การอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังทรงกระบอกหมุน

กิตติพงษ์ กุลมาตย์, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และปราศรัย ชลิดาพงศ์
กณะพลังงานและวัสดุ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถนนสุขสวัสดิ์ 48 กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกที่ช่วงความชื้นสูงโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนชนิดอากาศสัมผัสกับข้าวเปลือกโดยตรงและไหลตามกัน เพื่อหาแนวทางในการอบแห้งที่เหมาะสม โดยพิจารณาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณภาพข้าวเปลือก ความสิ้นเปลืองพลังงาน และอัตราการผลิต เป็นสำคัญ จากการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อ Residence time distribution พบว่าอัตราการป้อนข้าวเปลือกสูง มุมเอียงของตัวถังทรงกระบอกสูง หรืออัตราการหมุนตัวถังทรงกระบอกสูง จะทำให้ค่า Residence time distribution น้อย สมการทำนายค่า Mean residence time ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่า Mean residence time ได้ดี สมการทำนายอัตราการอบแห้งที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ดีเช่นกัน จากผลการทดลองพบว่าอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานในรูปพลังงานปฐมภูมิมีค่าประมาณ 8-25 MJ/kg-water คิดเป็นพลังงานความร้อน 76% และพลังงานไฟฟ้า 24% ความสิ้นเปลืองพลังงานจะต่ำเมื่อ hold-up มีค่ามาก คุณภาพของข้าวเปลือกในรูปของความขาวสัมพัทธ์และเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์อยู่ในเกณฑ์ดี โดยลดต่ำลงเล็กน้อยเมื่อความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกมีค่าลดลง จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาจุดเหมาะสมในการอบแห้ง โดยใช้อุณหภูมิอากาศขาเข้า 115°C อบแห้งข้าวเปลือกความชื้น 30% มาตรฐานแห้ง จนเหลือความชื้น 22-23% มาตรฐานแห้ง พบว่าที่อัตราการไหลอากาศจำเพาะต่ำจะทำให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำและให้อัตราการผลิตสูง ส่วนอัตราการหมุนเวียนอากาศกลับที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 75%

คำสำคัญ : การอบแห้งข้าวเปลือก / เครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุน / Residence time

Rotary Drying of Paddy

Kittipong Kullamart, Somchart Soponronnarit and Prasal Chalidapongse

School of Energy and Materials

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

Abstract

The objective of this research is to study strategies for drying high moisture paddy by co-current rotary dryer. Criteria for the study are quality of paddy, energy consumption and drying capacity. Experimental result showed that residence time distribution decreased when feed rate of paddy, slope or rotation speed of cylinder were increased. The mean residence time equation developed was found to be accurate and so was the drying equation. Energy consumption was 8-25 MJ/kg-water or equal to 76% thermal energy and 24% electrical energy in terms of primary energy. If moisture content of paddy decreased or energy consumption increased while with hold-up increased, energy consumption decreased. Grain quality was determined in terms of relative whiteness and relative head yield. It was found that average grain quality was quite well but decreased slightly when the final moisture content decreased. The mathematical model was used to determinate the appropriate drying strategy. Inlet air temperature was fixed at 115^{o}C and initial moisture content of paddy was 30% dry basis. Final moisture content was limited to 22-23% dry basis. It was found that at a low specific air flow rate, the primary energy consumption was considerably low and the drying capacity was high. The appropriate fraction of air recycled was 75%.

Keywords : Paddy drying / Rotary dryer / Residence time

บทนำ

วัตถุประสงค์สำคัญของการอบแห้งข้าวเปลือกคือการลดความชื้นของข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว จาก 20-25 % wb ให้เหลือความชื้นประมาณ 14 % wb ซึ่งจะเหมาะต่อการเก็บรักษาและทำให้ขายได้ราคาดี แนวทางของการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกในเขตร้อนชื้นควรจะเป็นการอบแห้งแบบเร็วในตอนแรก เพื่อลดความชื้นให้เหลือประมาณ 18 % wb หลังจากนั้นจึงควรอบแห้งต่อในถังเก็บจนความชื้นลดลงถึงระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ [1])

การอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังทรงกระบอกหมุนเป็นการอบแห้งแบบรวดเร็ว เหมาะกับข้าวเปลือกช่วงความชื้นสูง จัดเป็นเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล โดยทั่วไปใช้อบแห้งวัสดุที่เป็นเม็ดเป็นสะเก็ดและเป็นก้อน สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูง ๆ และอบแห้งอย่างต่อเนื่อง

ได้ในปริมาณมาก อีกทั้งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งมีความชื้นค่อนข้างสม่ำเสมอ (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล [2])

เครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนประกอบด้วย ตัวถังทรงกระบอกที่ทำมุมเอียงเล็กน้อยกับแนวระดับ เมล็ดพืชชื้นจะถูกนำเข้าทางด้านสูงและเมล็ดพืชแห้งจะไหลออกทางด้านต่ำ ภายในตัวถังมีตัวตัก (Flights) ติดอยู่ที่ผนังตามแนวนอน ขณะที่ตัวถังหมุนเมล็ดพืชจะถูกตักขึ้นไปตามเส้นรอบวง แล้วตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และปะทะกับกระแสอากาศร้อน การอบแห้งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นขณะที่เมล็ดพืชตกผ่านกระแสอากาศร้อน ลักษณะการไหลของกระแสอากาศกับเมล็ดพืชเป็นแบบไหลตามกัน ซึ่งจะเหมาะกับการอบแห้งเมล็ดพืช

ไพบูรย์ โรจน์วิบูลย์ชัย และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ [3] ศึกษาการอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดไหลตามกัน การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองหาสมการ Mean residence time และการทดลองเพื่อศึกษาข้อมูลการอบแห้ง เช่น ความสิ้นเปลืองพลังงาน การถ่ายเทความร้อน พบว่า สมการที่ได้ขึ้นกับตัวแปร 4 ตัวคือ อัตราการป้อนข้าวโพด อัตราการหมุนของตัวถังทรงกระบอก ความลาดเอียงของตัวถังทรงกระบอก และความเร็วลม ดังสมการ

$$t_m = t_1 + t_2 \qquad (1)$$

$$t_m = A[L/(N^n D \tan\theta)] + Bv \qquad (2)$$

โดย $\ln(A) = (0.3151\theta - 0.468548)\ln(F) - 1.9596\theta^{(-0.393504)}$

$n = (0.048081F + 0.50289)\theta - (0.0609811F - 0.42703)$

$B = 0.13894(t_1 F) - 2.82856$

ผลการทดลองแสดงว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนข้าวโพด อัตราการหมุนตัวถังทรงกระบอก มุมเอียงของตัวถังทรงกระบอก หรืออัตราการไหลของอากาศ ค่า Mean residence time จะมีค่าลดลง สมการที่ได้สามารถนำมาอธิบายค่า Mean residence time ได้ดีพอสมควร ความสิ้นเปลืองพลังงานขึ้นกับปริมาณข้าวโพดภายในตัวถังทรงกระบอก(hold-up) เมื่อปริมาณข้าวโพดมากขึ้นความสิ้นเปลืองพลังงานจะน้อยลง เมื่อความชื้นข้าวโพดลดลงความสิ้นเปลืองพลังงานจะเพิ่มขึ้น เพราะที่ความชื้นต่ำน้ำจะระเหยออกมาจากข้าวโพดได้ยาก สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อคิดเทียบกับปริมาตรตัวถังทรงกระบอกขึ้นกับ ความเร็วลม อัตราการหมุนของตัวถังทรงกระบอก และปริมาณข้าวโพดที่อยู่ภายในตัวถังทรงกระบอก ในการอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุน ควรใช้อุณหภูมิของกระแสอากาศที่ค่อนข้างสูงหากไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และไม่ควรอบแห้งจนผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำเกินไป นอกจากนี้ยังควรพิจารณาการอบแห้งที่ hold-up สูง ๆ ด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสม พัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ และศึกษา Residence time distribution ของข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนชนิดไหลตามกัน

