



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนา/ปรับปรุงผลิตภัณฑ์
อาหาร/เกษตรโดยการผสมผสาน
เทคนิคการอบแห้งที่หลากหลาย
เล่มที่ 1

โดย สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และคณะ

กันยายน 2549

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนา/ปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหาร/เกษตรโดย การผสมผสานเทคนิคการอบแห้งที่หลากหลาย

เล่มที่ 1

คณะผู้วิจัย		สังกัด
1. ศ.ดร.สมชาติ	โสภณรณฤทธิ์	มจร.
2. รศ. วารุณี	เดีย	มจร.
3. รศ.ดร.สมเกียรติ	ปรัชญาวรากร	มจร.
4. ผศ.ดร.อดิศักดิ์	นาถกรณกุล	มจร.
5. ผศ.ดร.สักรกมล	เทพหัสดิน ณ อยุธยา	มจร.
6. ดร.ชนิด	สวัสดิเสวี	มจร.
7. ผศ.ดร.ฐานิตย์	เมธิยานนท์	ม.มหานคร
8. ผศ.ดร.ชัยยงค์	เดชะไพโรจน์	ม.ศิลปากร
9. ผศ.ดร.เจริญพร	เลิศสถิตินากร	ม.มหาสารคาม
10. ผศ.ดร.สัมพันธ์	ฤทธิเดช	ม.มหาสารคาม
11. ผศ.ดร.ณัฐพล	ภูมิสะอาด	ม.มหาสารคาม
12. ผศ.ดร.ทรงชัย	วิริยะอำไพวงศ์	ม.มหาสารคาม
13. ผศ.ดร.อำไพศักดิ์	ทิบุญมา	ม.อุบลราชธานี
14. ดร.จินดาพร	จำรัสเลิศลักษณ์	ม.มหาสารคาม
15. นักศึกษาปริญญาเอก 17 คน และปริญญาโท 40 คน		

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้การสนับสนุนโครงการเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ระยะที่ 2 - การพัฒนา/ปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหาร/เกษตรโดยการผสมผสานเทคนิคการอบแห้งที่หลากหลาย นอกจากนี้ยังใคร่ขอขอบคุณหน่วยงานต่าง ๆ ที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี ได้แก่ บริษัทไรซ์เอ็นจิเนียริงซัพพลาย จำกัด บริษัทจักรวาลเทคโนโลยีเกษตร จำกัด สถาบันวิจัยอาหารและพัฒนาผลิตภัณฑ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร และท้ายสุด โรงเรียนอัสสัมชัญ ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยด้านการทดสอบเครื่องต้นแบบ

บทสรุปผู้บริหาร

กระทรวงอุตสาหกรรมรายงานไว้ว่า ประเทศไทยส่งออกอาหารแห้งปีละหลายพันล้านบาท นอกจากนี้ยังส่งออกข้าวปีละกว่าแสนล้านบาท การอบแห้งเป็นกระบวนการสำคัญในสายการผลิตของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ เทคนิคการอบแห้งมีหลากหลาย เช่น การใช้ลมร้อน ใช้น้ำร้อนยวดยิ่ง ป้อนความร้อน รังสีอินฟราเรดไกล รังสีไมโครเวฟ ภายใต้อากาศหรือน้ำ/สูงกว่าบรรยากาศ การใช้สารดูดความชื้น การผสมผสานเทคนิคที่หลากหลายสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ปรับปรุงคุณภาพ และหรือลดต้นทุนการผลิต เช่นผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อสัตว์และผลไม้ที่มีความกรอบคล้ายกับของที่ได้จากการทอด แตกต่างที่ไม่มีน้ำมันเพิ่มเติมในผลิตภัณฑ์ การผลิตข้าวหนึ่งโดยใช้ไอน้ำยวดยิ่งช่วยลดขั้นตอน/กรรมวิธี การผลิต ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้ง คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปี มีนักวิจัยที่ชำนาญการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร/เกษตร จำนวนมาก เป็นแหล่งรวบรวมความเชี่ยวชาญสหสาขาวิชา ได้แก่ วิศวกรรมศาสตร์สาขาต่าง ๆ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร เป็นแหล่งพึ่งพิงทางความรู้และเทคโนโลยีด้านการอบแห้งให้กับภาคเอกชนและภาครัฐ มีการให้คำปรึกษาตามคำร้องขออย่างสม่ำเสมอ รวมถึงการจัดอบรมทางวิชาการเพื่อเผยแพร่ความรู้ใหม่ ๆ ที่ได้จากการวิจัย

ผลงานเด่นของห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งได้แก่ การร่วมมือกับภาคเอกชนพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับอบแห้งข้าวเปลือก ผักและผลไม้ จนนำไปสู่การจดสิทธิบัตร ผลิตภัณฑ์ และส่งออกอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดซ์เบด เต้าเผาเกลือโซโครน เครื่องอบแห้งป้อนความร้อน เครื่องอบแห้ง LPG ปัจจุบันเน้นงานการพัฒนากรรมวิธีการผลิตข้าวหนึ่ง/ข้าวขาว ผักและผลไม้อบแห้งคุณภาพสูง ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยข้างต้นได้แก่ การลดความสูญเสียของผลผลิตผลการเกษตร การเพิ่มมูลค่าผลผลิต การสนับสนุนการส่งออก/ทดแทนการนำเข้า และการสนับสนุนนโยบายครัวของโลก

โครงการวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ เพิ่มขีดความสามารถในการวิจัยของกลุ่มนักวิจัยในห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้ง คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมีเป้าหมายสูงสุดในการยกระดับความสามารถให้ทัดเทียมกับระดับนานาชาติ เทคโนโลยีการอบแห้งที่เน้นได้แก่ การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารโดยเทคนิคต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้เป้าหมายเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารนานาชาติแล้ว ยังมีเป้าหมายให้มีการนำผลงานไปผลิตขายและใช้งานในภาคอุตสาหกรรมด้วย

โดยการทำงานเป็นทีมในรูปแบบของปราชญ์ คือมีฐานของปราชญ์เป็นนักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอก มีอาจารย์ผู้ช่วยอยู่ระหว่างฐานและยอดของปราชญ์ ซึ่งมีหัวหน้ากลุ่มวิจัยคอยดูแลให้คำแนะนำปรึกษา ในขณะใดขณะหนึ่งจะมีนักศึกษาปริญญาโทประมาณ 15 คน ระดับปริญญาเอกประมาณ 8 คน ทำวิทยานิพนธ์ มีอาจารย์ร่วมกลุ่มวิจัยกว่า 10 คน มีการประชุมวิชาการร่วมกันระหว่างนักศึกษาและอาจารย์ทุกสัปดาห์ อาจารย์ที่มีอาวุโสหน่อยจะทำหน้าที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมกับอาจารย์ที่อาวุโสกว่าทางวิชาการ อาจารย์เหล่านี้จะเรียนรู้การทำงานอย่างเป็นทีมจากกระบวนการนี้ ทุก ๆ คนในห้องปฏิบัติการวิจัยมีความรับผิดชอบต่อการเขียนบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ โดยเฉพาะในวารสารนานาชาติ นอกจากการทำงานร่วมกันเป็นทีมภายในห้องปฏิบัติการวิจัยของตนเองแล้ว ยังร่วมกันทำงานวิจัยกับภาคอุตสาหกรรมในการผลิตเครื่องอบแห้งต้นแบบ และกับสถาบันวิจัยอื่นที่มีความชำนาญเฉพาะด้านด้วย

หัวข้อการวิจัยส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการอบแห้ง หากแบ่งตามผลิตภัณฑ์ที่สำคัญ ได้แก่ เมล็ดพืชจำพวกข้าว ข้าวโพด ถั่วเหลือง ผักและผลไม้ สมุนไพร เนื้อสัตว์ แต่อาจแบ่งตามลักษณะของ

เทคโนโลยีการอบแห้ง ได้แก่ การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน หรือไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดเซชัน และเทคนิคสเปาเด็ดเบด การอบแห้งโดยใช้บีบความร้อน การอบแห้งโดยใช้สารดูดความชื้น การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดไกล การอบแห้งภายใต้สภาวะความดันต่ำ การอบแห้งโดยการผสมผสานเทคนิคการอบแห้งหลายแบบ นอกจากนี้ยังทำการวิจัยด้านการใช้พลังงานหมุนเวียนจากมวลชีวภาพ และการประหยัดพลังงานในการอบแห้ง

โครงการวิจัยนี้ประสบความสำเร็จเกินเป้าหมายที่ตั้งไว้ คือได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติจำนวน 28 เรื่อง (ไม่นับที่อยู่ระหว่างการตีพิมพ์) ในวารสารในประเทศจำนวน 13 เรื่อง ในรายงานการประชุมทางวิชาการนานาชาติ จำนวน 15 เรื่อง และในรายงานการประชุมทางวิชาการในประเทศ จำนวน 60 เรื่อง บางบทในหนังสือ 1 บท สิทธิบัตรการประดิษฐ์ระหว่างการตรวจสอบจำนวน 1 เรื่อง มีนักศึกษาระดับปริญญาเอกและปริญญาโทจบการศึกษา 8 คน และ 31 คน ตามลำดับ นอกจากประสบความสำเร็จทางด้านผลงานทางวิชาการแล้ว ยังสามารถขยายผลไปสู่ภาคอุตสาหกรรมเมล็ดพืช และอุตสาหกรรมผักและผลไม้ โดยมีบริษัทเอกชนผลิตขายเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดสำหรับข้าวเปลือก ข้าวเนื้ ข้าวโพด และถั่วเหลือง เตาเผาแลกเปลี่ยนไอคอลน เครื่องอบแห้งบีบความร้อน และเครื่องอบแห้งลมร้อนสำหรับอุตสาหกรรมผักและผลไม้แห้ง รวมถึงระบบเป่าลมเย็นข้าวเปลือกในไซโล

ที่สำคัญไม่น้อยไปกว่าผลที่ได้จากโครงการข้างต้นคือ การพัฒนากลุ่มวิจัยจากสหสาขาวิชา ให้ทำงานกันเป็นทีม รวมแล้ว 71 คน ตลอดระยะเวลา 3 ปี โดยทำงานร่วมกับสถาบันวิจัยอื่น และภาคอุตสาหกรรมด้วย

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: RTA4680012

ชื่อโครงการ: (ภาษาไทย) การพัฒนา/ปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหาร/เกษตรโดยการผสมผสานเทคนิคการอบแห้งที่หลากหลาย
(ภาษาอังกฤษ) Development and Improvement of Agricultural and Food Products with Combination of Various Drying Techniques

คณะผู้วิจัย (รวม 71คน):

1. ศ.ดร. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มจร. หัวหน้าโครงการ
2. รศ.วราภรณ์ เตีย สายวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มจร.
3. รศ.ดร.สมเกียรติ ปรัชญาวารการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มจร.
4. ผศ.ดร.อดิศักดิ์ นาถกรณกุล สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มจร.
5. ผศ.ดร.สักรกมล เทพหัสดิน ณ อยุธยา ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มจร.
6. ดร.ชนิตย์ สวัสดิ์เสวี สายวิชาเทคโนโลยีอุณหภูมิอากาศ คณะพลังงานและวัสดุ มจร.
7. ดร.ฐานิตย์ เมธิยานนท์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.)
8. ดร.ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยศิลปากร (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.)
9. ดร.เจริญพร เลิศสถิตธนากร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (1 ต.ค. 2546 – 30 ก.ย. 2548) (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.)
10. ดร.สัมพันธ์ ฤทธิเดช คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (1 ต.ค. 2546 – 30 ก.ย. 2547) (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.)
11. ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (1 ต.ค. 2546 – 30 ก.ย. 2548) (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.)
12. ดร.ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (1 ก.ค. 2547 -) (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.)
13. ดร.อำไพศักดิ์ ทิบุญมา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (1 ก.ค. 2547 -) (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.)
14. ดร.จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (1 ก.ค. 2549 -)
15. นักศึกษาปริญญาเอก 17 คน และนักศึกษาปริญญาโท 40 คน

e-mail: Somchart.sop@kmutt.ac.th

สาขาวิชาที่ทำการวิจัย: เทคโนโลยีพลังงาน/ เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว
งบประมาณทั้งโครงการ: อนุมัติ 6.0 ล้านบาท ใช้จริงประมาณ 4 ล้านบาท

ระยะเวลาดำเนินงาน: 1 ตุลาคม 2546 - 30 กันยายน 2549

วัตถุประสงค์:

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์โดยรวมเพื่อพัฒนาบุคลากรทางการวิจัยโดยเน้นการพัฒนาอาจารย์นักวิจัยรุ่นใหม่ มีเป้าหมายในการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท-เอก จำนวนผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ และการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้จริงในภาคธุรกิจอุตสาหกรรม

วิธีการ:

ในขณะใดขณะหนึ่งจะมีนักศึกษาปริญญาโทประมาณ 15 คน ระดับปริญญาเอกประมาณ 8 คน ทำวิทยานิพนธ์ มีการประชุมวิชาการร่วมกันระหว่างนักศึกษาและอาจารย์ทุกสัปดาห์ อาจารย์ที่มีอาวุโสหน่อยจะทำหน้าที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมกับอาจารย์ที่อาวุโสกว่าทางวิชาการ อาจารย์เหล่านี้จะเรียนรู้การทำงานอย่างเป็นทีมจากกระบวนการนี้ ทุก ๆ คนในห้องปฏิบัติการวิจัยมีความรับผิดชอบต่อการเขียนบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ โดยเฉพาะในวารสารนานาชาติ นอกจากการทำงานร่วมกันเป็นทีมภายในห้องปฏิบัติการวิจัยของตัวเองแล้ว ยังร่วมกันทำงานวิจัยกับภาคอุตสาหกรรมในการผลิตเครื่องอบแห้งต้นแบบ และกับสถาบันวิจัยอื่นที่มีความชำนาญเฉพาะด้านด้วย

หัวข้อการวิจัยส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการอบแห้ง หากแบ่งตามผลิตภัณฑ์ที่สำคัญ ได้แก่ เมล็ดพืชจำพวกข้าว ข้าวโพด ถั่วเหลือง ผักและผลไม้ สมุนไพร เนื้อสัตว์ แต่อาจแบ่งตามลักษณะของเทคโนโลยีการอบแห้ง ได้แก่ การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนหรือไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดเซชันและเทคนิคสเปาเต็ดเบด การอบแห้งโดยใช้บีมความร้อน การอบแห้งโดยใช้สารดูดความชื้น การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดไกล การอบแห้งภายใต้สภาวะความดันต่ำ การอบแห้งโดยการผสมผสานเทคนิคการอบแห้งหลายแบบ นอกจากนี้ยังทำการวิจัยด้านการใช้พลังงานหมุนเวียนจากมวลชีวภาพ และการประหยัดพลังงานในการอบแห้ง

ผล :

โครงการวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จเกินเป้าหมายที่ตั้งไว้ คือได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติจำนวน 28 เรื่อง (ไม่นับที่อยู่ระหว่างการตีพิมพ์) ในวารสารในประเทศจำนวน 13 เรื่อง ในรายงานการประชุมทางวิชาการนานาชาติ จำนวน 15 เรื่อง และในรายงานการประชุมทางวิชาการในประเทศ จำนวน 60 เรื่อง บางบทในหนังสือ 1 บท สิทธิบัตรการประดิษฐ์ระหว่างการตรวจสอบจำนวน 1 เรื่อง มีนักศึกษาระดับปริญญาเอกและปริญญาโทจบการศึกษา 8 คน และ 31 คน ตามลำดับ นอกจากประสบความสำเร็จทางด้านผลงานทางวิชาการแล้ว ยังสามารถขยายผลไปสู่ภาคอุตสาหกรรมเมล็ดพืชและอุตสาหกรรมผักและผลไม้ โดยมีบริษัทเอกชนผลิตขายเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชเบดสำหรับข้าวเปลือก ข้าวเนือง ข้าวโพด และถั่วเหลือง เต้าเหวแกลบแบบไซโคลน เครื่องอบแห้งบีมความร้อน และเครื่องอบแห้งลมร้อนสำหรับอุตสาหกรรมผักและผลไม้แห้ง รวมถึงระบบเป่าลมเย็นข้าวเปลือกในไซโล

วิจารณ์และสรุป :

1. ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารนานาชาติจำนวน 28 เรื่อง มีค่า impact factor รวม 29.085
2. ใช้เงินวิจัยสำหรับโครงการนี้รวมประมาณ 4 ล้านบาท คิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 143,000 บาท ต่อบทความในวารสารนานาชาติ 1 เรื่อง
3. ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารในประเทศจำนวน 15 เรื่อง หากคิดให้บทความในวารสารในประเทศจำนวน 2 เรื่อง เทียบเท่ากับบทความในวารสารนานาชาติจำนวน 1 เรื่อง จะได้บทความเทียบเท่าวารสารนานาชาติจำนวน 9 เรื่อง คิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 123,000 บาท ต่อบทความเทียบเท่าวารสารนานาชาติ 1 เรื่อง
4. ผลงานวิจัยที่นำไปสู่ภาคอุตสาหกรรมสามารถก่อประโยชน์อย่างสูง เช่น ลดค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง เพิ่มสมรรถนะการอบแห้ง และยกระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังสร้างรายได้ให้กับประเทศจากการส่งออกเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดและเตาแลกเปลี่ยนไซโคลน
5. ได้ค้นพบผลพลอยได้จากการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งสำหรับอบแห้งข้าวเปลือก ผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์ โดยเฉพาะกับข้าวเปลือก ซึ่งนำไปสู่การค้นพบกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งแบบใหม่ ที่ลดเวลาการทำงาน มีค่าใช้จ่ายต่ำ
6. ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบอบแห้งแบบต่าง ๆ จนสามารถนำไปสู่การหาเงื่อนไขการออกแบบ และเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมที่สุด
7. ที่สำคัญที่สุดคือการพัฒนากลุ่มวิจัยจากสหสาขาวิชาให้ทำงานกันเป็นทีม รวม 71 คนในระยะเวลา 3 ปี

คำสำคัญ : การอบแห้ง, ความดันต่ำ, คุณภาพ, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, ป้อนความร้อน, ผัก, ผลไม้, ฟลูอิดไชน์เบด, เมล็ดพืช, รังสีอินฟราเรดไกล, สารดูดความชื้น, อาหาร, ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ABSTRACT

Project code: RTA4680012

Project title: Development and Improvement of Agricultural and Food Products with Combination of Various Drying Techniques

Investigators (71 people):

Investigators		Organization
1. Prof.Dr.Somchart	Soponronnarit	Division of Energy Technology, School of Energy and Materials, KMUTT (Head of project)
2. Assoc.Prof.Warunee	Tia	Division of Energy Management Technology, School of Energy and Materials, KMUTT
3. Assoc.Prof.Dr.Somkiat	Prachayawarakorn	Division of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, KMUTT
4. Asst.Prof.Dr.Adisak	Nathakaranakule	Division of Energy Technology, School of Energy and Materials, KMUTT
5. Asst.Prof.Sakamon	Devahastin	Division of Food Engineering, Faculty of Engineering, KMUTT
6. Dr.Thanit	Swasdisevi	Division of Thermal Technology, School of Energy and Materials, KMUTT KMUTT
7. Asst.Prof.Dr.Thanid	Madhiyanon	Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Technology Mahanakorn
8. Asst.Prof.Dr.Chaiyong	Taechapairoj	Faculty of Engineering and Technology, Silpakorn University
9. Asst.Prof.Dr.Chareonporn	Lertsatitthanakorn	Faculty of Engineering, Marasarakham University
10. Asst.Prof.Dr.Sampan	Rittidech	Faculty of Engineering, Marasarakham University
11. Asst.Prof.Dr.Nattapol	Poomsa-ad	Faculty of Engineering, Marasarakham University
12. Asst.Prof.Dr.Songchai	Wiriyampaiwong	Faculty of Engineering, Marasarakham University
13. Asst.Prof.Dr.Umphisak	Teeboonma	Faculty of Engineering, Ubonratchathani University
14. Asst.Prof.Dr.Jindaporn	Jamradloedluk	Faculty of Engineering, Marasarakham University
15. Seventeen doctoral and forty master students		

Email Address: Somchart.sop@kmutt.ac.th

Research field: Energy technology/ Post-harvest technology

Project fund: Six million baht approved, about four million baht actual payments

Project period: 1 October 2003 – 30 September 2006

Objectives:

The objective of the Project "Development and Improvement of Agricultural and Food Products with Combination of Various Drying Techniques" is to enhance the research capabilities of the lecturers and researchers involved in the project, and to produce numbers of graduated doctoral and master students as well as international journal publications and transfer research outputs to industrial sections and commercialization.

Methodology:

During each semester, there are about 15 master and 8 doctoral students working in the project. Project meeting was arranged weekly for discussion between the students and supervisors who co-operated under senior-supported advisor system. All colleagues had a responsibility to publish the knowledge from his/her researches especially in cited international journals. Collaboration was also made with industrial sectors to produce prototyped dryer and with expertise research institutes.

Research topics of the project are mostly in the field of drying technology. Research topics separated by products are emphasized on grains (i.e. paddy, corn, and soybean), vegetable, fruit, herb and meat. The topics are also separated by drying technology into hot air and superheated steam drying, fluidized bed and spouted bed drying, heat pump drying, drying using adsorbent, far-infrared drying, drying under low pressure and drying by combined techniques. Renewable energy from biomass and drying energy saving are also included in the research topics of the project.

Results:

The success of this project is beyond the proposed target. The outputs of the project are 28 publications in international journals (excluding some papers in print), 13 publications in national journals, 15 papers in international proceedings, 60 papers in national proceedings, and one chapter in one book. One patent of invention is on pending status. Eight doctoral and 31 master students in the project have been graduated. Besides the academic outputs, the knowledge of the project is also transferred to industrial sectors in grain, vegetable and fruit drying. Private companies have been produced and commercialized fluidized bed dryers for drying paddy, parboiled rice, corn and soybean; rice-husk cyclonic furnace; heat pump and hot air dryer for fruit and vegetable drying industries; and cool air ventilation system in a paddy silo.

Discussion and Conclusion:

1. Twenty eight papers have been published in international journals with overall impact factor (2004) of 29.085.
2. The overall budget used in this project is about 4 million baht and is about equivalent to 143,000 baht per an international journal paper.
3. Fifteen papers have been published in national journals. If two national journal papers are set to be equivalent to one international journal paper, it costs about 123,000 baht per an equivalent international journal paper.
4. Research outputs transferred to industrial sectors resulted in high benefit to these sectors, such as saving drying energy, improving drying performance and dried products' qualities. This technology transfer also produced more incomes from exporting fluidized bed dryers and rice-husk cyclonic furnaces.
5. Advantages of using superheated steam for drying paddy, vegetable, fruit and meat were found from this research. This drying technique has a trend to use for developing new drying processes, especially new techniques for producing parboiled rice which have low drying cost and short drying time.
6. Mathematical models of studied drying techniques have been developed to the level that can be used for optimizing drying designs and operations.
7. The most success of the project is the cooperation of 71 researchers from multi branches of knowledge for three years.

Key words: adsorbent, drying, far-infrared, fluidization, fruit, grain, heat pump, low pressure, mathematical model, quality, superheated steam, vegetable, food.

รายงานการวิจัย

1. ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา

เทคนิคการอบแห้งมีหลากหลาย เช่น การใช้ลมร้อน ใช้น้ำร้อนยวดยิ่ง ป้อนความร้อน รังสีอินฟราเรด ไกล รังสีไมโครเวฟ ภายใต้ความดันบรรยากาศ หรือต่ำกว่า/สูงกว่า บรรยากาศ การผสมผสานเทคนิคที่หลากหลายสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ปรับปรุงคุณภาพ และหรือลดต้นทุนการผลิต เช่นผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อสัตว์และผลไม้ที่มีความกรอบคล้ายกับของที่ได้จากการทอด แต่ต่างกันที่ไม่มีน้ำมันเพิ่มในผลิตภัณฑ์ การผลิตข้าวหนึ่งโดยใช้ไอน้ำยวดยิ่งช่วยลดขั้นตอน/กรรมวิธี การผลิต ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้ง คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยอย่างต่อเนื่องเป็นเวลหลายปี มีนักวิจัยที่ชำนาญการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร/เกษตร จำนวนมาก เป็นแหล่งรวบรวมความเชี่ยวชาญสหสาขาวิชา ได้แก่ วิศวกรรมศาสตร์สาขาต่าง ๆ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้ง เป็นแหล่งพึ่งพิงทางความรู้และเทคโนโลยีด้านการอบแห้งให้กับภาคเอกชนและภาครัฐ มีการให้คำปรึกษาคำร้องขออย่างสม่ำเสมอ รวมถึงการจับมือทางวิชาการเพื่อเผยแพร่ความรู้ใหม่ ๆ ที่ได้จากการวิจัย

ผลงานเด่นของห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งได้แก่ การร่วมมือกับภาคเอกชนพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับอบแห้งข้าวเปลือก ผักและผลไม้ จนนำไปสู่การจดสิทธิบัตรและผลิตขายและส่งออกอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรเซด เต้าเผาเกลือโซโครอน เครื่องอบแห้งป้อนความร้อน ปัจจุบันเน้นงานการพัฒนากรรมวิธีการผลิตข้าวหนึ่ง/ข้าวขาว ผักและผลไม้อบแห้งคุณภาพสูง ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยข้างต้นได้แก่ การลดความสูญเสียของผลิตผลการเกษตร การเพิ่มมูลค่าผลผลิต การสนับสนุนการส่งออก/ทดแทนการนำเข้า และการสนับสนุนนโยบายครัวของโลก

2. วัตถุประสงค์

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์โดยรวมเพื่อพัฒนาบุคลากรทางการวิจัยโดยเน้นการพัฒนาอาจารย์นักวิจัยรุ่นใหม่ มีเป้าหมายในการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท-เอก จำนวนผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ และการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้จริงในภาคธุรกิจอุตสาหกรรม โดยมีวัตถุประสงค์จำเพาะดังนี้

1. ฝึกฝนอาจารย์ นักวิจัยรุ่นใหม่/ปานกลาง ประมาณ 7 คนตลอดโครงการ
2. ผลิตบัณฑิตปริญญาโทเน้นการวิจัย 6 คน/ปี รวม 18 คนตลอดโครงการ
3. ผลิตบัณฑิตปริญญาเอกเน้นการวิจัย 1.3 คน/ปี รวม 4 คนตลอดโครงการ
4. ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารนานาชาติ 4 เรื่อง/ปี รวม 12 เรื่องตลอดโครงการ และตีพิมพ์ในวารสารในประเทศ 4 เรื่อง/ปี รวม 12 เรื่องตลอดโครงการ
5. นำผลงานวิจัยไปใช้งานในภาคธุรกิจอุตสาหกรรม 1 เรื่อง/ปี รวม 3 เรื่องตลอดโครงการ และจดสิทธิบัตร 1 เรื่อง

3. ระเบียบวิธีวิจัย

ในขณะใดขณะหนึ่งจะมีนักศึกษาปริญญาโทประมาณ 15 คน ระดับปริญญาเอกประมาณ 8 คน ทำวิทยานิพนธ์ ทุกสัปดาห์จะมีการประชุมวิชาการร่วมกันระหว่างนักศึกษาและอาจารย์ อาจารย์ที่มีอาวุโสหน่อยจะทำหน้าที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมกับอาจารย์ที่อาวุโสกว่าทางวิชาการ อาจารย์เหล่านี้จะเรียนรู้การทำงานอย่างเป็นทีมจากกระบวนการเหล่านี้ ทุก ๆ คนในห้องปฏิบัติการมีความรับผิดชอบต่อการเขียนบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่โดยเฉพาะในวารสารนานาชาติ นอกจากนี้ยังร่วมมือกับภาคอุตสาหกรรมในการผลิตเครื่องต้นแบบบอบแห้ง และกับสถาบันวิจัยอื่นที่มีความชำนาญเฉพาะด้านด้วย รายละเอียดของบุคลากรมีดังนี้

อาจารย์ร่วมโครงการวิจัยเต็มเวลา

1. ศ.ดร. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มจร. หัวหน้าโครงการ
2. รศ.วราวุธ เตีย สายวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มจร.
3. รศ.ดร.สมเกียรติ ปรัญญาวรากร ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มจร. ได้รับทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว. ทุนเมธีวิจัย สกว. และ ทุนคปภ. สกว.
4. ผศ.ดร.อดิศักดิ์ นาถกรณกุล สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มจร. ได้รับทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.

อาจารย์ร่วมโครงการวิจัยบางเวลา

1. ผศ.ดร.ลักกมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มจร. ได้รับทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว. ทุนเมธีวิจัย สกว. และ ทุนคปภ. สกว.
2. ดร.ธนิตย์ สวัสดิ์เสวี สายวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานและวัสดุ มจร. ได้รับทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.
3. ดร.ฐานิตย์ เมธิยานนท์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.) ได้รับทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.
4. ดร.ชัยยงค์ เศษะไพโรจน์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยศิลปากร (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.) ได้รับทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.
5. ดร.เจริญพร เลิศสถิตธนากร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (1 ต.ค. 2546 – 30 ก.ย. 2548) (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.) ได้รับทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.
6. ดร.สัมพันธ์ ฤทธิ์เดช คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (1 ต.ค. 2546 – 30 ก.ย. 2547) (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.) ได้รับทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว. และเตรียมทำสัญญารับทุนเมธีวิจัย สกว.
7. ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (1 ต.ค. 2546 – 30 ก.ย. 2548) (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.) ได้รับทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.
8. ดร.ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (1 ก.ค. 2547 -) (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.) ได้รับทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.
9. ดร.อำไพศักดิ์ ทิบุญมา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (1 ก.ค. 2547 -) (ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผ.ศ.) ได้รับทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.

10. ดร.จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (1 ก.ค. 2549 -) ได้รับทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.

