุ่มตัวอย่างเมล็ดข้าวโพดประมาณ 150 g ตรวจสอบหาเปอร์เซ็นต์เมล็ดแตกโดยน้ำหนัก โดยพิจารณาเมล็ดที่แตกออกจากกัน และเมล็ดที่มีการปริแตกอย่างชัดเจน แล้วทำการตรวจสอบหาเปอร์เซ็นต์เมล็ดร้าวโดยน้ำหนักโดยการส่องไฟ

ผลและวิจารณ์

อัตราการระเหยน้ำ

Table 1 แสดงผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งข้าวโพดแบบฟลูอิดไคซ์เบด การทดลองที่ 1-10 และ 11-14 เป็นการอบแห้งในช่วงความชื้นเริ่มต้นสูง (26-40 %db.) และในช่วงความชื้นเริ่มต้นต่ำ (21-23 % db.) ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง 119-188°C พบว่า จากการทดลอง ที่ 1-10 ให้อัตราการระเหยน้ำสูง อัตราการระเหยน้ำเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นดังแสดงใน Figure 3 การทดลองที่ 11-14 เป็นการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดในช่วงความชื้นต่ำ (18-22 % db.) พบว่า อัตราการระเหยน้ำมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับการทดลองที่ 1-10 ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำส่วนใหญ่อยู่บริเวณส่วนในของเมล็ด การถ่ายเทมวลสารถูกจำกัดด้วยการแพร่ความชื้นในเมล็ด การลดความชื้นจึงเป็นไปได้ยาก

ความสิ้นเปลืองพลังงาน

อัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเช่นกัน แต่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยขึ้นอยู่กับความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดข้าวโพดดังแสดงใน Figure 4 สำหรับช่วงความชื้นเริ่มต้นสูง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของความร้อนจากน้ำมันดีเซลและของไฟฟ้า อยู่ในช่วง 4.7-6.9 และ 0.32-0.61 MJ/kg-water evaporated ตามลำดับ ในกรณีช่วงความชื้นเริ่มต้นต่ำ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของความร้อนจากน้ำมันดีเซลและของไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10.0-27.4 และ 0.65-2.03 MJ/kg-water evaporated ตามลำดับ การทดลองที่ 9 และ 10 เป็นการเพิ่มเวลาในการอบแห้งโดยใช้วิธีเพิ่มความสูงของชั้นเมล็ดข้าวโพด จากการทดลอง พบว่า อัตราการระเหยน้ำมีค่าสูงพอประมาณ แต่ความชื้นสุดท้ายไม่ค่อยสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับผลของการทดลองที่ 1-8 ทั้งนี้เนื่องจากพัดลมมีกำลังงานไม่เพียงพอ ในการทำให้เมล็ดข้าวโพดเกิดฟลูอิดไคซ์อย่างสมบูรณ์

คุณภาพของเมล็ดข้าวโพด

Table 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเมล็ดข้าวโพด เมื่อเมล็ดข้าวโพดผ่านการอบแห้งเปอร์เซ็นต์การแตกของเมล็ดมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง แต่ในบางกรณีมีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเศษจากการแตกหักมีขนาดเล็กและเบาเมื่อเทียบกับเมล็ดสมบูรณ์ จึงถูกพัดพาออกจากห้องอบแห้งไปกับอากาศร้อนและถูกจัดออกจากระบบด้วยไซโคลน ยกเว้นในการทดลองที่ 8 ซึ่งทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 188°C พบว่า เปอร์เซ็นต์การแตกหลังการอบแห้งเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากเมล็ดข้าวโพดบางส่วนเกิดการแตกในลักษณะแตกบานคล้าย pop corn ซึ่งการแตกในลักษณะนี้เกิดจากการใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงเกินไป

ในส่วนของการเปอร์เซ็นต์การร้าวของเมล็ดข้าว

Table 1 Experimental results on performance of fluidized bed corn dryer.

Test no.	Temperature (°C)	Air recycled (%)	Bed height (cm)	Feed rate (kg/h)	Residence time (min)	Initial moisture content (% db.)	Final moisture content (% db.)
1	119	78.2	13	2000	3.44	38.2	31.2
2	131	78.2	13	3000	2.29	32.7	27.1
3	145	78.2	17	2000	4.50	28.2	19.2
4	152	78.2	15	1860	4.27	40.3	26.3
5	156	80.4	15	1980	4.01	29.4	19.4
6	168	80.4	15	2016	3.94	29.7	19.0
7	172	80.4	15	1980	4.01	28.6	17.8
8	188	80.4	15	2160	3.68	26.1	15.7
9	156	80.4	20	2160	4.90	26.5	18.1
10	168	80.4	20	2160	4.90	26.4	17.0
11	120	84.4	17	1860	4.84	22.2	19.1
12	143	84.4	17	1860	4.84	18.6	16.7
13	156	84.4	19	1600	6.28	21.1	14.2
14	165	84.4	17	1860	4.48	22.8	18.2

Table I (continued)

Test no.	Rate of water evaporation (kg/h)	Energy consumption from diesel (MJ/h)	Electricity consumption (MJ/h)	Specific heat consumption (MJ/kg water evap.)	Specific electricity consumption (MJ/kg water evap.)
1	103.1	710.7	64.0	6.9	0.61
2	125.5	728.1	58.7	5.8	0.47
3	140.3	771.9	58.7	5.5	0.42
4	185.6	875.8	58.7	4.7	0.32
5	153.0	894.0	59.7	5.8	0.41
6	165.8	967.1	59.7	5.8	0.37
7	170.8	1058.1	59.7	6.2	0.35
8	178.2	1238.1	59.7	6.9	0.35
9	143.5	901.3	59.7	6.3	0.41
10	159.9	957.6	59.7	6.0	0.37
11	47.3	713.0	58.7	15.1	1.22
12	28.7	786.2	58.7	27.4	2.03
13	92.3	925.6	58.7	10.0	0.65
14	69.4	1090.0	58.7	15.7	0.85

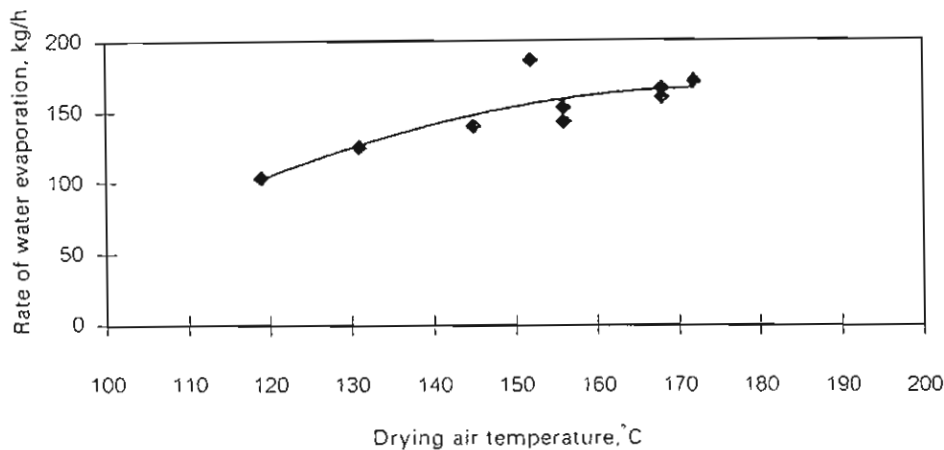


Figure 3 Effect of drying air temperature on water evaporation.
(range of average moisture content 22-35 %db.)