วิธีการ

1. การทดลอง

การทดลองนี้ใช้เครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนของ ไพบูรย์ โรจน์วิบูลย์ชัย และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ [3] ซึ่งแสดงดัง Fig.1 เป็นเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนชนิดอากาศสัมผัสกับข้าวเปลือกโดยตรงและไหลตามกัน ประกอบด้วยตัวถังทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 เมตร ยาว 1.5 เมตร สามารถปรับความลาดเอียงได้ ตัวตักที่ใช้ปลายงอทำมุม 90 องศา จำนวน 8 ตัว ประกอบอยู่ในตัวถังทรงกระบอกเพื่อช่วยในการผสมกันระหว่างวัสดุเปียกกับอากาศร้อน ชุดทดรอบประกอบด้วยมอเตอร์ ตัวปรับความเร็วและเกียร์ทด มอเตอร์มีขนาด 1 กำลังม้า ตัวให้ความร้อนมีกำลัง 13.6 kW ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ตัวป้อนเป็นตัวป้อนแบบหมุนมีมอเตอร์ขนาดกำลัง 90 W พัดลมใช้พัดลมแบบเหวี่ยง ใบพัดโค้งหน้า มอเตอร์ 1/4 กำลังม้า ปรับความเร็วกระแสอากาศโดยใช้ลิ้นแบบผีเสื้อ

การทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน ในส่วนที่ 1 นั้นเป็นการทดลองหาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อ Residence time distribution ส่วนที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อสร้างสมการทำนาย Mean residence time ส่วนที่ 3 เป็นการทดลองอบแห้งเพื่อศึกษาอิทธิผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ผลต่อ คุณภาพข้าวเปลือก ความสิ้นเปลืองพลังงาน และอัตราการผลิต

1.1 การทดลองหา Residence time distribution

ในการทดลองหา Residence time distribution ศึกษาโดยใช้ tracer ด้วยการนำข้าวเปลือกไปย้อมสี วิธีการทดลองโดยการปรับมุมเอียงและอัตราการหมุนตัวถังทรงกระบอก อัตราการป้อนข้าวเปลือกและอัตราการไหลของอากาศตามสภาวะที่ต้องการศึกษา รอให้เข้าสู่สถานะคงตัว แล้วจึงใส่ tracer เข้าไปในเครื่องอบแห้ง พร้อมกับรองรับข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งทันทีโดยเปลี่ยนภาชนะที่รองรับทุก 1 นาที จนกระทั่ง tracer ออกจากเครื่องอบแห้งจนหมด หาน้ำหนัก tracer ที่ออกมาในแต่ละช่วง คำนวณหาสัดส่วนของ tracer จากสมการ

$$E(t) = F\,C(t)/Q \qquad (3)$$

เมื่อ $E(t)$ = สัดส่วนของอนุภาคที่ออกจากเครื่องอบแห้งที่มีเวลาอยู่ในช่วง t ถึง $t+\Delta t$

F = อัตราการป้อนของข้าวเปลือก, kg/min

$C(t)$ = สัดส่วนโดยน้ำหนักของข้าวเปลือกย้อมสีในภาชนะที่เวลาใด ๆ

Q = น้ำหนักของข้าวเปลือกย้อมสีทั้งหมดที่ใส่เข้าไปในเครื่องอบแห้ง, kg

แล้วพล็อตกราฟระหว่างค่า E กับ t จะได้กราฟ Residence time distribution ของข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนของแต่ละสภาวะ แล้วนำกราฟของแต่ละสภาวะที่เราสนใจมาเปรียบเทียบกัน

1.2 การทดลองหา Mean residence time

การทดลองหา Mean residence time ของเครื่องอบแห้งแบบหมุน แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ไม่ใช้ความเร็วลม และส่วนที่ใช้ความเร็วลม ส่วนที่ไม่ใช้ความเร็วลมมีตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการป้อนข้าวเปลือก อัตราการหมุน และมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอก เริ่มการทดลองโดยกำหนดให้อัตราการป้อนข้าวเปลือกและมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอกมีค่าคงที่ แล้วเลือกอัตราการหมุนของตัวถังทรงกระบอกค่าหนึ่ง ทำการเดินเครื่องประมาณ 30 นาที เพื่อรอให้เข้าสู่สถานะคงตัว แล้วหยุดเครื่องทันที จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ค้างอยู่ในถังทรงกระบอกออกมาชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาค่า Mean residence time จากสมการ (4) จากนั้นเปลี่ยนค่าอัตราการหมุนของตัวถังทรงกระบอกค่าต่อไป แล้วทำการทดลองเหมือนเดิม เมื่อทดลองที่ค่าอัตราการหมุนตัวถังทรงกระบอกจนครบแล้ว ให้เปลี่ยนมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอกแล้วเริ่มทดลองที่ค่าอัตราการหมุนตัวถังทรงกระบอกใหม่ และเมื่อเปลี่ยนค่ามุมเอียงของตัวถังทรงกระบอกครบแล้ว จึงเปลี่ยนค่าอัตราการป้อนเมล็ดข้าวเปลือก ส่วนกรณีที่ใช้ความเร็วลม กำหนดให้อัตราการหมุนและมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอกมีค่าคงที่ แต่เปลี่ยนค่าอัตราการป้อนเมล็ดข้าวเปลือกและความเร็วของกระแสอากาศ แล้วทำการทดลองหา Mean residence time เหมือนกรณีไม่ใช้ความเร็วลม

1.3 การทดลองอบแห้ง

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้อุณหภูมิของกระแสอากาศที่ 115 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่ Soponronnarit and Prachayawarakorn [4] แนะนำโดยที่คุณภาพข้าวยังไม่เสียหาย ข้าวเปลือกที่เข้าอบแห้งมีความชื้นประมาณ 32 % มาตรฐานแห้ง การทดลองครั้งแรกใช้มุมเอียง 0.5 องศา อัตราการหมุน 15 rpm อัตราการป้อน 0.5 kg/min และความเร็วกระแสอากาศ 0.5 m/s ทำการอบแห้งเป็นเวลา 40 นาที พร้อมกับเก็บข้อมูลการใช้พลังงานที่อุปกรณ์ต่าง ๆ นำข้าวเปลือกที่อบแห้งได้ไปหาความชื้นและทดสอบคุณภาพทางการสี การทดลองครั้งที่สองทำอย่างการทดลองแรก แต่เปลี่ยนความเร็วลมเป็น 1 m/s และการทดลองครั้งต่อไปก็ปรับตัวแปรที่เราสนใจศึกษาคือ อัตราการหมุนตัวถังทรงกระบอก มุมเอียงของตัวถังทรงกระบอก และอัตราการป้อนข้าวเปลือก แล้ววิเคราะห์หา อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน อัตราการผลิต และคุณภาพของผลิตภัณฑ์

2. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังทรงกระบอกหมุนนี้ ได้พัฒนาโดยใช้รูปแบบสมการของ ไพบูรย์ โรจน์วิบูลย์ชัย และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ [3] หาสมการทำนายเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง นำรูปแบบสมการของ Page [5]

มาพัฒนาสมการทำนายอัตราการอบแห้ง นำกฎสมดุลมวลและกฎสมดุลพลังงานมาใช้ในการทำนายความสิ้นเปลืองพลังงาน