นักศึกษาปริญญาเอกร่วมในโครงการวิจัย

1. นายชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ (จบการศึกษา)
การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไชต์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
2. นายยุทธนา ฐิระวณิชกุลย์ (จบการศึกษา)
การจัดการข้าวเปลือกชั้นโดยการอบแห้งในที่เก็บภายใต้สภาวะอากาศร้อนชื้น
3. นางสุภวรรณ ฐิระวณิชกุลย์ (จบการศึกษา)
ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งข้าวเปลือก
4. นายวทีญญ รอดประพัฒน์ (จบการศึกษา)
การพัฒนาเครื่องต้นแบบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไชต์โดยใช้อิอน้ำร้อนยวดยิ่ง
5. นางยุวนารี นามสงวน (จบการศึกษา)
การอบแห้งกุ้งด้วยเทคนิคไอน้ำร้อนยวดยิ่งร่วมกับบีบความร้อน
6. นายนเรศ มีโส (จบการศึกษา)
การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไชต์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล
7. น.ส.จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ (จบการศึกษา) (เป็นผลงานในทุน คปก. แบบกลุ่มวิจัย สกว.)
การอบแห้งผลไม้ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
8. นายกิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ (จบการศึกษา)
การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้แก๊สดูดซับความชื้น
9. นายณรงค์ อังกิมบัวน
การอบแห้งเนื้อสัตว์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
10. นายกิตติ สถาพรประสาธน์
การอบแห้งสลัดจ์โดยเทคนิคกระแสน
11. นายปกรณ์ เหลืองมาลาวัฒน์
การอบแห้งด้วยฮีทปั๊มและรังสีอินฟราเรดไกล
12. นายฉัตรชัย นิมนน
การอบแห้งโดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้ความดันต่ำ
13. นายวุฒิกรณ์ จริยตันติเวทย์
การผลิตข้าวเหนียวโดยการพ่นไอน้ำก่อนการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชต์
14. น.ส.ดลฤดี ใจสุทธิ์
อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกและคุณภาพข้าวกล้องและข้าวขาวที่ได้จากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชต์
15. น.ส.รติยา ฐวพาณิชยานันท์
การอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยสุกด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด
16. น.ส.ชลิดา เนียมนุ้ย
ปรากฏการณ์ถ่ายเทและการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพระหว่างกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษา
กุ้ง

17. นายประธาน สติภัยเรืองศักดิ์

การพัฒนาเตาเผาชีวมวลร่วมกับถ่านหินโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไชด์แบบห้องเผาไหม้สั้น

นักศึกษาปริญญาโทร่วมโครงการวิจัย

1. นายปรกรณ์ เหลืองมาลาวัฒน์ (จบการศึกษา)

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำความเย็นข้าวเปลือก

2. นายณรงค์ศักดิ์ แก้วนิล (จบการศึกษา)

เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งกระเทียม

3. นายเฉลิมพร เอี่ยมมี (จบการศึกษา)

การผลิตข้าวหอมหนึ่งด้วยกระบวนการผสมผสาน

4. นส.พิมพ์พร แจ่มพลอย (จบการศึกษา)

นโยบายการวิจัยพลังงานหมุนเวียน

5. นายเชษฐ์ โชติบุญ (จบการศึกษา)

การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลในไชโลเก็บข้าวเปลือก

6. นายศรีมา แจ้คำ (จบการศึกษา)

การอบแห้งอาหารด้วยปั๊มความร้อนและ FIR

7. น.ส.สุนัยพร พรหมดวง (จบการศึกษา)

การอบแห้งสมุนไพรด้วยปั๊มความร้อน

8. น.ส.ปวีณา ปรัชญาวสิน (จบการศึกษา)

การทดลองอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

9. นายพยุ้งศักดิ์ ท่าไม้สุข (จบการศึกษา)

การอบแห้งข้าวสาลีเพื่อผลิตข้าวพร้อมกิน

10. นายสุทธิศักดิ์ แก้วนก (จบการศึกษา)

การอบแห้งกระเทียมระยะที่สอง

11. น.ส.รติยา สุวพานิชยานนท์ (จบการศึกษา)

การถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้งเมล็ดถั่วเหลือง

12. นายรัฐพร บัวชม (จบการศึกษา)

การอบแห้งเมล็ดกาแฟสดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

13. นายอริคม จิรจินดาเลิศ (จบการศึกษา)

การผลิตข้าวกล้องหนึ่งโดยเทคนิคฟลูอิดไชเซชัน

14. นายปรีดา ปรากฏมาก (จบการศึกษา)

การประยุกต์เครือข่ายรพูนในการอบแห้งเมล็ดพืช

15. นายประธาน สติภัยเรืองศักดิ์ (จบการศึกษา)

การผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่ง

16. น.ส.อุบลวรรณ ชนะภัย (จบการศึกษา)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

17. น.ส.ภาวิกา วงศ์แก้ว (จบการศึกษา)

การลดความชื้นของข้าวเปลือกโดยใช้เกลบบด

18. นายธนากร บุรณเพชร (จบการศึกษา) (ผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงดูพัฒนาการนักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการอบแห้งใบหม่อน
19. นายวิริยะ แสงทน (จบการศึกษา) (ผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงดูพัฒนาการนักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
ห่อความชื้นสัมพัทธ์ปิดสำหรับอุณหภูมิต่ำในเครื่องอบแห้ง
20. นายมนตรี มนต์พิลา (จบการศึกษา) (ผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงดูพัฒนาการนักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
21. นายวรวิทย์ กริยาวณิชกุล
การอบแห้งเนื้อไก่ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (จบการศึกษา)
22. นายพีระวัตร ทองนอก (จบการศึกษา)
การออกแบบและทดสอบเตาแลกเปลี่ยนแบบไซโคลนร่วมกับฟลูอิดไอเซชัน
23. นายฤทธิไกร งามชุ่ม (จบการศึกษา)
การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล
24. นายวรุฒ ยุทธชัย (จบการศึกษา)
อิทธิพลการแช่ที่มีต่อการลดลงของสารต่อต้านโภชนาการในเมล็ดถั่วเหลืองที่อบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน
25. นายศิริวัฒน์ ศิลป์ประเสริฐ (จบการศึกษา)
การอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
26. นายพลสันต์ วงษ์ศรี (จบการศึกษา)
การปรับปรุงและทดสอบเครื่องต้นแบบอบแห้งอาหารโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
27. นายเกียรติศักดิ์ จงสุวรรณรักษ์ (จบการศึกษา)
การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามมิติสำหรับการเก็บรักษาข้าวเปลือกในไซโลเหล็กทรงกระบอก
28. นายเสริมพงษ์ อติเรกรัตน์ (จบการศึกษา)
การอบแห้งอาหารโดยใช้ลมร้อนร่วมกับซิลิกาเจล
29. นายภูมิใจ สะอาดชม (จบการศึกษา)
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดภายใต้ความดันต่ำ
30. นส.นาภากรณ์พลายโก (จบการศึกษา) (ผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงดูพัฒนาการนักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
ผลของการพรีทรีตเมนต์ที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกล้วยแผ่น
31. น.ส.มัทนียา เขียวเวช (จบการศึกษา)
การเร่งข้าวเก่าโดยการอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศ
32. นายมานะ สุขะรา
อิทธิพลของระดับความสูงที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกล้วยแผ่น
33. นายสมคิด โฆษิตพันธ์วงศ์
อิทธิพลของเวลาและอุณหภูมิการแช่ที่มีต่อการผลิตข้าวหนึ่งโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
34. นายวิระ ศรีอาริยะกุล
อิทธิพลของการพ่นไอน้ำที่มีต่อการผลิตข้าวหนึ่งโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่ใช้อากาศร้อน
35. นายอนุชา ใจกล้า
เงื่อนไขที่เหมาะสมของการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันสำหรับการรักษาคุณภาพ

36. นายปัญญา ตีระกิจวัฒนา

การให้ความร้อนกับถั่วเหลืองโดยใช้เทคนิคฟลูอิดาเซชันร่วมกับการพ่นไอน้ำก่อนเพื่อลดสารต่อต้านโภชนาการ

37. น.ส.พรสิภาณัฐ ใจบุญ

การทดสอบเปรียบเทียบการอบแห้งลำไยด้วยเทคนิคต่างๆ

38. น.ส.จรรุวรรณ กุลวิศ

การศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพกล้วยแผ่น

39. นายคำพันธ์ บัวละพันธ์

การศึกษาเงื่อนไขการอบแห้งที่มีผลต่อการพองตัวของกล้วยแผ่น

40. น.ส.ศกุนตลา ภูเจริญ

การวิเคราะห์การใช้พลังงานในการผลิตเอทานอลโดยใช้วัตถุดิบต่างชนิด

4. ผลงาน

ผลงานวิจัยโดยสรุปมีดังนี้

1. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

- บทความวิจัยในวารสารนานาชาติ จำนวน 28 เรื่อง รวมค่าแฟคเตอร์ผลกระทบ (Impact factor) = 29.085 โครงการนี้มีค่าใช้จ่ายโดยประมาณ 4 ล้านบาท ดังนั้นค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการตีพิมพ์ผลงานในวารสารนานาชาติเท่ากับ 143,000 บาท/เรื่อง
- บทความวิจัยในวารสารในประเทศ จำนวน 13 เรื่อง
- บางบทในหนังสือ จำนวน 1 บท
- บทความวิจัยในรายงานการประชุมทางวิชาการนานาชาติ จำนวน 15 เรื่อง
- บทความวิจัยในรายงานการประชุมทางวิชาการในประเทศ จำนวน 60 เรื่อง

2. สิทธิบัตร

มีสิทธิบัตรที่อยู่ระหว่างการดำเนินการขอจดในประเทศไทย จำนวน 1 เรื่อง

3. ผลงานด้านการพัฒนาบุคลากรวิจัย

- ฝึกฝนอาจารย์ 13 คน นักศึกษาปริญญาเอก 17 คน นักศึกษาปริญญาโท 40 คน ทำงานร่วมกันเป็นทีมแบบสหสาขาวิชา มีนักศึกษาปริญญาเอกและปริญญาโทจบการศึกษา 8 และ 31 คน ตามลำดับ
- อาจารย์ที่ร่วมกลุ่มวิจัยได้รับทุนวิจัยจาก สกว. ดังนี้ ทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ 12 ทุน ทุนเมธีวิจัย 2 ทุน กำลังจะได้รับทุนเมธีวิจัยอีก 1 ทุน ทุน คปก. 2 ทุน
- อาจารย์ที่ร่วมกลุ่มวิจัยได้รับการเลื่อนตำแหน่งทางวิชาการจำนวน 7 คน

4. ผลงานที่นำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม

- มีผลงานวิจัยที่นำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมหลายเรื่อง บางเรื่องเป็นงานวิจัยเพิ่มเติมจากโครงการเมธีวิจัยอาวุโส ระยะที่ 1 ผลงานหลักได้แก่ เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดซ์เบดเตาเผาแลกเปลี่ยนโคลน เครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน เครื่องอบแห้งด้วย LPG นอกจากนี้ยังมีผลงานที่แนะนำกับภาคอุตสาหกรรมจนสามารถผลิตขาย ได้แก่ ระบบทำความเย็นข้าวเปลือกในไซโล และได้พัฒนาต้นแบบที่มีศักยภาพเชิงพาณิชย์ ได้แก่ เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล
- ให้คำปรึกษากับภาคอุตสาหกรรม จำนวน 15 เรื่อง

รายละเอียดของผลงานวิจัยมีดังนี้

1 Research Publication, Book Chapter and Patent:

International Journal Papers:

1. Wiriyaumpaiwong, S., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2003. Soybean drying by two-dimensional spouted bed. *Drying Technology-An International Journal* 21(9) 1739-1761. (IF = 0.987)
2. Prachayawarakorn, S., Sawanduanpen, S., Saynampheung, S., Poolpatarachewin, T., Soponronnarit, S. and Nathakaranakule, A. 2004. Kinetics of colour change during storage of dried garlic slices as affected by relative humidity and temperature. *Journal of Food Engineering* 62, 1-7. (IF = 1.22)
3. Tirawanichakul, Y., Prachayawarakorn, S., Varanyanon, W. and Soponronnarit, S. 2004. Simulation and grain quality for in-store drying of paddy. *Journal of Food Engineering* 64, 405-415. (IF = 1.22)
4. Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T. and Soponronnarit, S. 2004. Influence of FIR irradiation on paddy moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering* 65, 293-301. (IF = 1.22)
5. Wiriyaumpaiwong, S., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2004. Comparative study of heating process for full-fat soybeans. *Journal of Food Engineering* 65, 371-382. (IF = 1.22)
6. Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S., Wetchacama, S. and Chinnabun, K. 2004. Methodology of enhancing drying rate and improving maize quality in a fluidized-bed dryer. *Journal of Stored Products Research* 40, 379-393. (1.044)
7. Taechapairoj, C., Prachayawarakorn, S. and Soponronnarit, S. 2004. Characteristics of rice dried in superheated-steam fluidized-bed. *Drying Technology-An International Journal* 22(4), 719-743. (IF = 0.987)

8. Namsanguan, Y., Tia, W., Devahastin, S. and Soponronnarit, S. 2004. Drying kinetics and quality of shrimp under different two-stage drying processes. *Drying Technology-An International Journal* 22(4), 759-778. (IF = 0.987)
9. Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S., Varanyanon, W., Tungtrakul, P. and Soponronnarit, S. 2004. Effect of fluidized bed drying temperature on various quality attributes of paddy. *Drying Technology-An International Journal* 22(7), 1731-1754. (IF = 0.987)
10. Devahastin, S., Suvarnakuta, P., Soponronnarit, S., Mujumdar, A.S., 2004. A comparative study of low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material. *Drying Technology-An International Journal* 22(8), 1845-1867. (IF = 0.987) (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เล็งทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
11. Prachayawarakorn, S., Prachayawasin, P. and Soponronnarit, S. 2004. Effective diffusivity and kinetics of urease inactivation and color change during processing of soybeans with superheated-steam fluidized bed. *Drying Technology-An International Journal* 22(9), 2095-2118. (IF = 0.987) (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เล็งทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
12. Prachayawarakorn, S., Poomsa-ad, N. and Soponronnarit, S. 2005. Quality maintenance and economy with high-temperature paddy-drying process. *Journal of Stored Products Research* 41, 333-351. (1.044)
13. Suvarnakuta, P., Devahastin, S., Soponronnarit, S., Mujumdar, A.S., 2005. Drying kinetics and inversion temperature in a low-pressure superheated steam drying system. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 44(6), 1934-1941 (IF = 1.424). (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เล็งทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
14. Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Terdyothin, A. 2005. Investigations on head-rice yield and operating time in the fluidized-bed drying process : Experiment and simulation. *Journal of Stored Products Research* 41, 387-400. (1.044)
15. Prachayawarakorn, S., Choteboon, C. and Soponronnarit, S. 2005. Simultaneous momentum, heat and mass transfer with color change during paddy storage in silo. *Drying Technology-An International Journal* 23(1&2), 205-223. (IF = 0.987)
16. Namsanguan, Y., Tichangtong, S., Tia, W., Soponronnarit, S. and Devahastin, S. 2005. Simulation of a mixed air and superheated steam drying system. *Drying Technology-An International Journal* 23(1&2), 225-248. (IF = 0.987)
17. Madhiyanon, T. and Soponronnarit, S. 2005. High temperature spouted bed paddy drying with varied downcomer air flows and moisture contents: Effects on drying kinetics, critical moisture content, and milling quality. *Drying Technology-An International Journal* 23(3), 473-495. (IF = 0.987) (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เล็งทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
18. Rittidech, S., Dangenon, W. and Soponronnarit, S. 2005. Closed-ended oscillating heat-pipe (CEOHP) air-preheater for energy thrift in a dryer. *Applied Energy* 81, 198-208. (0.378) (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เล็งทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)

19. Prachayawarakorn, S., Tia, W., Poopaiboon, K. and Soponronnarit, S. 2005. Comparison of performances of pulsed and conventional fluidized-bed dryers. *Journal of Stored Products Research* 41, 479-497. (1.044)
20. Rordprapat, W., Nathakarakakule, A., Tia, W. and Soponronnarit, S. 2005. Comparative study of fluidized bed paddy drying using hot air and superheated steam. *Journal of Food Engineering* 71, 28-36. (IF = 1.209)
21. Lertsatitthanakorn, C., Rerngwongwitaya, S. and Soponronnarit, S. 2006. Field experiments and economic evaluation of an evaporative cooling system in a silkworm rearing house. *Biosystems Engineering* 93, 213-219. (IF=0.496) (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
22. Soponronnarit, S., Nathakarakakule, A., Jirajindalert, A. and Taechapairoj, C., 2006. Parboiling brown rice using superheated steam fluidization technique. *Journal of Food Engineering* 75, 423-432. (IF = 1.209)
23. Taechapairoj, C., Prachayawarakorn, S., and Soponronnarit, S., 2006. Modelling of parboiled rice in superheated steam fluidized bed. *Journal of Food Engineering* 76, 411-419. (IF=1.209)
24. Prachayawarakorn, S., Kaewnin, N., Natahakarakakule, A. and Soponronnarit, S. 2006. Effects of peeled and unpeeled garlic cloves on the changes of drying rate and quality. *Drying Technology-An International Journal* 24(1), 65-75. (IF=0.987)
25. Prachayawarakorn, S., Prachayawasin, P. and Soponronnarit, S. 2006. Heating process of soybean using hot-air and superheated-steam fluidized-bed dryers. *LWT-Food Sci Technol* 39, 770-778. (IF=0.818)
26. Madhiyanon, T., Techaprasan, A. and Soponronnarit, S. 2006. Mathematical models based on heat transfer and coupled heat and mass transfer for rapid high temperature treatment in fluidized bed: application for grain heat disinfestations. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49, 2277-2290. (IF=1.22)
27. Prachayawarakorn, S., Ruengnarong, S. and Soponronnarit, S. 2006. Characteristics of heat transfer in two-dimensional spouted bed. *Journal of Food Engineering* 76, 327-333. (IF=1.209)
28. Witinantakit, K., Prachayawarakorn, S., Nathakarakakule, A. and Soponronnarit, S. 2006. Paddy drying using adsorption technique: experiments and simulation. *Drying Technology-An International Journal* 24, 609-617. (IF=0.987)

Local Journal Papers:

1. Wanichsumran, S., Tungtrakul, P., Waranyanon, W. and Soponronnarit, S. 2003. Increased yield in head rice of poor quality paddy by combined soaking and fluidized bed drying. *The Journal of the Royal Institute of Thailand* 28(4), 1160-1169 (in Thai).
2. Madhiyanon, T., Piriyaungroj, N., Nathakarakakule, A. and Soponronnarit, S. 2003. The vortexing-fluidized bed combustor cold model : experimental study of air – rice husk flow

- behavior. Research and Development Journal of Engineering Institute of Thailand, 14(4), 59-67 (in Thai). (เป็นผลงานในฐานะที่ปรึกษาและวิจัยร่วม)
3. Leungmalawat, P., Nathakaranakule, A. and Soponronnarit, S. 2004. Developing a mathematical model of paddy cooling system. The Journal of the Royal Institute of Thailand 29(1), 64-77 (in Thai).
 4. Soponronnarit, S., Taechapairoj, C. and Prachayawarakorn, S. 2004. A new technique for the manufacture of steamed rice. The Journal of the Royal Institute of Thailand 29(1), 78-86 (in Thai).
 5. Chaoranan, A., Soponronnarit, S. and Tia, W. 2004. Water heating using heat pump. Research and Development Journal of Engineering Institute of Thailand, 15(2), 31-37 (in Thai).
 6. Tia, W., Jangploy, P., Sakunpongmalee and Soponronnarit, S. 2004. Status and research trends on biomass energy in Thailand. The Journal of the Royal Institute of Thailand 29(3), 557-567 (in Thai).
 7. Madhiyanon, T., Piriyaungroj and Soponronnarit, S. 2004. A novel vortex-fluidized bed combustor with two combustion chambers for rice husk fuel. Songklanakarin J. Sci. Technol. 26(6), 875-893 (in Thai). (เป็นผลงานในฐานะที่ปรึกษาและวิจัยร่วม)
 8. Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2004. Mathematical modelling and simulation of fluidized-bed drying, tempering and ventilation of grains. KKU Engineering Journal 32(1), 1-14.
 9. Eiammi, C., Tangtrakul, P., Tachapairoj, C. and Soponronnarit, S. 2004. Combination process of steaming and drying for parboiling aromatic rice. Thai Society of Agricultural Engineering Journal 11(1), 24-33 (in Thai).
 10. Soponronnarit, S., Jirajindalert, Nathakaranakule, A., Taechapairoj, C. 2005. Parboiling brown rice using superheated steam fluidization technique. The Journal of the Royal Institute of Thailand 30(1), 76-91 (in Thai).
 11. Rordprapat, W., Nathakaranakule, A., Tia, W. and Soponronnarit, S. 2005. Development of a superheated-steam-fluidized-bed dryer for parboiled rice. The Journal of the Royal Institute of Thailand 30(2), 363-378 (in Thai).
 12. Tia, W., Jangploy, P., Sakunpongmalee and Soponronnarit, S. 2004. Status and research trends on renewable energy in Thailand. The Journal of the Royal Institute of Thailand 30(3), 659-677 (in Thai).
 13. Taechapairoj, C., Sinprasert, S., Prachayawarakorn, S. and Soponronnarit, S. 2005. Effect of drying medium on drying kinetics and beef quality. The Journal of the Royal Institute of Thailand 30(4), 970-987 (in Thai).

Book Chapters:

1. Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2003. Research and development work on paddy drying in South-east Asia. Lectures and Workshop Exercises on Drying of Agricultural and Marine Products. Eds: Ghin, Y.B. et al., ASEAN SCNCER, pp.87-112.

Keynote/Invited speaker in Conferences/Symposiums:

1. Soponronnarit, S. 2003. Fluidised bed grain drying. Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Drying Conference, 1-3 September 2003, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, pp. 55-71 (keynote paper).
2. Soponronnarit, S. 2003. Fluidised bed grain drying. Presented at the International Seminar on Grain Drying in South Asia, 1-2 Dec. 2003, Durgapur, India (keynote paper).
3. Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2004. Mathematical modelling and simulation of fluidized-bed drying, tempering and ventilation of grains. Proc. 15th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-15), 9th-13th May 2004, Bangkok, Thailand, pp. 8-14 (keynote paper).
4. Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2004. Mathematical modelling and simulation of fluidized-bed drying, tempering and ventilation of grains. Presented at The 18th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, Khonkaen, 18-20 Oct. 2004. Also in KKU Engineering Journal 32(1), 1-14.
5. Tia, W., Jangploy, P., Sakunpongmalee, K. and Soponronnarit, S. 2005. Status and research trends on renewable energy in Thailand. CD-Rom Proceedings of the 1st Energy Network Conference, Pattaya, 11-13 May 2005, 18 p. (invited paper in Thai).
6. Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2005. Research and development work on paddy drying in South-East Asia. Paper presented at the 3rd National Technical Seminar on Post-harvest/Post-production Technology, Cha-am, 10-11 Oct. 2005 (keynote paper).
7. Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Taechapairoj, C. 2005. New method for producing parboiled rice under high-temperature superheated-steam fluidization. Proc. of the 4th Asia Pacific Drying Conference, 13-15 Dec. 2005, Kolkata, India (invited paper).
8. Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2006. Research and development work on paddy drying in South-East Asia. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, 23-24 Jan. 2006, Marasarakham, pp. 15-31 (keynote paper).

International Conference Papers:

1. Namsanguan, Y., Tia, W., Devahastin and S. Soponronnarit, S. 2003. Drying kinetics and quality of shrimp undergoing two-stage superheated steam and heat pump drying. Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Drying Conference, 1-3 September 2003, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, pp. 457-467.
2. Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W. and Soponronnarit, S. 2003. Diffusion model of a wide drying temperature range for fluidized bed paddy drying. Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Drying Conference, 1-3 September 2003, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, pp. 657-666.

3. Jamradloedluk, J., Nathkaranakule, A., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2003. Drying of durian slices in superheated steam and hot air. Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Drying Conference, 1-3 September 2003, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, pp. 667-677. (เป็นผลงานในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมทุน คปภ. สกว.)
4. Uengkimbuan, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Nathkaranakule, A. 2003. Comparative study of pork dried using superheated steam and hot air. Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Drying Conference, 1-3 September 2003, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, pp. 679-691. (เป็นผลงานในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมทุน คปภ. สกว.)
5. Rordprapat, W., Nathkaranakule, A., Tia, W. and Soponronnarit, S. 2003. Effect of soaking time and drying media on qualities of paddy dried by fluidization technique. Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Drying Conference, 1-3 September 2003, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, pp. 693-704.
6. Meeso, N., Nathkaranakule, A., Madhiyanon, T. and Soponronnarit, S. 2003. Effect of far-infrared radiation and tempering on subsequent drying of paddy by fluidization technique. Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Drying Conference, 1-3 September 2003, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, pp. 705-720.
7. Sathapomprasath, K., Devahastin, S. and Soponronnarit, S. 2004. Effects of operating conditions on the overall performance of an air and superheated steam-operated impinging stream dryer. Proc. 15th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-15), 9th-13th May 2004, Bangkok, Thailand, pp. 55-59.
8. Suvarnakuta, P., Devahastin, S., Soponronnarit, S. and Mujumdar, A.S. 2004. Drying rate and inversion temperatures of porous particles undergoing low-pressure superheated steam and vacuum drying. Proc. 15th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-15), 9th-13th May 2004, Bangkok, Thailand, pp. 60-64. (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
9. Rittidech, S., Soponronnarit, S. and Dangelton, W. 2004. Effect of hot gas temperature and working fluid on effectiveness of a closed-end oscillating heat pipe air-preheater for dryer. Proc. 15th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-15), 9th-13th May 2004, Bangkok, Thailand, pp. 65-72. (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
10. Prachayawarakorn, S., Ruengnarong, S. and Soponronnarit, S. 2004. Characteristics of heat transfer in two-dimensional spouted bed. Proc. 15th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-15), 9th-13th May 2004, Bangkok, Thailand, pp. 73-78.
11. Tirawanichakul, Y., Prachayawarakorn, S., Varanyanon, W. and Soponronnarit, S. 2004. In-store paddy drying under tropical atmosphere: strategy and quality aspects. Proc. 15th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-15), 9th-13th May 2004, Bangkok, Thailand, pp. 431-437.
12. Prachayawarakorn, S., Choteboon, C. and Soponronnarit, S. 2004. Moisture transport and change of yellowness of paddy during storage. Proc. 15th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-15), 9th-13th May 2004, Bangkok, Thailand, pp. 609-614.

13. Jamradloedluk, J., Nathakaranakule, A., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2005. Modelling of dehydration and rehydration kinetics of durian. Proc. 2nd Int. Conf. on Innovations in Food Processing Technology and Engineering, 11-13 Jan. 2005, Bangkok, Thailand, pp. 267-277.
14. Witinantakit, K., Prachayawarakorn, S., Nathakaranakule, A. and Soponronnarit, S. 2005. Drying of paddy using rice husk as adsorbent. Proc. 2nd Int. Conf. on Innovations in Food Processing Technology and Engineering, 11-13 Jan. 2005, Bangkok, Thailand, pp. 312-319.
15. Uengkimbuan, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Nathakaranakule, A. 2005. Drying kinetics and physical properties of dried pork using two-stage techniques. Proc. 2nd Int. Conf. on Innovations in Food Processing Technology and Engineering, 11-13 Jan. 2005, Bangkok, Thailand, pp. 320-328.

Local Conference Papers:

1. Madhiyanon, T., Piriyaungroj, N., Nathakaranakule, A. and Soponronnarit, S. 2003. Development of a vortexing-fluidized bed combustor for rice husk fuel. CD Rom Proc. the 17th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, KMITNB-Prachinburi., 15-17 Oct. 2003, 9 p (in Thai). (เป็นผลงานในฐานะที่ปรึกษาและวิจัยร่วม)
2. Madhiyanon, T., Baingam, M. and Soponronnarit, S. 2003. Solid fuel producing from sawdust by extrusion technique. CD Rom Proc. the 17th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, KMITNB-Prachinburi., 15-17 Oct. 2003, 6 p (in Thai). (เป็นผลงานในฐานะที่ปรึกษาและวิจัยร่วม)
3. Madhiyanon, T. and Soponronnarit, S. 2003. High temperature spouted bed grain drying with various downcomer-airflow. CD Rom Proc. the 17th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, KMITNB-Prachinburi., 15-17 Oct. 2003, 12 p (in Thai). (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
4. Jamradloedluk, J., Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., and Prachayawarakorn, S. 2004. Compressive behaviors of durian slices during hot air and superheated steam drying. Proc. the 5th Technical Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, 26-27 April 2004, Bangkok, pp. 1-7. (เป็นผลงานในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมทุน คปก. สกว.)
5. Uengkimbuan, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S., and Nathakaranakule, A. 2004. Pork drying using superheated steam and hot air. Proc. the 5th Technical Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, 26-27 April 2004, Bangkok, pp. 8-14 (in Thai). (เป็นผลงานในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมทุน คปก. สกว.)
6. Witinantakit, K., Nathakaranakule, A., Prachayawarakorn, S., and Soponronnarit, S. 2004. Drying of paddy using rice husk as an adsorption medium. Proc. the 5th Technical Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, 26-27 April 2004, Bangkok, pp. 15-21 (in Thai).
7. Jaekum, S., Nathakaranakule, A., Prachayawarakorn, S., and Soponronnarit, S. 2004. Fruit and herb drying using combined techniques of heat pump and far-infrared radiation. Proc. the 5th

Technical Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, 26-27 April 2004, Bangkok, pp. 22-28 (in Thai).

8. Tia, W., Soponronnarit, S., and Athasart, S. 2004. Cogeneration potential of a parboiled rice mill. Proc. the 5th Technical Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, 26-27 April 2004, Bangkok, pp. 29-35 (in Thai).
9. Prachayawasin, P., Soponronnarit, S., and Prachayawarakom, S. 2004. Soybean drying using superheated steam fluidized bed. Proc. the 5th Technical Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, 26-27 April 2004, Bangkok, pp. 36-43 (in Thai).
10. Kaewnin, N., Prachayawarakom, S., Soponronnarit, S., and Nathakaranakule, A. 2004. Appropriate strategy for drying garlic. Proc. the 5th Technical Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, 26-27 April 2004, Bangkok, pp. 44-51 (in Thai).
11. Iam-mi, Ch., Tungtrakul, P., Taechapairoj, Ch., and S., Soponronnarit. 2004. The drying for parboiling aromatic rice using superheated-steam fluidized bed. Proc. the 5th Technical Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, 26-27 April 2004, Bangkok, pp. 52-61 (in Thai).
12. Prakotmak, P., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2004. Effect of pore size distribution on water transport inside porous materials. Proc. the 5th Technical Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, 26-27 April 2004, Bangkok, pp. 62-69 (in Thai).
13. Teeboonma, U. and Soponronnarit, S. 2004. Heat pump drying design using optimization technique. Proc. the 5th Technical Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, 26-27 April 2004, Bangkok, pp. 70-77 (in Thai).
14. Buranapetch, T., Soponronnarit, S., and Poomsa-Add, N. 2004. Equilibrium moisture content and drying kinetics of mulberry leaves. Proc. the 5th Technical Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, 26-27 April 2004, Bangkok, pp. 125-131 (in Thai). (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงดูพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
15. Teeboonma, U. and Soponronnarit, S. 2004. Comparative assessment of R134a, R407C, and R410A as alternatives to R22. Proc. the 5th Technical Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, 26-27 April 2004, Bangkok, pp. 139-146.
16. Sathitruangsak, P., Soponronnarit, S. and Madhiyanon, T. 2004. Briquette fuel product from coconut shell by extrusion technique using molass as binder. CD Rom Proc., The 18th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, Khonkaen, 18-20 Oct. 2004, 7p. (in Thai).
17. Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P. and Soponronnarit, S. 2004. A study of influences of binder treated from wheat straw on physical properties of fuel briquette. CD Rom Proc., The 18th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, Khonkaen, 18-20 Oct. 2004, 5p. (in Thai).
18. Madhiyanon, T., Piriyaungroj, N., Thongnork, P. and Soponronnarit, S. 2004. Vortexing-fluidized bed combustor (VFBC) : Part I Effects of primary air on performance of combustor. CD Rom

- Proc. The 18th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, Khonkaen , 18-20 Oct. 2004, 9p. (in Thai). (เป็นผลงานในฐานะที่ปรึกษาและวิจัยร่วม)
19. Madhiyanon, T., Piriyaungroj, N., Thongnork, P. and Soponronnarit, S. 2004. Vortexing-fluidized bed combustor (VFBC) : Part II Effects of secondary air on performance of combustor. CD Rom Proc. The 18th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, Khonkaen , 18-20 Oct. 2004, 9p. (in Thai). (เป็นผลงานในฐานะที่ปรึกษาและวิจัยร่วม)
 20. Thuwapanichayanan, R., Soponronnarit, S. and Prachawarakorn, S. 2004. Mathematical model for fluidized bed drying using superheated steam. CD Rom Proc. The 18th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, Khonkaen, 18-20 Oct. 2004, 6p. (in Thai).
 21. Dangton, W., Rittidech, S. and Soponronnarit, S. 2004 Performance tests of a closed-end oscillation heat pipe air preheater for dryer. CD Rom Proc. The 18th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, Khonkaen, 18-20 Oct. 2004, 8p. (in Thai). (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
 22. Montripilla, M., Soponronnarit, S. and Poomsa-ad, N. 2004. Drying kinetics of cooked glutinous rice using superheated steam and hot air. CD Rom Proc. The 18th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, Khonkaen, 18-20 Oct. 2004, 6p. (in Thai). (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
 23. Jutajan, W., Soponronnarit, S., Siriamornpun, S. and Poomsa-Ad, N. 2005. Physical properties of cooking glutinous rice after drying. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 379-386 (in Thai).
 24. Sathapomprasath, K., Devahastin, S. and Soponronnarit, S. 2005. Effects of operating conditions on the overall performance of impinging stream dryer. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 463-471.
 25. Witinantakit, K., Prachayawarakorn, S., Nathkaranakule, A. and Soponronnarit, S. 2005. Modeling of paddy drying using rice husk as adsorption medium. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 472-482 (in Thai).
 26. Jamradloedluk, J., Nathkaranakule, A., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2005. Rehydration kinetics of dried durian. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 483-490.
 27. Tachapiroch, C., Prachayawarakorn, S., Trangtrakoon, P., Tarmaisuk, P. and Soponronnarit, S. 2005. The effect of drying on instant rice properties. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 491-498 (in Thai).
 28. Uengkimbuan, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Nathkaranakule, A. 2005. Drying kinetics and physical properties of pork dried using two-stage techniques. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 499-506 (in Thai).