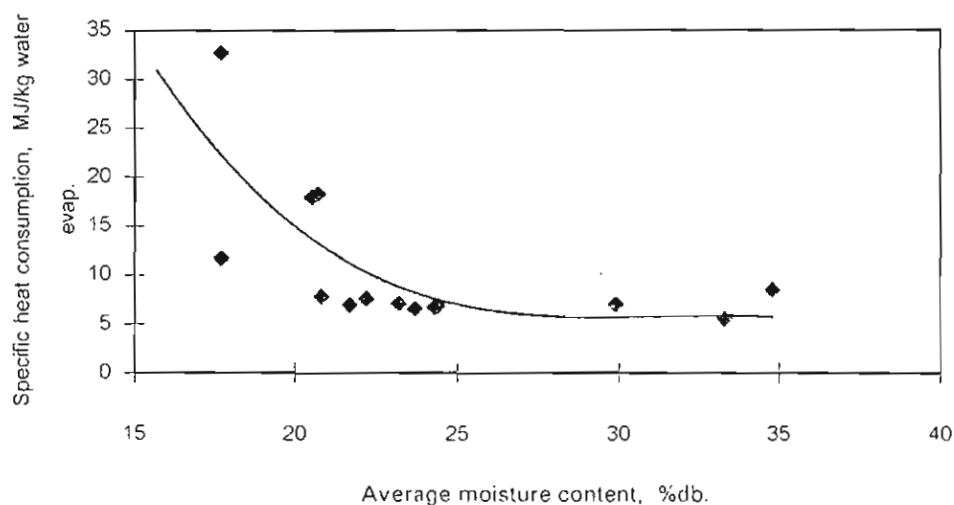


Figure 4 Effect of average moisture content on specific heat consumption.
(range of drying air temperature 119-188°C)

โพดหลังการอบแห้ง พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง โดยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง ผิววนอกของเมล็ดสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ผิววนอกแข็งตัว และเมื่อโชนการอบแห้งเคลื่อนย้ายจากบริเวณผิววนอกไปยังชั้นในของเมล็ด บริเวณชั้นในสูญเสียความชื้นและหดตัวโดยแยกตัว

ออกจากผิววนอกที่แข็ง

สำหรับการเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ดข้าวโพดจากการทดลอง พบว่า กระบวนการอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ดข้าวโพดน้อยมาก กล่าวคือ การอบแห้งเมล็ดข้าวโพดมีค่า a (redness) และ b (yellowness) โดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งถือว่าไม่มีผลกระทบใด ๆ ในทางการค้า

Table 2 Quality of corn.

Test no.	Drying air temperature (°C)	Final moisture content (% db.)	Colour change				Breakage kernel (%)		Stress crack kernel (%)	
			Reference	After drying	a	b	Reference	After drying	Reference	After drying
1	119	31.1	10.85	22.87	11.26	23.85	3.8	2.9	-	-
2	131	27.1	13.34	27.35	12.85	28.28	2.4	2.4	-	-
3	145	19.2	9.87	26.65	10.63	25.46	4.6	5.9	-	-
4	152	26.3	10.80	28.85	12.09	25.93	2.0	2.8	-	-
5	156	19.4	9.55	23.24	10.42	22.92	1.7	1.5	1.6	10.0
6	168	19.0	10.90	26.92	11.41	29.34	1.3	1.0	1.7	30.4
7	172	17.8	11.64	26.13	13.62	23.55	1.8	2.2	2.4	38.8
8	188	15.7	10.77	20.42	12.87	18.44	2.1	4.6	4.1	49.1
9	156	18.1	11.32	18.60	12.40	23.52	2.0	2.1	3.6	19.7
10	168	17.0	9.19	19.77	12.35	21.29	2.5	2.4	3.8	28.7
11	120	19.1	10.23	22.82	11.42	24.52	1.0	1.9	0.2	0.6
12	143	16.7	8.84	21.10	11.13	23.91	1.7	1.8	0.6	1.0
13	156	14.2	7.66	19.86	8.10	21.61	2.4	2.8	0.6	32.7
14	165	18.2	6.98	19.52	7.69	20.22	1.5	1.3	0.8	3.3

1. For experiments 1-4 and 11-14, reference samples were dried by ambient air.

2. For experiments 5-10, corn before drying was used as reference samples.

สรุป

จากผลการทดลองอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคเซชั่น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคเซชั่นเหมาะสำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง เนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานน้อย ความสิ้นเปลืองพลังงานมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นของเมล็ดข้าวโพดลดต่ำลง
2. อัตราการระเหยน้ำเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้ง แต่การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเกินไปร่วมกับความชื้นเริ่มต้นเมล็ดข้าวโพดที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้การแตกและการร้าวของเมล็ดเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 150-160°C
3. การเพิ่มความสูงของชั้นเมล็ดข้าวโพดมากเกินไปทำให้เกิดฟลูอิดไคเซชั่นลดลง ซึ่งส่งผลถึงความไม่สม่ำเสมอของความชื้นสุดท้าย

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอแสดงความขอบคุณต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและ Australian Centre for International Agricultural Research ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- อนันต์ พงษ์ธรกุลพาณิชย์. 2539. การอบแห้งข้าวโพดด้วยเทคนิคฟลูอิดไคเซชั่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- Abid, M., R. Gibert, and C. Laguerie. 1990. An experimental and theoretical analysis of the mechanisms of heat and mass transfer during the drying of corn grains in a fluidized bed. *International Chemical Engineering* 30 : 632-642.
- Dayanghirang, D.D., T.F. Ghaly, J.W. Sutherland, and B.G. Patil. 1991. Heat induced damage in maize grain as a consequence of fluidized bed drying, pp. 114-121. *In Proceedings of the 14th ASEAN Seminar on Grains Post-harvest Technology*. Philippines.
- Satayaprasert, C. and V. Vanishsrivatana. 1992. Drying corn in fluidized bed. *Thailand Eng. J.* 44 : 76-79.
-
- วันรับเรื่อง : 5 มิ.ย. 40
วันรับตีพิมพ์ : 2 มี.ค. 41

ผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อ อัตราการเหลืองของข้าวเปลือกขึ้น