2.1 แบบจำลองสำหรับหา Mean residence time

สมการเวลาที่ใช้ในการอบแห้งหาได้จากการทดลองในช่วงอัตราการหมุนตัวถังทรงกระบอก 7-20 rpm มุมเอียงของตัวถังทรงกระบอก 0.3-1 องศา อัตราการไหลของอากาศ 0-1 m/s และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 0.3-1 kg/min จากการทดลองสามารถหาเวลาเฉลี่ยได้จากสมการ

$$t_m = II/F \quad (4)$$

ฟิตเวลาเฉลี่ยของข้าวเปลือกที่อยู่ในเครื่องอบแห้งเข้ากับรูปแบบสมการของไพบูรย์ โรจน์วิบูลย์ชัย และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ ดังสมการ

$$t_m = A[L/(N^n D\tan\theta)] + Bv \quad (5)$$

จากนั้นใช้หลักสมการถดถอยหาค่า A, n และ B ได้ดังแสดงไว้ในส่วนผลการทดลอง

2.2 แบบจำลองการอบแห้ง

สมการการอบแห้งข้าวเปลือกได้จากการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุน ที่อุณหภูมิ 115 °C อัตราการไหลอากาศจำเพาะ 0.007-0.042 kg/s-kg dry hold-up อัตราการหมุนตัวถังทรงกระบอก 15-20 rpm มุมเอียงตัวถังทรงกระบอก 0.1-1 องศา ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 32 % db จากผลการทดลองหาอัตราการอบแห้งได้จากสมการ

$$MR = (M(t)-M_{eq})/(M_{in}-M_{eq}) \quad (6)$$

ฟิตอัตราการอบแห้งเข้ากับรูปแบบสมการอบแห้งของ Page [5] ดังสมการ

$$MR = \exp(-Xt^Y) \quad (7)$$

ใช้หลักสมการถดถอยหาค่า X และ Y ได้ดังแสดงไว้ในส่วนผลการทดลอง

สมการความชื้นสมดุลหาจากสมการของ ชอบ ลายทอง [6] มีรูปแบบดังนี้

$$1-RH = \exp(c_1(1.8T+491.7)(100M_{eq})^{c_2}) \quad (8)$$

โดย $c_1 = -4.723\times10^{-6}$

$c_2 = 2.386$

2.3 การคำนวณสภาวะอากาศ

อาศัยหลักสมดุลมวลและสมดุลพลังงานในการคำนวณสภาวะอากาศได้ดังนี้

2.3.1 สภาวะอากาศก่อนอบแห้ง พิจารณาปริมาตรควบคุม CV3 ใน Fig.2

$$W_{mix} = (1-RC)\,W_a + RC\,W_{out} \quad (9)$$

2.3.2 สภาวะอากาศหลังอบแห้ง พิจารณาปริมาตรควบคุม CV1 ใน Fig.2

$$T_{out} = [\,m_{mix}(C_a T_{mix}+(C_v T_{mix}+h_{fg})W_{mix})+f_d(C_p+C_w M_{in})T_{p,in}-(m_{mix}W_{out}h_{fg})-Q_{ld}]$$
$$/\,[m_{mix}(\,C_a + W_{out}C_v\,) + f_d(\,C_p + C_w\,M_{out})] \quad (10)$$

$$W_{out} = W_{mix} + (f_d/m_a)(M_{in} - M_{out}) \quad (11)$$

2.3.3 สภาวะอากาศที่เวียนกลับก่อนเข้าผสม พิจารณาปริมาตรควบคุม CV2 ใน Fig.2

$$T_{rc} = [T_{out}(C_a+W_{out}C_v)-(Q_{lrc}/m_{rc})]/(C_a+W_{out}C_v) \quad (12)$$

2.3.4 อุณหภูมิของอากาศที่ผสมแล้วก่อนเข้า heater พิจารณาปริมาตรควบคุม CV3 ใน Fig.2

$$T_x = [m_a(T_a(C_a+W_aC_v)+W_ah_{fg})+m_{rc}(T_{rc}(C_a+W_{out}C_v)+W_{out}h_{fg})-m_{mix}W_{mix}h_{fg}]$$
$$/[m_{mix}(C_a+W_{mix}C_v)] \quad (13)$$

2.4 การคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงาน

1.ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน พิจารณาปริมาตรควบคุม CV4 ใน Fig.2

$$Q_h + Q_l = m_{mix}(C_a + C_vW_{mix})(T_{mix}-T_x) \quad (14)$$

2.ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

จากผลการทดลอง คำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า แยกอุปกรณ์ต่าง ๆ คือ มอเตอร์หมุนพัดลมดูดอากาศ มอเตอร์หมุนตัวป้อนข้าวเปลือก และมอเตอร์หมุนตัวถังทรงกระบอก โดยคำนวณอัตราความสิ้นเปลืองปริมาณการใช้ไฟฟ้าในรูปพลังงานปฐมภูมิ ดังนี้

$$E_{fan} = 0.36 + 0.06\,v \quad (15)$$

$$E_{rot} = 0.356666 + 0.026\,N \quad (16)$$

$$E_{feed} = 0.16 \quad (17)$$

2.5 ขั้นตอนการคำนวณ

แสดงขั้นตอนการคำนวณหลักๆ ไว้ใน Flow chart ดัง Fig.3 คือ เริ่มจากคำนวณหา Mean residence time จากสมการ (5) แล้วคำนวณ W_{mix} จากสมการ (9) โดยสมมติ W_{out1} ให้เท่ากับ 0.02 คำนวณหา M_{eq} จากสมการ (8) คำนวณหา MR และ M_{out} จากสมการ (7) และ (6) แล้วคำนวณหา W_{out} จากสมการ (11) เปรียบเทียบค่า W_{out} ที่คำนวณได้กับค่า W_{out1} ที่สมมติขึ้น ถ้าผลต่างมีค่ามากกว่า 0.00001 ให้กลับไปคำนวณใหม่โดยสมมติค่า W_{out1} ใหม่ เท่ากับค่า W_{out} จากสมการ (11) ถ้าผลต่างระหว่าง W_{out} กับ

W_{out1} มีค่าน้อยกว่า 0.00001 แล้ว จึงคำนวน T_{out},T_{rc} และ T_x จากสมการ (10),(12),(13) ตามลำดับ หลังจากนั้นคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจากสมการ (14)-(17)

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ต่อ Residence time distribution(RTD)

จากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น อัตราการหมุนตัวถังทรงกระบอกสูงขึ้น หรือมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอกมากขึ้น จะทำให้ RTD น้อยลง ดัง Fig.4-6 เนื่องจากเวลาที่ใช้น้อยลง ดังนั้นโอกาสในการกระเด้งกระดอนน้อยลง เป็นผลให้การกระจายของเวลาน้อยลง ส่วนการเพิ่มอัตราการป้อนข้าวเปลือกจะมีผลทำให้ RTD น้อยลงเล็กน้อย ดัง Fig.7 เพราะเมื่อเพิ่มอัตราการป้อน จะทำให้ปริมาณข้าวเปลือกในถังทรงกระบอกเพิ่มขึ้น ข้าวที่นอนอยู่ที่ส่วนล่างเพิ่มขึ้น พื้นที่ในการกระเด้งกระดอน (คือส่วนที่เป็นตัวตัก) น้อยลง ทำให้ค่าการกระจายน้อยลง และสำหรับความชื้นของข้าวเปลือกไม่มีผลต่อ RTD ดัง Fig.8