29. Wongkaew, P., Prachayawarakorn, S., Nathkaranakule, A. and Soponronnarit, S. 2005. Effects of bulk density of rice husk and mixing ratio on drying characteristics of paddy. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 507-518 (in Thai).
30. Buakhom, R., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2005. Drying of coffee berries using heat pump and hot air. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 519-529 (in Thai).
31. Ngamchum, R., Swasdisevi, T., Devahastin, S. and Soponronnarit, S. 2005. Cavendish drying with far infrared-vacuum dryer. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 530-542 (in Thai).
32. Kraiwanichkul, W., Nathkaranakule, A. and Soponronnarit, S. 2005. Chicken drying using superheated steam combined with heat pump. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 543-554 (in Thai).
33. Yuttachai, W., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2005. Effect of soaking on urease inactivation and protein solubility in soybean during treatment with hot air fluidized bed drying. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 555-565 (in Thai).
34. Kaewnok, S., Prachayawarakorn, S., Nathkaranakule, A. and Soponronnarit, S. 2005. Effects of temperature on drying characteristics and quality of garlic clove. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 566-576 (in Thai).
35. Madhiyanon, T., Adirekrut, S., Sathitruangsak, P. and Soponronnarit, S. 2005. A study of coconut drying using hot air combined with desiccant. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 577-586 (in Thai).
36. Chanapai, U., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 2005. Mathematical modeling for a single soybean drying with superheated steam and hot air. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 587-601 (in Thai).
37. Namsanguan, Y., Tia, W., Devahastin, S. and Soponronnarit, S. 2005. Characteristics of shrimp dried by two-stage drying technique at different drying conditions. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 620-629 (in Thai).
38. Kitikhun, C., Soponronnarit, S., Teeboonma, U. and Wiriyaumpaiwong, S. 2005. Production of steam for domestic industry using traveling grate combustor as heat source. In CD-Rom Proc. of the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, 30th-31st March 2005, pp. 858-867 (in Thai).

39. Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Thongnork, P., Soponronnarit, S. and Wongchang, T. 2005. A short combustion chamber fluidized-bed combustor: Part I. Effects of primary air on combustor performance. In CD-Rom Proceedings of the 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 19-21 October 2005, 8p.
40. Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Wongchang, T. and Soponronnarit, S. 2005. A short combustion chamber fluidized-bed combustor: Part II. Effects of upper secondary air on combustor performance. In CD-Rom Proceedings of the 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 19-21 October 2005, 9p.
41. Madhiyanon, T., Lapirattanakun, A., Sathitruangsak, P. and Soponronnarit, S. 2005. Vortexing-fluidized bed combustor: The performance and gas distribution, within a combustor. In CD-Rom Proceedings of the 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 19-21 October 2005, 15p.
42. Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P. and Soponronnarit, S. 2005. Study of solid fuel produced from ground anthracite by extrusion technique. In CD-Rom Proceedings of the 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 19-21 October 2005, 6p.
43. Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Adirekrut, S. and Soponronnarit, S. 2005. A coconut drying kinetics comparison between drying in a combined hot air-desiccant system and a hot air system. In CD-Rom Proceedings of the 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 19-21 October 2005, 8p.
44. Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Adirekrut, S. and Soponronnarit, S. 2005. A study of the influences of drying air relative humidity in a combined hot air-desiccant dryer. In CD-Rom Proceedings of the 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 19-21 October 2005, 10p.
45. Yangwo, P., Wiriyaumpaiwong, S. and Soponronnarit, S. 2006. Multi-stage reduction of moisture of paddy by using tapioca flour as adsorption media. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.381-388 (in Thai).
46. Rikham, K., Wiriyaumpaiwong, S. and Soponronnarit, S. 2006. Multi-stage reduction of moisture of paddy by using rice husk as adsorption media. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.389-395 (in Thai).
47. Witinantakit, K., Prachayawarakom, S., Nathkaranakule, A. and Soponronnarit, S. 2006. Multi-pass drying of paddy using rice husk. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.396-402 (in Thai).
48. Jamradioedluk, J., Soponronnarit, S., Nathkaranakule, A. and Prachayawarakom, S. 2006. Adsorption isotherms of durian flour undergoing three different drying techniques. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.403-410 (in Thai).

49. Wongsri, P., Swasdsevi, T., Prachayawarakorn, S. and Soponronnarit, S. 2006. Superheated steam pork meat drying. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.437-446 (in Thai).
50. Plytho, N., Prachayawarakorn, S., Tia, W. and Soponronnarit, S. 2006. Effect of pretreatment on drying kinetics and quality of banana slices. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.447-455 (in Thai).
51. Nimmol, C., Devahastin, S., Swasdisevi, T. and Soponronnarit, S. 2006. Drying of carrot by far-infrared radiation under vacuum condition. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.456-463 (in Thai).
52. Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., and Soponronnarit, S. 2006. Drying of foam-mat ripe bananas. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.464-472 (in Thai).
53. Sinprasert, S., Taechapairoj, C., Prachayawarakorn, S. and Soponronnarit, S. 2006. Investigation of drying kinetics of beef dried using superheated steam and hot air. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.473-481 (in Thai).
54. Chiawwet, M., Prachayawarakorn, S., Tungtrakul, P. and Soponronnarit, S. 2006. Accelerating aging of paddy using fluidized bed drying followed by tempering. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.482-490 (in Thai).
55. Jaisut, D., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W., Tungtrakul, P. and Soponronnarit, S. 2006. Producing high quality brown rice using fluidization technique. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.491-499 (in Thai).
56. Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T. and Soponronnarit, S. 2006. Feasibility study of combined FIR and hot-air convection in fluidized bed paddy drying. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.500-507 (in Thai).
57. Jariyatontivait, W., Prachayawarakorn, S., Teachapairoj, C. and Soponronnarit, S. 2006. Effects of soaking time and pre-steaming for production of parboiled rice using hot air fluidized bed. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.508-515 (in Thai).
58. Luangmalawat, P., Nathakaranakule, A., Prachayawarakorn, S., Tungtrakul, P. and Soponronnarit, S. 2006. Effect of drying methods on quality of cooked rice. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.516-524 (in Thai).
59. Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Adirekrut, S. and Soponronnarit, S. 2006. A study of coconut drying kinetics by fluidized bed technique. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.525-530 (in Thai).

60. Jamradloedluk, J., Soponronnarit, S., Nathakarakakule, A. and Prachayawarakom, S. 2006. Physical and pasting properties of durian flour obtained by different drying methods. In CD-Rom Proc. of the 7th National Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Mahasarakham Univ., 23rd-24th January 2006, pp.566-572 (in Thai).

Patents:

1. Equipment and processes in steaming and drying cereal grains using superheated steam fluidization technique. Patent (Invention) pending No. 083492.

2 ผลงานที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรม:

ผลงานที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ต่อเนื่องจากโครงการที่แล้ว

1. เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไธซ์เบด บริษัทเอกชนที่ร่วมวิจัยได้ผลิตจำหน่ายแล้วประมาณ 250 เครื่อง โดยมียอดขายปีละประมาณ 25 เครื่อง ปัจจุบันมีหลายบริษัทผลิตจำหน่ายอย่างแพร่หลาย
2. เตาเผาแกสไบโอโคลน บริษัทเอกชนที่ร่วมวิจัยได้ผลิตจำหน่ายแล้วประมาณ 250 เครื่อง โดยมียอดขายปีละประมาณ 25 เครื่อง ปัจจุบันมีหลายบริษัทผลิตจำหน่ายอย่างแพร่หลาย
3. เครื่องอบแห้งปื้มความร้อน บริษัทเอกชนที่ร่วมวิจัยได้ผลิตจำหน่ายแล้วประมาณ 25 เครื่อง
4. เครื่องอบแห้งแบบตู้โดยใช้ LPG บริษัทเอกชนที่ร่วมวิจัยได้ผลิตจำหน่ายแล้วประมาณ 25 เครื่อง

ผลงานที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมในโครงการนี้

1. ได้ให้คำปรึกษากับคุณณรงค์ศักดิ์ ภูธรนะพิบูล บริษัทเทอร์โมคูลซ์พพลาย แอนด์ เซอร์วิส จำกัด กทม. เรื่องการทำความเย็นข้าวเปลือกที่เก็บรักษาในไซโล ปัจจุบันได้ผลิตขายให้กับโรงสีข้าวหลายแห่ง
2. ได้จัดสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไธซ์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
3. ได้จัดสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องอบแห้งปื้มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล

ผลงานที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมในโครงการนี้ในรูปแบบที่ปรึกษาโครงการวิจัย/ร่วมวิจัย

1. เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบด อยู่ระหว่างการสร้าง (ดูภาคผนวก)
2. การผลิตเชื้อเพลิงแท่งแข็งจากถ่านกะลามะพร้าวโดยเทคนิคเอ็กทราซัน ได้ถ่ายทอดเทคโนโลยี (ดูภาคผนวก)

การให้คำปรึกษากับภาครัฐกิจอุตสาหกรรม

- 31 มกราคม 2547 คุณสุรเชษฐ์ บุชบกแก้ว จังหวัดลำพูน ขอคำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้เตาเผาแกสที่ใช้กับเครื่องอบแห้งลำไยขนาดใหญ่ อัตราความร้อนจากเตาประมาณ 1 MW

- 29 มีนาคม 2547 ห้างหุ้นส่วนจำกัดไทยฟิลเตอร์เทค กทม. โดย คุณวิโรจน์ จิระกรานนท์ ปรึกษาวិธีการ
อบแห้งซีเมนต์จากโรงงานเป้งมันสำปะหลัง
- 12 กรกฎาคม 2547 โรงงานน้ำมันมะพร้าวมงคลเจริญทรัพย์ 2 จังหวัดราชบุรี โดย คุณอนุวัฒน์ คงอุดม-
เกียรติ ปรึกษาวิธีการอบแห้งเนื้อมะพร้าวโดยใช้ความร้อนจากเตาเผาฟืน
- 12 กรกฎาคม 2547 โรงสีศิริวิทยุญ จังหวัดฉะเชิงเทรา โดย คุณพิเชษฐ์ โดนิตวงศ์ ปรึกษาเรื่อง การ
ออกแบบเตาแกลบเพื่อใช้กับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก
- 16 กรกฎาคม 2547 ส่วนส่งเสริมวิศวกรรมเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร โดย คุณจงรักษ์ งามดี ขอ
คำปรึกษาวิธีการปรับปรุงการไหลของลมร้อนในเครื่องอบแห้งแบบตู้ ซึ่งภายในบรรจุ
ถาดใส่ผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ลมร้อนไหลอย่างสม่ำเสมอ
- 18 กันยายน 2547 บริษัทเทอร์โมคูลซ์พพลาย แอนด์ เซอร์วิส จำกัด กทม. โดย คุณณรงค์ศักดิ์ ภูธร-
พิบูล ปรึกษาเรื่องการทำความเย็นข้าวเปลือกที่เก็บรักษาในไซโล ได้รับรายงานว่า
ได้ผลดีขายให้กับโรงสีข้าวหลายแห่ง
- 8 เมษายน 2548 กลุ่มผู้ประกอบการโรงสีจากสามประเทศในอเมริกากลาง ได้แก่ เม็กซิโก โคลัมเบีย
และเวเนซุเอลา จำนวน 8 คน เข้าเยี่ยมชมงานวิจัยด้านการอบแห้งข้าวเปลือกที่
ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้ง คณะพลังงานและวัสดุ มจร.
- 22 เมษายน 2548 บริษัทธนาคุณอินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด กทม. โดยคุณวิมล เสือเปรม ปรึกษาเกี่ยวกับ
การระบายอากาศในไซโลเก็บข้าวเปลือกขนาด 1,000 ตัน
- 19 พฤษภาคม 2548 กลุ่มบริษัทธรรมสรณ์ กทม. โดย คุณธิดาวิวัฒน์ และคุณชจร สมลาย ปรึกษาวิธีการ
นั่งและอบแห้งขยะอินทรีย์ภายใต้ความดันสูง
- 1 มิถุนายน 2548 กลุ่มบริษัทธรรมสรณ์ กทม. ปรึกษาเป็นครั้งที่ 2
- 16 มิถุนายน 2548 กลุ่มบริษัทธรรมสรณ์ กทม. ปรึกษาเป็นครั้งที่ 3
- 20 มิถุนายน 2548 บริษัทแอควาเนซ คอมบัสชั่น เอ็นจิเนียริง จำกัด กทม. โดย คุณวิรัชชัย วชิรเกตุร
และบริษัท ยูโร-ไทย เอ็นจิเนียริง จำกัด โดยคุณวรชัย นิเวศวิวัฒน์ ปรึกษาวิธีการ
อบแห้งลำไย
- 24 สิงหาคม 2548 ผู้ประกอบการโรงสีที่ใหญ่ที่สุดในโลกจากประเทศสหรัฐอเมริกา (Riceland Food Inc.)
จำนวน 4 คน เข้าเยี่ยมชมงานวิจัยด้านการอบแห้งข้าวเปลือกที่ห้องปฏิบัติการวิจัย
เทคโนโลยีการอบแห้ง คณะพลังงานและวัสดุ มจร.
- 10 พฤศจิกายน 2548 บริษัทร็อคเอเชีย จำกัด จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยคุณปริชา แซ่ลิม ปรึกษาวิธีการ
อบแห้งเยื่อเปลือกไม้เพื่อเป็นเชื้อเพลิง
- 27 พฤษภาคม 2549 บริษัทเทอร์โมคูลซ์พพลาย แอนด์ เซอร์วิส จำกัด กทม. โดย คุณณรงค์ศักดิ์ ภูธร-
พิบูล ปรึกษาเรื่องการผลิตเครื่องอบแห้งแบบบีบความร้อนเพื่อขาย

3 รายชื่อนักศึกษาที่ทำวิทยานิพนธ์แล้วเสร็จ:

1. นายปรกรณ์ เหลืองมาลาวัฒน์ ต.ค. 46 วศ.ม. เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มจร. "การพัฒนา
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำความเย็นข้าวเปลือก"
2. นายเฉลิมพร เอี่ยมมี ต.ค. 46 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "การรวมกระบวนการผลิตของการนั่ง
ข้าวและการอบแห้งข้าวหนึ่งสำหรับข้าวหอม"

3. นายณรงค์ศักดิ์ แก้วนิล พ.ย. 46 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "การการศึกษาหาแนวทางการออกแบบแห่งกระเทียมที่เหมาะสม"
4. นายชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ ต.ค. 46 วศ.ม. เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มจร. "การออกแบบห้องข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไคส์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง"
5. นายเชษฐ โชติบุญ ต.ค. 46 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "การจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเก็บข้าวเปลือกในถังเก็บโลหะ"
6. นายศรีมา แจ่มคำ พ.ย. 46 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "การออกแบบหม้อไอน้ำโดยใช้ปฏิกิริยาความร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกล"
7. นางสาวพิมพ์พร แจ่มพลอย ธ.ค. 46 วศ.ม. เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มจร. "แนวทางการวิจัยพลังงานชีวมวลและพลังงานขนาดเล็กสำหรับประเทศไทย"
8. นายยุทธนา ภูริวงษ์กุล ม.ค. 47 ป.ร.ด. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "การจัดการข้าวเปลือกชั้นโดยการอบแห้งในที่เก็บภายใต้สภาวะอากาศร้อนชื้น"
9. นางสาวปวีณา ปรัญญาวคิน มี.ค. 47 วศ.ม. วิศวกรรมเคมี มจร. "การศึกษาผลของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีต่อคุณภาพของถั่วเหลือง" (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงดูทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
10. นายธนากร บุรณเพชร พ.ค. 47 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มมส. "อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการอบแห้งใบหม่อน" (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงดูทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
11. นายประสาน สถิตยธิ์เรื่องสวัสดิ์ มี.ย. 47 วศ.ม. เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มจร. "การออกแบบและทดสอบสกรูอัดสำหรับผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่ง"
12. นายสุทธิศักดิ์ แก้วนก มี.ย. 47 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "อิทธิพลของอุณหภูมิและรูปทรงที่มีผลต่อการอบแห้งและคุณภาพของกระเทียม"
13. นางสาวสุนิษา พรหมดวง มี.ย. 47 วศ.ม. เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มจร. "การอบแห้งตะไคร้ด้วยปฏิกิริยาความร้อน"
14. นายพยุหศักดิ์ ท่าไม้สุข มี.ย. 47 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "การอบแห้งข้าวสุกเพื่อผลิตเป็นข้าวกล้องสำเร็จรูป"
15. นายอัคริณ จิระจินดาเลิศ มี.ย. 47 วศ.ม. เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มจร. "การนึ่งข้าวกล้องด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง"
16. นายปริดา ปรากฏมาก มี.ย. 47 วศ.ม. เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มจร. "อิทธิพลของการกระจายขนาดท่อที่มีต่อการเคลื่อนที่ของน้ำในวัฏจักรพุน"
17. นางสาวรติยา ชูพานิชพันธ์ ก.ค. 47 วศ.ม. เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มจร. "แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิดไคส์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน"
18. นายรัฐพร บัวชม ก.ค. 47 วศ.ม. เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มจร. "การอบแห้งเมล็ดกาแฟสดโดยใช้ปฏิกิริยาความร้อนและลมร้อน"
19. น.ส.อุบลวรรณ ชนะภัย ต.ค. 47 วศ.ม. เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มจร. "แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งถั่วเหลืองเมล็ดเดียวโดยเทคนิคฟลูอิดไคส์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน"
20. นายวิริยะ แดงทน พ.ย. 47 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มมส. "ท่อนำความร้อนสลับปิดสำหรับอุ่นอากาศในเครื่องอบแห้ง" (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงดูทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
21. นายมนตรี มนต์พิลา พ.ย. 47 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มมส. "การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง" (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงดูทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)

22. น.ส.ภาวิกา วงศ์แก้ว พ.ย. 47 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้แก๊สเป็นสารดูดความชื้น"
23. นางยุวนารี นามสงวน ต.ค. 47 ป.ร.ด. เทคโนโลยีอุณหภาพ มจร. "การอบแห้งกุ้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยบีบความร้อน"
24. นายวาทัญญู รอดประพัฒน์ พ.ย. 47 ป.ร.ด. เทคโนโลยีอุณหภาพ มจร. "การพัฒนาเครื่องต้นแบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง"
25. นางสุภาวรรณ ภูริระวิชย์กุล ธ.ค. 47 ป.ร.ด. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "การศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพบางประการของข้าวเปลือกชั้น"
26. นายนเรศ มีโส พ.ค. 48 ป.ร.ด. เทคโนโลยีอุณหภาพ มจร. "การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดไกลในกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก"
27. นายพีระวัตร ทองนอก ก.พ. 48 วศ.ม. เทคโนโลยีอุณหภาพ มจร. "เตาเผาไหม้ชีวมวลฟลูอิดไชน์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้นโดยไม่ใช้วัสดุเฉื่อยผสมลงในเบด : ออกแบบสร้างและทดสอบ"
28. นายวรุต ยุทธชัย เม.ย. 48 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "อิทธิพลของการบำบัดขั้นต้นและอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อการลดลงของเอนไซม์ยูรีเอสและการละลายโปรตีนในถั่วเหลืองโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไชน์"
29. นายฤทธิไกร งามชุ่ม เม.ย. 48 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "การออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล"
30. นายวรวิทย์ กรัวยณิษฐ์กุล เม.ย. 48 วศ.ม. เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มจร. "การอบแห้งเนื้อไก่ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งร่วมกับบีบความร้อน"
31. นายศิริวัช คิลปีประเสริฐ ก.ค. 48 วศ.ม. เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มจร. "การอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง"
32. นายพลสันต์ วงษ์ศรี ก.ย. 48 วศ.ม. เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มจร. "การอบแห้งเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง"
33. นายเสริมพงษ์ อติเรกรัตน์ ต.ค. 48 วศ.ม. เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มจร. "การอบแห้งอาหารโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น"
34. นางสาวจินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ ต.ค. 48 ป.ร.ด. เทคโนโลยีอุณหภาพ มจร. "การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งทุเรียนด้วยเทคนิคต่างๆ" (เป็นผลงานในทุน คปก. แบบกลุ่มวิจัย สกว.)
35. นายเกียรติศักดิ์ จงสุวรรณรักษ์ เม.ย. 49 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามมิติของการเก็บรักษาข้าวเปลือกในไซโลเหล็กทรงกระบอก"
36. นางสาวนาภาพร ปลายไธ เม.ย. 49 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "อิทธิพลของการพรีทรีทเมนต์ที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกล้วยแผ่น" (เป็นผลงานในฐานะนักวิจัยที่เลี้ยงทุนพัฒนานักวิจัยหน้าใหม่ สกว.)
37. นางสาวมัทนียา เขียวเวช พ.ค. 49 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "การเร่งความเก่าของข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคในการอบแบบฟลูอิดไชน์เบดร่วมกับการเทมเปอร์"
38. นายภูมิใจ สอาดโณม พ.ค. 49 วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน มจร. "การจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยหอมทองด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล"
39. นายกิตติศักดิ์ วิธินันท์กิตต์ มีย. 49 ป.ร.ด. เทคโนโลยีอุณหภาพ มจร. "การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้สารดูดความชื้น"

4 กิจกรรมอื่น ๆที่เกี่ยวข้อง

Keynote/Invited speakers,

- The 3rd Asia-Pacific Drying Conference, 1-3 September 2003, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- The International Seminar on Grain Drying in South Asia, 1-2 Dec. 2003, Durgapur, India.
- The 15th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-15), Bangkok, Thailand, 9-14th May 2004,
- The 18th Mechanical Engineering Network Conference, Khonkaen, Thailand, 18-20th Oct. 2004.
- The 1st Energy Network Conference, Pattaya, Thailand, 11-13th May 2005.
- The 1st Technical Conference of Mahasarakham University, Thailand, 1st-2nd Sep. 2005.
- The 3rd National Technical Conference on Post-harvest Technology, Cha-am, Thailand, 10-11th Oct. 2005.
- The 4th Asia Pacific Drying Conference (ADC 05), 12-15th Dec. 2005, Kolkata, India.
- The 7th National Agricultural Engineering Conference, Marasarakham University, Thailand, 23rd-24th Jan. 2006.
- Technology and Innovation for Sustainable Development Conference, Khonkaen, Thailand, 25-27th Jan. 2006.

ทำวิจัยร่วม

ทำวิจัยด้านการอบแห้งข้าวเปลือกร่วมกับ Japan International Research Center for Agricultural Sciences โดยร่วมกับกรมวิชาการเกษตร และสถาบันวิจัยอาหารและพัฒนาผลิตภัณฑ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (1 ตุลาคม 2546 – 31 มีนาคม 2548)

เป็นวิทยากรรับเชิญบรรยายเกี่ยวกับงานวิจัย

- สสวท เรื่อง การสร้างเครือข่ายงานวิจัย, 2004
- สกว เรื่อง การเขียนบทความวิจัย, 2004
- SIIT เรื่อง Key features for successful research, 2004
- Expert consultation on post-harvest technologies for ensuring food safety and value addition for enhanced income, Asia-Pacific Association of Agricultural Research Institutions, Bangkok, 1-3 Dec. 2004.
- สกว เรื่อง New Technique for Producing Parboiled Rice, การประชุม นักวิจัยหน้าใหม่พบเมธีวิจัยอาวุโส สกว, 14-16 ม.ค. 2548

- โรงงานยาสูบ เรื่อง สถานภาพและแนวทางการพัฒนาพลังงานทดแทน 6 ก.ย. 2548
- บวท ผู้ดำเนินการเสวนา เรื่อง การพัฒนาพลังงานที่ยั่งยืนสำหรับประเทศไทย ที่ มทส 19 ต.ค. 2548

เป็นกรรมการเกี่ยวกับงานวิจัย

- Advisory panel of International Drying Symposium
- Board member of Section IV: Post-harvest Technology and Process Engineering, Congre International de Genie Rural (CIGR)
- Editorial member of International Energy Journal
- Editorial member of Asian Journal of Energy and Environment
- Editorial member of Engineering Journal, Khonkaen University
- Editorial member of the Journal of the Royal Institute of Thailand

ภาคผนวก

โครงการที่มีส่วนร่วมกับภาคอุตสาหกรรม

โดย ผศ. ดร.ฐานิตย์ เมธิยานนท์ (หัวหน้าโครงการ)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

โครงการที่มีส่วนร่วมกับภาคอุตสาหกรรม มีอยู่ด้วยกันสี่โครงการ

1. โครงการ : เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดในระดับอุตสาหกรรม

ผู้ประกอบการที่ร่วมโครงการ : บ. เกษตรไทยอินเตอร์ (22) จำกัด

ลักษณะความร่วมมือ : ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (VFBC) ในระดับอุตสาหกรรมขนาด 9 MW_{th} โดยการออกแบบเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (VFBC) ในระดับอุตสาหกรรมนี้ได้นำข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต่อการออกแบบและสร้างเตาเผาจากการศึกษาและวิจัยเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (VFBC) ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งทางภาคอุตสาหกรรมรับหน้าที่ในการก่อสร้างตัวเตา โดยหลังจากที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ ทางคณะผู้วิจัยและทางภาคอุตสาหกรรมได้ร่วมกันทดสอบสมรรถนะและการทำงานของเตาเผาไหม้

ความก้าวหน้า : จากการที่ได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดในระดับอุตสาหกรรมพบว่าสมรรถนะใกล้เคียงกับเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (VFBC) ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้มีค่าใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไขการทดลองโดยมีค่าระหว่าง 90-95% (เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับห้องปฏิบัติการพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 75-94% เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว) ได้ค่าภาระความร้อนเตาเผาไหม้และพิกัดเตาที่ทดสอบโดยมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.67 MW_{th}/m³ และ 7.5 MW_{th} ทั้งนี้พบว่า ทางภาคอุตสาหกรรมพอใจกับภาระความร้อนที่เตาอุตสาหกรรมทำได้อยู่ในปัจจุบันคือ 0.67 MW_{th}/m³ โดยสูงกว่าที่เตาไซโคลนที่ทางภาคอุตสาหกรรมผลิตอยู่ ซึ่งทำได้เพียง 0.25 MW_{th}/m³ โดยสามารถนำ VFBC นี้ไปใช้เป็นตัวนำกำลังให้กับอุตสาหกรรมที่ต้องการแหล่งพลังงานความร้อนในกระบวนการผลิตโดยเฉพาะอุตสาหกรรมโรงสีข้าวในประเทศไทย ซึ่งหลังจากได้ประชุมกับทางภาคอุตสาหกรรมถึงประเด็นที่จะนำ VFBC ไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมโรงสีพบว่า ในระยะ 2-3 ปีที่ผ่านมาโรงสีต่างๆได้ขยายกำลังผลิตและสั่งซื้อเครื่องอบแห้งพร้อมกับเตาเผาไหม้เป็นจำนวนมาก ทำให้ปัจจุบันตลาดของเตาเผาไหม้ที่ใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงเริ่มอิ่มตัว ทางคณะผู้วิจัยหาทางออกโดยการนำเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นมาเผาไหม้แทน เช่น ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง ทลายปาล์มเพื่อที่จะเป็นการเปิดกว้างในการที่จะนำ VFBC ไปใช้ในอุตสาหกรรมด้านอื่น

2. โครงการ : การผลิตเชื้อเพลิงแท่งแข็งจากถ่านกะลามะพร้าวโดยเทคนิคเอ็กทราซัน

ผู้ประกอบการที่ร่วมโครงการ : บ. สามัคคี ดำเนิน คาร์บอน จำกัด

ลักษณะความร่วมมือ : ทางคณะผู้วิจัยได้ถ่ายทอดเทคโนโลยีทั้งในส่วนของรูปแบบสกรูอัดซึ่งช่วยให้สามารถลดขั้นตอนในการผลิตลงได้ และในส่วนของการเลือกใช้ตัวประสานที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเชื้อเพลิงแท่งทำให้ไม่แตกหักง่ายขณะทำการเผาไหม้ จากการถ่ายทอดเทคโนโลยีในเรื่องสกรูอัด ทำให้ทางโรงงานสามารถลดขั้นตอนในการผลิตลงได้ครึ่งหนึ่งจากการที่ต้องทำการอัดรีดถึงสองครั้งก็เหลือเพียงครั้งเดียว นอกจากนี้ยังทำให้โรงงานสามารถผลิตเชื้อเพลิงจากผงถ่านกะลามะพร้าวได้ 100% ซึ่งเป็นที่

ต้องการของตลาดต่างประเทศ ในส่วนของตัวประสานซึ่งคณะผู้วิจัยแนะนำให้ใช้กากน้ำตาลแทนแป้งมันที่ทางโรงงานใช้อยู่ ขณะนี้ทางโรงงานกำลังดำเนินการทดสอบอยู่ นอกจากนี้ คาดว่าภายในเร็วๆ นี้ ทางคณะผู้วิจัยจะนำเครื่องอัดรีดเชื้อเพลิงแท่งที่ออกแบบและจัดสร้างไว้ นำไปทดสอบการใช้งานจริงที่โรงงาน

ความก้าวหน้า : ในขณะนี้ทางคณะผู้วิจัยได้นำเครื่องผลิตแท่งเชื้อเพลิงไปทดสอบในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งพบว่าอัตราการผลิตที่ได้ประมาณ 5 ตันต่อวัน (อัดภายในขั้นตอนเดียว) และความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นั้นมีค่า ประมาณ 1.5 MPa ซึ่งเกินมาตรฐานของการค้าขายเชิงพาณิชย์ที่ 0.375 MPa โดยเครื่องผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นนี้ยังสามารถนำไปใช้ผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากวัตถุดิบชนิดอื่น ๆ ได้อีกด้วย เช่น ผงถ่านหินแอนทราไซต์ ผงถ่านไม้ยางพารา รวมถึงผงถ่านซังข้าวโพด นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้ออกแบบเครื่องผลิตแท่งเชื้อเพลิงในรูปแบบใหม่ที่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของแท่งเชื้อเพลิงได้ระหว่าง 38 - 50 mm ทำให้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานได้มากขึ้น และได้ส่งเข้าประกวดในโครงการรางวัลนวัตกรรมแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5 ซึ่งได้รับรางวัลรองชนะเลิศอันดับสอง หลังจากนั้นก็ได้มีการติดต่อจากราชการ เพื่อจะนำเครื่องไปทำการแสดง และจากภาคเอกชนเพื่อขอเยี่ยมชมงาน รวมถึงมีการสั่งเครื่องผลิตแท่งเชื้อเพลิงเพื่อนำไปใช้ในการประกอบธุรกิจอีกด้วย

3. โครงการ 1.เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธเบต (VFBC) ในระดับห้องปฏิบัติการ

2. เตาเผาไหม้ฟลูอิดไธเบตแบบห้องเผาไหม้สันที่ไม่ใช้วัสดุเฉื่อยผสมในเบด (FBC)

ผู้ประกอบการที่คาดว่าจะร่วมโครงการ : บริษัทร่วมทุนจัดการพลังงาน จำกัด

ลักษณะความร่วมมือ : เป็นการร่วมวิจัยเพื่อที่จะหาความเป็นไปได้ในการนำ VFBC และ FBC ไปใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น โดยเป้าหมายของบริษัทคือสร้างโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นหลักซึ่งโรงไฟฟ้าที่จะดำเนินการสร้างนั้นจะมีลักษณะของระบบผลิตไฟฟ้าความร้อนร่วม (Cogeneration) และเข้าร่วมกับโครงการผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (SPP) สำหรับเชื้อเพลิงที่ได้รับความสนใจอยู่ในขณะนี้คือ ทลายปาล์ม และซังข้าวโพด โดยในการดำเนินโครงการนี้จะสอดคล้องกับนโยบายของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานแห่งชาติที่ส่งเสริมให้มีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล

ความก้าวหน้า : ตอนนี้อยู่ในช่วงประเมินโครงการ

4. โครงการ 1.เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธเบต (VFBC) ในระดับห้องปฏิบัติการ

2. เตาเผาไหม้ฟลูอิดไธเบตแบบห้องเผาไหม้สันที่ไม่ใช้วัสดุเฉื่อยผสมในเบด (FBC)

ผู้ประกอบการที่คาดว่าจะร่วมโครงการ : บริษัทยูนิค ไมนิ่ง เซอร์วิสเชส มหาชนจำกัด

ลักษณะความร่วมมือ : ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินบดบิทูมินัสกับเชื้อเพลิงชีวมวล โดยจะร่วมมือจากทางบริษัทยูนิค ไมนิ่ง เซอร์วิสเชส มหาชน จำกัด โดยที่มาของโครงการนี้คือ บริษัทมีเศษถ่านหินบิทูมินัสขนาด 0-10 mm อยู่เป็นจำนวนมาก แต่ยังไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์เท่าที่ควร ประกอบกับปัญหาของการกักเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลที่ต้องใช้เนื้อที่มากและการขาดแคลนเชื้อเพลิงชีวมวลในช่วงที่ไม่ใช่ฤดูกาลเก็บเกี่ยวของภาคอุตสาหกรรมที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงอยู่ในปัจจุบัน สำหรับรูปแบบของความร่วมมือ คือ ทางบริษัทจะสนับสนุนถ่านหินบิทูมินัสในการทดลอง ซึ่งหากมีแนวโน้มที่ดีก็จะขยายไปสู่ภาคอุตสาหกรรมที่มีการใช้งานเครื่องกำเนิดไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล ดังนั้นทางบริษัทจึงมีความสนใจที่จะนำถ่านหินบดบิทูมินัสขนาด 0-10 mm มาเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลภายใน VFBCและFBC ในสัดส่วน (ความร้อน) ไม่เกิน 25 (ถ่านหิน): 75 (ชีวมวล) ตามข้อกำหนดของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานแห่งชาติ (สนพ.)