Effect of Temperature and Relative Humidity on Yellowing Rate of Paddy

นิรชรา ศรีสุบัติน¹ : สมชาติ โสภณรณฤทธิ์¹ และ ทิพาพร อยู่วิทยา²

Nirachara Srisubati, Somchart Soponronnarit, and Tipaporn Yoovidhya

ABSTRACT

The effects of temperature and relative humidity in storage chambers on yellowing rate of paddy were investigated and then an empirical equation for predicting the yellowing rate was developed. Paddy was conditioned using saturated salt solutions at relative humidities from 80 to 95 % and temperatures 35, 45, 55, 60, and 65°C. The yellowing rate was found to follow the zero order kinetics. The yellowing constant values (k) increased exponentially with temperature while increased linearly with water activity. The magnitude of activation energy varied from 130-145 kJ/mol. A predictive equation for determining yellowing rate was $\ln k = \alpha - \delta a_w - \epsilon/T + (\gamma a_w)/T$ where a_w is water activity (valid from 0.80 to 0.95), T is absolute temperature (valid from 308 to 338 K) and α , δ , ϵ and γ are constants. The results of variance analysis showed that temperature, water activity and their interaction significantly influenced the yellowing rate of paddy.

Key words : paddy, temperature, relative humidity, yellowing

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาปัจจัยของ
อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ส่งผลต่อการ

เปลี่ยนแปลงอัตราการเหลืองของข้าวเปลือก พร้อม
ทั้งสร้างสมการแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์
ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ โดยทำการทดลองในระบบปิด
ที่อุณหภูมิ 35, 45, 55, 60, และ 65°C และ

1 คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

2 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

ความชื้นสัมพัทธ์ 80 - 95 % (ควบคุมโดยสารละลายเกลืออิ่มตัว) จากการศึกษาพบว่าอัตราการเหี่ยวของข้าวเปลือกเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ค่าพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 130-145 kJ/mol ค่าคงที่อัตราการเหี่ยวเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแบบเอกซโปเนนเชียล และเพิ่มขึ้นตาม water activity แบบเชิงเส้น สามารถเขียนสมการทำนายอัตราการเหี่ยวได้ว่า $\ln k = \alpha - \delta a_w - \varepsilon/T + (\gamma a_w)/T$ เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตราการเหี่ยว (b unit/day) a_w คือ water activity T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ ส่วน α , δ , ε และ γ คือค่าคงที่ สมการนี้ใช้ได้กับอุณหภูมิ 308-338 K และ a_w 0.80-0.95 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าคงที่อัตราการเหี่ยวพบว่า อุณหภูมิ a_w และ ปฏิสัมพันธ์ร่วมของทั้งสอง ปัจจัยมีอิทธิพลต่ออัตราการเหี่ยวของข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

คำนำ

สีของข้าวเปลือกเป็นคุณลักษณะสำคัญประการหนึ่งที่ใช้กำหนดคุณภาพและราคาของข้าว ทั้งนี้ราคาของข้าวขึ้นกับสนธิสัญญาของผู้บริโภคในแต่ละท้องที่ โดยทั่วไปแล้วข้าวเปลือกจะเหลืองขึ้นในขั้นตอนต่างๆ หลังจากการเก็บเกี่ยวไปจนถึงการเก็บรักษา โดยตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเหี่ยวของข้าวเปลือกคือ อุณหภูมิ ความชื้นของข้าว และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม

Gras *et al.* (1989) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเหลืองของข้าวสารสองสายพันธุ์เนื่องจากผลของอุณหภูมิ a_w และองค์ประกอบของอากาศในการเก็บรักษา และพบว่า ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเหี่ยวคือ อุณหภูมิ และ a_w O_2 มีผลต่อความเหลืองของข้าวเล็กน้อย ส่วน CO_2 ไม่มีผลต่ออัตราการเหี่ยวของข้าวสาร และเสนอสมการทำนายอัตราการเหี่ยว คือ $k = \alpha \cdot e^{b/T} (a_w)^\gamma [O_2]^\delta$ เมื่อ k = อัตราการ

เหี่ยว (Hunter b unit/day) T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) a_w = water activity O_2 = ปริมาณออกซิเจน (mol/m^3) ส่วน α , β , γ และ δ คือค่าคงที่ สมการนี้ใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิ 35-60°C และ $a_w = 0.4-0.8$

Bason *et al.* (1990) พบว่า อุณหภูมิและ a_w มีอิทธิพลต่อการเหี่ยวของข้าวเปลือก O_2 มีผลเล็กน้อย ส่วน CO_2 ไม่มีผล และสามารถใช้อัตราการของ Gras *et al.* (1989) ทำนายอัตราการเหี่ยวของข้าวเปลือกได้ในช่วงอุณหภูมิและ a_w เช่นเดียวกัน

Phillip *et al.* (1988) ศึกษาการเหี่ยวของข้าวเปลือกระหว่างการทำแห้งโดยการระบายอากาศและเก็บรักษาข้าวเปลือกระยะเวลาหนึ่งปี ทำการระบายอากาศด้านล่างกองข้าวเปลือก ความชื้นเริ่มต้น 22.4% ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของอากาศ 75% อัตราการไหลของอากาศ 1.5 $m^3/min-ton$ paddy พบว่าสามารถลดความชื้นให้เหลือ 14%wb. โดยใช้เวลามากกว่า 8 สัปดาห์ และสังเกตเห็นความเหลืองเมื่อเวลาผ่านไป 5 สัปดาห์ เมื่อสิ้นสุดการทดลองความเหลืองเท่ากับ 4.5-5.5% และพบเชื้อราเจริญได้ดีที่ชั้นบนสุดของกองข้าว สาเหตุที่แท้จริงของการเหี่ยวยังไม่ทราบแน่ชัด แต่อาจสัมพันธ์กับสภาพความชื้นสูงและการเจริญของเชื้อรา ก่อนหรือระหว่างการอบแห้ง

Phillips *et al.* (1989) ศึกษาการเหี่ยวของข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้ง โดยแบ่งการทดลองเป็น 4 แบบ คือ ข้าวเปลือกขึ้นกองผึ่งในอากาศแวดล้อมในที่โล่งและในโกดัง ข้าวเปลือกขึ้นบรรจุในกระสอบกองผึ่งในอากาศแวดล้อมในที่โล่งและในโกดัง ข้าวเปลือกอบแห้งกองผึ่งในอากาศแวดล้อมในที่โล่งและโกดัง และข้าวเปลือกอบแห้งบรรจุในกระสอบกองผึ่งในอากาศแวดล้อม ในที่โล่งและโกดัง ข้าวเปลือกมีความชื้นมากกว่า 20% wb ความชื้นสัมพัทธ์อากาศในช่วง 44-84% ผลการทดลองพบว่ากองข้าวเปลือกขึ้นพบความเหลือง 100% ที่ใจกลางกองภายใน 5 วัน เกิดเชื้อราอย่างรุนแรงใน