2. การวิเคราะห์สมการ Mean residence time

2.1 พิจารณาส่วนที่ไม่ใช้ความเร็วลม

จากการทดลองหา t_1 ได้จากสมการ (4) เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t_1 กับอัตราการหมุนของตัวถังทรงกระบอก พบว่าความสัมพันธ์เป็นแบบยกกำลัง ซึ่งเป็นไปตามสมการ (5) จากสมการ (5) หาค่า n ได้โดยใช้ลอการิธึม สมการที่ได้คือ

$$\ln[t_1] = (-n)\ln(N)+\ln[\Lambda(L/D\ \tan\theta)] \qquad (18)$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[t_1]$ กับ $\ln(N)$ จะได้ค่า $-n$ และ Λ ที่ขึ้นกับอัตราการป้อนข้าวเปลือกและมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอก จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่าง $(-n)$ และ Λ กับมุมเอียงของตัวถังทรงกระบอกได้ดังสมการ

$$n = (0.8097406-0.492370F) + (-0.033137+0.561410F)\theta \qquad (19)$$

$$\Lambda = (0.0930186-0.121473F) + (0.0474537+0.143728F)\theta \qquad (20)$$

2.2 พิจารณาส่วนที่ใช้ความเร็วลม

จากการทดลองจะได้ค่า t_2 เป็นลบ เนื่องจากการไหลของกระแสอากาศกับข้าวเปลือกเป็นแบบไหลตามกัน ดังนั้นผลของความเร็วลมจึงทำให้ค่า Mean residence time น้อยลง แล้วหาความสัมพันธ์ ระหว่าง t_2 กับอัตราการไหลของอากาศได้ดังสมการ

$$t_2 = Bv \qquad (21)$$

จะได้ค่า B ที่ขึ้นกับอัตราการป้อนข้าวเปลือกค่าต่าง ๆ ซึ่งที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกค่าหนึ่งก็มี hold- up ค่าหนึ่ง (ณ ความเร็วลมเป็นศูนย์ hold-up มีค่าเท่ากับ $F\times t_1$) หาความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ hold-up ได้ดังสมการ

$$B = -3.96647 + 0.10583(H) \quad (22)$$

ซึ่งก็คือ $$B = -3.96647 + 0.10583(F \times t_1) \quad (23)$$

จากค่า (-n), A และ B ที่ได้จากการทดลอง นำลงไปแทนในสมการ (5) แล้วเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่าสามารถใช้ทำนาย Mean residence time ได้ดี

3. ผลการทดลองหาสมการอบแห้ง

จากการทดลองสามารถหาค่า X และ Y จากรูปแบบสมการของ Page [5] ดังสมการ (6) จะได้ค่า X และ Y ซึ่งขึ้นกับอัตราการไหลอากาศจำเพาะดังนี้คือ

$$X = 0.038906 - 0.264\ (m/H) \quad (24)$$

$$Y = 0.791349 + 6.99093\ (m/H) \quad (25)$$

สมการ (24) และ (25) ใช้ได้กับอุณหภูมิของอากาศ 115 °C และอัตราการไหลอากาศจำเพาะในช่วง 0.019-0.032 kg/s-kg dry hold-up เมื่อนำค่า X และ Y ที่ได้แทนในสมการ (6) แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าสามารถทำนายผลได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งของฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่องของ อรอนงค์ ศรีพวาทกุล [7] ที่อัตราการไหลอากาศจำเพาะและอุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน พบว่าแบบฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่องอบแห้งได้เร็วกว่า ดัง Fig.9 ทั้งนี้เนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกในฟลูอิไดซ์เบดมีโอกาสสัมผัสกับอากาศมากกว่า

4. ความสิ้นเปลืองพลังงาน

จากผลทดลองหาอัตราความสิ้นเปลืองพลังงาน โดยคิดในรูปพลังงานปฐมภูมิต่อปริมาณน้ำที่ระเหยพบว่า มีค่าประมาณ 8-25 MJ/kg-water แบ่งเป็นพลังงานความร้อน 76 % และพลังงานไฟฟ้าในรูปพลังงานปฐมภูมิ 24 % เมื่อความชื้นข้าวเปลือกลดลงความสิ้นเปลืองพลังงานจะเพิ่มขึ้น และที่ค่า hold-up มากหรือที่อัตราการไหลอากาศจำเพาะต่ำความสิ้นเปลืองพลังงานจะต่ำ

5. คุณภาพผลิตภัณฑ์

นำข้าวที่ผ่านการอบแห้งไปทดสอบการสีเพื่อหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งนั้นมีคุณภาพดี เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดและค่าความขาวลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดัง Fig.10 และ Fig.11 นั่นแสดงว่า อาจจะใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงกว่า 115 °C ก็ได้

6. การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม

เพื่ออบแห้งข้าวเปลือกให้ได้คุณภาพดี อบแห้งให้ได้ปริมาณมาก ๆ และประหยัดพลังงาน ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม โดยใช้อุณหภูมิ

อากาศขาเข้า 115 °C อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 30 °C ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 70 % ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 30 % db ทำการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการป้อน 1 kg/min อัตราการหมุนตัวถังทรงกระบอก 20 rpm มุมเอียงตัวถังทรงกระบอก 0.5 องศา โดยใช้อัตราการไหลอากาศจำเพาะ 3 ค่า คำนวณการอบแห้ง 2 เที่ยว จนเหลือความชื้นประมาณ 22-23 % db โดยสมมติว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งแล้ว 1 ครั้ง จะถูกเก็บไว้เป็นเวลานานพอจนความชื้นภายในเมล็ดสม่ำเสมอ ได้ผลดัง Fig.12 พบว่าที่อัตราการไหลอากาศจำเพาะต่ำมีอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำและให้อัตราการผลิตสูง เพราะที่อัตราการไหลอากาศจำเพาะต่ำ ข้าวเปลือกจะมีเวลาอยู่ในเครื่องอบแห้งนานกว่า จึงมีเวลาในการอบแห้งมากกว่า ทำให้ระเหยน้ำได้มากกว่า ในขณะที่พลังงานที่ต้องใช้ในการอุ่นอากาศน้อยกว่า และเมื่อพิจารณาอัตราการหมุนเวียนอากาศกลับที่เหมาะสม ดัง Fig.13 พบว่า ที่อัตราการไหลอากาศจำเพาะ 0.016 kg/s-kg dry hold-up ควรใช้อัตราหมุนเวียนอากาศกลับ 75 % ของอากาศที่ใช้อบแห้ง

สรุป

1. ตัวแปรที่มีผลต่อ RTD ได้แก่อัตราการไหลของอากาศ มุมเอียงหรืออัตราการหมุนของตัวถังทรงกระบอก เมื่อตัวแปรเหล่านี้มีค่ามากขึ้นจะทำให้ RTD น้อยลง

2. สมการ Mean residence time ที่สร้างขึ้นสามารถทำนายได้ดี

3. สามารถใช้รูปแบบสมการการอบแห้งของ Page [5] ทำนายการอบแห้งได้ดี

4. จากการจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าจุดเหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 115 °C คือที่อัตราการไหลอากาศจำเพาะ 0.016 kg/s-kg dry hold-up และอัตราการหมุนเวียนอากาศกลับ 75 %

รายการสัญลักษณ์

A = ค่าคงที่

B = ค่าคงที่

C = ความร้อนจำเพาะ, kJ/kg °C

C(t) = สัดส่วนโดยน้ำหนักของข้าวเปลือกย้อมสีในภาชนะที่เวลาใด ๆ

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวถังทรงกระบอก, m

E = อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในรูปพลังงานปฐมภูมิ, kW

E(t) = สัดส่วนของอนุภาคที่ออกจากเครื่องอบแห้งในช่วงเวลา t ถึง t+Δt, 1/min

F = อัตราการป้อนข้าวโพด, kg/min

f_d = อัตราการป้อนมวลแห้งข้าวโพด, kg/s

H = มวลที่ค้างอยู่ในถังทรงกระบอก(hold-up), kg

h_{fg} = ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำอิสระ, kJ/kg

L = ความยาวตัวถังทรงกระบอก, m

M = ความชื้นเมล็ดพืช, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

m = อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s

MR = อัตราส่วนความชื้น

N = อัตราการหมุนของตัวถังทรงกระบอก, rpm

n = ค่าแฟคเตอร์กำลังของอัตราการหมุน

Q = น้ำหนักข้าวเปลือกย้อมสีทั้งหมดที่ใส่เข้าไปในเครื่องอบแห้ง, kg หรือ ความร้อน, kW

RC = สัดส่วนอากาศเวียนกลับ

RH = ความชื้นสัมพัทธ์, decimal

T = อุณหภูมิ, °C

t = เวลาอบแห้ง, min

t_1 = เวลาที่เป็นผลมาจากลักษณะของเครื่องอบแห้ง, min

t_2 = เวลาที่เป็นผลมาจากความเร็วลม, min

t_m = เวลาที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ในถังเฉลี่ย, min

v = ความเร็วกระแสอากาศ, m/s

W = อัตราส่วนความชื้น, kg-water/kg-dry air

θ = มุมเอียงของตัวถังทรงกระบอก, degree

สัญลักษณ์กำกับล่าง

a = อากาศแห้ง

eq = ที่สมดุล

fan = พัดลม

feed = ตัวป้อนข้าวเปลือก

h = เครื่องทำความร้อน

in = เข้าเครื่องอบแห้ง

l = ที่สูญเสีย

ld = สูญเสียที่ถังทรงกระบอก

lrc = สูญเสียที่อากาศเวียนกลับ

mix = อากาศผสม

out = ออกจากเครื่องอบแห้ง

p = อนุภาคแห้ง

rc = อากาศเวียนกลับ

rot = ตัวหมุนถังทรงกระบอก

v = ไอน้ำ

w = น้ำ

เอกสารอ้างอิง

1. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2530, แนวทางการอบแห้งข้าวเปลือกในเขตร้อนชื้น, วารสารวิศวกรรมเกษตร, กันยายน-ธันวาคม, หน้า 41-52.

2. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2522, อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), หน้า 71-83.

3. ไพบูรย์ โรจน์วิบูลย์ชัย และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2535, การอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแนวทางการอบแห้ง, วิทยาสารเกษตรศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์, ปีที่ 26, ฉบับที่ 1, หน้า 50-59.

4. Soponronnarit, S. and S. Prachayawarakorn, 1994, Optimum Strategy for Fluidized Bed Paddy Drying, Drying Technology, Vol.12, No.7, pp. 1667-1686.

5. Page, G.E., 1949, Factors Influencing the Maximum Rate of Drying Shell Corn in Layers, Unpublished Thesis, Master of Science, Purdue University, pp. 75-79.

6. ชอบ ลายทอง, 2530, การศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ความร้อนของข้าวเปลือก, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 35.

7. อรอนงค์ ศรีพวาทกุล, 2537, การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดอย่างต่อเนื่อง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 67.

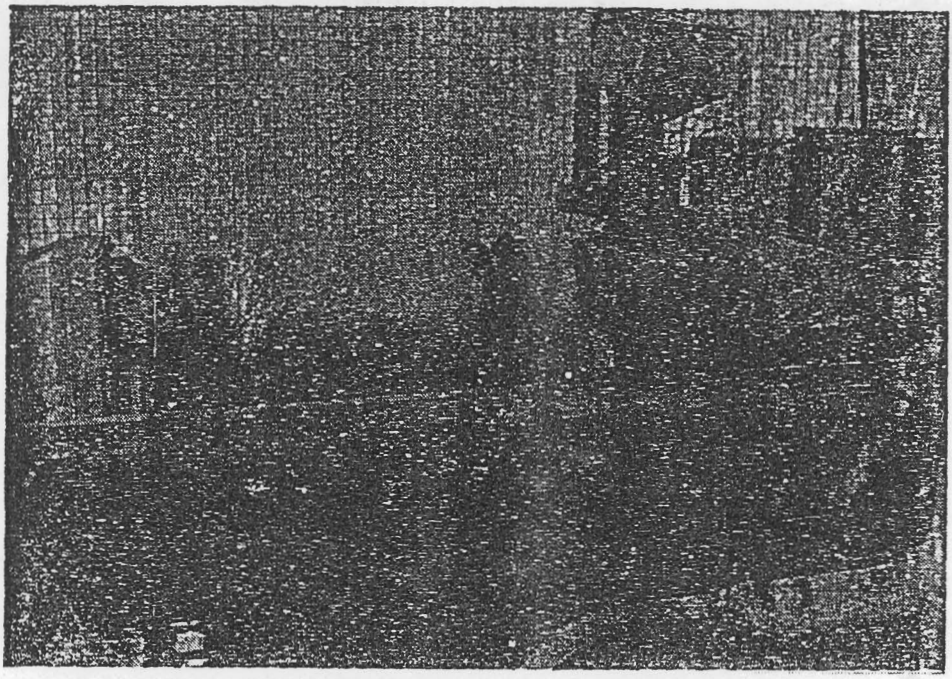

Fig.1 Rotary dryer

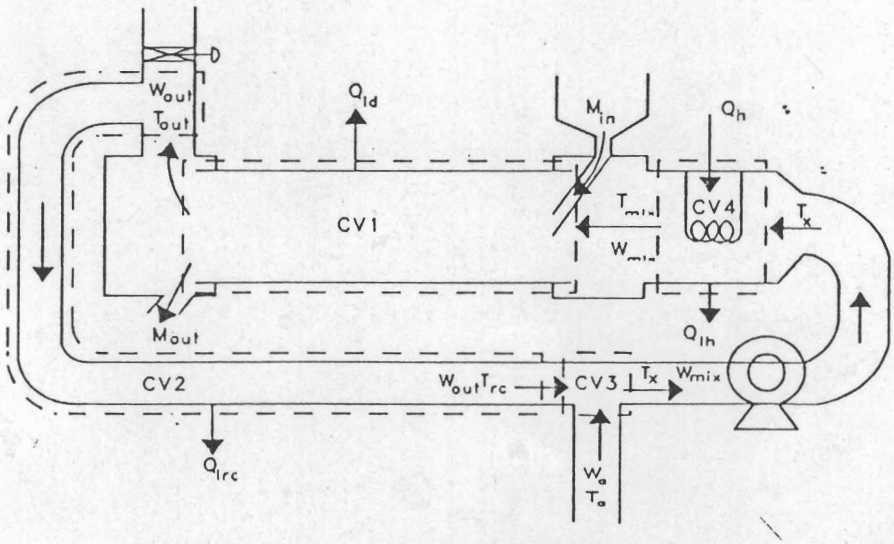

Fig.2 Control volumes of rotary drying system

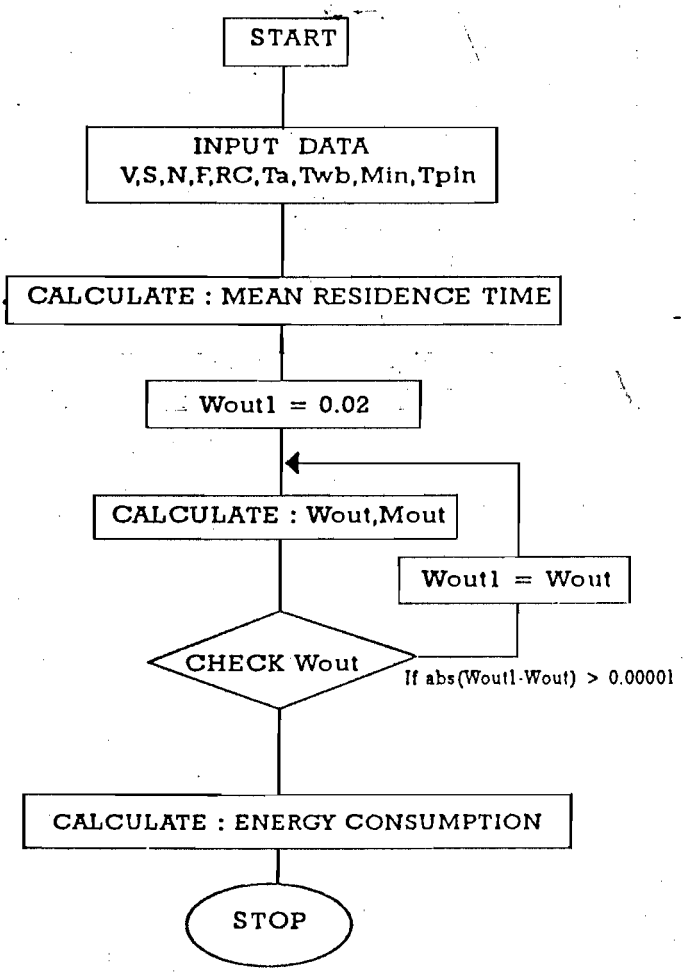

Fig.3 Computer simulation flow chart

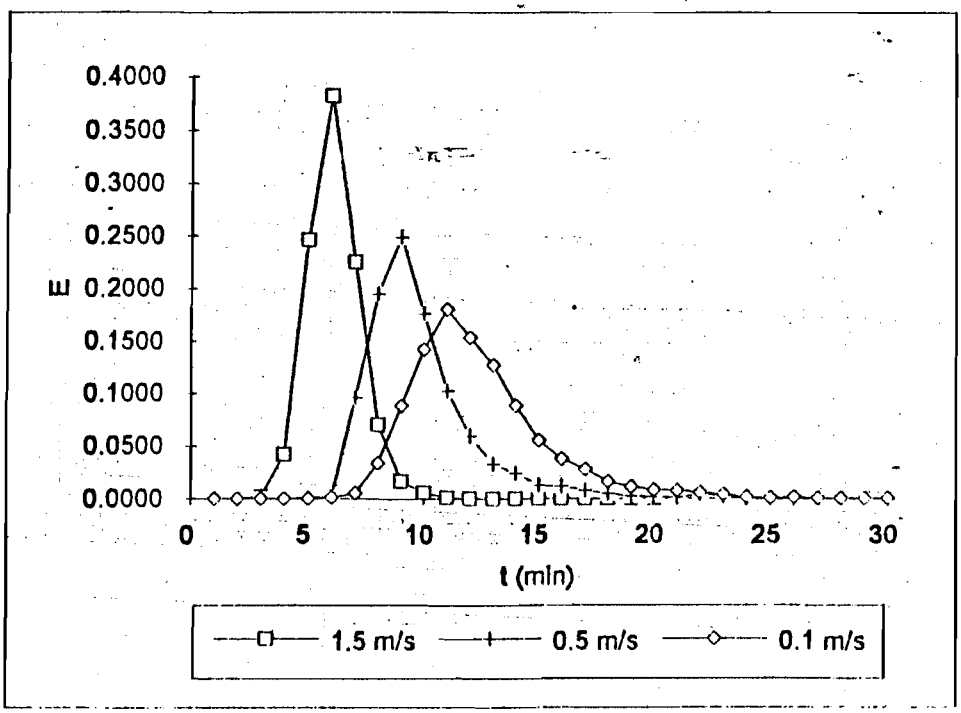

Fig.4 Effect of air flow rate on residence time distribution