ความก้าวหน้า : ขณะนี้กำลังอยู่ในขั้นตอนการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ

Soybean Drying by Two-Dimensional Spouted Bed

Songchai Wiriyaumpaiwong,^{1,*} Somchart Soponronnarit,¹
and Somkiat Prachayawarakorn²

¹School of Energy and Materials, and ²Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thungkru, Bangkok, Thailand

ABSTRACT

Urease activity, cracking, and breakage are important factors in considering the quality of raw soybean for feed meal industries. A two-dimensional spouted bed dryer was investigated to determine its capability for thermally inactivating the urease enzyme and maintaining its other qualities. The experimental results have shown that the drying kinetics of soybean in a two-dimensional spouted bed dryer are of the form described in the thin layer drying. The expression for the model parameter in Newton's law of cooling equation accounting for the moisture contents and inlet air temperatures was developed. The initial moisture content and inlet air temperature conditions cause cracks in the kernels. The strong collision between kernels and

*Correspondence: Songchai Wiriyaumpaiwong, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Pracha-utit Rd., Thungkru, Bangkok 10140, Thailand; E-mail: wsongchai@hotmail.com.

deflector because of high superficial velocity leads to high percentage of broken soybeans in the spout region. However, the velocity of 15.9 m/s can reduce the breakage below 5%. The inactivation of urease at low-to-moderate moisture content is suitably described by the first order kinetics. The modified Monod equation is applied when the moisture content is higher than 26% dry basis due to the inhibitory effect of water content on the inactivation rate. To complete urease inactivation and maintain protein quality, the temperatures of 150°C should be used.

Key Words: Grain; Inactivation; Protein; Urease; Trypsin.

INTRODUCTION

Soybean has long been used as a primary protein source in human foods and animal diets. Soybean proteins are used as human foods in a variety of forms, such as infant formulas, flour, protein isolates and concentrates, and textured fibers. New soy foods has been continually developed.^[1,2] The demand of soy foods is increasingly important because of low cholesterol and high protein in soybean. However, raw soybeans cannot immediately be utilized because they contain the anti-nutritional factors i.e., trypsin inhibitors, hemagglutinins, and saponins.^[3] These substances seriously affect the growth of animals.^[4] Proper processing of soybean treatment requires control of moisture content, temperature, and processing time^[5] to inactivate such factors. Adequate moisture and temperature during processing facilitates destruction of the anti-nutritional factors.

There are four major processes to inactivate the anti-nutritional factors such as extrusion, infrared roast, hot-air treatment and solid-particulate treatment. The different heat treatments provide dissimilar results. White et al.^[6] and Faber and Zimmerman^[7] found that the weight gain and growth of baby chicken were higher with the extruded soybeans than with the infrared roasted soybeans. Solid-particulate treatment produced excellent results in terms of feed efficiency.^[8]

Recently, several works have been studied about the fluidized bed technique for eliminating the trypsin inhibitor in soybeans.^[9,10] In their works, the urease measurement was used as an indirect indicator for inactivating the trypsin inhibitors since its analysis is simple. It showed a positive result of reduction in urease activity to acceptable limit of 0.3 pH rise or lower by using temperature higher than 120°C. This standard level is applied for the feed meal products.^[11]

In addition to the urease activity, the crack of kernels is also an important part, particularly drying at high temperatures. To avoid grain cracking too high, soybeans should not be dried below 23.5% from initial 33.5% dry-basis.^[10,12] Another approach that might replace fluidized bed technique is the spouted bed. This technique is suitable for coarse particles that will be difficult to be fluidized completely. In the present work, a two-dimensional spouted bed dryer shown in Fig. 1 is used. By this approach, particles are speeded up and carried by a very high air velocity from the bottom of drying chamber through a spout zone until impacting with a deflector and then falling down to the top of bed in the downcomer zone. The high air velocity together with high temperature in the spout zone provides the rapid moisture transfer from particles to air although the contact time is very short. In the downcomer, air and particles move in counter-current flow. Particles mix strongly at the bottom of this zone due to their movement to entrain into spout. Such a cyclic movement is the main characteristic of the spouted bed dryer.^[13-15]

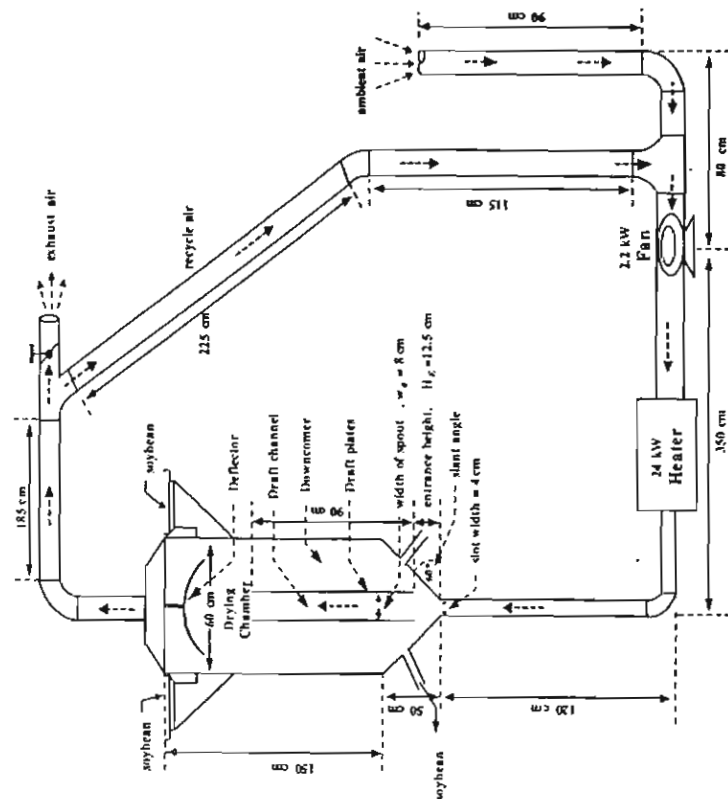


Figure 1. Schematic diagram of two-dimensional spouted bed dryer.

The aim of this work is to investigate moisture reduction and urease inactivation of raw soybeans in two-dimensional spouted bed dryer. The effects of moisture content and temperature on the other soybean qualities such as cracking and breakage, and protein are also reported.

MATERIALS AND METHODS

Spouted Bed Dryer

The schematic diagram of a two-dimensional spouted bed dryer with draft plates is shown in Fig. 1. The inlet cross sectional area of $4 \times 15 \text{ cm}^2$, drying chamber of $60 \times 15 \times 50 \text{ cm}^3$, spout width of 8 cm and entrance height of 12.5 cm were used. The selected values of spouted width and entrance height could maintain the transport of soybean to spout region and the spouting behavior. A 24 kW electrical heater was equipped to heat the air. A PID controller was used to control the temperature with an accuracy of $\pm 1^\circ\text{C}$. A backward-curved blade centrifugal fan driven by a 2.2 kW motor was used to supply hot air into the dryer. An airflow rate was controlled by a variable speed unit. In the operation, the equipments were first heated until the temperatures reached the desired level. The heated air is then forced through the spouted bed dryer in which 90% of total airflow passed between draft plates, with the rest flowing through the downcomer. After that, some of the exhaust air was delivered to atmosphere and the remaining was recycled and then mixed with fresh air.

To get rid of the dead zone, the slanted base was fixed at an angle of 60° as recommended by Passos et al.^[16] Kalwar et al.^[17] found a serious dead region at the bottom for the slant angle lower than 30° . A deflector was installed for entrapping the entrainment of solid particles at a height of 142 cm from the base. At this height, the grain bed depth could be maintained at the same level for both the downcomer sides.

Quality

Soybeans were rewetted to obtain the desired moisture content and kept in a temperature-controlled room between 8 and 10°C for 5 or 7 days to ensure uniform moisture content throughout the kernels. Before starting the experiments, the soybeans were placed in ambient condition until grain temperature rose to room temperature. The soybeans were

then treated with heat by using the two-dimensional spouted bed dryer, as shown in Fig. 1. The grains were dried at inlet temperatures of 120, 130, 140, or 150°C controlled at $\pm 1^\circ\text{C}$. The air velocity varied in the range of 15.86 and 20.50 m/s with a fixed hold up of 25 kg, corresponding to the bed height of 60 cm. The initial moisture contents of interest were 14, 22, and 28% dry basis. Samples were taken from the dryer at drying times of 0, 5, 10, 15, 20, 25, and 30 min. The moisture content determination was determined at a temperature of 103°C in an electrical oven for 72 h, according to ASA standard.^[11]

The urease activity was determined by following AACC method 22-90.^[18] Experimental data was expressed as pH difference. The pH difference values were then converted to percentage of urease inactivation using equation proposed by Savage et al.^[19] According to AOCs method Aa 5-38,^[20] the percentage of crude protein content can be calculated by percentage of nitrogen multiplied by nitrogen-to-protein factor (6.25) and the percentage of nitrogen in soybean was estimated by Kjeldahl method, using a TKN analyzer. Protein solubility indicated the dispersion of proteins in 0.2% KOH solution. The nitrogen in the supernatant was determined by the Kjeldahl method. According to ASA standard,^[11] protein solubility should be in the range of 70–85%. If its value is lower than 70%, it represents overcooked soybean, but if higher than 85%, soybean is insufficiently cooked. Protein solubility was calculated by

$$\text{Protein solubility} = \frac{\text{nitrogen of the supernatant in 0.2\% KOH solution}}{\text{crude protein}} \times 100 \quad (1)$$

In addition to the above quality parameter, cracking and breakage were inspected visually by sorting out the cracked or broken kernels with fluorescent light using a 200-g sample. At the beginning, the soybean kernels had a sound quality. The percentages of cracking and breakage can be calculated by the following equations:

$$\% \text{ Cracking} = \frac{\text{weight of cracked kernel}}{\text{weight of sample}} \times 100 \quad (2)$$

$$\% \text{ Breakage} = \frac{\text{weight of broken kernel}}{\text{weight of sample}} \times 100 \quad (3)$$

All analysis was performed in duplicate and the average value was presented in this work.

Thin Layer Drying Models

The drying rates in a drafted two-dimensional spouted bed are greatly affected by the inlet air temperature. The sensible heat gain and following moisture evaporation mostly occur between draft plates. The full exposure of individual grains to gas stream in a draft channel results in thermodynamic equilibrium to justify the condition for thin layer concept. Therefore, the drying rates for grains were correlated in the form of thin layer model. There are several thin layer models to predict the drying rate of cereal grains such as Newton's Law of Cooling, and the models of Page^[21] and Sharaf-Eldeen et al.^[22] In this research, three models were fitted to the experimental data to obtain the suitable model for predicting the drying rate in the spouted bed dryer. The three models are:

Newton's Law of Cooling:

$$MR = \exp(-k_1 t) \quad (4)$$

where k_1 is the drying constant (min^{-1}) and t is the drying time (min). MR in Eq. (1) is the moisture ratio defined as $(M - M_{eq})/(M_{in} - M_{eq})$ where M is the moisture at time t (decimal dry basis), M_{in} is the initial moisture content (decimal dry basis) and M_{eq} is the equilibrium moisture content (decimal dry basis). In calculating the moisture ratio (MR), we assumed M_{eq} to be zero because of low relative humidity at the temperature above the normal boiling point.^[23]

Page's^[21] Equation:

$$MR = \exp(-k_2 t^n) \quad (5)$$

where k_2 and n are the drying constants.

Sharaf-Eldeen et al.'s^[22] Equation (two-component model):

$$MR = A \exp(-k_3 t) + B \exp(-k_4 t) \quad (6)$$

where k_3 , k_4 , A , B are the drying constants.

Kinetic Model of Urease Inactivation

The behavior of urease inactivation during drying was very complicated. It was mostly affected by initial moisture content. The inactivation rate started a relative increase at early drying period for

the low-to-moderate moisture content. With the high moisture content, however, the reaction rate was inhibited. The kinetics of urease inactivation was therefore accounted for such behaviors by the first order for the low-to-moderate moisture content and the modified Monod models for high moisture content.

The Modified Monod equation^[24]

$$U = \exp(c_1 \cdot t) / [K + \exp(c_2 \cdot t)] \quad (7)$$

The first order kinetic model

$$dU/dt = -k(U - U_e) \quad (8)$$

where U is the degree of urease inactivation, t is the inactivation time, c_1 , K , c_2 , U_e , and k are the inactivation constants. For a batch system, integration of Eq. (8) becomes

$$(U - U_e) / (U_o - U_e) = \exp(-kt) \quad (9)$$

where U_o is the degree of inactivation at $t=0$. All of the constants in Eqs. (7) and (8) were statistically fitted to the function of initial moisture content and inlet air temperature using a nonlinear regression. c_1 , K , c_2 , U_e , and k in Eqs. (7) and (8) are given by the following equations:

$$c_1 \text{ and } c_2 = b_1 \cdot M_i / \exp(b_2 \cdot T) \quad (10)$$

$$K = M_i^{b_3} \cdot T^{b_4} \cdot \exp(b_5/T) \quad (11)$$

$$U_e \text{ and } k = b_6 + (b_7 \cdot M_i) + (b_8 \cdot T) + (b_9 \cdot M_i \cdot T) \quad (12)$$

where M_i and T are the initial moisture content (percent dry basis) and the inlet temperature (K), respectively.

RESULTS AND DISCUSSION

Effects of Temperature on Reduction of Moisture Content

Figure 2 shows the reduction of moisture content at different drying conditions. It is evident that the movement of moisture from the inside kernel to outside has a high potential capability with high inlet air temperature because of a large driving force of heat transfer. The change in moisture content with time follows the exponential decay, implying that the internal resistance controls the moisture movement. This resistance strictly limits the moisture movement at low moisture content. As shown in Fig. 2c, the average drying rates at 14% d.b. is very slow, for example,

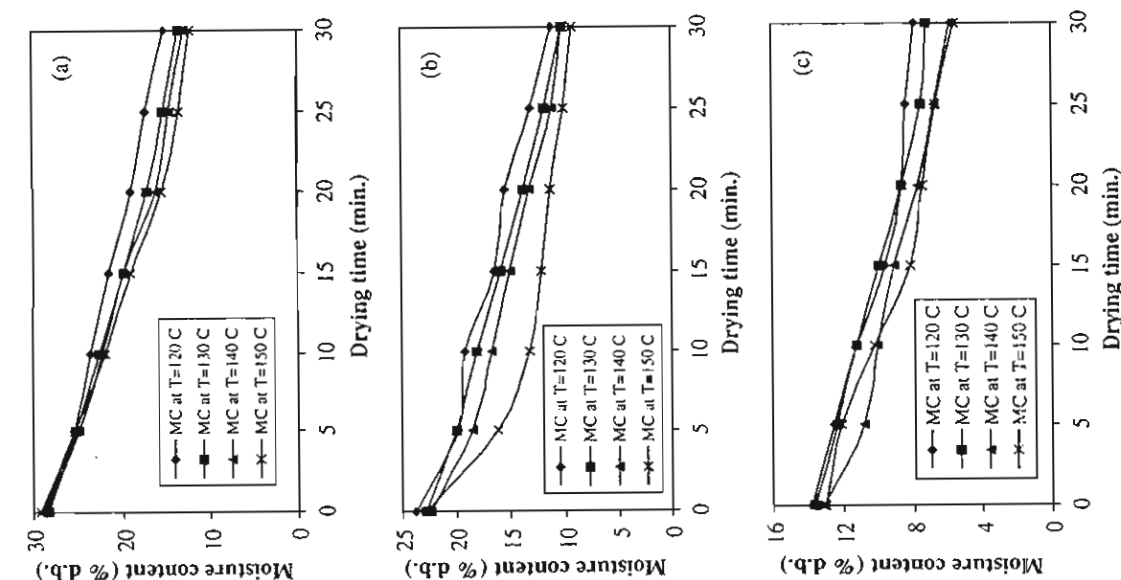


Figure 2. Relationship of moisture reduction with drying time at initial moisture contents of (a) 28% d.b., (b) 22% d.b., and (c) 14% d.b.

7% reduction of moisture content for 30 min at 150°C. The internal resistance, however, becomes less important for the higher range of moisture content since a large portion of moisture exists near the exterior surface which can be removed easily while the kernels are being drawn through the spout region where the mixing of grains and air is rigorous. This can be indicated by the slope of moisture curve shown in Figs. 2a and b for the moisture contents of 28 and 22% d.b., respectively.

Moisture Ratio (MR) Fitting

To find a relationship for each thin layer model between the drying constants and the independent variables, the drying constants were correlated with a function of inlet air temperature (T) and initial moisture content (M_i). The functions developed for drying constants of each model were then substituted into the original one. A nonlinear technique was used for estimating the constant parameters. The prediction of each model was generated for all the drying runs and compared with the collected data of each run. Typical graph of this comparison for some illustrative drying conditions is shown in Figs. 3a–c. The results of fitting three proposed models were then evaluated based on r^2 and the mean sum of squares of the errors (MSE). The MSE can be expressed by^[25]

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{obs} - MR_{pre})^2}{n - z} \quad (13)$$

where MR_{obs} is the moisture content ratio from the experiment, MR_{pre} is the predicted moisture ratio, n is the number of data points, and z is the number of unknown parameters. The values of r^2 , MSE and drying constants for three proposed models for soybean drying are shown in Table 1. It is very clear that the three proposed models predicts the moisture content almost the same magnitude and approaching to the experimentally determined values. For ease of practical use, however, Newton's law of cooling is the suitable equation for calculating the MR.

Effect of Air Velocity on Cracking and Breakage

The cracking and breakage of soybean kernels were in the V-shaped fissures, as observed from the experiments. This result is similar to that reported by several workers.^[10,26,27] Figure 4a shows the percentage of the cracked kernels at different air velocities and a 142cm deflector height. The fracture on soybean kernels develops progressively with

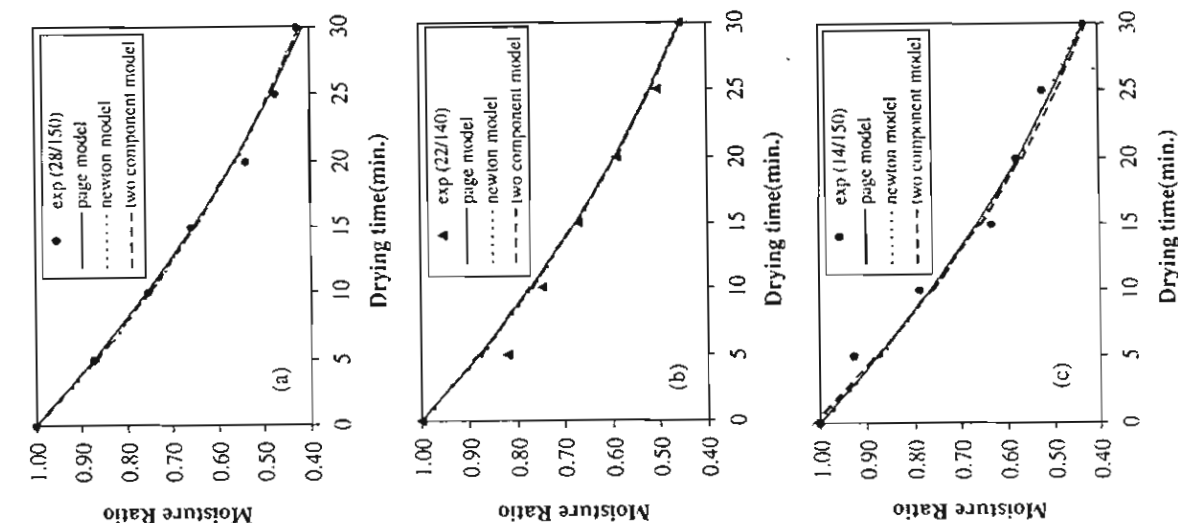


Figure 3. Comparison of predicted MR to experimental data at different drying conditions. (a) Initial moisture content of 28% d.b. and 150°C. (b) 22% d.b. and 140°C. and (c) 14% d.b. and 150°C.

Table 1. Drying constants and comparison of r^2 and MSE of each empirical model.

Models	Drying constants	r^2	MSE
Newton's law of cooling $MR = \exp(-k_1 t)$	$k_1 = 0.7652 M_i^{0.0559}$ $\exp(-1467.12/T)$	0.9862	0.00036
Page's equation $MR = \exp(-k_2 t^n)$	$k_2 = 0.0347$ $\exp(-142.0664/T)$ $n = 2.7985 M_i^{0.0183}$	0.9869	0.00067
Two component model $MR = A \exp(k_3 t) + B \exp(k_4 t)$	$\exp(-440.6973/T)$ $A = 0.8425 M_i^{-0.2938}$ $\exp(-405.3663/T)$ $k_1 = -2.5999$ $\exp(663.9915/T)$ $B = 1.3278 M_i^{-0.0148}$ $\exp(-96.8986/T)$ $k_4 = -1.5147$ $\exp(-1674.9034/T)$	0.9862	0.00001

reduction in moisture content, in particular at the early drying period showing the rapid development of crack kernels. When considering the influence of air velocities at the spout region, it shows that the percentage of the cracked kernel is slightly affected by the superficial velocity. At the final moisture content of 16% dry basis, the percentages of the cracked kernels at the superficial air velocities of 15.86, 17.12, and 20.5 m/s were 71, 72, and 75, respectively.

Figure 4b shows final moisture content versus the percentage of breakage, showing the severe effect of superficial air velocity on the percentage of the broken kernels. The soybean kernels are prone to break at high velocity, for example, the percentage of the broken kernels at 16% dry basis was higher than 10% at 20.5 m/s and less than 5% at 15.86 m/s. Such higher amounts of the broken kernels at higher air velocity is due to the combined effects of the strong impact of soybean kernel with deflector and drying rate, the latter playing a minor role since the drying rate at such velocities is essentially identical.

Effects of Moisture Content and Temperature on Percentages of Cracking and Breakage

To minimize the effect of the collision between kernels and deflector, the superficial air velocity was kept at 15.86 m/s throughout

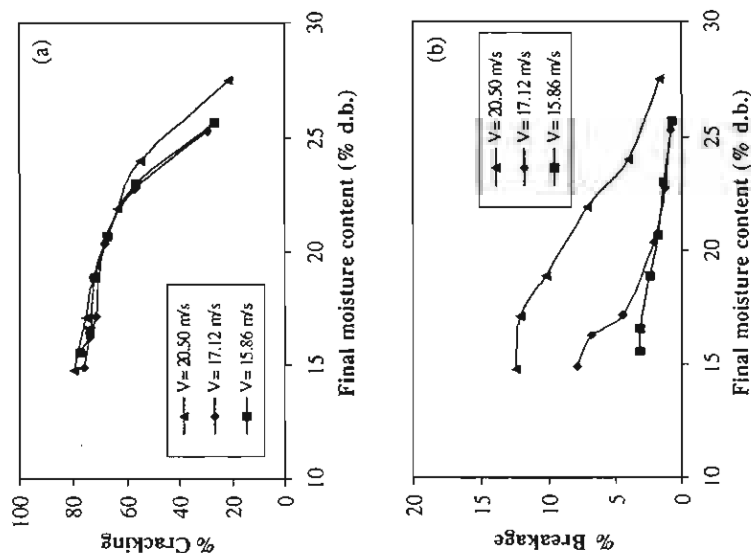


Figure 4. Effect of air velocities on (a) the percentage of cracking and (b) breakage at a fixed temperature of 130°C, initial moisture content of 28% d.b. and a deflector height of 142 cm.

the experiments. The percentages of the cracked and broken kernels obtained at temperatures of 120–150°C and initial moisture contents of 14–28% dry basis are shown in Fig. 5a–c, indicating the strong dependence of the percentages of the cracked and broken kernels on the final moisture contents and inlet air temperatures. Either the reduction of final moisture content or the increase in inlet air temperature directs toward the increase in the percentage of the fissured kernels.

As shown in Fig. 5a–b, at initial moisture contents of 22 and 28% dry basis, the percentages of fissures at the end are between 58 and 61% for the cracking and 3–4% for the breakage. Such amounts of fissure kernels are comparable to those obtained by the fluidized bed technique as reported by Soponronnarit et al.^[10] However, when soybeans were dried from 14.0% dry basis, the percentages of cracking and breakage

are respectively 10–14.4% and 1.2–2.0% as shown in Fig. 5c. According to the results shown in Fig. 5, they suggest that the drying rate greatly affect the crack and breakage formations in the soybean kernels. Higher drying rate, directly related to the combination of higher inlet air

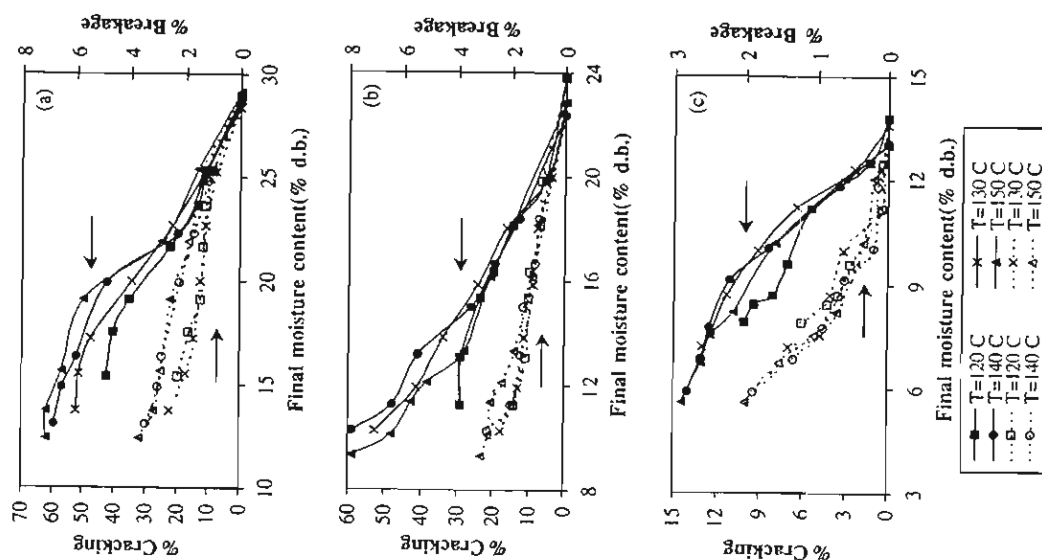


Figure 5. Percentage of cracking and breakage vs. final moisture content for the initial moisture contents of (a) 28% d.b., (b) 22% d.b., and (c) 14% d.b.

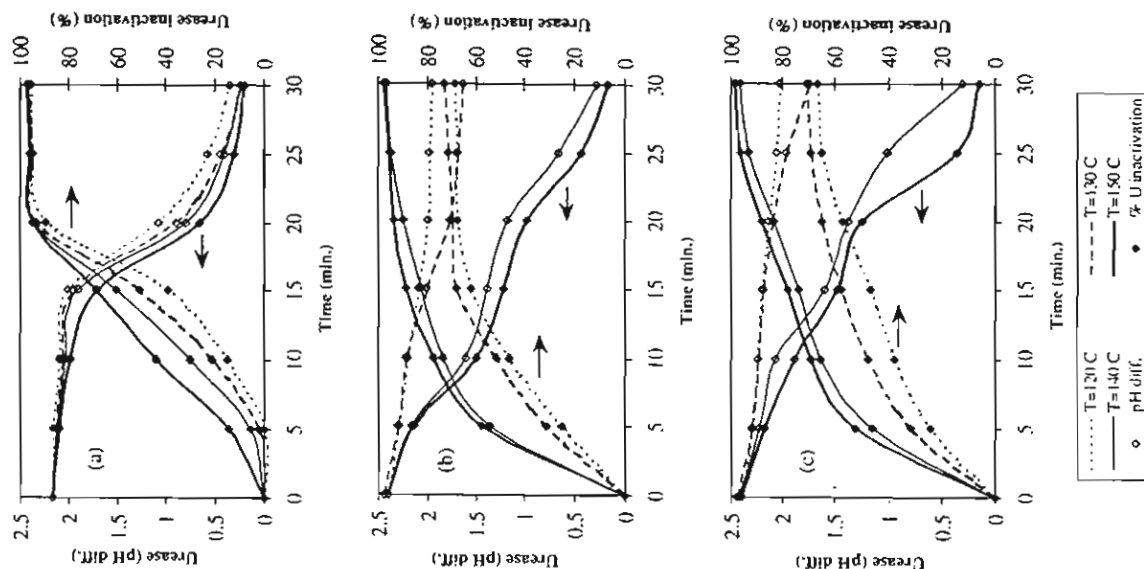


Figure 6. Effect of drying time on the urease activity and percentage of urease inactivation at different initial moisture content of (a) 28%, (b) 22%, and (c) 14% d.b.

temperature and initial moisture content, provides the larger amount of the cracked and broken kernels.

As shown in Figs. 4a-b, the percentages of cracking and breakage at the end of drying for the temperature of 130°C and air velocity of 15.9 m/s (77% for cracking and 3.2% for breakage) is higher than that at the corresponding conditions shown in Fig. 5a (52% cracking and 2.54% for breakage). This can be attributed to the different moisture contents of soybean before rewetting, in which the moisture contents for the nonrewetting soybeans in Figs. 4 and 5 were 12 and 14% dry basis, respectively. The soybean rewetted from 12 to 28% dry basis leads to greater swelling than that rewetted from 14 to 28% dry basis. Thus, the grains adsorbed more water have a weaker strength, causing by a swelling of the cells at the surface layers which induces the gradient of forces between the surface and inner portion of the kernels.⁽²⁸⁾

Urease Activity and Percentage of Urease Inactivation

The experimental results of urease activity and percentage of urease inactivation at different drying conditions are shown in Fig. 6a-c. The urease enzyme, measured by pH rise in an ammonia solution, was about 2.2-2.5, which is a typical value for raw soybeans. The pH difference was then converted to the percentage of urease inactivation by an equation proposed by Savage et al.⁽¹⁹⁾ As presented in this figure, the urease activity reduces monotonically with drying time for any moisture content, except for the initial moisture content of 28% dry basis that shows a slow decline of urease activity for the first 15 min and a more rapid decrease afterwards. The behavior of urease activity is opposite to that of its inactivation showing the increase in amount of the inactive urease enzyme.

Inactivation of urease enzyme is very complicated and requires precise control of related parameters. The effective urease inactivation requires the adequate heat and moisture content for a given drying time. At temperatures of 120 and 130°C shown in Fig. 6, the inactivation of urease is insufficient for any initial moisture content, except for 28% dry basis showing the acceptable level with 97% urease inactivation, corresponding to the urease activity less than 0.3 pH difference. The accomplishment was performed within drying time of 30 min, at which the final moisture content was in the range from 14 to 15% dry basis. At the temperatures higher than 130°C, however, the urease enzyme is inactivated in 30 min for any initial moisture content (97% inactivation). The final moisture contents at 30 min for the initial moisture contents

between 14 and 28% dry basis were in the respective range of 7–12.5% dry basis.