เวลา 2 วัน อุณหภูมิวัดได้ 65°C ในเวลา 6 วัน ส่วนในกองข้าวเปลือกอบแห้งบรรจุกระสอบวัดอุณหภูมิได้ 40°C เมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน ความเหลืองเปลี่ยนแปลง 1-3%

Yap *et al.* (1988) ศึกษาผลของความชื้น สายพันธุ์ และการบ่ม (aging) ที่มีต่อการเหลืองของข้าว ความชื้นเริ่มต้นของข้าว 12-20% ทดลองที่ 60°C เป็นเวลา 4 วันและฆ่าเชื้อราที่ผิวข้าวก่อนเริ่มการทดลอง ทั้งข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสาร จากการทดลองพบว่า การเก็บข้าวที่ 60°C เป็นเวลา 4 วัน มีนัยสำคัญทางสถิติต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L^* , a^* และ b^* ตามระบบการวัดสีของ Hunter ของข้าวกล้อง และข้าวสาร ค่า b^* ของข้าวเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นของข้าว ซึ่งค่า b^* ของข้าวเปลือกสูงกว่าข้าวกล้องหรือข้าวสาร และค่า b^* ในข้าวเก่ามีค่าสูงกว่าในข้าวใหม่นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวกล้องสายพันธุ์ต่าง ๆ มีอัตราการเหลืองไม่แตกต่างกัน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า แบบจำลองทำนายอัตราการเหลืองของ Gras *et al.* (1989) ที่เสนอไว้ มีข้อจำกัดการใช้คือ สามารถใช้คำนวณทำนายในช่วงความชื้นข้าวต่ำ ($a_w = 0.4-0.8$) เท่านั้น ซึ่งเป็นข้าวที่ผ่านกระบวนการลดความชื้นแล้ว ส่วนในช่วงหลังการเก็บเกี่ยวและรอการลดความชื้นยังไม่มีการศึกษาไว้ งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะแวดล้อม ที่มีต่ออัตราการเหลืองของข้าวเปลือกขึ้น โดยเน้นศึกษาในสภาวะที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สูง พร้อมทั้งหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยดังกล่าว

อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบการทดลอง

เลือกใช้แผนการทดลองแบบ 5×3 factorial design (fixed effect model) ทำการทดลองซ้ำสองครั้ง

และใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) ในการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ a_w และปฏิสัมพันธ์ร่วมของปัจจัยทั้งสองที่มีต่ออัตราการเหลืองของข้าว

การเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือก

นำข้าวเปลือกจากการเก็บเกี่ยวใหม่ ๆ มาทำความสะอาดคัดแยกเศษฟาง หญ้า และดินออก และนำมาปรับความชื้นให้ได้ประมาณ 24% dry-basis จากนั้นเก็บในถุงพลาสติก ที่อุณหภูมิ 5°C ทั้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้งานเพื่อให้เกิดความสมดุล โดยการทดลองนี้ได้เตรียมตัวอย่างข้าวเปลือกสำหรับการทดลองทั้งหมดไว้ โดยเก็บในถุงพลาสติกปิดสนิทที่ 5°C และก่อนเริ่มการทดลองทุกครั้ง ต้องทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวอย่างเริ่มต้น

การทดลอง

ชุดทดลองประกอบด้วยกล่องพลาสติกใส พร้อมฝาขนาด 17×24.5×8 cm ภายในมีถาดแก้วขนาด 15×22×4 cm สำหรับบรรจุสารละลายเกลืออิมิตัวชนิดต่างๆ เหนือถาดแก้วมีตะแกรงพลาสติกขนาด 15×24×2 cm วางอยู่ เริ่มการทดลองโดยชั่งน้ำหนักข้าวเปลือก 160 g เกลี่ยให้สม่ำเสมอทั่วตะแกรง ซึ่งวางอยู่บนถาดแก้วบรรจุสารละลายเกลืออิมิตัวชนิดต่างๆ ซึ่งให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหนือสารละลายเท่ากับ 80, 85 และ 95% ที่อุณหภูมิ 35, 45, 55, 60 และ 65°C เกลือที่ใช้ได้แก่ $(NH_4)_2SO_4$, KCl, $BaCl_2 \cdot H_2O$ และ K_2SO_4 (สมชาติ, 2537 : ASTM, 1991) จากนั้นปิดฝากล่องให้สนิท และปิดทับด้วยเทปกาวใส ขนาดความกว้าง 2.5 นิ้วตามรอยผนึก และควบคุมอุณหภูมิโดยวางกล่องทดลองในตู้อบไฟฟ้า เมื่อครบตามเวลาต่างๆจึงเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกมาวิเคราะห์ความชื้น และคุณภาพการสี จากนั้นนำข้าวสารมาวัด

ค่าความขาว โดยใช้ Kett digital whiteness meter for rice (model C-300) และวัดความเหลือง (ค่า b ตามระบบการวัดสีของ Hunter) โดยใช้เครื่องวัดสี Juki รุ่น JP 7100

ผลและวิจารณ์

อัตราการเปลี่ยนแปลงความเหลืองศึกษาได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าสีเหลืองตามระบบของ Hunter เมื่อเทียบกับเวลา ซึ่งผลจากการทดลองเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศคงที่ การเปลี่ยนแปลงค่า b นั้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเวลา (Figure 1) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้เป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ซึ่งเกิดด้วยอัตราคงที่เมื่อปัจจัยอื่น ๆ คงที่ เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\frac{db}{dt} = k \quad \text{..... (1)}$$

k คือค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (1) ในช่วง $b = b_0$ ที่ $t = 0$ และ $b = b$ ที่ $t = t$ จะได้

$$b = b_0 + kt \quad \text{..... (2)}$$

ความชันของกราฟใน Figure 1 คือ k ซึ่งที่อุณหภูมิ และ water activity (a_w) ค่าต่างๆ สามารถหาค่า k ได้จากความชันของกราฟที่สภาวะนั้นๆ ได้ ดัง

Table 1

เมื่อนำค่า k ที่ได้มาพลอตกับ a_w เปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง k และ a_w เป็นเส้นตรงที่มี r^2 สูงถึง 0.9 ในทุก ๆ อุณหภูมิ (Figure 2) โดยความชันเส้นกราฟเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับอุณหภูมิ จะได้ความสัมพันธ์แบบเอกซโปเนนเชียล (Figure 3) ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส คือ

$$k = k_0 e^{E_a/RT} \quad \text{..... (3)}$$

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad \text{..... (4)}$$

เมื่อ E_a = พลังงานกระตุ้น, kJ/mole

T = อุณหภูมิ, K

R = gas constant

จากสมการที่ (4) เมื่อพลอตกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ จะได้กราฟเป็นเส้นตรงดัง Figure 4 เมื่อทำ