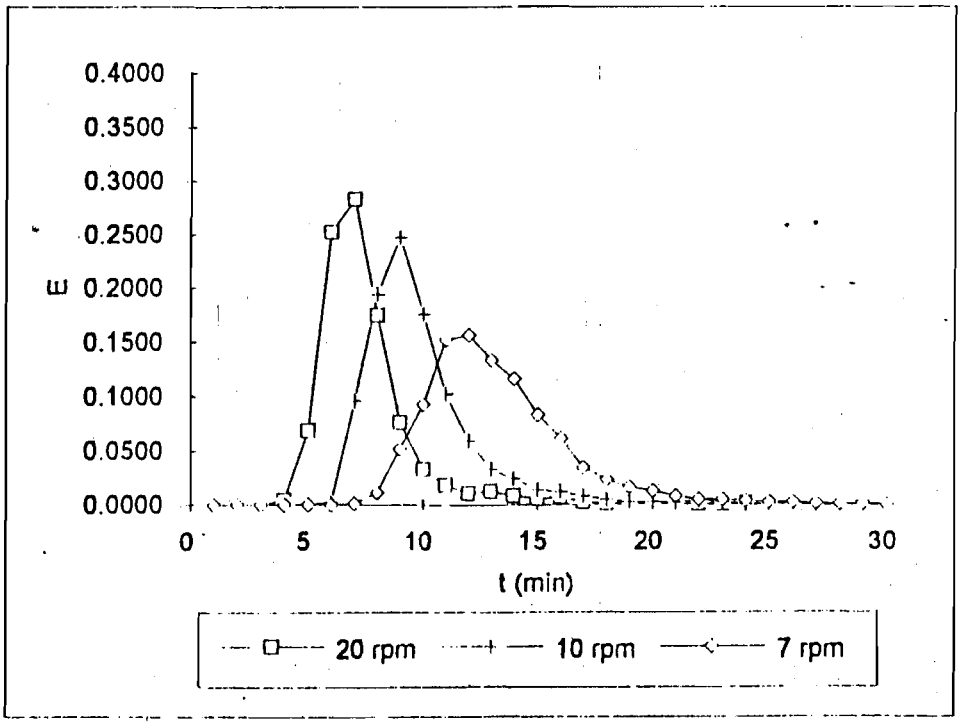

Fig.5 Effect of rotation speed on residence time distribution

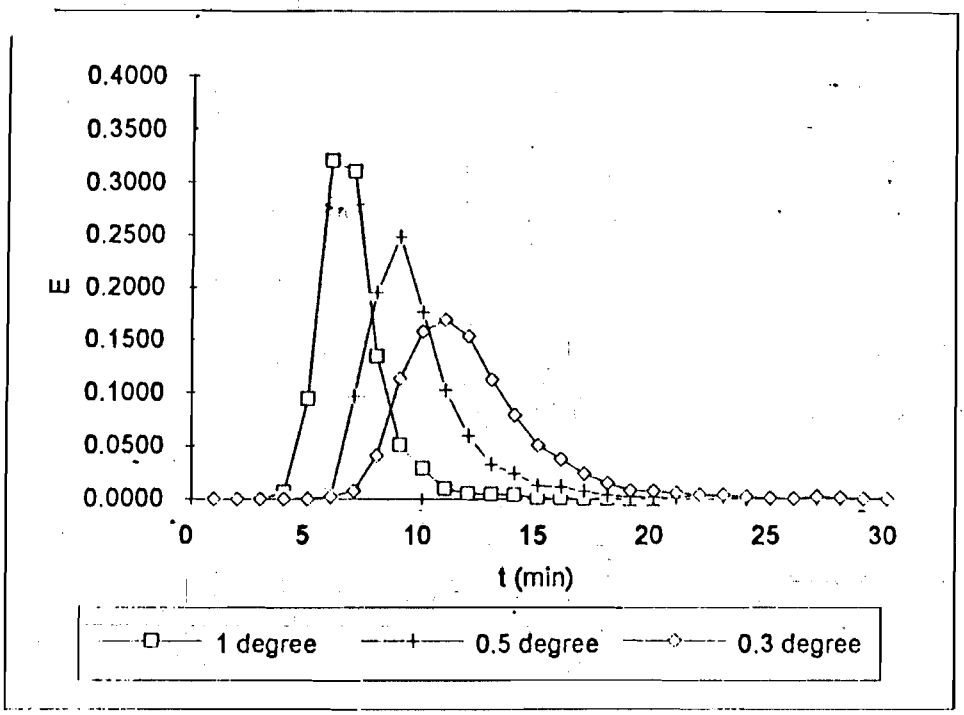

Fig.6 Effect of slope on residence time distribution

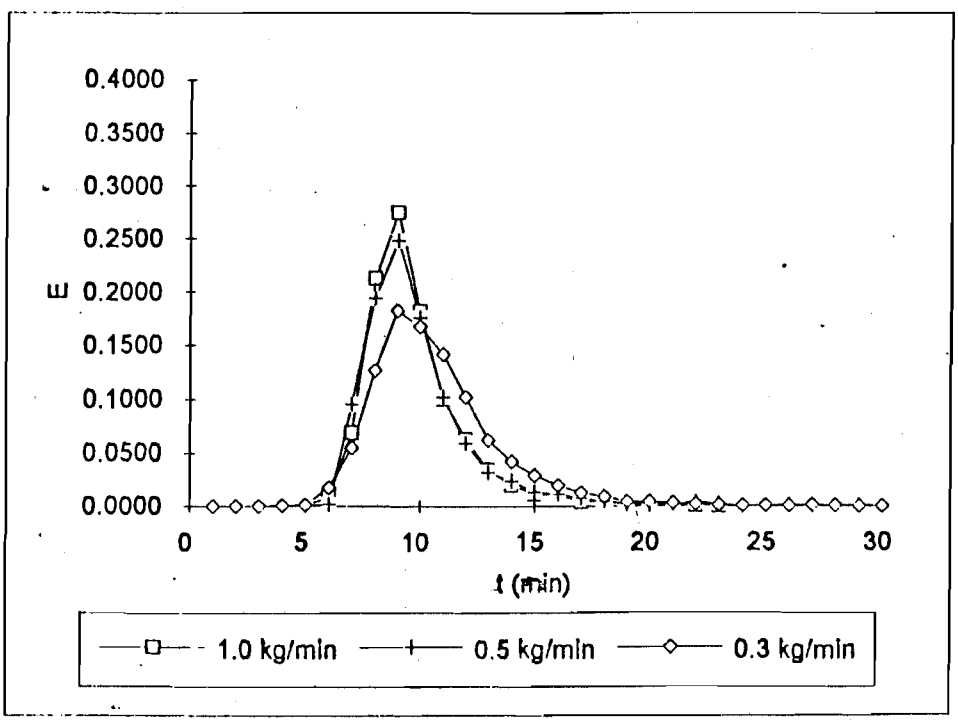

Fig.7 Effect of feed rate of paddy on residence time distribution

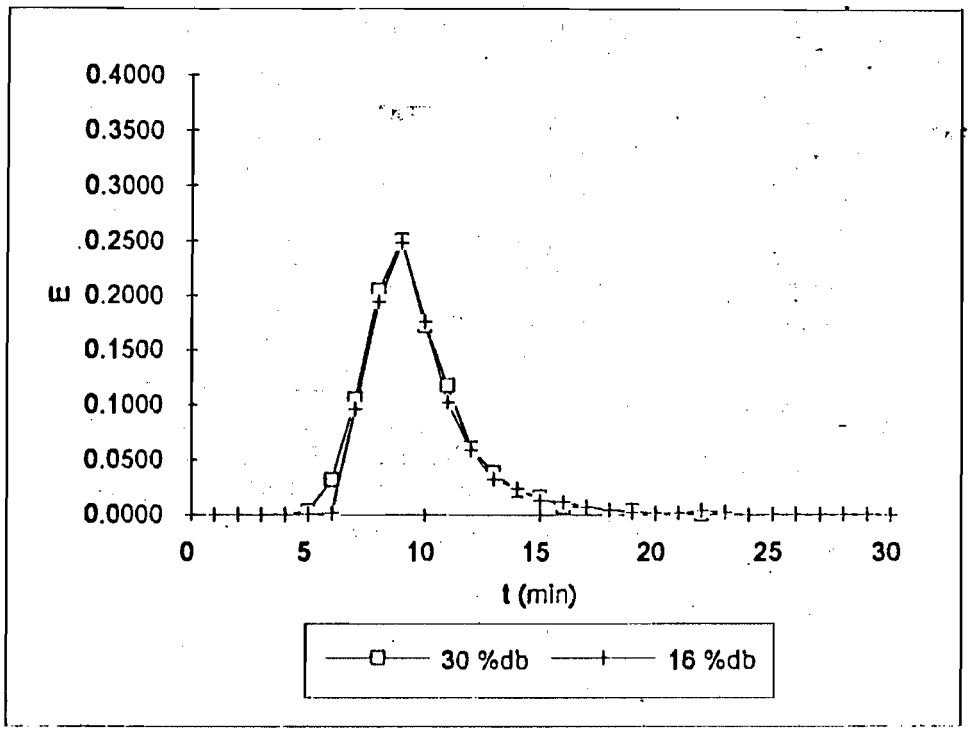

Fig.8 Effect of moisture of paddy on residence time distribution

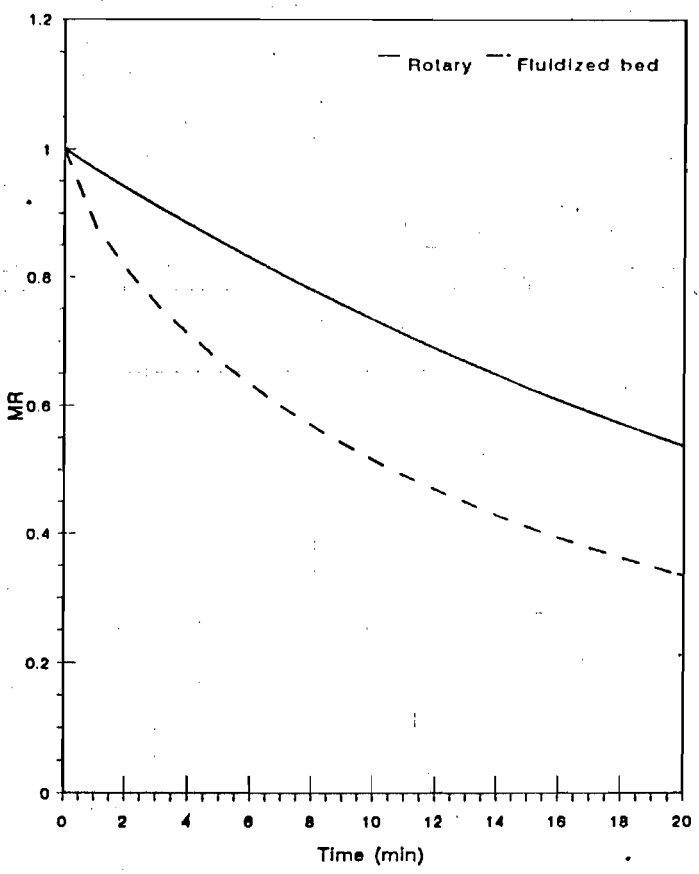

Fig.9 Comparison of drying rate between fluidized bed and rotary drying

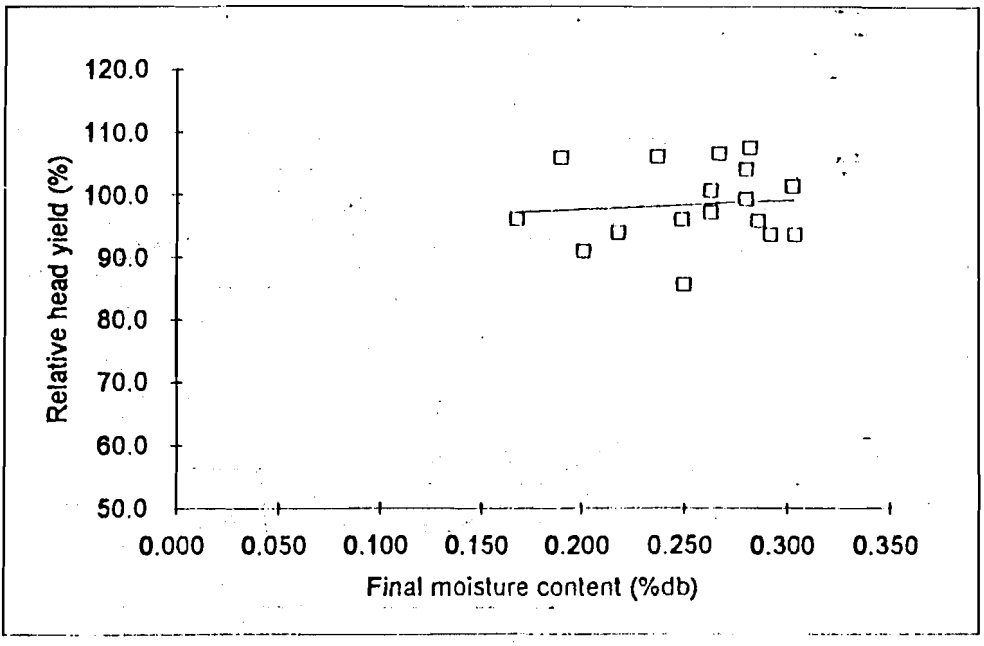

Fig.10 Relationship between relative head yield and final moisture content of paddy