Results indicate that the spouted bed is applicable to inactivate urease enzyme in soybean kernels. However, when compared with the previous works in which soybeans were dried by fluidized bed technique,^[9,10] the drying time in the spouted bed requires much longer for achieving the inactivated urease enzyme. The inactivation times at moisture content of 22% dry basis and temperature of 140°C, for example, needs at least 30 min for the spouted bed dryer whilst it needed only 10 min for the fluidized bed dryer. The longer inactivation time is due to the effect of tempering of grains in the downcomer.

Kinetics of Urease Inactivation Fitting

The data of percentage of urease inactivation at different drying conditions was used for analysis. A nonlinear procedure was used to estimate the model parameters, c_1 , K , c_2 , in Eq. (7) and U_e , k , in Eq. (8). A set of empirical models were generated for c_1 , K , c_2 , U_e , and k but only one was chosen for each kinetics parameter based on a compromise between the goodness of fit as indicated by the coefficient of determination and MSE.

The estimated constant parameters (b_1 – b_9), r^2 for each model parameters and MSE for each model are shown in Table 2. Note that the first order kinetics model was analyzed from the sets of data obtained under the conditions of initial moisture content between 14 and 22% dry basis and temperatures between 120 and 150°C. For low-to-moderate moisture content, because of inhibitory effect of higher moisture content on the urease inactivation, the modified Monod equation was fitted with the set of data at 28% dry basis.

The proposed correlations for c_1 , K , c_2 , k , and U_e were then substituted into Eqs. (7) and (9) to calculate the urease inactivation. It was found that both kinetic models describe the urease inactivation reasonably well compared to the experimental data as shown in Fig. 7. In Figs. 8–11, the sensitivity of temperature and initial moisture content to the urease inactivation is presented. The Modified Monod and the first order kinetic prediction results are covered through the range of moisture content from 26 to 30% and from 14 to 25% dry basis, respectively. Insufficient inactivation often occurs when using low temperature and moisture content even though inactivation rates are relatively faster at the early period as shown in Fig. 10, comparing to those shown in

Table 2. Estimated constants in equations (8), (9) and (10).

Constants	Modified Monod equation			First order kinetic model	
	c_1	K	c_2	U_e	k
b_1	2.39588	—	2.41301	—	—
b_2	0.01301	—	0.01302	—	—
b_3	—	11.62190	—	—	—
b_4	—	-11.47016	—	—	—
b_5	—	14126.82346	—	—	—
b_6	—	—	—	-2.58181	-0.40940
b_7	—	—	—	8.47817E-03	1.14487E-03
b_8	—	—	—	1.63242E-03	-2.47649E-02
b_9	—	—	—	-5.72912E-06	6.89432E-05
r^2	0.9972	0.9999	0.9969	0.8459	0.9760
MSE		0.00115			0.00157

Figs. 8 and 9. They also indicate that the inhibitory effect of moisture content on the urease inactivation as illustrated in Fig. 9 becomes less important when the initial moisture content of soybean approaches 26% dry basis since the inactivation rate calculated from Eq. (7) is almost superimposed to that found by using Eq. (9) after drying time of 15 min.

Effects of Temperature on Soybean Protein

Destruction of anti-nutrition factors using higher temperature may cause the reduction of amount of protein. Therefore, it is necessary to check the amount of protein after heat treatment. The total crude proteins before and after heat treatment and protein solubility are shown in Table 3. The amount of crude protein in raw soybeans for all lots varied between 38 and 43. After 30 min, the amount of protein in the soybeans at different inlet temperatures is insignificantly changed as compared to the reference ones, indicating the properly processed soybeans. However, the protein solubility at inlet temperature of 120°C is still high, showing the insufficiently cooked soybeans. To make sure soybeans are properly cooked; protein solubility in the range of 70–85% and the complete urease inactivation (97%), inlet temperature should not be lower than 150°C.

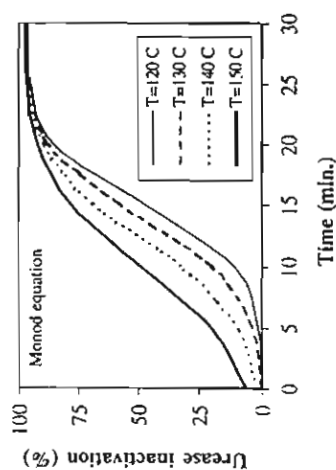


Figure 8. Influence of variation of temperature on the predicted inactivation at initial moisture content of 28% d.b.

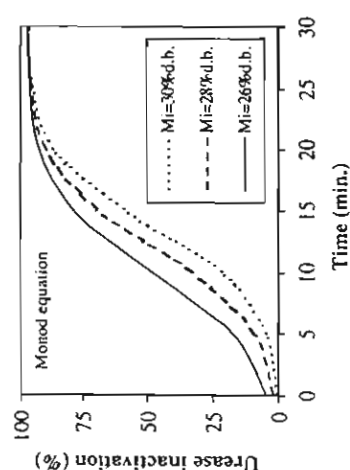


Figure 9. Influence of variation of initial moisture content on the predicted inactivation (inlet air temperature of 140°C).

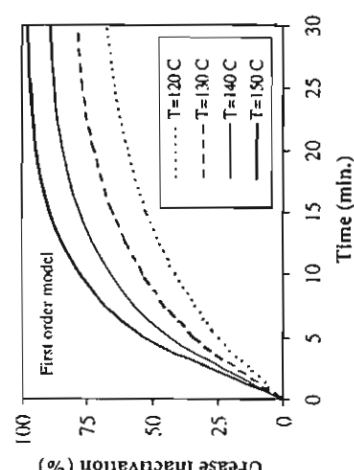


Figure 10. Influence of variation of temperature on the predicted inactivation at initial moisture content of 18% d.b.

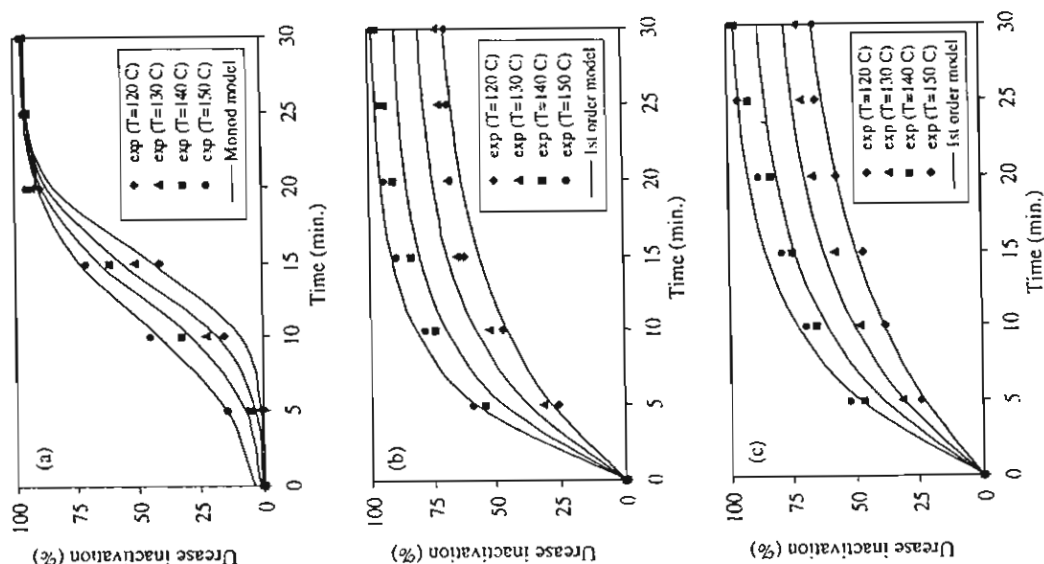


Figure 7. Predicted lines and data points of inactivation at different initial moisture contents (a) 28%, (b) 22%, and (c) 14% d.b.

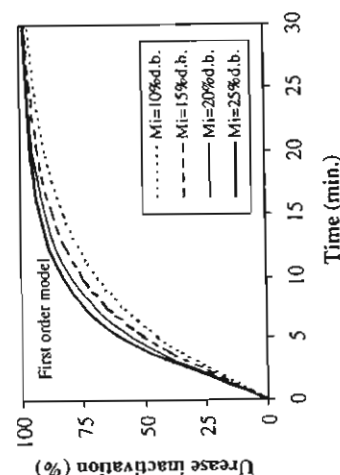


Figure 11. Influence of variation of initial moisture content on the predicted inactivation (inlet air temperature of 150°C).

Table 3. Crude protein content of soybeans at different operating conditions.

Temp. (°C)	IMC 28% d.b.		IMC 22% d.b.		IMC 14% d.b.	
	Protein after drying (%)	Protein solubility (%)	Protein after drying (%)	Protein solubility (%)	Protein after drying (%)	Protein solubility (%)
120	37.16	89.41	39.03	91.99	41.78	90.61
130	38.04	NA	43.45	NA	41.29	NA
140	38.04	81.22	40.70	74.64	42.17	80.65
150	38.14	81.96	39.81	73.80	42.27	73.95
	Initial protein		Initial protein		Initial protein	
	38.44–38.93		40.80–43.75		42.37–43.84	

Note: temp. = inlet air temperature and IMC = initial moisture content.
NA = Not available.

CONCLUSIONS

- Drying kinetics for soybeans in two-dimensional spouted bed can be described by Newton's law of cooling with adequate accuracy and its equation is very tractable.
- The development of fissuring on the kernels is mainly caused by the combination of moisture content and inlet temperature. The high air velocity in the spouted region results in the large amounts of broken and cracked kernels due to the powerful impact between the kernels and deflector.

- Two-dimensional spouted bed dryer can be fully complied with a requirement of both soybean drying and inactivation of urease enzyme, along with the protein content to be maintained, as long as the operating temperature is 150°C.
- The kinetics of inactivation of urease enzyme can be suitably described by the first order reaction for the initial moisture contents lower than 26% dry basis. At higher initial moisture content of 26% dry basis, the application of the first order kinetic model was switched to the Modified Monod equation for predicting the kinetics of urease inactivation.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Thailand Research Fund for supporting this work.

REFERENCES

1. Lin, K. Expanding soybean food utilization. *Food Technology* 2000, 54, 46–58.
2. Singh, R.; Singh, G.; Chanhnan, G.S. Nutritional evaluation of soy-fortified biscuits. *Journal Food Science Technology* 2000, 37, 162–164.
3. Cheong, Y.L. *Fullfat Soybean Meal Production and Utilization*; Technical Bulletin of American Soybean Association: Singapore, 1997.
4. Stephenson, E.L.; Tollet, L. Processing of soybeans for broiler feeding. *Feedstuffs* 1960, 31, 8.
5. Wright, K.N. Soybean meal processing and quality control. *Journal American Oil Chemists' Society* 1981, 58, 294–300.
6. White, C.L.; Greene, D.E.; Waldroup, P.W.; Stephenson, E.L. The use of unextracted soybeans for chicks. *Poultry Science* 1967, 46, 1180–1185.
7. Faber, J.L.; Zimmerman, D.R. Evaluation of infrared-roasted and extruder-processed soybeans in baby pig diets. *Journal of Animal Science* 1973, 36, 902–907.
8. Raghavan, G.S.V.; Harper, J.M. Nutritive value of salt-bed roasted soybeans for broiler chicks. *Poultry Science* 1974, 53 (2), 547–553.

9. Osella, C.A.; Gordo, N.A.; González, R.J.; Tosi, E.; Ré, E. Soybean heat-treated using a fluidized bed. *Lebensm. Wiss u.—Technology* 1997, 30, 676–680.
10. Soponronnarit, S.; Swadisevi, T.; Wetchacama, S.; Wutiwiwatchai, W. Fluidized bed drying of soybeans. *Journal Stored Products Research* 2001, 37, 133–151.
11. ASA. *Fullfat Soybeans Handbook of American Soybean Association*; Singapore, 1990.
12. Barrozo, M.A.S.; Murata, V.V.; Costa, S.M. The drying of soybean seeds in countercurrent and concurrent moving bed dryer. *Drying Technology* 1998, 16 (9&10), 2033–2048.
13. Madhyanon, T.; Soponronnarit, S.; Tia, W. A two-region mathematical model for batch drying of grains in a two-dimensional spouted bed. *Drying Technology* 2001, 19 (6), 1045–1064.
14. El-Naas, M.H.; Rognon, S.; Legros, R.; Mayer, R.C. Hydrodynamics and mass transfer in a spouted bed dryer. *Drying Technology* 2000, 18 (1&2), 323–340.
15. Devahastin, S.; Mujumdar, A.S.; Raghavan, G.S.V. Diffusion-controlled batch drying of particles in a novel rotating jet annular spouted bed. *Drying Technology* 1998, 16 (3–5), 525–544.
16. Passos, M.L.; Mujumdar, A.S.; Raghavan, V.G.S. Spouted beds for drying: principles and design considerations. *Advances in Drying* 1987, 4, 359–397.
17. Kalwar, M.I.; Kudra, T.; Raghavan, G.S.V.; Mujumdar, A.S. Drying of grains in a drafted two-dimensional spouted bed. *Journal Food Proc. Eng.* 1991, 3, 321–332.
18. AACC. *Approved Method of the American Association of Cereal Chemist*, 9th Ed.; AACC: St. Paul, MN, 1995.
19. Savage, W.D.; Wei, L.S.; Sutherland, J.W.; Schmidt, S.J. Biologically active components inactivation and protein insolubilization during heat processing of soybeans. *Journal of Food Science* 1995, 60, 164–168.
20. AOCS. *Official and Tentative Methods of the American Oil Chemists' Society*, 3rd Ed.; AOCS: Campaign, IL, 1984.
21. Page, G.E. Factors Influencing the Maximum Rate of Drying Shelled Corn in Layers. Unpublished M.S. thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, 1949.
22. Sharaf-Eldeen, Y.I.; Blaisel, J.L.; Hamdy, M.Y. A model for ear corn drying. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers* 1980, 27, 195–200.

- shrimp in superheated steam and hot air. *Drying Technology* 2002, 20 (3), 669–684.
24. Lee, J.M. *Biochemical Engineering*; Englewood Cliffs: NJ, 1992.
 25. López, A.; Piqué, M.T.; Romero, A.; Aletá, N. Modelling of walnut sorption isotherms. *Ital. J. Food Sci.* 1998, 1 (10), 67–74.
 26. Jia, C.-C.; Sun, D.-W.; Cao, C.-W. Mathematical simulation of stresses within a corn kernel during drying. *Drying Technology* 2000, 18 (4), 887–906.
 27. Overhuls, D.G.; White, G.M.; Hamilton, H.E.; Ross, I.J. Drying soybean with heated air. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers* 1973, 16, 112–113.
 28. Grosh, G.M.; Milner, M. Water penetration and internal cracking in tempered wheat grains. *Cereal Chemistry* 1959, 36, 260.

Kinetics of colour change during storage of dried garlic slices as affected by relative humidity and temperature

Somkiat Prachayawarakorn^{a,*}, Saijai Sawangduanpen^a, Supranee Saynampheung^a,
Thitikorn Poolpatarachewin^a, Somchart Soponronnarit^b, Adisak Nathakarakule^b

^a Department of Chemical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Suksawat 48 Road, Bangkok 10140, Thailand

^b School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Suksawat 48 Road, Bangkok 10140, Thailand

Received 27 October 2002; accepted 13 May 2003

Abstract

The influence of relative humidity and temperature on colour changes in garlic slices has been investigated. The lab colour parameters, lightness, redness and yellowness, were used to determine the colour changes in the environments of isothermal heating at 20, 37 and 50 °C and relative humidity at 30%, 70% and 90%. The experimental results have shown that temperature and relative humidity greatly affect the redness, yellowness and lightness. A first-order kinetic model is an appropriate representation for describing the changes in the experimental values of the lightness and redness. In contrast to the redness and lightness, the yellowness is described by a first-order kinetics in series, characterised the rise in the yellowness to a maximum value followed by a decrease. According to the experimental results indicated by total colour difference, the maximum browning rate occurs at 70% relative humidity.

© 2003 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Garlic; Browning reaction; Colour kinetics

1. Introduction

Garlic is a semi-perishable spicy herb, used as a primary ingredient for preparing the various kinds of native food in Asia. The moisture content of fresh harvested garlic is approximately 162% (dry basis) and the garlic is then dried by sun drying or convective drying to maintain its quality for prolonged storage. The drying process and phenomenological changes that occur during drying prominently affect the product quality attributes such as colour and texture (Ambrose & Sreenarayanan, 1998). In general, garlic that meets the required market specification appears light brown or creamy-white in colour.

The colour, one of the most important qualities of acceptance for products, reflects a sensation to the human eye and visual examination is the common method of assessing product colour. The change of product colour is caused by the reactive components in the food activated during the drying process. Colour develop-

ment is the result of various reactions such as non-enzymatic browning reactions and pigment destruction (Cornwell & Wrolstad, 1981; Wong & Stanton, 1992). It results in undesirable colour, odour, flavour changes and lowering of nutritive value (Toribio & Betusawa, 1978). In non-enzymatic browning reactions, the browning rates are closely related to temperature and relative humidity (Labuza & Saltmarch, 1981; Rapusas & Driscoll, 1995; Samaniego-Esguerra, Boag, & Robertson, 1991; Soponronnarit, Srisubati, & Yoovidhya, 1998). Maximum stability of dried foods can be obtained by dehydrating and maintaining them at the monolayer moisture content.

Colour can be characterised by spectrophotometer at any wavelength. For example, 420 nm is one of the wavelengths most frequently used for juices. Colour determination can also be detected by a tristimulus colourimeter in terms of redness, yellowness and lightness. The latter is the simplest instrumental method and it has been previously proved to be valuable in describing discolouration and providing useful information for quality control of food products (Feng & Tang, 1998; Garza, Ibarz, Pagan, & Giner, 1999; Krokida, Tsami, & Urbricain, 1998; Maskan, 2001).

* Corresponding author. Tel.: +662-4270-9221; fax: +662-428-3534.

E-mail address: somkiat.pra@kmutt.ac.th (S. Prachayawarakorn).

In the present work, the kinetics of the browning reaction in garlic slices is determined quantitatively using the colourimetry and the generalised kinetic models for L -, a - and b -values are then proposed to describe its colour change with environmental conditions as well as with time. The kinetic parameters are correlated empirically with a modified Arrhenius-type equation. The kinetic models proposed in this present study, in association with heat and mass transfer equations, enables us to predict the changes in colour during garlic drying. It also can be used to identify an appropriate drying condition in order to obtain high quality dried garlic.

2. Material and methods

Dry garlic bulbs obtained from the local market were sliced to a uniform size of $15 \times 15 \times 3$ mm³. The dry garlic slices were rewetted to the desired moisture content of 1.6 dry basis and kept in cold storage at 5 ± 0.5 °C for a week. To follow the colour development with relative humidity and temperature levels, the static method was employed. In this work, three levels of temperature, 20, 37 and 50 °C, and four levels of relative humidity, 30%, 50%, 70% and 90% for each temperature were used for determining the browning kinetics of the garlic slices. This temperature range is relevant to commercial practice.

A series of saturated salt solutions was prepared in order to obtain the required relative humidity. The salt solutions used were $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NaCl and BaCl_2 and the corresponding water activity levels were prepared from the data reported by Gustafson (1972). Samples were left on a wire screen placed inside airtight containers, which were then sealed and kept in temperature-controlled incubators, temperature fluctuation being ± 1 °C. To ensure the uniform moisture content, the garlic slices were spread in a single layer with a mass of 4.2 g. Samples were removed at different exposure time intervals to measure their colour.

The degree of browning is represented by the values of L , a and b , measured by a JP-700 Hunterlab Juki colourimeter. The colourimeter was calibrated each time with a standard reference having a value of L , a and b corresponding to 97.76, -0.06 and -0.3 , respectively. The values of a and b range from -60 to $+60$. The positive values of a and b represent redness and yellowness respectively and the negative values of a and b show the respective greenness and blueness. The value of lightness can vary between 0 and 100, with the highest one showing the highest lightness of the sample. Five pieces of sample were used to measure the colours, each of which were measured at five different surface positions. The results reported throughout this work were based on the average value.

3. Results and discussion

3.1. Change of L -, a - and b -values

Garlic samples initially had a creamy-white colour. This colour was represented by a L -value between 66 and 68, an a -value between -3.77 and -3.16 and b -value between 14.3 and 16.2. Figs. 1–3 show respectively the L -, a - and b -values at different levels of relative humidity and temperature, indicating the dissimilar patterns of the individual lab colour parameter over the exposure time. For the lightness, the L -value rapidly and linearly drops during the early period whilst the a - and b -values increase as shown in Fig. 1(a)–(c). After a long exposure time, the changes in the lightness and redness become rather slower. The yellowness presented in Fig. 3(a)–(c) exhibits the opposite behaviour, that is, after rising to a maximum value, the b -value then reduces with time. This suggests that destruction of yellow pigments takes place. The disappearance rate in the latter period varies rapidly especially at high temperature and relative humidity.

As seen in Fig. 1(a)–(c), changing L -value seems to be independent of relative humidity at relative humidities lower than 50%. Similar results are found for the redness and yellowness. These results reveal that the relative humidity is not an important factor in accelerating colour change when the relative humidity is lower than 50%. However, under such low humidity, the temperature will have a greater effect; garlic had slightly more yellowness and redness as well as becoming darker with increase in temperature.

When the relative humidity is higher than 50%, the trends of change in all the Hunter parameters are still similar to those mentioned above, but the rate change for each one is faster and now dependent on the relative humidity, in addition to the temperature effect. However, when the relative humidity is higher than a certain level, the colour changes, instead of increasing, become smaller and comparable to that at lower humidity. This can be seen in the case of 90% relative humidity compared to that at 70%.

The changes in colour values, L , a and b , for garlic under different levels of relative humidity and temperature appear to have different behaviours and it is difficult to describe such changes by a single kinetic model. A first-order reaction was chosen to describe the changes of L - and a -values. This can be expressed by the following equation:

$$\frac{x_{\text{eq}} - x(t)}{x_{\text{eq}} - x_0} = \exp(-kt), \quad (1)$$

where x and x_0 are the a - or L -values at time t and at the beginning, k is the reaction constant (min^{-1}). X_{eq} is the equilibrium value at infinite time and can be determined by linear regression. For the b -value, first-order reaction

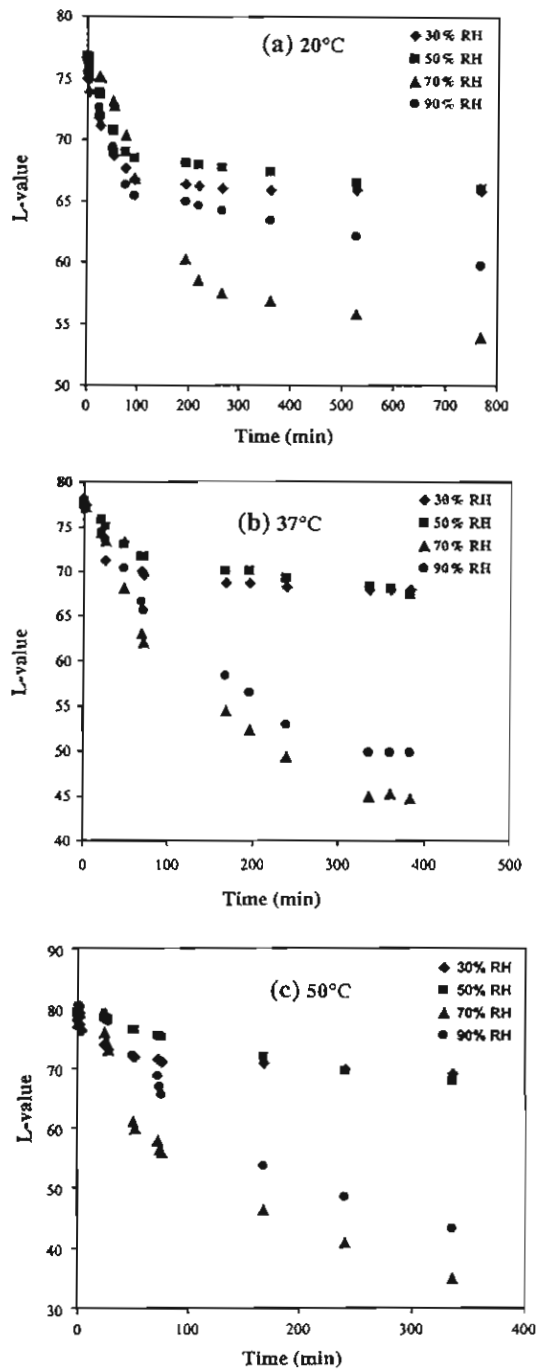


Fig. 1. Change of lightness at different levels of relative humidity and temperature.

kinetics is not suitable to describe the change in the yellowness because there are two different behaviours, the rate of formation and rate of disappearance. Accordingly, a combined kinetic equation is proposed, in which the kinetics reactions are considered to consist of two series steps, the first and second steps, corresponding to colour formation and degradation, followed

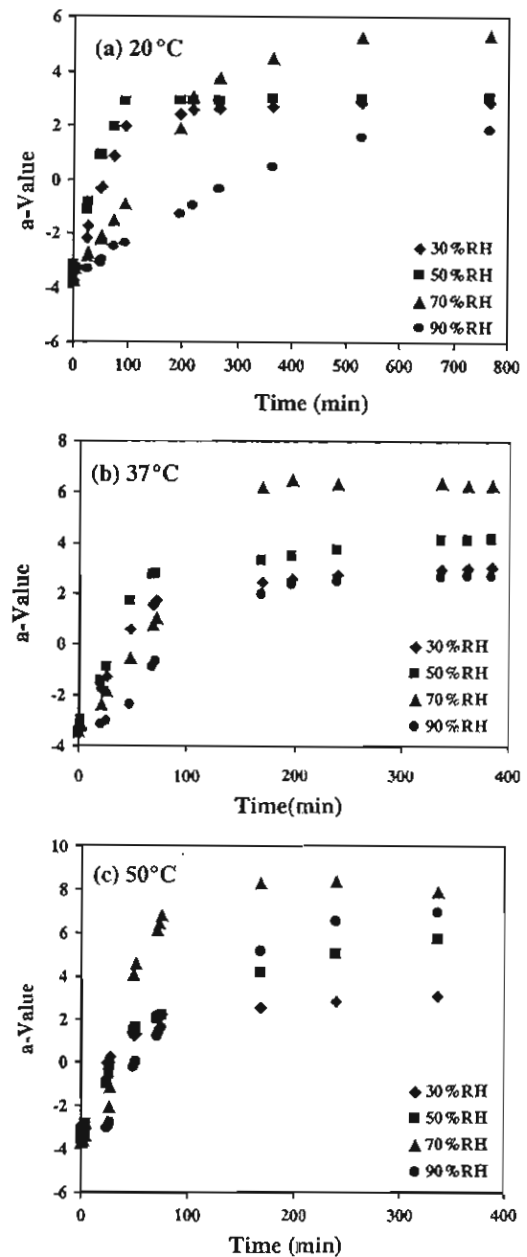


Fig. 2. Change of redness at different levels of relative humidity and temperature.

by a first-order reaction. The combined kinetics model can thus be expressed by

$$b(t) = ck_1 \left[\frac{\exp(-k_{b1}t)}{k_{b2} - k_{b1}} + \frac{\exp(-k_{b2}t)}{k_{b1} - k_{b2}} \right] + b_0 \exp(-k_{b2}t), \quad (2)$$

where k_{b1} and k_{b2} are the reaction constants (min^{-1}), b_0 is the b -value at $t = 0$ and c is the constant. If b_0 becomes zero, Eq. (2) will then be reduced to the equation as reported by Levenspiel (1999). As may be expected, the

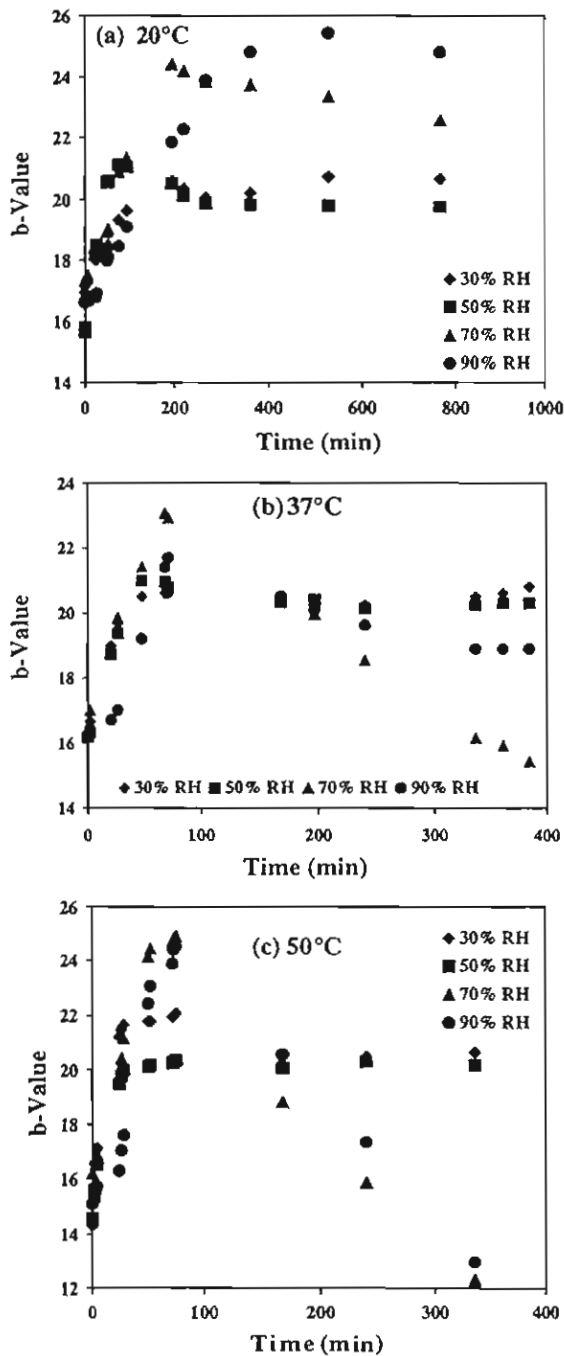


Fig. 3. Change of yellowness at different levels of relative humidity and temperature.

values of k_{b1} and k_{b2} govern the locations of maximum yellowness. The time at which the maximum b -value occurs is thus

$$t_{\max} = \frac{1}{k_{b2} - k_{b1}} \ln \left[\frac{k_{b2}}{k_{b1}} \{1 - b_0(k_{b2} - k_{b1})\} \right]. \quad (3)$$

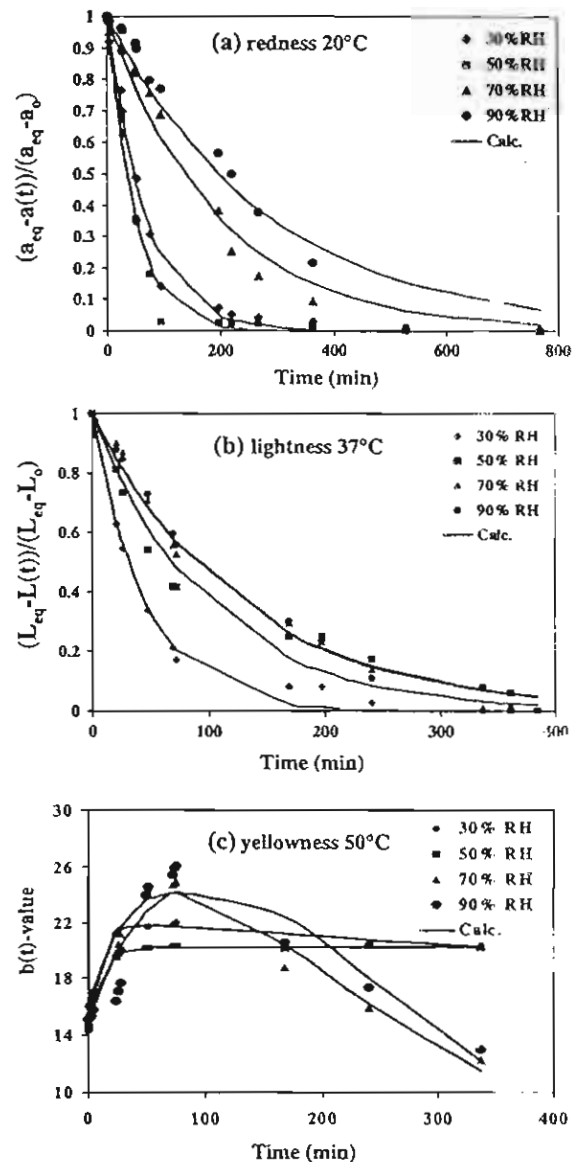


Fig. 4. Colour changes of garlic at different levels of relative humidity and temperature.