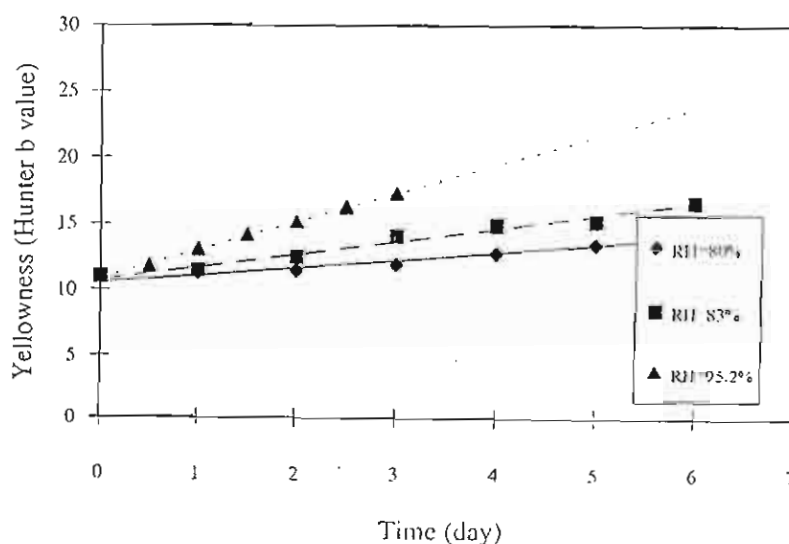


Figure 1 Relationship between yellowness and time at 60°C at different relative humidities.

Table 1 Experimental results of rate of yellowing at different temperatures and water activities.

Temperature (°C)	Salt solution	a_w	Calculated ¹ emc (%db.)	Actual emc (%db.)	k (b unit/day)	r^2
35	(NH ₄) ₂ SO ₄	0.798	16.91	16.94	7.20×10^{-3}	0.93
45	(NH ₄) ₂ SO ₄	0.793	16.53	14.88	4.81×10^{-2}	0.96
55	KCl	0.806	16.60	14.03	3.07×10^{-1}	0.98
60	KCl	0.800	16.34	14.21	5.84×10^{-1}	0.95
65	KCl	0.793	16.05	13.47	1.01	0.99
35	KCl	0.830	17.75	17.93	1.88×10^{-2}	0.99
45	BaCl ₂ ·H ₂ O	0.860	18.38	18.65	5.14×10^{-2}	0.91
55	BaCl ₂ ·H ₂ O	0.840	17.51	18.39	4.57×10^{-1}	0.99
60	BaCl ₂ ·H ₂ O	0.830	17.11	19.48	9.79×10^{-1}	0.98
65	BaCl ₂ ·H ₂ O	0.820	16.72	18.20	2.08	0.99
35	K ₂ SO ₄	0.967	24.29	30.97	5.19×10^{-2}	0.97
45	K ₂ SO ₄	0.961	23.36	30.60	1.15×10^{-1}	0.99
55	K ₂ SO ₄	0.955	22.53	27.90	7.92×10^{-1}	0.93
60	K ₂ SO ₄	0.952	22.14	29.40	2.16	0.99
65	K ₂ SO ₄	0.949	21.78	26.83	3.87	1.00

¹ Calculated from Henderson's equation

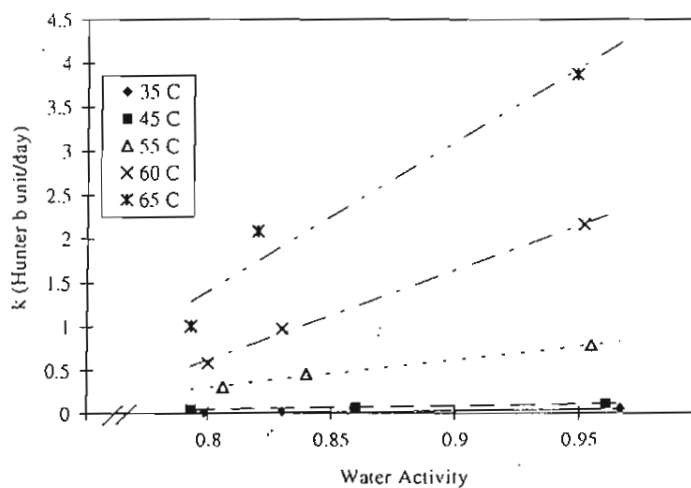


Figure 2 Relationship between rate of yellowing and water activity at different temperatures.

วิเคราะห์ สามารถหาค่า E_a และ $\ln k_0$ ได้จากความสัมพันธ์และจุดตัดแกนตั้งของกราฟตามลำดับ โดยค่าต่าง ๆ แสดงไว้ใน Table 2 และเมื่อนำค่า E_a และ $\ln k_0$ มาพลอตกราฟสัมพันธ์กับ a_w จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงดัง Figures 5 และ 6 ตามลำดับ โดยได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5) และ (6)

$$E_a = 215499.5 - 89069.28a_w \quad (5)$$

$$\ln k_0 = 71.87 - 25.32a_w \quad (6)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (5) และ (6) ลงในสมการที่ (4) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง k , T และ a_w ดังนี้

$$\ln k = 71.87 - 25.32a_w - \frac{25919.13}{T} + \frac{10712.78a_w}{T} \quad (7)$$

หรือแสดงด้วยสมการย่อเป็น

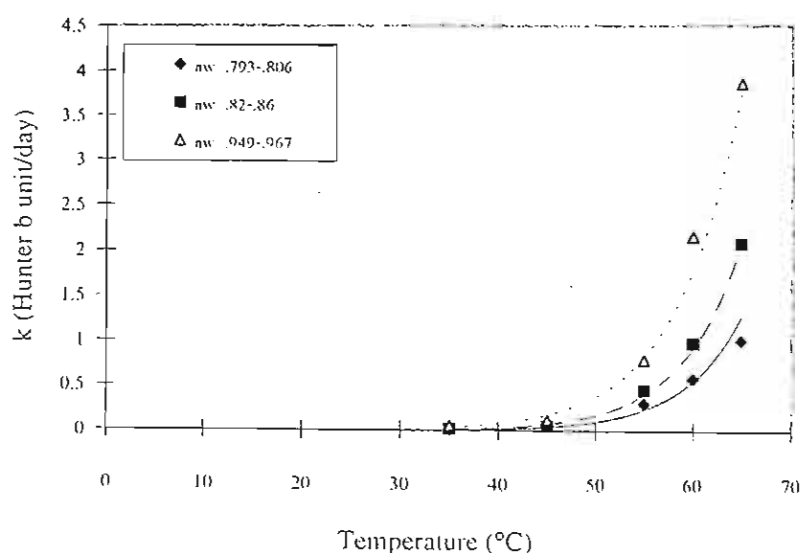


Figure 3 Relationship between rate of yellowing and temperature at different water activities.