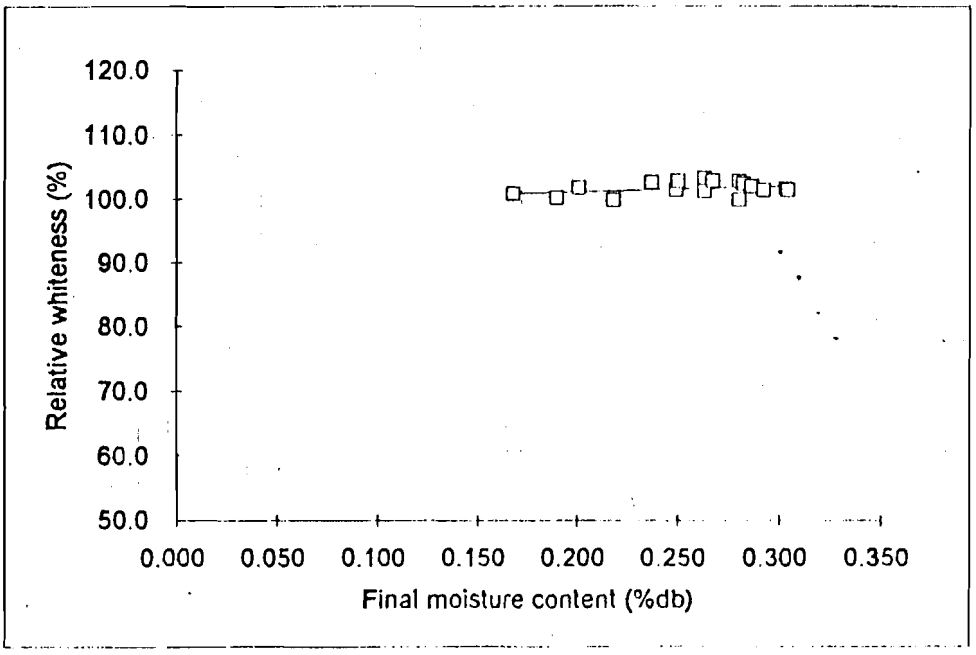

Fig.11 Relationship between relative whiteness and final moisture content of paddy

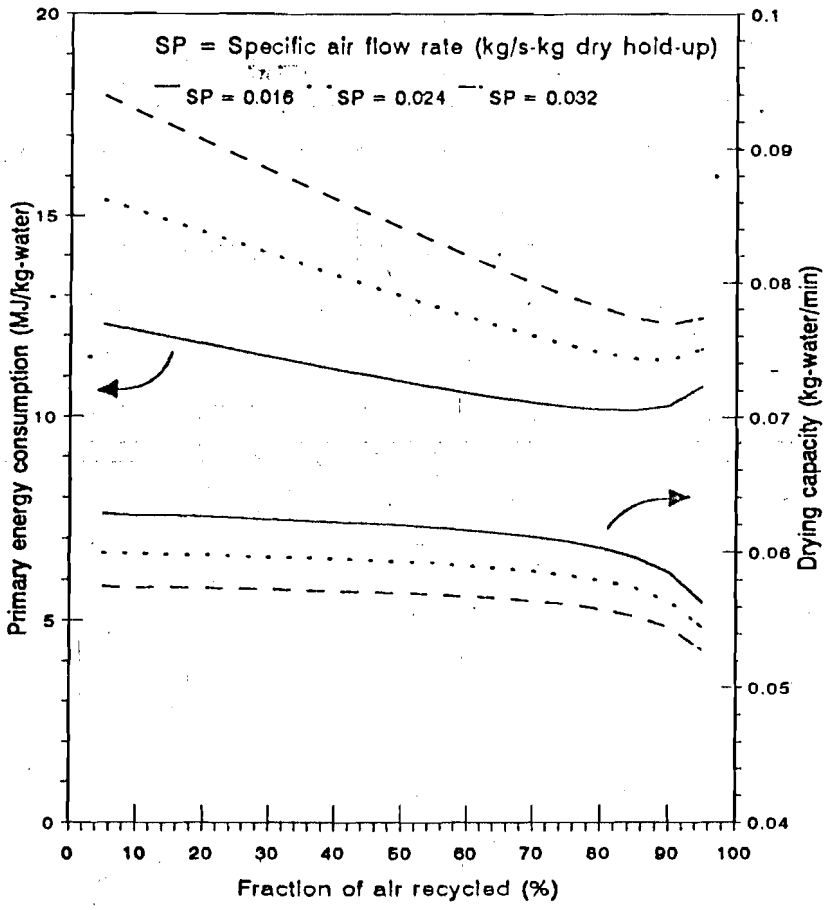

Fig.12 Effect of fraction of air recycled on primary energy consumption and drying capacity at different specific air flow rate

note:

Specific air flow rate (SP), (kg/s-kg dry hold-up)		
SP = 0.016 kg/s-kg dry matter : v =	0.743	m/s
SP = 0.024 kg/s-kg dry matter : v =	0.945	m/s
SP = 0.032 kg/s-kg dry matter : v =	1.094	m/s
Cylinder diameter	0.3	m
Cylinder length	1.5	m
Feed rate of wet paddy	.1	kg/min
Rotation speed of cylinder	20	rpm
Slope of cylinder	0.5	degree
Residence time	4.33,3.66,3.18	min
Initial moisture content of paddy	30	%db
Drying pass	2	times
Final moisture content of paddy	22-23	%db

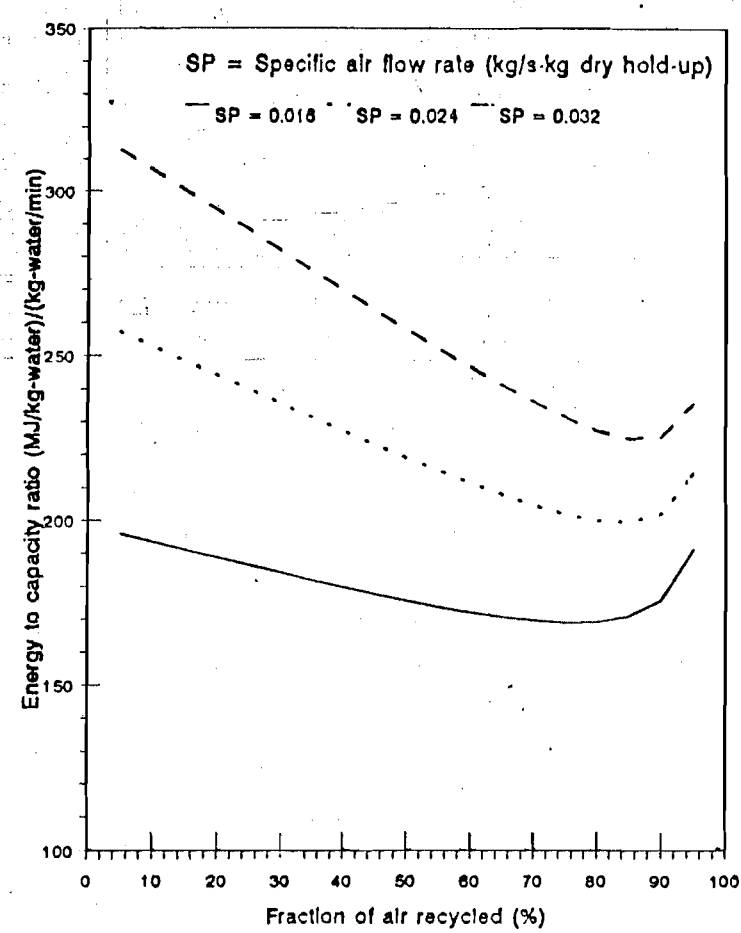

Fig.13 Effect of fraction of air recycled on primary energy consumption to drying capacity ratio at different specific air flow rate