Substituting $t_{\max}$ in Eq. (3) into Eq. (2), we obtain the following equation for calculating the maximum b -value:

$$b_{\max} = c \left(\frac{k_{b2}}{k_{b1}} (1 + b_0(k_{b1} - k_{b2})) \right)^{k_{b2}/(k_{b1} - k_{b2})} \times \left[1 - b_0 k_{b2} + \frac{b_0}{c} \right]. \quad (4)$$

By regression of experimental data with Eq. (1) for a - and L -values and Eq. (2) for b -value, reaction constants were obtained from garlic placed in various temperature and relative humidity environments. The predicted and experimental colour parameters for some conditions are illustrated in Fig. 4(a)–(c) for redness, lightness and

yellowness, respectively, showing the proposed models capable of predicting the colour changes. The solid line of calculated lightness at 30% relative humidity shown in Fig. 4b is superimposed with the one at 50%.

In order to obtain the functional relationships between constant parameters in the equations of L -, a - and b -values and operating conditions, the empirical models were developed by non-linear regression analysis. The correlation equations, along with their coefficients of determinations (R^2) and residual sum of squares (RSS), for each colour parameter are given as follows:

Redness:

$$k_a = \left(4.68 - \frac{84.13}{RH} - \frac{523.97}{T} \right) \exp \left(-\frac{2279.64}{T} + \frac{558.98}{RH} + \frac{13.856^2}{RH} - \frac{1.298T}{RH} \right),$$

$$R^2 = 0.90, \text{ RSS} = 0.005, \quad (5)$$

$$a_{eq} = (307.7 + 0.2326T) \exp[0.000065RH - \exp(-0.0196RH + 0.2723)] - 2.585RH,$$

$$R^2 = 0.96, \text{ RSS} = 0.81. \quad (6)$$

Lightness:

$$k_L = (0.00000298) \exp \left(\frac{2177.04}{T} + \frac{279.872}{RH} - \frac{69329.7}{RH \cdot T} \right),$$

$$R^2 = 0.96, \text{ RSS} = 0.0022, \quad (7)$$

$$L_{eq} = \frac{(347.39 - 0.7940T - \frac{4840.55}{RH}) \exp(0.24182RH) + 8.83 \times 10^8}{13131500 + \exp(0.2418RH)},$$

$$R^2 = 0.99, \text{ RSS} = 1.66. \quad (8)$$

Yellowness:

$$k_{b1} = \left(0.90386 + \frac{129.4451}{T} - \frac{90.74128}{RH} + \frac{1908.852}{RH^2} - \frac{3884.178}{RH \cdot T} \right) \exp \left(-\frac{3252.927}{T} + \frac{542.3706}{RH} + \frac{886.3580}{RH^2} \right),$$

$$R^2 = 0.98, \text{ RSS} = 0.004, \quad (9)$$

$$k_{b2} = (127.96954) \exp \left[\left(\frac{-4376.0011}{T} \right) + \exp \left(\frac{239.7552}{RH} - \frac{11608.7}{RH^2} \right) \right],$$

$$R^2 = 0.98, \text{ RSS} = 0.003, \quad (10)$$

$$c = (31.70352 - 0.204875T + 0.000333T^2) \times \exp[-0.03741RH + \exp(0.010838RH + 1.19392)] - 0.105791RH,$$

$$R^2 = 0.98, \text{ RSS} = 0.003, \quad (11)$$

where T is the absolute temperature and RH is the percentage of relative humidity.

When garlic is exposed to different relative humidity and temperature levels for a very long time, it becomes darker, in particular at high relative humidity and temperature which shows a low calculated L_{eq} -value, lower than that at the mild conditions shown in Fig. 5. In addition to low luminosity, the garlic loses its yellow pigment and becomes redder when held at higher relative humidity and temperature. The redness behaviour at equilibrium can be seen in Fig. 6 and it exhibits the highest value at a relative humidity between 70% and 80% for any temperature.

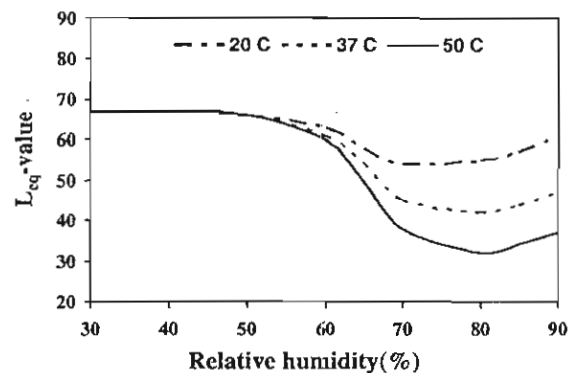


Fig. 5. Prediction of L_{eq} -value at different levels of relative humidity and temperature.

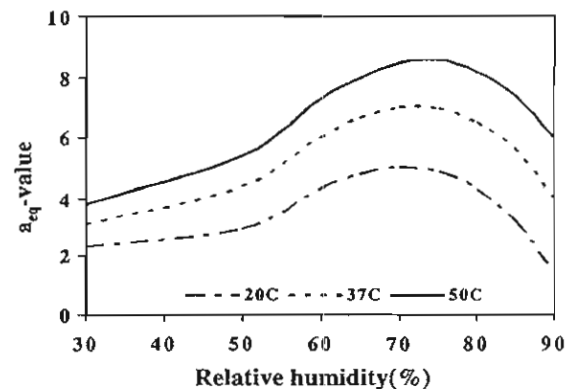


Fig. 6. Prediction of a_{eq} -value at different levels of relative humidity and temperature.

3.2. Maximum yellowness ($b_{\max}$)

The required time to obtain the maximum yellowness was found to range from 50 to 480 min depending on the relative humidity and temperature; the shorter time being obtained with higher temperatures and lower relative humidity levels. The $b_{\max}$ -value presented in Fig. 7 indicates that the increase in relative humidity and temperature induces more yellowness in garlic, except for the temperature of 37 °C at which shows lower $b_{\max}$ over the relative humidity range.

3.3. Change of ΔE

Total colour difference (ΔE) was calculated from the Hunter parameters, L , a and b , using the Hunter–Scottfield equation:

$$\Delta E = \sqrt{(L(t) - L_0)^2 + (a(t) - a_0)^2 + (b(t) - b_0)^2}, \quad (12)$$

where $L(t)$, $a(t)$ and $b(t)$ are respectively the lightness, redness and yellowness at time t in minutes. The total colour difference is shown in Fig. 8(a)–(c) showing that the value of ΔE is dependent on the temperature and relative humidity. The ΔE -value obtained at any temperature is noticeably higher for the high relative humidity condition than for the low one although the increase in the ΔE -value for the latter case in the early period seems to be higher, especially at a temperature of 20 °C. This behaviour can be explained by the state of the bound water and the solute mobility. At low humidity, the moisture content of garlic falls quickly before reactive species can reach each other. Therefore, the ΔE -values for the low humidity levels of 30% and 50% are almost equal and relatively low compared to the values at higher humidity levels. These results clearly

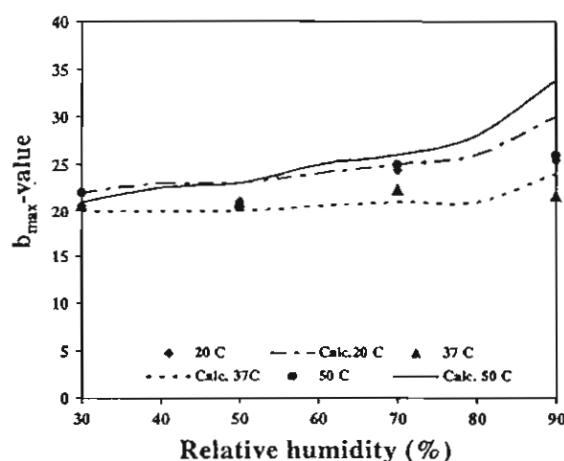


Fig. 7. Comparison of $b_{\max}$ -value obtained from the experiment and calculation by Eq. (4).

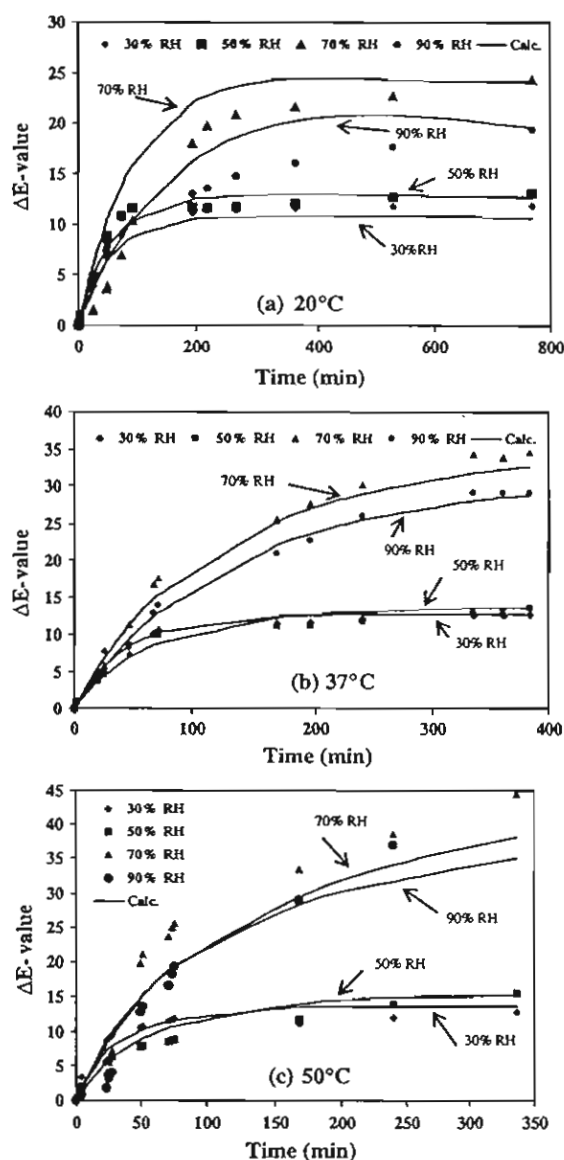


Fig. 8. Change of ΔE -value at different relative humidity and temperature levels.

indicate that the relative humidity at low levels plays an important role in retarding the browning reactions. When considering the temperature effect, it appears that the total colour difference is slightly depended on the temperature when the relative humidity is lower than 50%.

For the high humidity, on the other hand, the loss of moisture content is slow and the water inside the garlic acts as a solvent. As a result, as the temperature increases, the reactive species can dissolve in the water so that their potential mobility and reactivity become higher, resulting in higher ΔE values as represented in

Fig. 8(a)–(c) for the 70% relative humidity. As the relative humidity is higher than 70%, the opposite result to those mentioned above becomes evident. The lowering of ΔE -value is noticed with increase in relative humidity. This result can be explained by the fact that there exists a large amount of water in the garlic and the dilution of reactive species inhibits the browning rate.

According to the experimental results at various relative humidity levels, the maximum browning rate for the garlic occurs at 70% relative humidity. This result is similar to the work reported by Rapusas and Driscoll (1995) who studied the browning rate in the dehydrated food product and observed the occurrence of maximum browning rate ranging from 65 to 75% relative humidity. Thus, to keep the low browning rate, use low relative humidity and temperature for storage or dehydration.

As shown in Fig. 8, the proposed empirical kinetics models for L , a and b , which are used to calculate the total colour difference by Eq. (12), can reasonably predict the changes in total colour difference under various operating conditions.

4. Conclusion

Three colour parameters, lightness (L), redness (a), and yellowness (b), were used to investigate the changes in colour of garlic. The lightness, redness and yellowness were found to be dependent on relative humidity and temperature. The reduction in the lightness and increase in the redness with time can suitably be described by a first-order kinetics model. For yellowness, it rises to a maximum value, after which it declines, and such characteristics of the yellowness-time curve can be represented by first-order reactions in series. The reaction rate constants for the L , a and b kinetic equations are empirically correlated with relative humidity and temperature in the ranges of 30–90% and 20–50 °C, respectively. As indicated by the total colour difference, there exists a maximum browning rate for garlic which was isothermally heated at a relative humidity of 70%.

Acknowledgements

The authors would like to thank King Mongkut's University of Technology Thonburi and The Thailand Research Fund for their financial support.

References

- Ambrose, D. C. P., & Sreenarayanan, V. V. (1998). Studies on the dehydration of garlic. *Journal of Food Science Technology*, 35, 242.
- Cornwell, C. J., & Wrolstad, R. E. (1981). Causes of browning in pear juice concentrate during storage. *Journal of Food Science*, 46, 515.
- Feng, H., & Tang, J. (1998). Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *Journal of Food Engineering*, 63, 679.
- Garza, S., Ibarz, A., Pagan, J., & Giner, J. (1999). Non-enzymatic browning in peach puree during heating. *Food Research International*, 32, 335.
- Gustafson, F. C. (1972). Equilibrium moisture content of shelled corn from 50 °F to 155 °F. Unpublished master of science thesis, University of Illinois, Urbana, USA.
- Krokida, M. K., Tsami, E., & Urbicain, M. J. (1998). Kinetics on colour changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology*, 16(3–5), 667.
- Labuza, T. P., & Saltmarch, M. (1981). The nonenzymatic browning reaction as affected by water in foods. In L. B. Rockland, & G. F. Stewart (Eds.), *Water activity: influences on food quality* (p. 605). New York: Academic Press.
- Levenspiel, O. (1999). Chemical reaction engineering (third ed., p. 53). USA: John Wiley & Sons.
- Maskan, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwi fruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 169.
- Rapusas, R. S., & Driscoll, R. H. (1995). Kinetics of non-enzymatic browning in onion slices during isothermal heating. *Journal of Food Engineering*, 24, 417.
- Samaniego-Esguerra, C. M., Boag, I. F., & Robertson, G. L. (1991). Kinetics of quality deterioration in dried onions and green beans as a function of temperature and water activity. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 24, 53.
- Soponronnarit, S., Srisubati, N., & Yoovidhya, T. (1998). Effect of temperature and relative humidity on yellowing rate of paddy. *Journal of Stored Product Research*, 34(4), 323.
- Toribio, J. L., & Betusawa, M. (1978). Heat induced browning of clarified apple juice at high temperatures. *Journal of Food Science*, 51, 172.
- Wong, M., & Stanton, D. W. (1992). Effect of removal of amino acids and phenolic compounds on non-enzymatic browning in stored kiwi fruit juice concentrates. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 26, 138.

Simulation and grain quality for in-store drying of paddy

Yutthana Tirawanichakul ^{a,*}, Somkiat Prachayawarakorn ^{b,1}, Warunee Varanyanond ^{c,2},
Somchart Soponronnarit ^{a,3}

^a Drying Technology Research Laboratory, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi,
ThungKru, Prachautit Rd., Bangkok 10140, Thailand

^b Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT),
ThungKru, Prachautit Rd., Bangkok 10140, Thailand

^c The Institute of Food Research and Product Development (IFRPD), Kasetsart University, Chatuchak, Thailand

Received 8 February 2003; accepted 13 September 2003

Abstract

Quality of product obtained from dehydration process is important to consumer and food manufacturer. Experiment results from the in-store drying technique using ambient air temperature have shown that the head rice yield, stickiness and whiteness of samples dried from initial moisture contents of 18.5–20.6% to $13.3 \pm 0.6\%$ wet basis at temperature of $30 \pm 4^\circ\text{C}$ and specific airflow rates of $0.65\text{--}1.5\text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy reduces but hardness increases. As compared with the qualities of control samples which were gently dried by ambient air aeration in thin layer dryer, they are all slightly different. A near-equilibrium drying model incorporating the yellowing kinetics of paddy is proposed which takes accounts of the experimental observations. The model is reasonable to predict the experimental data. The simulation results indicate that the degree of whiteness depends on temperature, relative humidity, loading capacity and airflow rate. The relative humidity lower than 70% and specific airflow rate higher than $0.75\text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy are recommended.

© 2003 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: In-store drying; Microstructure; Near equilibrium model; Rice quality

1. Introduction

Freshly harvested paddy may contain the water around 18–26% wet basis. The management of highly moist paddy during the harvesting period is a serious problem in Asian countries because high humidity conditions can encourage the excessive mould growth and the high respiration rate from grain. Consequently, the dry matter of grain is lost and heat liberated from its respiration and biological activities may accelerate rice yellowing (Soponronnarit & Nathakaranakule, 1990). To obtain high quality of paddy and prevent all the above problems, moisture content of paddy must be reduced to moisture content of 12.0–14.0% wet basis.

The in-store paddy drying, which is well known as a fixed-bed drying, is the most common method used for the purpose of paddy drying. To ensure a high head rice yield and a high germination rate of rice, the recommended drying temperature should not exceed 43°C (Soponronnarit & Preechakul, 1990).

Physical quality index used for considering quality of rice is the head rice yield and the rice yellowing. Many researchers have studied on physical quality in terms of yellowness or whiteness (Bason, Gras, Banks, & Esteves, 1990; Gras & Bason, 1989; Gras, Banks, Bason, & Ariola, 1989; Phillips, Widjaja, Wallbridge, & Cooke, 1988; Quitco, 1982; Soponronnarit, Srisubati, & Yoo-vidhya, 1998; Yap, Juiliano, & Perez, 1988). The yellowing of rice was mainly caused by either non-enzymatic reactions or enzymatic reactions. The enzymatic reactions induced by the fungal metabolites might be expected to produce the distinctly yellowed individual rice kernel while the non-enzymatic browning reaction might cause the overall change in hue. For non-enzymatic reactions, the water activity and temperature play an important role in accelerating the yellowing of rice

* Corresponding author. Tel.: +1-662-4708695-6x112; fax: +1-662-4279062/8746364/4708623.

E-mail addresses: tyutthan@hotmail.com (Y. Tirawanichakul), isomarnit@cc.kmutt.ac.th (S. Soponronnarit).

¹ Tel.: +1-662-4709220-35x206.

² Tel.: +1-662-9428629-35.

³ Tel.: +1-662-4708695-6x111; fax: +1-662-4708623/4279062.

kernels while oxygen shows a minor effect. In addition to such factors, variety and ageing also have some effects.

The effect of various postharvest treatments on chemical and physicochemical properties of rice were investigated by using texture profile (Juliano, 1985; Ngamchuen, Lamaimaat, & Kanchana, 1985), microstructure (Inprasit & Noomhorm, 2001; Zhou, Robards, Helliwell, & Blanchard, 2002), sensory analysis (Ngamchuen et al., 1985; Jean, Meullenet, Bradley, Griffin, & Daniels, 1999) and thermal analysis (Ohtsubo, Toyoshima, & Okadome, 1998; Ong & Blanshard, 1995). The low-temperature fixed-bed drying takes long time to reduce the moisture content of paddy. This long period of drying looks like as the storage duration. Storage duration and temperature had profound effects on the sensory analysis, texture profiles and chemical property (Gras & Bason, 1989; Jean et al., 1999; Ngamchuen et al., 1985; Zhou et al., 2002). A few studies have been conducted on effect of fixed-bed drying at low temperature on quality.

The objective of this paper is to investigate the quality of paddy obtained by in-store drying technique. The mathematical model developed by Soponronnarit and Nathakarnakule (1990) is used for predicting moisture content and degrees of yellowness represented in the form of value of whiteness. In addition, the physical quality, physicochemical quality, microstructure and germination are also determined.

2. Materials and methods

2.1. In-store drying system

Fig. 1 illustrates the schematic diagram of in-store dryer and its components. A deep bed dryer is composed of a cylindrical bin with a diameter of 0.75 m and height of 2.75 m, a blower and an electrical heating unit (in case of control relative humidity of inlet drying air temperature, the air will be heated but it is not used in these experiments). However, the electrical heating unit was shut off during the experiment. In the experiments, the bed depth of paddy was fixed at 1.0 m. Ambient air flow rates of 0.93, 0.65, 1.20 and 1.50 m³/min m³ of paddy for experiment Nos. 1, 2, 3 and 4, respectively, were blown through the grain bed. The outlet air was then delivered to the atmosphere. The desired air flow rate was controlled by the combination of a frequency inverter and a butterfly valve.

2.2. Methods

2.2.1. Paddy drying condition

Suphanburi 1, the long grain *indica* variety with a high amylose content of 27–29% provided by Rice Research Station at Pathumthani province, Thailand, was used in the experiments. To obtain the uniform moisture content, fresh paddy was rewetted by spraying water and then mixed and kept in a cold storage at the tem-

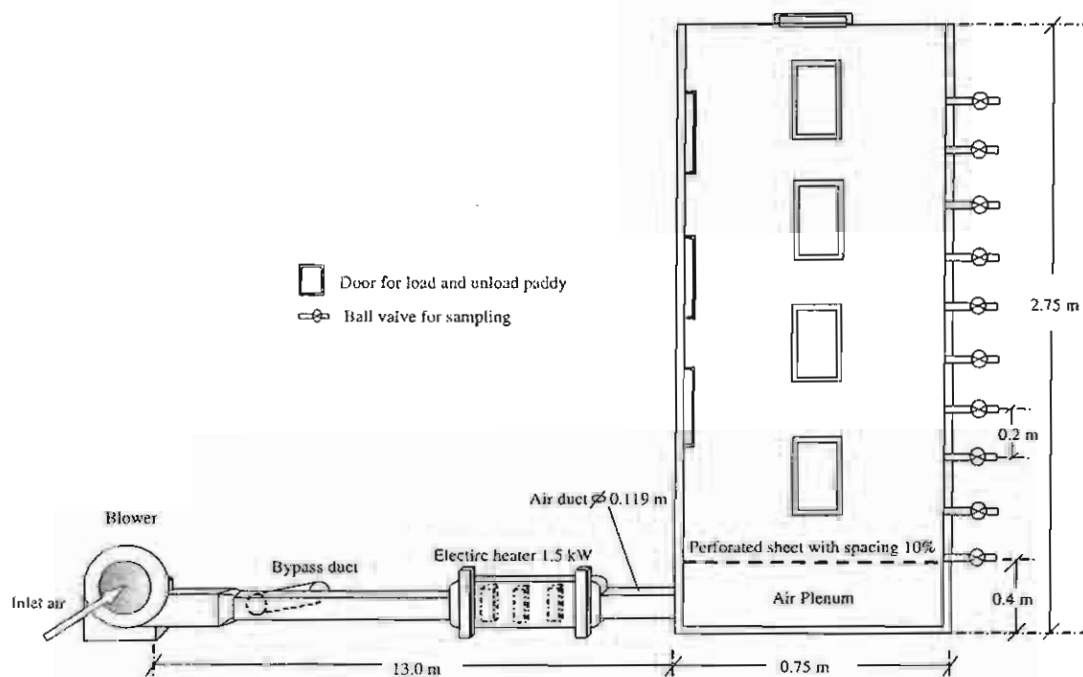


Fig. 1. Schematic diagram of in-store dryer [the electrical heaters were shut off in this work]

perature of 4–8 °C for a week. Before running the experiments, paddy was placed at the ambient environment until its temperature was closed to ambient air temperature. The initial moisture contents were 20.1% wet basis for experiment No. 1 and experiment No. 3, 18.5% wet basis for experiment No. 2 and 19.5% wet basis for experiment No. 4. The moisture content of paddy was determined by using AOAC standard method (AOAC, 1995). During the experiments, inlet air, moisture content, grain temperature and outlet air were recorded. Paddy sample was taken out from the bin for determining head rice yield and whiteness of rice. Moisture content of the sample was determined in every 5 day, except for the first 3 day of the experiment that it was checked in every 24 h. To avoid disturbance of drying process, the sampling for determining head rice yield was done in every 5 days. The grain temperature, dry bulb and wet bulb temperatures were measured by K-type thermocouple, which were continuously monitored by a Yogokawa data logger with a precision of ± 0.1 °C. Air relative humidity was determined from dry and wet bulb temperatures. Air velocity was measured by a hot wire anemometer with a precision of ± 0.1 m/s.

2.2.2. Quality of paddy

Quality of paddy from the fixed-bed experiments were characterized by head rice yield, whiteness, pasting properties and texture properties, germination and compared with the control one, for which paddy lied in a single layer was dried by ambient air ventilation. The details on each method were reported in the following items.

2.2.2.1. Head rice yield. The method of head rice yield determination was followed as by the guideline of USDA method (USDA, 1988). Percentage of head rice yield was reported as the average value of two replications. The relative head rice yield is referred to the ratio of head rice yield obtained from the dried sample to that from the control sample.

2.2.2.2. Whiteness of rice. The rice whiteness was measured by the light reflectance at the surface of rice kernel using a Satake milling meter. Before measuring, the meter was calibrated with standard pure white magnesium oxide powder. The initial yellowness value was measured in Hunter *b* unit by using Data Color meter and used as an input parameter for calculating the rice whiteness [see Eq. (16)].

2.2.2.3. Microstructure study. The structure of rice kernels were characterized with a Phillips 535-M scanning electron microscope at 10–20 kV. Before scanning, the milled rice samples were cut in cross section. Then, the samples were glued on the metal stubs for the stable supporting and were coated with gold (~30 nm thick) to

become the electrical conductor for electron attachment during scanning.

2.2.2.4. Texture measurement. Hardness and stickiness of rice were determined by a bench-top Texture analyzer model TA-XT2i (Stable Micro Systems Ltd.). A 30 g portion of each dry-milled head rice sample was put in an aluminum cylindrical cup (diameter of 7 cm and height of 7 cm) and rice sample was rinsed twice with distilled water and the distilled water was added in an amount equal to a 1:1.7 ratio of rice to water by weight. After cooking cycle, the sample was then taken out and cooled down to room temperature for 1 h. The cooked rice sample was taken from the middle of cup and this portion (50.0 ± 0.1 g) was placed 1 cm equidistant from each other on the base of the Texture analyzer. The initial height of the compression probe (Ottawa cell) was set at 120 mm. During the compression, the test speed was 0.5 mm/s. The maximum force required to compress the cooked rice to 90% of initial portion height 10 mm measured as hardness. The initial height of the compression probe (Ottawa cell) was set at 120 mm. The pretest speed of probe was 1.5 mm/s. During the compression, the test speed was set up at 0.5 mm/s and the post test speed in retraction period was 10 mm/s. In the other words, the hardness was the height of the force peak on the first compression. For measuring stickiness value, the cylindrical probe P50 was used in this work. The texture profile analysis used for determining hardness and stickiness of cooked rice was recorded in kilogram.

2.2.2.5. Pasting property. The pasting properties of hydrothermally treated rice flour samples were determined using a Rapid Visco Analyzer [RVA] (Newport Scientific Ltd., Warriewood, NSW, Australia Model 3D) with approved method 61-02 (AACC, 2000). Viscosity of rice flour was reported as the average value of two replications. A heating and cooling cycle was used at a constant shear rate where the sample was equilibrated at 35 °C for 2 min and heated up to 95 °C at the rate of 11.8 °C/min, held at 95 °C for 2.5 min and cooled down to 35 °C at the same rate. The RVA parameters measured as peak viscosity (the maximum hot paste viscosity), holding strength (the trough at the minimum hot paste viscosity), final viscosity (the viscosity at the end of the test after cooling to 50 °C), setback (the final viscosity minus peak viscosity), peak time (min) and pasting temperature (°C). Those of RVA parameters were expressed in Rapid Visco Unit ($1 \text{ RVU} \approx 10^{-2} \text{ cP}$).

2.2.2.6. Germination of rice. The mature paddy samples were chosen and kept at room environment for 4 weeks before germination test. The germination test of dried paddy and control paddy was done following the method of the Rice Research Station, Pathumthani

province, Thailand. Two hundred mature kernels were placed in a Petri disc added with the distilled water of 200 ml and then were left for a week. A percentage of paddy germination, defined as the ratio of number of germinated seeds to total seeds and multiplied by 100, was represented. Percentage of paddy germination was reported as the average value of triplicate.

2.3. Mathematical model

Mathematical simulation of grain drying has been studied and the models for deep bed grain drying could be divided into the 3 models as follows: non-equilibrium model (Brooker, Bakker-Arkema, & Hall, 1992), near-equilibrium model (Soponronnarit, 1988; Soponronnarit & Chinsakolthanakorn, 1990; Soponronnarit & Nathakaranakule, 1990; Thompson, Peart, & Foster, 1968) and logarithmic model (Barre, Baughman, & Hamdy, 1971; Hukill, 1947). The mathematical deep bed paddy drying model used in this work is based on a near-equilibrium model, which has been developed by Soponronnarit (1988). In this model, it supposes that the temperatures of air and grain are in thermal equilibrium at a certain grain layer and a small time interval. The main equations of model are as follows.

2.3.1. Energy balance equation for a thin layer

In the model, the grain bed is composed of series of thin layer. For a given thin layer, the energy equation is derived based on the first law of Thermodynamics by assuming that heat loss is very small and can be negligible. Thus, the sum of changes of the internal energy in the control volume of a thin bed and enthalpy of flowing stream is equal to zero. The following equation can thus be written as (Soponronnarit, 1988)

$$c_a T_o + (2502 + c_v T_o) W_o + R c_{pw} \theta_o = c_a T_f + (2502 + c_v T_f) W_f + R c_{pw} T_f \quad (1)$$

where c is the specific heat capacity (kJ/kg °C), T is the air temperature (°C), θ_o is the grain temperature (°C), W is the absolute humidity (kg H₂O/kg dry air), and R is the ratio of dry grain mass to dry air mass (kg dry matter/kg dry air) with subscripts: 'a' is the dry air, 'f' is the after drying, 'o' is the before drying, 'pw' is the wet grain, and 'v' is the water vapor.

2.3.2. Mass balance equation for a thin layer

The assumption is that water vapor evaporated from the thin layer is equal to the changes of water vapor in flowing stream. The equation of mass balance can thus be written as (Soponronnarit, 1988)

$$W_f - W_o = (M_o - M_f) R \quad (2)$$

where M is the grain moisture content (decimal dry basis).

The moisture equilibrium for paddy is given by Henderson's equation (Henderson, 1952) as follows:

$$M_{eq} = \left(\frac{1}{100} \right) \left[\frac{\ln(1 - RH)}{\{C(1.8T + 491.7)\}} \right]^{1/N} \quad (3)$$

where M_{eq} is the equilibrium moisture content (decimal dry basis), T and RH are the air temperature (°C) and relative humidity (in decimal), respectively, and C and N are the arbitrary constants depending upon agricultural material (dimensionless).

For paddy, the values of C and N are -7.87×10^{-6} and 2.088, respectively.

2.3.3. Thin layer drying equation

An empirical thin layer drying equation developed by Agrawal and Singh (1977) is used. It can be written as the following equation:

$$MR = \left(\frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \right) = \exp(-x t^n) \quad (4)$$

where

$$x = 0.02958 - 0.44565 RH_o + 0.01215 T_o \quad (5)$$

$$y = 0.13365 + 1.93653 RH_o - 1.77431 RH_o^2 + 0.009468 T_o \quad (6)$$

where RH_o is the relative humidity of air before drying (in decimal), M_{in} is the initial grain moisture content (decimal dry basis), and t is the drying time (h).

2.3.4. Energy balance at fan

Temperature rise of air while flowing across a fan is determined by applying the first law of thermodynamics for steady state flow process. Eq. (7) is used for calculating temperature rise of air across fan given by (Soponronnarit, 1988)

$$m c_a \Delta T_s = \frac{\dot{m} P}{\rho_a E_f} \quad (7)$$

where $\dot{m}$ is the air mass flow rate (kg/s), ΔT_s is the temperature rise of air while flowing across a fan (°C), ρ_a is the air density (kg/m³), P is the pressure (kPa), and E_f is the fan efficiency, 0.60 (in decimal).