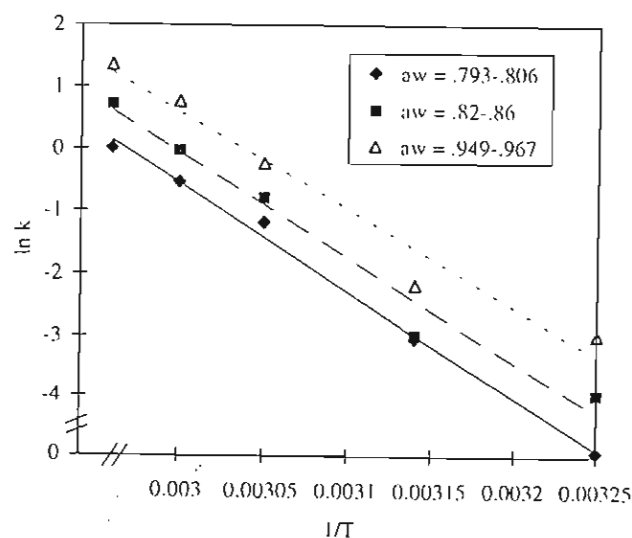


Figure 4 Relationship between $\ln k$ and $1/T$.

$$\ln k = \alpha - \delta a_w - \epsilon/T + (\gamma a_w)/T \dots\dots (8)$$

เมื่อ k = อัตราการเหือง, b unit/day

a_w = water activity, decimal

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์, K

α = 71.87 δ = 25.32

ϵ = 25919.13 γ = 10712.78

สมการนี้ใช้ได้ที่อุณหภูมิ 308-338 K และ water activity 0.80-0.95

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี analysis of variance แสดงใน Table 3 เห็นได้ว่าค่า F_o ของ อุณหภูมิ water activity และปฏิสัมพันธ์ร่วม ที่ได้จากการคำนวณ มีค่ามากกว่าค่า F_o จากตาราง F-distribution ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งอุณหภูมิ water activity

และปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสองปัจจัยดังกล่าว มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเหืองของข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงเส้นตรงที่เลือกใช้พบว่า แบบจำลองที่เลือกใช้เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และสมมติฐานที่ตั้งไว้นั้นถูกต้อง นั่นคือปัจจัยทั้งสองและปฏิสัมพันธ์ร่วมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเหืองของข้าวเปลือก ซึ่งทราบจาก normal probability plot ที่มีการกระจายเป็นปกติมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง (Figure 7) และจาก residuals plot (Figure 8) ซึ่งได้กราฟที่ไม่มีรูปแบบเฉพาะใด ๆ (structureless) และข้อมูลส่วนใหญ่ตกอยู่ในช่วงกลาง ๆ

Table 2 Activation energy and $\ln k_0$ at different water activities.

Range of water activity	Activation energy (J/mole)	$\ln k_0$	r^2
0.793-0.806	144,740	51.68	0.99
0.820-0.86	140,620	50.69	0.97
0.949-0.967	130,360	47.65	0.96

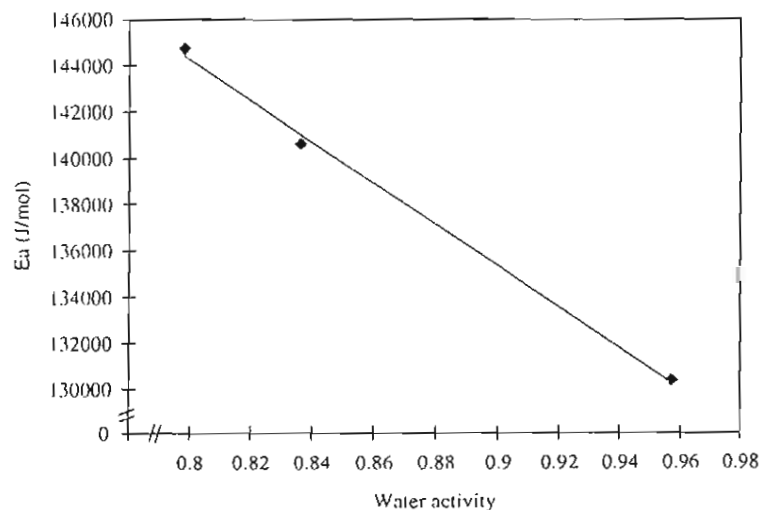


Figure 5 Relationship between activation energy (Ea) and water activity.

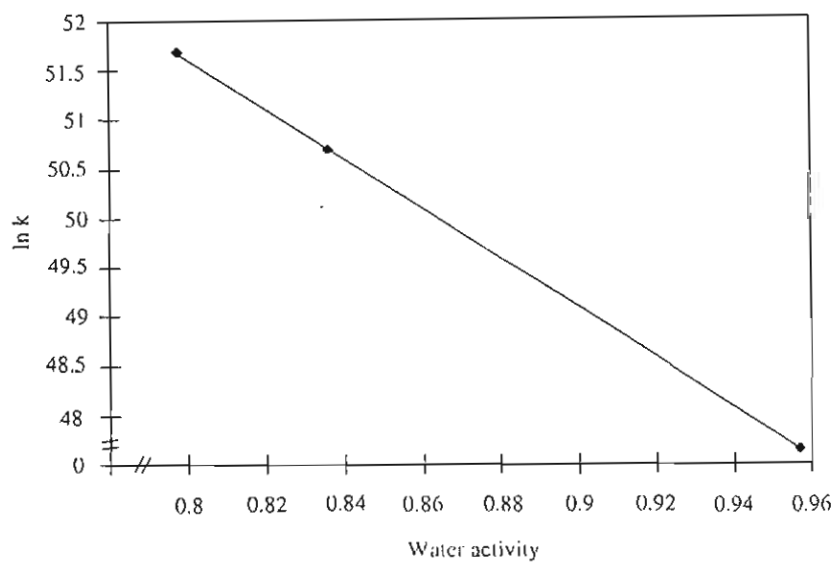


Figure 6 Relationship between $\ln k_0$ and water activity.

Table 3 Variance analysis of rate of yellowing.