Shaft power for driving fan can be calculated by the following equation (Soponronnarit, 1988):

$$BP = (q)(\Delta P_t)/E_m \quad (8)$$

where BP is the shaft power (kW), q is the volumetric air flow rate (m³/s), ΔP_t is the total pressure loss of system (kPa), and E_m is the mechanical efficiency (in decimal).

2.3.5. Dry matter loss

The dry matter loss (DML) equation for paddy used in the present work was obtained from Seib, Pfost, Sukaboi, Rao, and Burroughs (1980), showing that the loss of dry matter depends on grain temperature and

moisture content. The dry matter loss equation can be written in the following empirical form:

$$\text{DML} = 1 - \exp[\text{TERM}] \quad (9)$$

in which

$$\begin{aligned} \text{TERM} = & 0.001889 \left(\frac{t}{1000} \right)^{0.7101} \\ & \times \exp[0.0274(1.8\theta - 28)] \exp[31.63(M_w - 0.14)] \end{aligned} \quad (10)$$

where DML is the dry matter loss (in decimal), t is the drying time (h), θ is the long grain temperature ($^{\circ}\text{C}$), and M_w is the long grain moisture content (decimal dry basis).

Carbon-dioxide and water vapor are the by-products from the respiration reaction. A 1% of dry matter loss per kilogram of dry matter produces about 0.15778 MJ of heat. Therefore, the heat and moisture liberated from respiration was calculated by the following equations (Seib et al., 1980):

$$\Delta T_h = 15778 \text{DML} / c_{pw} \quad (11)$$

$$\Delta M_h = 0.6 \text{DML} \quad (12)$$

where ΔT_h is the temperature rise of grain ($^{\circ}\text{C}$), and ΔM_h is the moisture rise of grain (decimal dry basis).

The heat from this respiration process was important. In the simulation program, there is an optional condi-

tion for simulation with and without heat of grain respiration.

2.3.6. Shrinkage of paddy

The shrinkage of bulk paddy's equation for long grain rice with a validation of moisture content from 12.0% dry basis to 39% dry basis developed by Prechakul (1986) is given by

$$v = 0.001997 + 0.0012M \quad (13)$$

where v is the the volume per kilogram of dry matter (m^3/kg), and M is the moisture content of paddy (decimal dry basis).

2.3.7. Yellowness of rice kernel

The yellowing rate of paddy was explained by temperature and water activity and the following empirical equations are used to predict the change in the yellow color developed by Soponronnarit et al. (1998) as

$$\frac{db}{dt_d} = k \quad (14)$$

and

$$\begin{aligned} \ln k = & 71.87 - 25.32(\text{RH}) - \frac{25919.13}{T_k} \\ & + \frac{10712.78(\text{RH})}{T_k} \end{aligned} \quad (15)$$

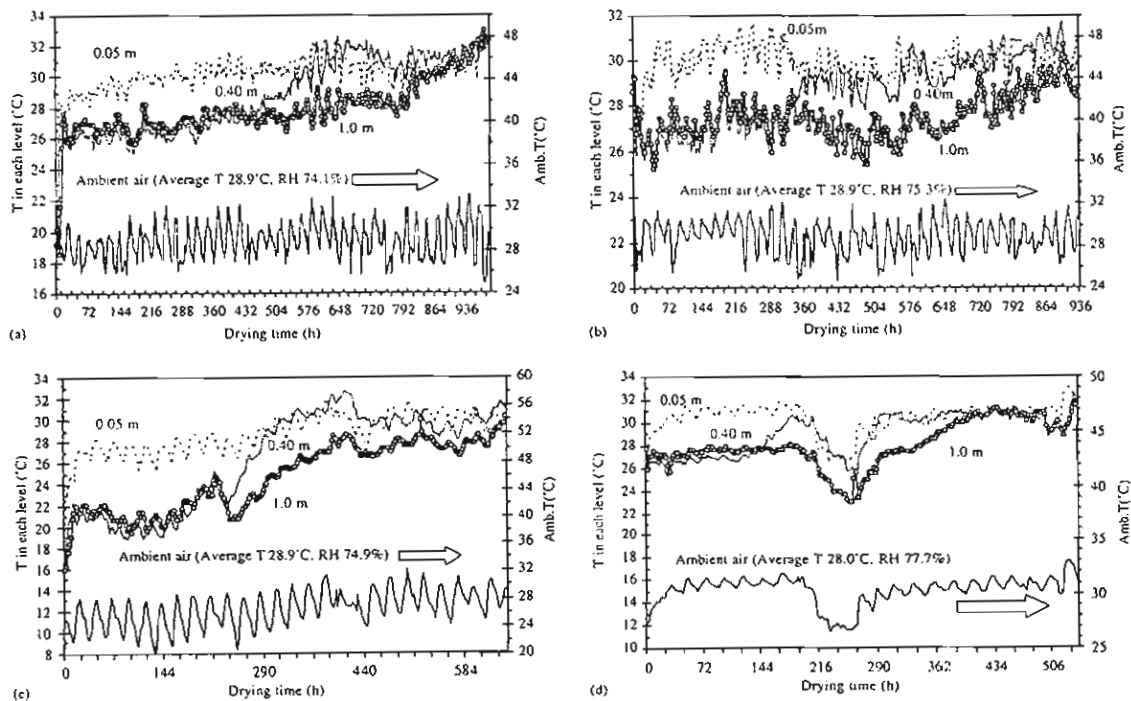


Fig. 2. Evolution of temperature profile during drying at different air flow rates (Amb. means ambient air): (a) experiment No. 1 ($0.93 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy); (b) experiment No. 2 ($0.65 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy); (c) experiment No. 3 ($1.20 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy); (d) experiment No. 4 ($1.50 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy).

where b is the yellowness of rice (Hunter b unit), t_d is the time (day), k is the constant value for the yellowing rate (Hunter b unit/day), RH is the relative humidity (in decimal), and T_k is the temperature (K).

From the experimental data, the empirical equation of rice whiteness (W_h) was formulated by a linear regression relation to the yellowness of rice as given by (Soponronnarit et al., 1998)

$$W_h = 85.1 - 3.36b \quad (16)$$

where W_h is the whiteness of rice.

Finally, the average moisture content and the average whiteness can be determined by Eqs. (17) and (18), respectively.

$$\bar{M}_{av} = \frac{\int_0^L M(x) dx}{\int_0^L dx} \quad (17)$$

$$\bar{W}_{hav} = \frac{\int_0^L W_h(x) dx}{\int_0^L dx} \quad (18)$$

where $\bar{M}_{av}$ is the average moisture content of paddy (% wet basis), $\bar{W}_{hav}$ is the average whiteness of rice kernel, $M(x)$ is the moisture content of paddy (% wet basis), $W_h(x)$ is the whiteness of rice in each bed depth, and dx is the bed depth (m).

The yellowness of paddy in each thin layer is calculated during drying time by using the air temperature and air relative humidity, which were in the thermal equilibrium with thin layer of grain kernel. The average moisture content and the average whiteness can be calculated by Eqs. (17) and (18), respectively.

2.4. Grain drying system program

The mathematical model of Grain Drying System Program (GDS) incorporating the Eqs. (14)–(16) was written by QBASIC language. The input parameters were composed of initial grain moisture content, grain temperature, inlet ambient air temperature, airflow rate and relative humidity.

The major assumption was that there exists thermal equilibrium between grain and drying air and the outlet drying air condition from the first thin layer is used as the input drying air condition for the next layer and the same calculation procedure is made for all thin layers with advancing time step.

3. Results and discussion

3.1. Moisture profile and energy consumption

Fig. 2(a)–(d) shows the evolution of temperatures during drying period for all experiments. The inlet air temperature and relative humidity change with time in range of 30 ± 4 °C and $76 \pm 8\%$, respectively. As seen

from these figures, the temperature during early drying period is relatively higher at the bottom level than at the upper level. When a particular period of drying time elapses, depending on the specific air flow rate and initial moisture content of paddy, the temperatures at the lower and upper parts of bed approach together. The phenomena of temperature change is correlated with the change of moisture profiles presented in Fig. 3(a) and (b), showing that drying zone starts from the bottom and then moves towards the top layer of paddy. At the end of drying, the moisture content of paddy at various levels is close to 13.3% wet basis. According to these results, they indicate that the transfer of heat and mass is in the equilibrium stage at the drying end.

In Fig. 3(a) and (b), they also show that the proposed model can predict the moisture content at various bed levels and is in a good agreement with the experimental results. In this calculation, the respiration effect and experimental weather data is used to predict the moisture change.

Fig. 4(a)–(d) intends to show the average moisture content prediction, which are included and excluded

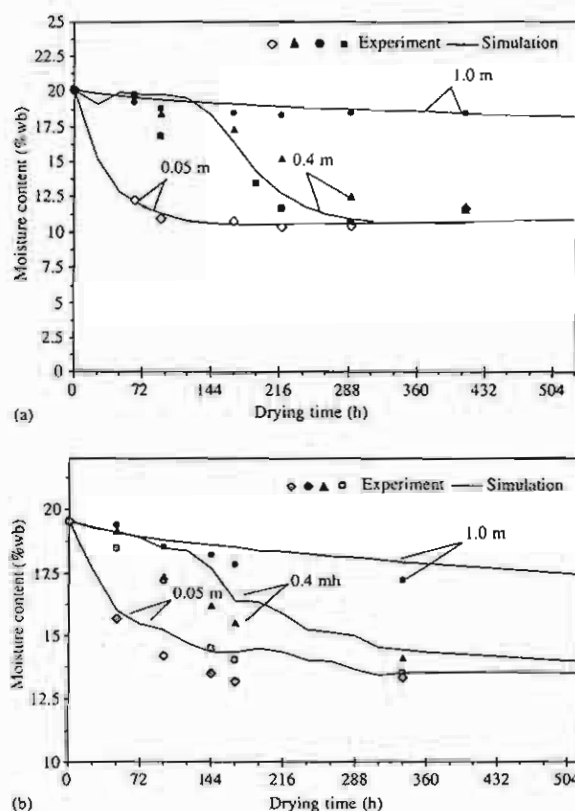


Fig. 3. Moisture profile in fix-bed drying at various specific air flow rates (including respiration): (a) experiment No. 3 (M_i 20.1% w.b., M_f 14% w.b., $1.20 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy); (b) experiment No. 4 (M_i 19.5% w.b., M_f 13.7% w.b., $1.50 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy).

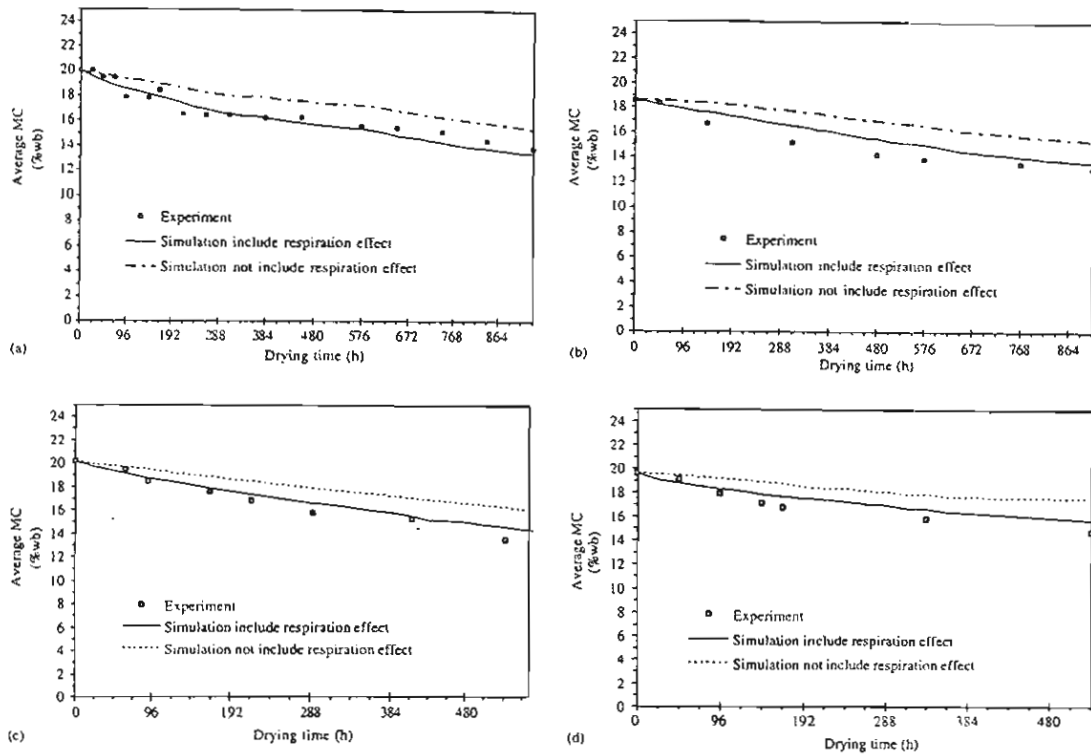


Fig. 4. Comparison of moisture prediction using the model including and excluding the respiration effect: (a) experiment No. 1 (M_i 20.1% w.b., M_f 14.4% w.b., $0.93 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy); (b) experiment No. 2 (M_i 18.5% w.b., M_f 13.3% w.b., $0.65 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy); (c) experiment No. 3 (M_i 20.1% w.b., M_f 14.0% w.b., $1.20 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy); (d) experiment No. 4 (M_i 19.5% w.b., M_f 13.7% w.b., $1.50 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy).

Table 1

Comparison of energy consumption between experiments and simulations of various drying strategies (grain bed depth 1.0 m, M_i 18.5–20.6% wet basis and M_f $13.3 \pm 0.7\%$ wet basis)

Descriptions	Simulated results of energy consumption, MJ/kg of water evaporated	Experimental results of energy consumption, MJ/kg of water evaporated	Simulated results of energy from respiration effect, [% DML] MJ/kg of water evaporated
Exp. 1: $0.93 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy	0.07	0.09	0.80 [0.80]
Exp. 2: $0.65 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy	0.11	0.11	2.00 [0.90]
Exp. 3: $1.20 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy	0.09	0.08	1.07 [0.66]
Exp. 4: $1.50 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy	0.13	0.09	1.01 [0.73]

respiration effect for the calculation of experiment Nos. 1, 2, 3 and 4, respectively. The simulation including the respiration effect shows the moisture content predictions more accuracy than the excluding one. This is because heat liberated from grain respiration increases the air temperature while air flows through the bed, thus allowing the more potential capability to remove the moisture inside the paddy.

The specific energy consumption reported in this work covers only the mechanical energy used for driving the fan. The energy consumption from the experiments shown in Table 1 is in a range of 0.08–0.11 MJ/kg of water evaporated for the specific air flow rate at 0.65–1.50 $\text{m}^3/\text{min m}^3$ of paddy. The prediction of specific

energy consumption from the model has a similar trend to the experimental values.

From the prediction of DML value, energy liberation of grain respiration corresponding to dry matter loss of 0.66–0.9% is about 0.8–2.0 MJ/kg of water evaporated (as given in Table 1). These amounts of energy are the main energy source used for evaporating water.

3.2. Paddy qualities

3.2.1. Head rice yield and whiteness

The average head rice yield of paddy samples at the beginning was about 40% for the first two experiments and 51% for the latter two experiments. The value of

Table 2
Physical quality and physicochemical quality of Suphanburi 1 rice variety dried by in-store dryer

Drying strategy	Hardness (kg)	Stickiness (kg)	Peak viscosity (RVU)	Final viscosity (RVU)	Relative head rice yield	Average whiteness	Germination (%)
Control rice	16.66 ± 4.25	— ^a	293.33	380.50	1	50.3	— ^a
EXP-1							
After drying	23.87 ± 5.28	— ^a	304.58	389.67	0.93	48.8	— ^a
EXP-1							
Control rice	16.14 ± 1.89	−0.11 ± 0.04	246.58	286.01	1	49.8	97.2
EXP-2							
After drying	22.84 ± 3.43	−0.07 ± 0.06	266.81	311.47	0.94	49.0	96.3
EXP-2							
Control rice	20.18 ± 0.69	−0.17 ± 0.04	239.00	261.25	1	51.1	97.7
EXP-3							
After drying	19.28 ± 0.04	−0.14 ± 0.03	255.17	272.17	0.95	49.3	96.8
EXP-3							
Control rice	16.86 ± 0.48	−0.29 ± 0.06	247.39	267.61	1	51.2	97.7
EXP-4							
After drying	17.61 ± 0.03	−0.29 ± 0.01	313.72	264.77	0.98	50.1	97.2
EXP-4							

^a Not available.

relative head rice yield after drying for all experiments was in between 0.93 and 0.98 as shown in Table 2. This indicates that the low drying temperature with low specific air flow rate of 0.65–1.5 m³/min m³ of paddy does not affect the head rice yield ($p < 0.05$).

Fig. 5(a) shows the change in the whiteness of rice kernel during drying at bed depths of 0.05–0.8 m for experiment No. 1. It seems that the value of whiteness at the bottom part, where the grain contacts with the low relative humidity, is slightly higher than at the upper part even at the upper part of paddy bed the rice whiteness is slightly lower than the lower part, the whiteness value still be acceptable in the market (>45). The similar behavior is also found in the experiment Nos. 2–4. However, the difference of whiteness at various bed levels is insignificant ($p < 0.05$), so that the average value of rice whiteness is presented. Fig. 5(b) shows the change in whiteness of rice kernel with drying time, indicating that the grain drying model incorporating the yellowing rate of rice is reasonable to predict the change in the whiteness during drying. The average value of rice whiteness for each experiment is shown in Table 2 indicates that the whiteness obtained the experiments slightly changes, comparing to that from the control sample.

3.2.2. Microstructure of rice

Fig. 6(a) and (b) shows examples of the microstructure of Suphanburi 1 rice kernel in cross section area before and after in-store drying of the rice samples, respectively. As shown in Fig. 6(a), the small granular shapes of rice samples with diameters of 4–8 µm are starch granules. The morphologies of starch granules do not change with the low temperature drying technique although drying time takes very long.

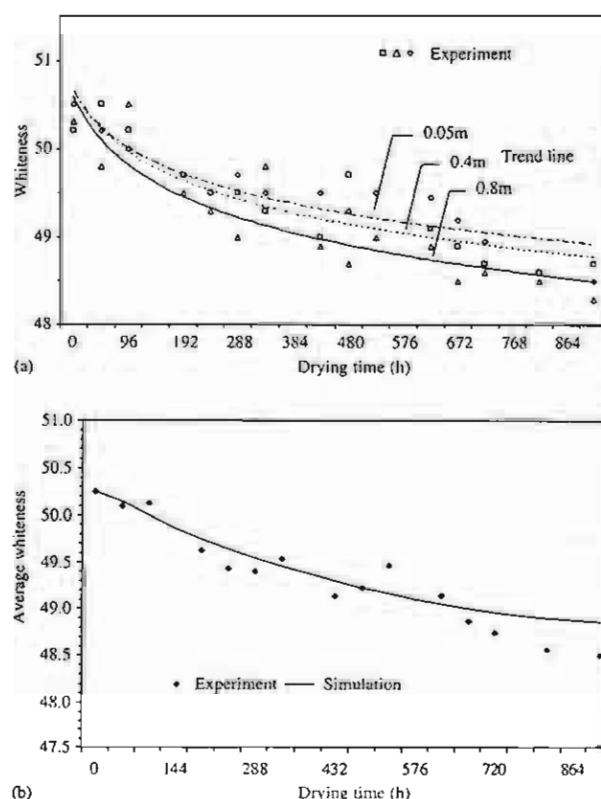


Fig. 5. The change of rice whiteness during drying: (a) whiteness value in each bed depth for experiment No. 1 (0.93 m³/min m³ of paddy); (b) whiteness value in each level of paddy bed depth for experiment No. 3 (1.20 m³/min m³ of paddy).

3.2.3. Texture and pasting property

Table 2 presents the physical quality and physicochemical quality of dried rice compared to that of the

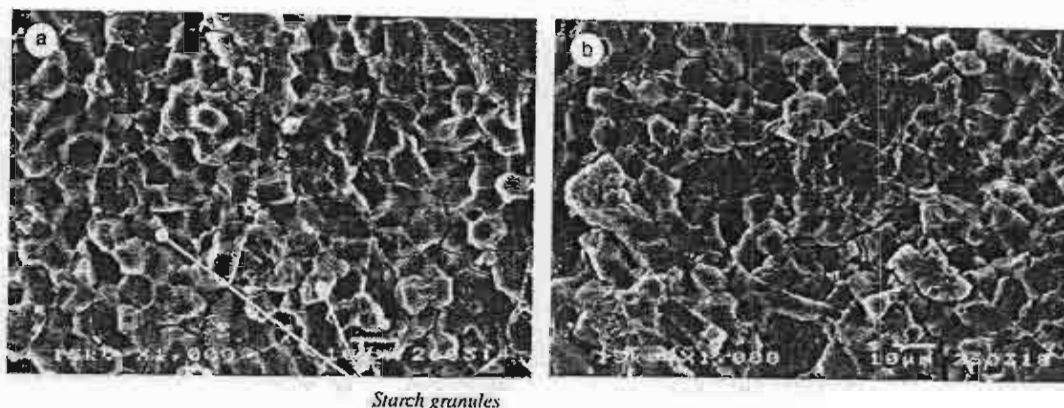


Fig. 6. Scanning electron micrograph of rice kernel in cross section view before and after in-store drying using ambient air at volumetric flow rate $0.65 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy (Suphanburi 1 variety): (a) before drying (control rice); (b) after drying.

control one. The hardness value increases whilst the stickiness slightly decreases. The change in the hardness correlates with the final viscosity, as shown in Table 2. The peak viscosity and final viscosity after drying relatively increase, however, the value of the final viscosity remains higher than the corresponding value of peak viscosity in all the cases. The long period of drying using ambient air ventilation can take the paddy aged like as the storage duration of paddy in ambient environment. This result is similar to the previous works reported by some researchers (Inprasit & Noomhorm, 2001; Juliano, 1985; Zhou et al., 2002). The change in hardness and stickiness from texture analysis correlates with the increase in final and peak viscosities of rice flour.

The germination of paddy was determined and average percentage for germination of rice was about $97.5 \pm 0.2\%$ for control paddy and $96.8 \pm 0.4\%$ for dried paddy, respectively. Thus, it can be concluded that the in-store drying by ambient air ventilation does not affect the germination of rice.

3.3. Drying strategy by GDS program

To investigate the proper drying condition for low-temperature air drying, simulation model (GDS program) had been performed at air temperatures of 30–40 °C, relative humidity (RH) of 60–90%, paddy bed depths of 1.8–3.6 m, initial moisture content of 18–20% wet basis, whiteness value of 48 at the beginning, specific air flow rates ranging of $0.35\text{--}1.0 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy and the limiting value of the dry matter loss is lower than 0.5%.

3.3.1. Whiteness–relative humidity of ambient air

The relation between whiteness and relative humidity of ambient air is shown in Fig. 7. It indicates that at air temperature of 30 °C, the average whiteness is slightly changed with relative humidity between 60% and 90%.

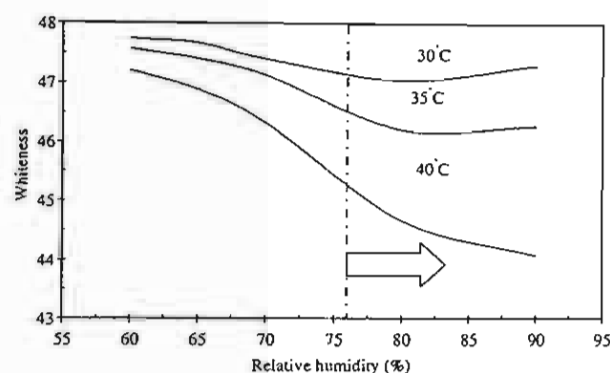


Fig. 7. The simulated values of whiteness of rice during various ambient air conditions of in-store paddy drying at the flow rate of $0.5 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy.

But, at temperatures of 35 and 40 °C, the average whiteness values show the large change when RH of inlet air is higher than 70%. This can be explained that as the temperature increases, the reactive species can more dissolve in the water so that their potential mobility and reactivity become higher, resulting in the large change in whiteness of rice. For determination of whiteness value in the mathematical model, the rice whiteness is inversely related to the yellowness of rice and this yellowness is depended on the temperature and relative humidity. Thus, paddy drying among the high relative humidity and high temperature can encourage the decrease of rice whiteness. This change of whiteness is also discussed by Gras et al. (1989), Phillips et al. (1988) and Bason et al. (1990). Moreover, the prediction results show that the average final moisture content of paddy cannot be reduced to 14% wet basis because of high relative humidity.

3.3.2. Whiteness–specific air flow rate

Fig. 8 shows the change in the value of rice whiteness with air flow rate of $0.35\text{--}1.0 \text{ m}^3/\text{min m}^3$ of paddy,

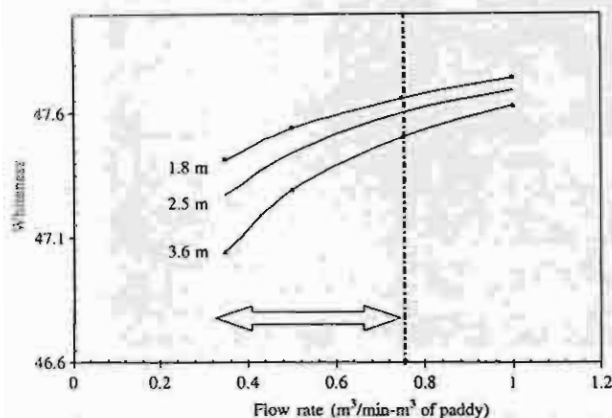


Fig. 8. The simulated values of whiteness of rice versus air flow rate of air of in-store paddy drying in different bed depths with RH 70%; initial moisture content (M_i) of 18% w.b.; final moisture content (M_f) of 14.0% w.b.

indicating that using high air flow rate results in high value of the rice whiteness. Besides the air flow rate, the whiteness also depends on the loading capacity: higher loading, corresponding to higher bed depth, shows the lower whiteness. This is because at low flow rate between 0.35 and 0.5 $\text{m}^3/\text{min m}^3$ of paddy and slow drying rate, the heat liberated from grain respiration causes the yellowing of rice kernels, especially at high bed depth. For the high air flow rate of 0.75 and 1.0 $\text{m}^3/\text{min m}^3$ of paddy, the heat from respiration is easy to deliver to the atmosphere. Moreover, the DML with air flow rate below of 0.75 $\text{m}^3/\text{min m}^3$ of paddy is higher than 0.5%. From these simulations, the recommended specific air flow rate should be higher than 0.75 $\text{m}^3/\text{min m}^3$ of paddy.

4. Conclusions

1. The in-store paddy drying using near ambient air temperature has a slight effect on the head rice yield and yellowing of the rice kernel. The value of hardness increases slightly whilst that of the stickiness decreases slightly due to drying.
2. The grain drying model including the yellowing kinetics can suitably describe the change in moisture content and rice whiteness occurring in the deep bed drying.
3. The simulation including the respiration effect shows the higher accuracy of average moisture content of rice at given drying time than that excluding respiration effect predictions. Thus, in the low temperature in-store drying, the energy liberated during the respiration of product is a dominant factor to reduce its moisture content.
4. The drying temperatures between 30 and 40 °C, along with the relative humidity lower than 70%, are recom-

mended. For the in-store paddy drying, the suitable specific air flow rate should not be lower than 0.75 $\text{m}^3/\text{min m}^3$ of paddy.

Acknowledgements

The authors wish to express their sincere thanks to the Thailand Research Fund (TRF). The authors also thank to the Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS) for financial support, the Institute of Food Research and Product Development (IFRPD) at Kasetsart University, Thailand for testing of rice qualities and Institute of Technology Rajchamongkrala, Headquarter, Pathumthani, Thailand for rice whiteness testing.

References

- AACC (2000). Approved methods of the AACC. The 10th American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, USA.
- Agrawal, Y. C., & Singh, R. P. (1977). Thin-layer drying studies on short-grain rough rice. ASAE Paper No. 77-3531, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 330–350.
- AOAC (1995). *Official methods of analysis* (15th ed.). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- Barre, H. J., Baughman, G. R., & Hamdy, M. Y. (1971). Application of the logarithmic model to cross-flow deep-bed drying. *Transactions of the ASAE*, 14(6), 1061–1064.
- Bason, M. L., Gras, P. W., Banks, H. J., & Esteves, L. A. (1990). A qualitative study of the influences of temperature, water activity and storage atmosphere on the yellowing of paddy endosperm. *Journal of Cereal Science*, 12, 193–201.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1992). *Drying and storage of grain and oilseeds*. New York: Van Nostrand Reinhold, pp. 206–240.
- Gras, P. W., & Bason, M. L. (1989). Biochemical effects of storage atmospheres on grain and grain quality. *ACIAR Proceeding No. 25. Fumigation and controlled atmosphere storage of grain*, pp. 83–91.
- Gras, P. W., Banks, H. J., Bason, M. L., & Arriola, L. P. (1989). A qualitative study of the influences of temperature, water activity and storage atmosphere on the yellowing of milled rice. *Journal of Cereal Science*, 9, 77–89.
- Henderson, S. M. (1952). A basic concept of equilibrium. *Agricultural Engineering*, 33, 29–31.
- Hukill, W. V. (1947). Basic principles in drying corn and grain sorghum. *Agricultural Engineering*, 28(8), 335–338, 340.
- Inprasit, C., & Noomhorm, N. (2001). Effect of drying air temperature and grain temperature of different types of dryer and operation on rice quality. *Drying Technology*, 19(2), 389–404.
- Juliano, B. O. (1985). *Rice: Chemistry and technology*. American Association of Cereal Chemists, USA, 774 pp.
- Jean, F., Meullenet, C., Bradley, P. M., Griffin, K., & Daniels, M. J. (1999). Effects of rough rice drying and storage conditions on sensory profiles of cooked rice. *Cereal Chemistry*, 76(4), 483–486.
- Ngamchuen, K., Lamaimaat, N., & Kanchana, N. (1985). Changes in cooking and eating qualities of rice during long-term storage. In *Proceedings of the 8th ASEAN technical seminar on grain post-harvest technology* (pp. 165–187). Manila Hotel, Philippines.

- Ong, M. H., & Blanshard, J. M. V. (1995). Texture determinants of cooked, parboiled rice II: physicochemical properties and leaching behaviour of rice. *Journal of Cereal Science*, 21, 261–269.
- Ohtsubo, K., Toyoshima, H., & Okadome, H. (1998). Quality assay of rice using traditional and novel tools. *Cereal Foods World*, 43(4), 203–206.
- Phillips, S., Widjaja, S., Wallbridge, A., & Cooke, R. (1988). Rice yellowing post-harvest drying by aeration and during storage. *Journal of Stored Products Research*, 24, 173–181.
- Preechakul, P. (1986). A study on in-store drying of paddy (2nd phase). Master thesis. School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 115 pp.
- Quitco, R. T. (1982). Studies of fungal infection and heating of paddy. In *Proceedings GASGA seminar, paddy deterioration in the humid tropics* (pp. 52–56). Baquio, Philippines, GTZ, Eschborn.
- Seib, P. A., Pfost, H. B., Sukaboi, A., Rao, V. S., & Burroughs, R. B. (1980). Spoilage of rough rice as measured by carbon dioxide evolution. In *Proceedings of the 3rd annual workshop on grain post-harvest technology*. Kuala Lumpur, January 29–30.
- Soponronnarit, S. (1988). Energy model of grain drying system. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 5(2), 43–68.
- Soponronnarit, S., & Chinsakolthanakorn, S. (1990). Effect of heat and water from respiration on drying rate and energy consumption. *ASEAN Journal for Science and Technology for Development*, 7, 65–83.
- Soponronnarit, S., & Nathakaranakule, A. (1990). Field experience of in-store drying of paddy under tropical climates. In *Proceedings of the 13th ASEAN seminar on grain postharvest tech.* (pp. 183–196). Brunei Darussalam, 4–7 September.
- Soponronnarit, S., & Preechakul, P. (1990). Experiments on in-store and batch drying of paddy: quality of product. *Kasetsart University Science Journal*, 24, 367–388 (in Thai).
- Soponronnarit, S., Srisubati, N., & Yoovidhya, T. (1998). Effect of temperature and relative humidity on yellowing rate of paddy. *Journal of Stored Products Research*, 34(4), 323–330.
- Thompson, T. L., Peart, R. M., & Foster, G. H. (1968). Mathematical simulation of corn drying—a new model. *Transaction of ASAE*, 11(4), 582–586.
- USDA (1988). Grain grade procedure. Federal Grain Inspection Service, Washington, DC, USA.
- Yap, A. B., Juiliano, B. O., & Perez, C. M. (1988). Artificial yellowing of rice at 60 °C. In *Proceeding group, the source of yellow grains in rice* (pp. 153–157). Myc. Centralbl, 3.
- Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., & Blanchard, C. (2002). Ageing of stored rice: changes in chemical and physical attributes. *Journal of Cereal Science*, 35, 65–78.