Source of variation	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F ₀
Temperature	22.20	4	5.55	21788.14
Water activity	5.31	2	2.66	10432.82
Interaction	5.94	8	0.74	2913.31
Error	3.82×10^{-3}	15	2.55×10^{-4}	
Total	33.45	29		

สรุป

อัตราการเหลืองของข้าวเปลือกเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ มีค่าพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 130-145 kJ/mol โดยที่ค่าของอัตราการเหลืองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับ water activity และมีความสัมพันธ์แบบ exponential กับอุณหภูมิ สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ได้คือ

$$\ln k = \alpha - \delta a_w - \epsilon/T + (\gamma a_w)/T$$

เมื่อ k = อัตราการเหลือง b unit/day

a_w = water activity, decimal

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์, K

α = 71.87 δ = 25.32

ϵ = 25919.13 γ = 10712.78

สมการนี้ใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิ 308-338 K และ

water activity ในช่วง 0.80-0.95

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าอุณหภูมิ water activity และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเหลืองของข้าวเปลือก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และจาก

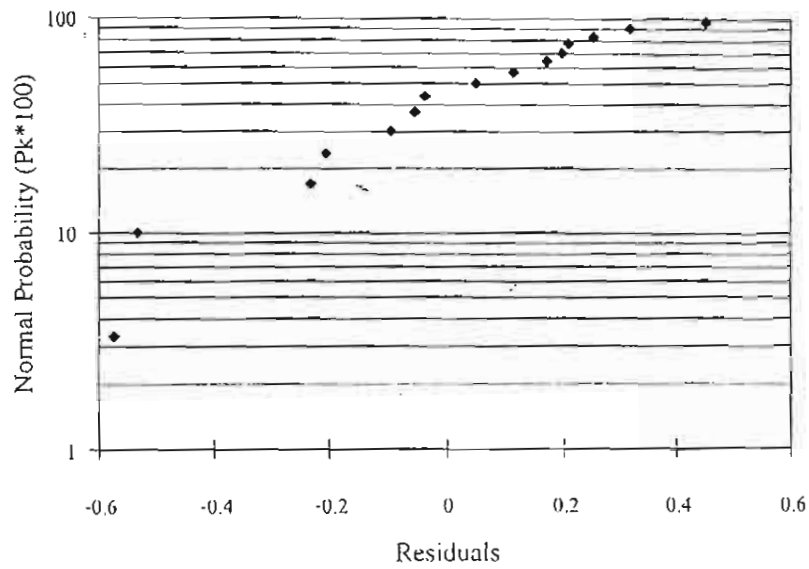


Figure 7 Normal probability plot.

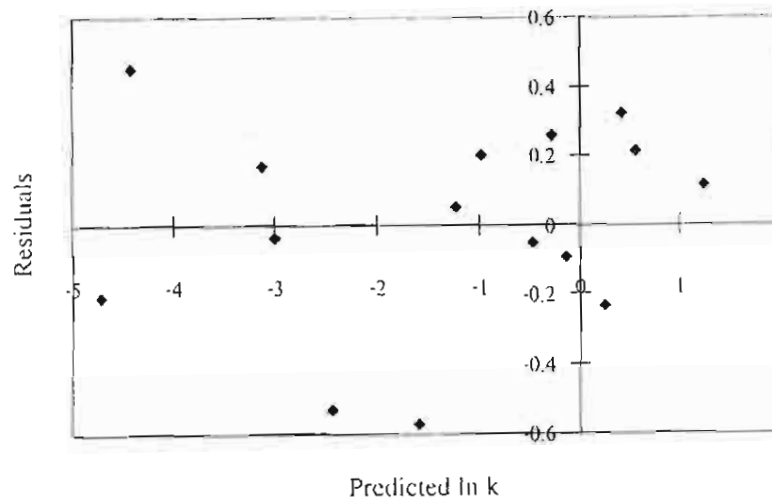


Figure 8 Plot of residuals versus predicted value.

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงเส้น
ตรงที่เลือกใช้พบว่า เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการ
ทดลองและสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่า ปัจจัยทั้งสองและปฏิ
สัมพันธ์ร่วมของทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อการเคลื่อน
ของข้าวเปลือก นั้นถูกต้อง

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการ
วิจัยและสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่ง
ชาติ ที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย และ
ขอบคุณศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานีที่ให้ความอนุเคราะห์

ในการทดสอบคุณภาพข้าว

เอกสารอ้างอิง

- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2537. การอบแห้งเมล็ดพืช. พิมพ์ครั้งที่ 6, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ. 384 น.
- ASTM. 1991. Standard Recommended Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions. American Society for Testing and Materials. Philadelphia.
- Bason, M.L., P.W. Gras, H.J. Banks, and L.A. Esteves. 1990. A quantitative study of the influence of temperature, water activity and storage atmosphere on the yellowing of paddy endosperm. *J. Cereal Sci.* 12 : 193-201.
- Gras, P.W., H.J. Banks, M.L. Bason, and L.P. Arriola. 1989. A quantitative study of the influence of temperature, water activity and storage atmosphere on the yellowing of milled rice. *J. Cereal Sci.* 9 : 77-89.
- Phillips, S., R. Mitfa, and A. Wallbridge. 1989. Rice yellowing during drying delays. *J. Stored Products Research* 25 : 155-164.
- Phillips, S., S. Winjaja, A. Wallbridge, and R. Cooke. 1988. Rice yellowing during post-harvest drying by aeration and during storage. *J. Stored Products Research* 24 : 173-181.
- Yap, A.B., B.O. Juliano, and C.M. Perez. 1988. Artificial yellowing of rice at 60°C, pp. 1-31 *In* The 11th ASEAN Technical Seminar on Grain Post-Harvest Technology, August 23-26, 1988, Kuala Lumpur.

วันรับเรื่อง : 19 ส.ค. 40

วันรับตีพิมพ์ : 2 มี.ค. 41

ผลพลอยได้จากการอบแห้งข้าวเปลือก โดยใช้เทคนิคฟลูอิดไอเซชัน*

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์** อติเทพ ทวีรัตนพาณิชย์*** สัมบูรณ์ เวชกามา****
_____ งามชื่น คงเสรี***** และ สุนันทา วงศ์ปิยชน*****

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงผลพลอยได้จากการอบแห้งข้าวเปลือก ที่ระดับความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกค่าต่าง ๆ โดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูง ๑๔๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณข้าวตัน (head rice) ได้ โดยคุณภาพของข้าวเปลือกโดยรวมอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ปริมาณข้าวตันสูงสุดเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วงร้อยละ ๑๙-๒๒ มาตรฐานเปียก ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณข้าวตัน คือ ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก และการทำกระบวนการเทมเปอร์ (tempering) เมื่อพิจารณาปัจจัยอุณหภูมิอากาศอบแห้งในช่วง ๑๔๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส พบว่าให้ผลการเพิ่มปริมาณข้าวตันใกล้เคียงกัน

ABSTRACT : SPIN-OFF FROM PADDY DRYING BY FLUIDIZATION TECHNIQUE*

* Paper presented at the Royal Institute, Bangkok, March 18, 1998.

Somchart Soponronnarit**

Fellow of the Royal Institute; Professor, School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok.

Aditthep Taweerattanapanish***

Master Degree Student, School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok.

Somboon Wetchacama****

Lecturer, School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok.

* บรรยายในการประชุมสำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน เมื่อวันที่ ๑๘ มีนาคม ๒๕๔๑

** ราชบัณฑิต ประเภทวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สำนักวิทยาศาสตร์; ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

*** นักศึกษาระดับปริญญาโท คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

**** อาจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

***** ผู้เชี่ยวชาญวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี, ปทุมธานี

***** นักวิชาการเกษตร ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี, ปทุมธานี

Ngamchuen Kongseree*****

Post Harvest Expert, Pathum Thani Rice Research Center, Pathumthani.

Sunanta Wongpiyachon*****

Agriculturist, Pathum Thani Rice Research Center, Pathumthani.

This paper describes the spin-off from fluidized bed paddy drying by high air temperature at various initial and final moisture contents. Experimental results showed that head rice yield could be increased while other qualities of rice were acceptable. Maximum value of head rice yield was obtained when final moisture content of paddy was in the range of 19-22 % wet-basis. The factors affecting the increase of head rice yield were initial and final moisture content of paddy and tempering process while drying air temperature of 140 and 150 °C gave similar result.

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีผลผลิตทางการเกษตรหลัก คือ ข้าว ข้าวโพด และพืชอื่น ๆ โดยเฉพาะข้าวซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญที่สุดของประเทศ เพราะนอกจากข้าวจะเป็นอาหารหลักของคนไทยแล้ว ยังเป็นสินค้าส่งออกที่ทำรายได้เข้าประเทศในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก ประเทศไทยสามารถผลิตข้าวเปลือกได้ประมาณ ๒๐ ล้านตันต่อปี

ปัญหาการขาดแคลนแรงงานเพื่อการเกษตรส่งผลให้มีการใช้เครื่องเกี่ยวนามากขึ้น เครื่องเกี่ยวนามที่มีประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวข้าวในขณะที่ข้าวเปลือกมีความชื้นค่อนข้างสูง รวมไปถึงการปลูกข้าวนาปรังซึ่งต้องเก็บเกี่ยวในฤดูฝนมีเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นข้าวเปลือกที่ได้มักมีความชื้นสูง ทำให้เครื่องอบแห้งเป็นสิ่งจำเป็นมากขึ้น

การอบแห้งโดยใช้เทคนิคฟลูอิดิเซชัน^(๑-๓) มีข้อดีคือ การกระจายความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งมีความสม่ำเสมอให้อัตราการลดความชื้นสูงกว่าแบบอื่น จึงใช้

เวลาน้อยกว่า

ในลักษณะเชิงพาณิชย์ของข้าว ราคาข้าวจะแปรผันกับคุณภาพข้าว เช่น ร้อยละข้าวตัน ความขาวของข้าว โดยเฉพาะร้อยละข้าวตันจะมีผลอย่างมากต่อราคาข้าว ดังนั้น การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงโดยใช้เทคนิคฟลูอิดิเซชันเพื่อการเพิ่มปริมาณข้าวตัน จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมข้าวของประเทศ

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดิเซชันชนิดอบแห้งเป็นวง มีห้องอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ๒๐ เซนติเมตร สูง ๑๔๐ เซนติเมตร อุปกรณ์ให้ความร้อนขนาด ๑๒ กิโลวัตต์ โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิตามต้องการ พัดลมที่ใช้ในการอบแห้งเป็นแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางใบพัดโค้งหลัง ใช้ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ขนาด ๑.๕ กิโลวัตต์ มีตัวปรับความเร็วรอบของพัดลม

เพื่อให้ได้อัตราการไหลของอากาศตามต้องการ บริเวณทางออกและท่ออากาศเวียนกลับติดตั้ง วาล์วเพื่อปรับอัตราการหมุนเวียนกลับของ อากาศกลับมาใช้ใหม่ รายละเอียดดังกล่าวดู ได้จาก รูปที่ ๑

วิธีการทดลองที่ใช้ในงานวิจัย

ในการทดลองได้นำข้าวเปลือกที่มีความชื้นร้อยละ ๒๓-๓๑ มาตรฐานเปียก มาอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูง คือ

ในเครื่องอบแห้งแบบถาด จนข้าวเปลือกเหลือ ความชื้นสุดท้ายที่ร้อยละ ๑๔ มาตรฐานเปียก หลังจากนั้นจึงนำข้าวไปสีต่อไป

ลักษณะที่ ๒ นำข้าวที่ผ่านการอบแห้ง แล้วมาผ่านการเทมเปอร์ ซึ่งก็คือการนำข้าว เปลือกที่ผ่านการอบแห้งมาให้ความร้อนต่อ ทันทีในขวดอับอากาศภายในตู้เป็นเวลา ๑๒ ชั่วโมง (สำหรับข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๐.๗ มาตรฐานเปียก ใช้อุณหภูมิ

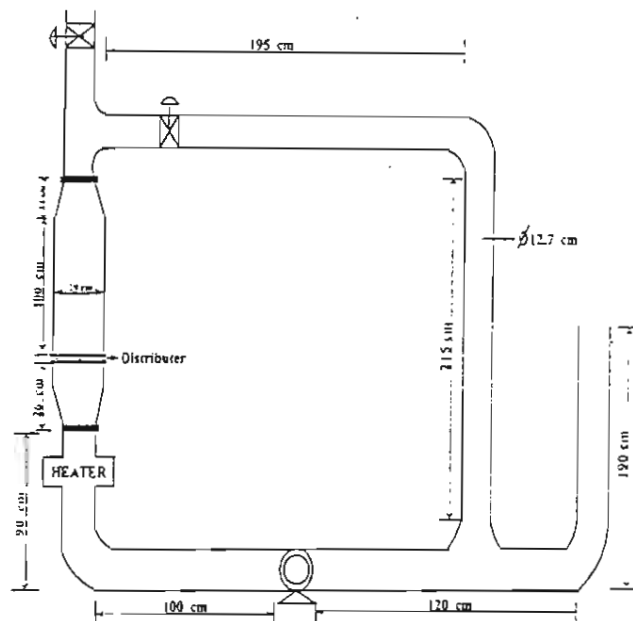


Figure 1 Diagram of Fluidized Bed Dryer

๑๔๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส อบแห้งจน เหลือความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกอยู่ใน ช่วงร้อยละ ๑๓-๒๔ มาตรฐานเปียก จากนั้น นำข้าวที่ผ่านการอบแห้งแล้วไปปฏิบัติการต่อ ใน ๒ ลักษณะคือ

ลักษณะที่ ๑ นำข้าวที่ผ่านการอบแห้ง มาปล่อยไว้ให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องประมาณ ๒๐-๓๐ นาที จากนั้นนำไปเป่าด้วยอากาศเย็น

ของข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งเป็น อุณหภูมิสำหรับการเทมเปอร์ ขณะที่ความชื้น เริ่มต้นของข้าวเปลือกค่าอื่น ๆ ใช้อุณหภูมิ สำหรับการเทมเปอร์เท่ากับ ๖๐ องศาเซลเซียส) จากนั้นจึงนำข้าวไปเป่าด้วยอากาศเย็น ในเครื่องอบแห้งแบบถาด จนข้าวเปลือกเหลือ ความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ ๑๔ มาตรฐาน เปียก หลังจากนั้นจึงนำข้าวไปสีต่อไป