Influence of FIR irradiation on paddy moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying

Naret Meeso ^{a,*}, Adisak Nathakaranakule ^a, Thanid Madhiyanon ^b,
Somchart Soponronnarit ^a

^a School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand

^b Department of Mechanical Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok 10530, Thailand

Received 29 August 2003; accepted 26 January 2004

Abstract

The influence of far-infrared (FIR) irradiation in multi-stage paddy drying process on moisture reduction and milling quality has been experimentally studied. The process, running in series, comprised fluidized bed drying, FIR irradiation, tempering and ambient air ventilation. The experimental results showed that the critical moisture content after the fluidized bed drying was around 23% d.b. whereas incorporating with the FIR irradiation could continuously reduced the moisture content to 21% d.b. without affecting paddy head rice yield and whiteness. Under the intensity of FIR irradiation, wet paddy was more sensitive than dry paddy. However, to maintain head rice yield, moisture equalization by a subsequent tempering stage was still required. Studying the microstructure of rice kernels and the pasting behavior of rice flours showed the presence of partial gelatinization resulted in the improvement of head rice yield.

© 2004 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Ambient air ventilation; Far-infrared irradiation; Fluidized bed; Tempering

1. Introduction

Two-stage paddy drying; fast dried in a fluidized bed dryer and then slowly dried by in-storage drying to moisture contents of 23% dry basis (d.b.) and 16% d.b. respectively, was recommended by Soponronnarit (1995) to maintain paddy qualities, such as head rice yield and whiteness. Poomsa-ad, Soponronnarit, Terdyothin, and Prachayawarakron (2001) suggested that the moisture content of paddy, after drying by a fluidized bed dryer, should not be less than 22.5% d.b. in order to maintain or in some cases to increase the head rice yield. High temperature use in the first stage, led to the development of a moisture gradient inside each grain kernel, and resulted in cracking and breakage of the paddy kernels. This problem can be solved by introducing a tempering process between the two stages in order to increase or maintain the paddy head rice yield and reduce the paddy

moisture content in the second stage (Soponronnarit, Wetchacama, Swasdisevi, & Poomsa-ad, 1999; Steffe, Singh, & Bakshi, 1979). The benefit of the tempering process depended on two main factors; tempering temperature and time (Poomsa-ad, Soponronnarit, Prachayawarakron, & Terdyothin, 2002; Steffe & Singh, 1980).

The fluidized bed paddy dryer that is suitable for high moisture grain (i.e. from 35% to 23% d.b.) has been widely used in more than 10 countries. However, in maintaining the head rice yield, paddy moisture reduction must be limited. According to the mechanism of FIR drying, heat is generated deep inside the grain and tends to be selectively absorbed in the regions with high moisture content. Thus the vapour pressure would be the largest in these regions, and the moisture diffusion will be in the direction toward the areas of lower vapour pressure such as the grain surface (Afzal & Abe, 1998; Afzal, Abe, & Hikida, 1999; Ratti & Mujumdar, 1995; Sakai & Hanzawa, 1994). Therefore, it may be possible to apply FIR irradiation in the drying process to lower this limit. Suitable wavelengths for medium paddy kernels were in the range of 2.9–9.5 μm for FIR (Bekki,

* Corresponding author. Tel./fax: +662-470-8663.

E-mail address: n_meeso@hotmail.com (N. Meeso).

1991). The depth of penetration of FIR in grains was just under 1–2 mm (Datta & Ni, 2002; Nindo, Kudo, & Bekki, 1995; Sandu, 1986). Hence, FIR was suitable for small grains, such as paddy or wheat. In addition, temperature of the FIR radiator, distance between the FIR radiator and the grain bed, initial grain moisture content and drying time significantly affected grain temperatures. However, FIR radiator temperature and radiator height had no significant effect on grain final moisture content (Fasina, Tyler, & Pickard, 1998).

Recently, the concept of FIR irradiation application immediately after convective warm air (approximately 40 °C) drying of paddy has been utilized in the paddy industry in Japan especially for the recirculating batch dryer (Bekki, 1991; Institute of Agricultural Machinery, Japan, 2003). It is believed to save energy consumption and obtained better product quality. In contrast to the FIR irradiation technique, much higher air temperature (approximately 120–150 °C) is usually used for paddy drying with the fluidization technique in the Thai rice industry. Thus, FIR irradiation was introduced in the production line, just after fluidized bed drying to improve the paddy quality. The purpose of this study was to experimentally investigate the influence of FIR irradiation on moisture reduction and milling qualities of paddy.

2. Materials and methods

2.1. Experimental apparatus

The experimental apparatus consisted of a batch-type fluidized bed dryer, a box-type FIR dryer, a tempering glass bottle and an ambient air ventilator as follows:

The batch-type fluidized bed dryer shown in Fig. 1, comprised a cylindrical drying chamber, a 12 kW electrical heater, a centrifugal fan driven by 1.5 kW motor. The drying temperature was controlled by a PID controller giving an accuracy of ± 1 °C.

The box-type FIR dryer, shown in Fig. 2, comprised a radiative chamber and air vents at the back of a chamber. A ceramic infrared heater had a diameter of 1.7 cm, a length of 60 cm, and maximum power of 800 W. Its surface temperature was controlled by ON-OFF controller. An acrylic sample tray had dimensions of 50×60×1.5 cm.

The tempering glass bottle had a diameter and a height of 12 and 10 cm respectively. It could be closed completely and kept in a hot-air oven at a temperature equal to the paddy temperature after the fluidized bed drying.

The ambient air ventilator had a diameter of 20 cm and a sample tray made of wire mesh. Air velocity,

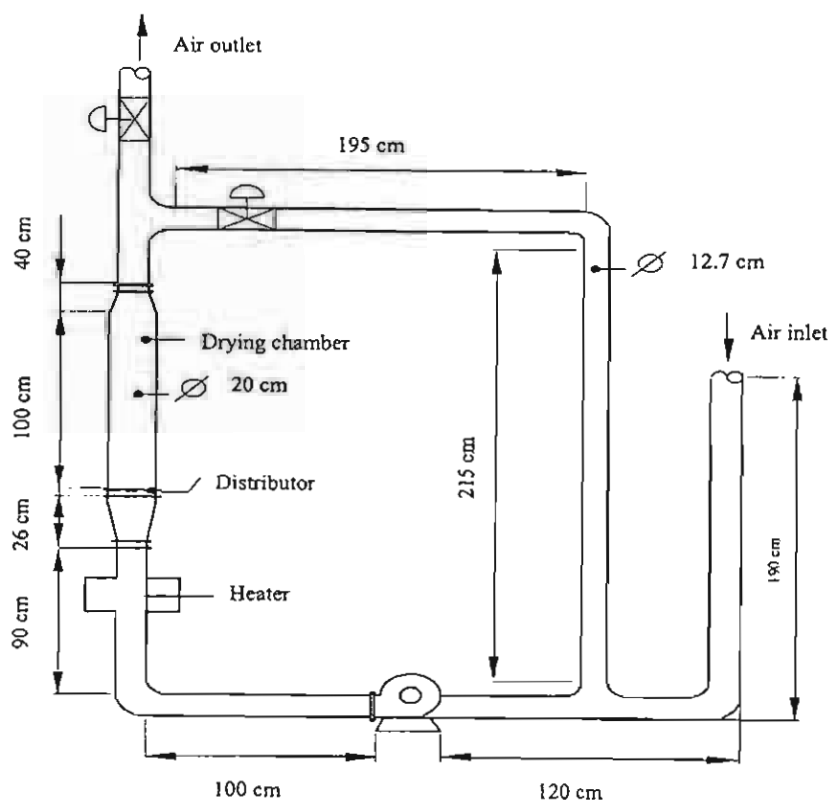


Fig. 1. Schematic diagram of a batch-type fluidized bed dryer.

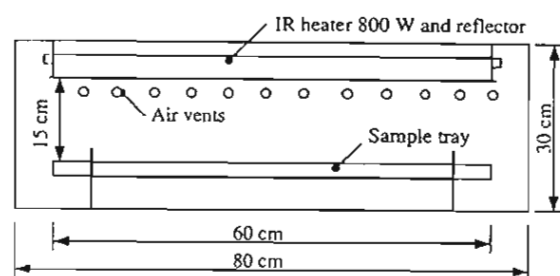


Fig. 2. Schematic diagram of a box-type FIR dryer.

ventilated throughout the tray, was measured by hot-wire anemometer (accuracy of ± 0.1 m/s).

The temperatures of grain, drying air and ambient conditions were measured by K-type thermocouples connected to a data logger with an accuracy of ± 1 °C.

2.2. Experimental procedure

The multi-stage drying process in each experiment was operated in series. It comprised fluidized bed (FB) drying, FIR irradiation, tempering (TEM) and ambient air ventilation (AAV). The experiments were divided into six conditions as shown in Table 1.

In the drying process, paddy was dried by a fluidized bed dryer at 150 °C for 1–2 min. Then, it was moved immediately into the sample tray as a single layer of grain and irradiated in a FIR dryer at intensities of 0.310 and 0.707 W/cm² for 0.5–1 min. After that, it was tempered in the tempering glass bottle for 20 min before

being exposed in ambient air with velocity of 0.15 m/s for 30 min.

Fresh harvested paddy (Supanburi 1) was rewetted to about 30.0–34.0% d.b. and kept in a cooling room at 3–5 °C for 7 days. Before starting the experiments, the paddy was left in ambient air until its temperature was close to ambient temperature.

Paddy samples were taken after each stage of the drying process, except after the tempering stage, for measuring moisture content and quality. The moisture contents of paddy were determined by drying three samples in a hot-air oven at 103 °C for 72 h (AACC, 1995). The paddy qualities in terms of head rice yield (HRY) and whiteness (Wh) were tested by the test method of the Ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand and measured using a KETT whiteness tester model C-300 respectively. The head rice yield was also presented in terms of relative head rice yield, which is the ratio of head rice yield obtained from the aforementioned drying processes to the head rice yield obtained from ambient air drying.

The change in microstructure of rice kernels during the multi-stage drying process was observed by scanning electron microscopy (SEM) (JSM-5600 Low vacuum, JEOL Co. Ltd.) at 15 kV. The polished rice kernels (before and after each drying process) were broken along the cross-sectional axis, placed on adhesive tape attached to a SEM stub, coated with gold-palladium then examined, and photographed.

A rapid visco analyzer (RVA) (Newport Scientific Instrument, Narrabeen N.S.W., Australia) was used to

Table 1
The experimental conditions of the paddy drying process

The drying process		The conditional numbers					
		A	B	C	D	E	F
FB	Air temperature (°C) ^a	150	150	150	150	150	150
	Bed thickness (cm) ^a	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
	Air velocity (m/s) ^a	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
	Time (min)	1	1	1.5	1.5	2	2
FIR	Average radiative intensity (W/cm ²)	0.312	0.707	0.310	0.689	0.310	0.310
	Bed thickness	— ^b	— ^b	— ^b	— ^b	— ^b	— ^b
	Average load of radiative chamber (kg _{dry paddy} /W)	2.0	0.9	2.1	0.9	2.1	2.1
	Distance between heater-paddy (cm) ^c	15	15	15	15	15	15
	Time (min)	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
	Time (min)	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
TEM	Temperature (°C)	75	75	80	80	85	—
	Time (min)	20	20	20	20	20	—
AAV	Bed thickness (cm) ^a	3	3	3	3	3	3
	Air velocity (m/s) ^a	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	Time (min)	30	30	30	30	30	30

^a Recommended by Poomsa-ad et al. (2001).

^b Corresponding to a paddy single layer of 1.1 kg_{wet paddy}.

^c Recommended by Afzal et al. (1999).

investigate the pasting behavior of milled rice flour according to the AACC (1995, standard method). Rice flour (3 g on % d.b.) was placed in water (25 ml) in the canister and mixed thoroughly. The operating temperature was first maintained at 50 °C for 1.5 min to allow a uniform temperature and then raised to 95 °C at a rate of 12 °C/min. The sample was maintained at 95 °C for 2.5 min, then cooled to 50 °C at a rate of 12 °C/min. After the sample was maintained at 50 °C for 1.5 min., the pasting behavior was specifically measured as the temperature where viscosity first increased by 2 rapid visco units (RVU) over a 20 s period and by the peak viscosity. These are needed in order to investigate the gelatinization of rice flour during the multi-stage drying process.

3. Results and discussion

3.1. Moisture reduction

The moisture content evaluations in the paddy drying processes shown in Figs. 3–6 show the change in moisture content of paddy after fluidized bed drying, FIR irradiation, tempering and ambient air ventilation with processing time.

Focusing on the FIR irradiation stage, the experimental results clearly showed that FIR intensities aided removing moisture from paddy, which still had high moisture contents after the fluidized bed drying stage, by approximately 1.5–2.6% d.b. (Fig. 3). These drying curves indicated that the moisture content of paddy was significantly reduced with higher radiation intensity. However, the radiation intensity had no influence on

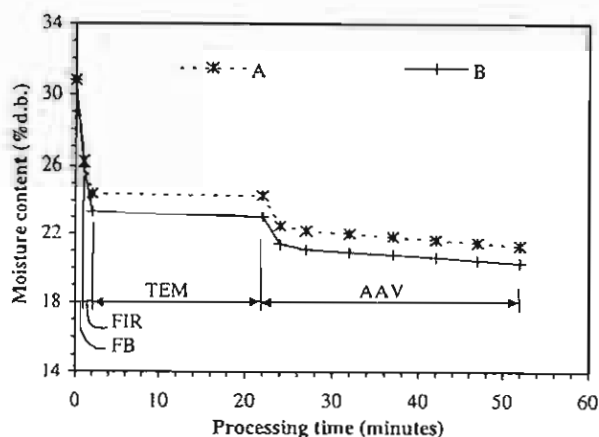


Fig. 3. Evolution of moisture content of paddy during conditions: (A) FB (150 °C, 1 min), FIR (0.312 W cm⁻², 1 min), TEM (75 °C, 20 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.2 °C, 70% RH). (B) FB (150 °C, 1 min), FIR (0.707 W cm⁻², 1 min), TEM (75 °C, 20 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.2 °C, 70% RH).

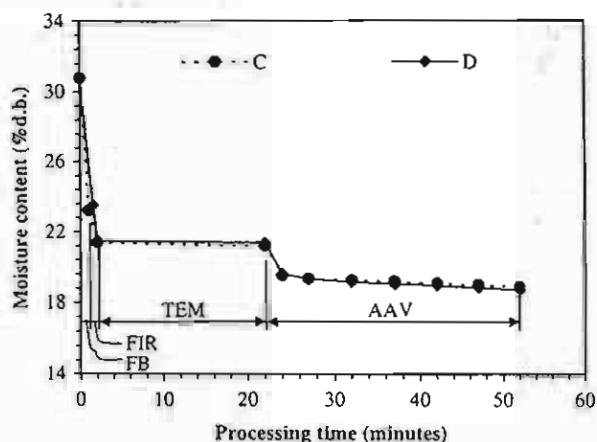


Fig. 4. Evolution of moisture content of paddy during conditions: (C) FB (150 °C, 1.5 min), FIR (0.310 W cm⁻², 0.5 min), TEM (80 °C, 20 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.2 °C, 70% RH). (D) FB (150 °C, 1.5 min), FIR (0.689 W cm⁻², 0.5 min), TEM (80 °C, 20 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.2 °C, 70% RH).

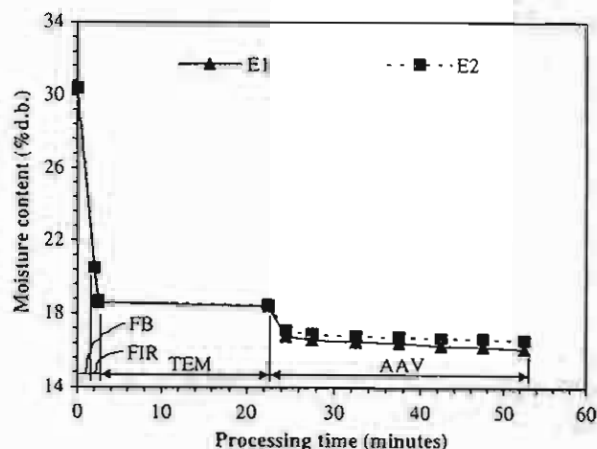


Fig. 5. Evolution of moisture content of paddy during conditions: (E1) FB (150 °C, 2 min), FIR (0.310 W cm⁻², 0.5 min), TEM (85 °C, 20 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.6 °C, 67% RH). (E2) is repeated experiment of E1 conditions.

moisture reduction of paddy with low moisture contents particularly for moisture contents less than 23% d.b. (Fig. 4). This was illustrated by comparing the moisture reduction between radiation drying with an FIR intensity of about 0.7 W cm⁻² and that of about 0.3 W cm⁻² as shown in Figs. 3 and 4. The result in Table 1 was also indicated that the moisture reduction increased with the decrease of the load of radiative chamber. The amount of radiation energy absorbed by paddy was directly proportional to the amount of water contained inside the paddy kernel. However, drying effectiveness of FIR irradiation covered a wide range of paddy moisture contents after fluidized bed drying, i.e. 26%, 23% and 21% d.b. as shown in Figs. 3–5 respectively.

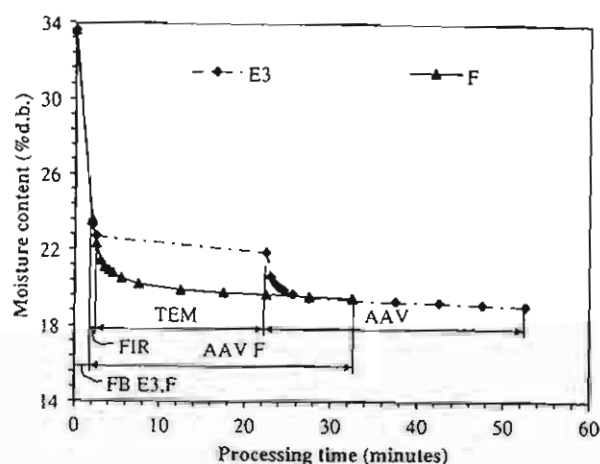


Fig. 6. Evolution of moisture content of paddy during conditions: (E3) FB (150 °C, 2 min), FIR (0.310 W cm⁻², 0.5 min), TEM (85 °C, 20 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.6 °C, 67% RH). (F) FB (150 °C, 2 min), FIR (0.310 W cm⁻², 0.5 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.6 °C, 67% RH).

During the transition period from the tempering to the ambient air ventilation period indicated by the drying curves in Figs. 3–5, the moisture content dropped progressively within 5 min after exposure to ambient air and thereafter it reduced gradually. Fig. 6 reflected the influence of FIR irradiation on moisture reduction in the ventilation stage by comparing the drying curves between the multi-stage drying processes with and without tempering stage after the FIR irradiation stage. The slopes of curve E (with a tempering stage) and curve F (without a tempering stage) during the ventilation period were almost the same. This meant that the multi-stage drying with the existence of a tempering stage after the FIR irradiation stage did not provide more benefit in moisture reduction in the ventilation stage compared with that without the tempering stage. It may be inferred that the mechanism of FIR irradiation, which may support redistribution of moisture inside paddy kernels, may be somewhat analogous to the tempering mechanism. However, the milling quality and

especially the head rice yield was quite different between the two cases, which will be discussed in the next section.

3.2. Milling qualities

3.2.1. Head rice yield

The head rice yield of paddy under each experimental condition is shown in Tables 2–5. The relationship between head rice yield and moisture content after each drying stage were plotted and shown in Figs. 7–9. A relative head rice yield over 100% could be achieved if the moisture content of paddy after fluidized bed drying was not less than 23% d.b. (Fig. 7). This limitation of paddy moisture content confirmed the results of Poomsa-ad et al. (2001). After passing the FIR irradiation stage, the results revealed the possibility of further paddy moisture content reduction to approximately 21% d.b., whereas the relative head rice yield was still maintained over 100%. (Fig. 8). An improvement in head rice yield in the drying process was mainly due to the rapid increase in paddy grain temperature during the fluidized bed stage (Table 6) to the temperature level of partial gelatinization (68–78 °C depending on the types of paddy (Sanders, 1996)). Meanwhile, during FIR irradiation which probably functioned as a partial tempering process, the radiation energy absorbed by moisture inside a paddy kernel aided moisture migration from inside to outside the paddy kernel. Thus, moisture removal and moisture leveling were occurring simultaneously. The latter resulted in decreasing moisture gradient as well as the stresses development within the kernel, hence head rice yield was maintained. Decreasing the moisture content lower than those limits (23% d.b. by fluidized bed drying and 21% d.b. by FIR irradiation after fluidized bed drying) resulted in more grain damage, as the stresses inside the paddy kernels increased due to high moisture and temperature gradients. In the experiments, when paddy transited from the tempering stage to the ventilation stage, no change in head rice yield was assumed. Therefore, head rice yield after ambient air ventilation shown in Tables 2–5 was

Table 2
Evolution of milling quality of paddy during conditions A and B

Drying process	The conditional numbers			
	A		B	
	HRY (%)	Wh	HRY (%)	Wh
Initial quality	52.2	50.4	52.2	50.4
Quality after FB	56.9	50.9	55.7	50.6
Quality after FIR	55.9	50.7	56.9	46.1
Quality after TEM	NA	NA	NA	NA
Quality after AAV	57.7	49.4	56.7	51.1

A: FB (150 °C, 1 min), FIR (0.312 W cm⁻², 1 min), TEM (75 °C, 20 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.2 °C, 70.0% RH).

B: FB (150 °C, 1 min), FIR (0.707 W cm⁻², 1 min), TEM (75 °C, 20 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.2 °C, 70.0% RH).

NA: non-available.

Table 3
Evolution of milling quality of paddy during conditions C and D

Drying process	The conditional numbers			
	C		D	
	HRV (%)	Wh	HRV (%)	Wh
Initial quality	52.2	50.4	52.2	50.4
Quality after FB	55.4	50.3	55.8	50.0
Quality after FIR	52.2	50.0	54.7	50.4
Quality after TEM	NA	NA	NA	NA
Quality after AAV	55.8	49.8	56.6	50.3

C: FB (150 °C, 1.5 min), FIR (0.310 W cm⁻², 0.5 min), TEM (80 °C, 20 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.2 °C, 70.0% RH).

D: FB (150 °C, 1.5 min), FIR (0.689 W cm⁻², 0.5 min), TEM (80 °C, 20 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.2 °C, 70.0% RH).

NA: non-available.

Table 4
Evolution of milling quality of paddy during conditions E1 and E2

Drying process	The conditional numbers			
	E1		E2	
	HRV (%)	Wh	HRV (%)	Wh
Initial quality	54.2	51.6	54.2	51.6
Quality after FB	31.0	47.7	27.8	48.4
Quality after FIR	20.0	45.4	21.9	46.4
Quality after TEM	NA	NA	NA	NA
Quality after AAV	46.6	48.7	47.1	48.6

E1: FB (150 °C, 2 min), FIR (0.310 W cm⁻², 0.5 min), TEM (85 °C, 20 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.6 °C, 67.0% RH).

E2 is repeated experiment of E1 conditions.

NA: non-available.

Table 5
Evolution of milling quality of paddy during conditions E3 and F

Drying process	The conditional numbers			
	E3		F	
	HRV (%)	Wh	HRV (%)	Wh
Initial quality	47.3	52.4	47.3	52.4
Quality after FB	48.7	49.3	47.0	48.8
Quality after FIR	45.8	48.4	45.2	47.1
Quality after TEM	NA	NA	–	–
Quality after AAV	47.9	47.3	30.0	46.2

E3: FB (150 °C, 2 min), FIR (0.310 W cm⁻², 0.5 min), TEM (85 °C, 20 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.6 °C, 67.0% RH).

F: FB (150 °C, 2 min), FIR (0.310 W cm⁻², 0.5 min) and AAV (30 min, ambient air condition: 29.6 °C, 67.0% RH).

NA: non-available.

representative for head rice yield after tempering. As the tempering temperatures of these conditions (75–80 °C) were in the range of gelatinization temperatures, head rice yields was slightly improved because of a continuous gelatinization reaction during tempering. This reason could be confirmed by much improvement of head rice yields of paddy in condition E (Table 4 and Fig. 9).

For the multi-stage drying process without tempering after the FIR irradiation stage (condition F in Table 5), the result showed that head rice yield was significantly

reduced because of sudden cooling at the beginning of the ventilation stage. Therefore, moisture relaxation during the tempering process before ventilation was recommended for maintaining grain quality. This also indicated that even though FIR irradiation may support moisture redistribution inside the kernel, moisture redistribution could not completely occur without the tempering process.

The change in the microstructure of the gelatinized kernel samples during condition D was observed by

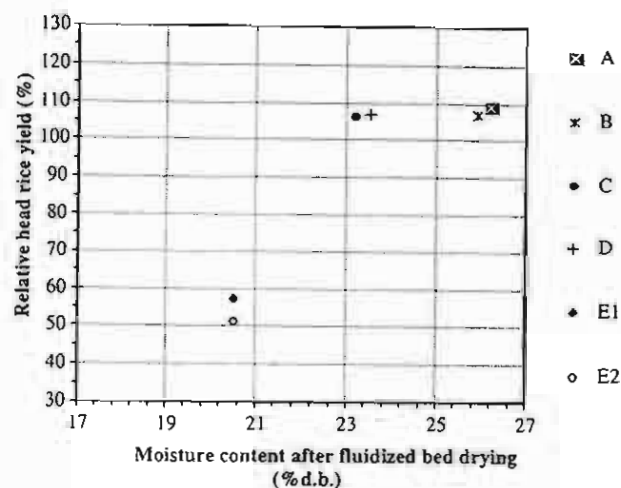


Fig. 7. The relationship between moisture content after fluidized bed drying and relative head rice yield.

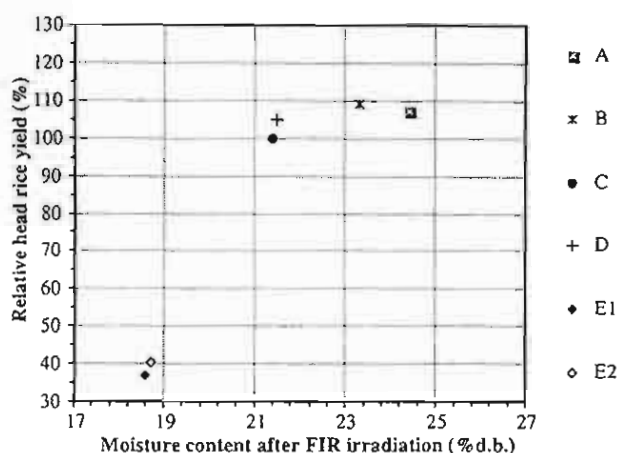


Fig. 8. The relationship between moisture content after FIR irradiation and relative head rice yield.

SEM (Fig. 10). This figure has an enlarged photograph of the kernels, in cross-sectional view. Fig. 10a showed a cross-sectional view of the kernel before drying that had the distinctive structure of starch granules spreading throughout. During fluidized bed drying, the kernel temperature rose rapidly, starch granules swelled,

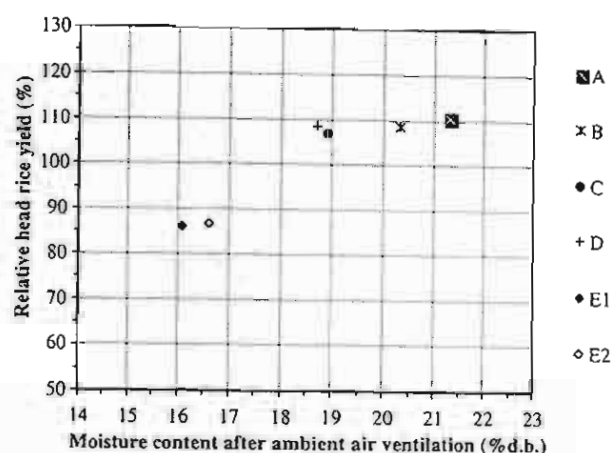


Fig. 9. The relationship between moisture content after ambient air ventilation and relative head rice yield.

absorbing surrounding moisture, and gelatinized. This gelatinization existed at the surface of starch granules and is called partial gelatinization (Fig. 10b). The granule surface gelatinization existed continuously in the FIR irradiation and tempering stages (Fig. 10c and d). Therefore, it was proven that, in the multi-stage drying, starch gelatinization certainly occurred in the rice kernels, and could support head rice yield maintenance.

In order to confirm the explanation in the previous section, the gelatinization of rice kernel samples during condition D was again investigated using RVA, as shown in Fig. 11. The pasting curve of milled rice flour before drying had a pasting temperature and a peak viscosity of 75.2 °C and 191.2 RVU, respectively. Reduction in the peak viscosity to 167.4 RVU after the fluidized bed drying stage indicated that the gelatinization has partially occurred in the rice kernel during fluidized bed drying. Similar to the rice flour after fluidized bed drying, the peak viscosity after the respective FIR irradiation and tempering stages had the slight difference, approximately 160.5 and 150.6 RVU. These results may support the explanation of gelatinization in the rice kernels, even though the reduction in peak viscosity after the fluidized bed drying stage, FIR irradiation and tempering stage were not significantly different.

Table 6
Average grain temperature of paddy after fluidized bed drying and FIR irradiation

Condition no.	FB drying			FIR irradiation		
	Drying temperature (°C)	Time (min)	Average grain temperature (°C)	Radiative chamber temperature (°C)	Time (min)	Average grain temperature (°C)
A	150	1	75	80	1	55.2
B	150	1	75	150	1	60.7
C	150	1.5	80	80	0.5	57.4
D	150	1.5	80	150	0.5	64
E, F	150	2	85	80	0.5	68

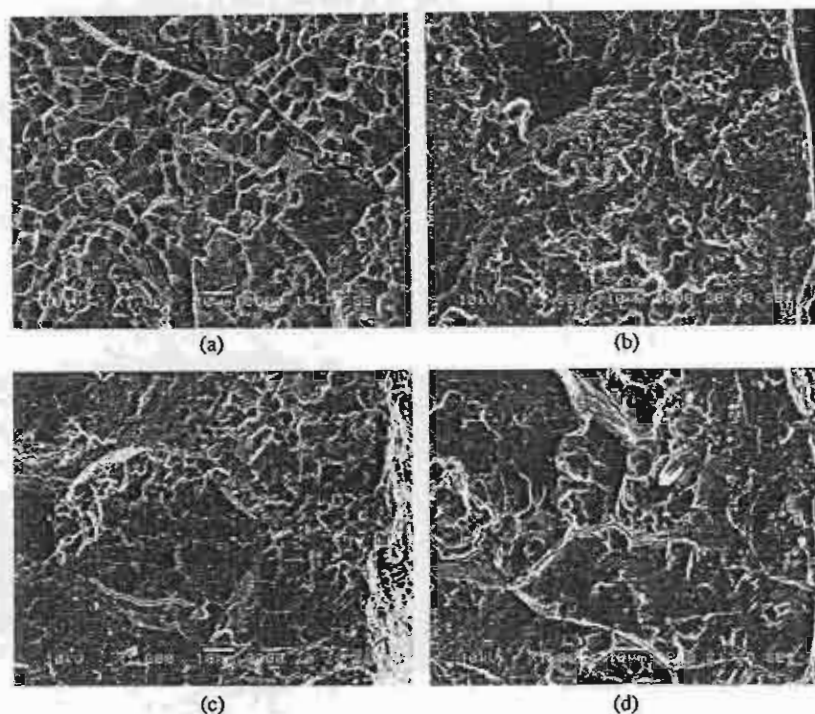


Fig. 10. Photos of cross-section of kernels during condition D: (a) before drying, (b) after fluidized bed drying, (c) after FIR irradiation and (d) after ambient air ventilation.

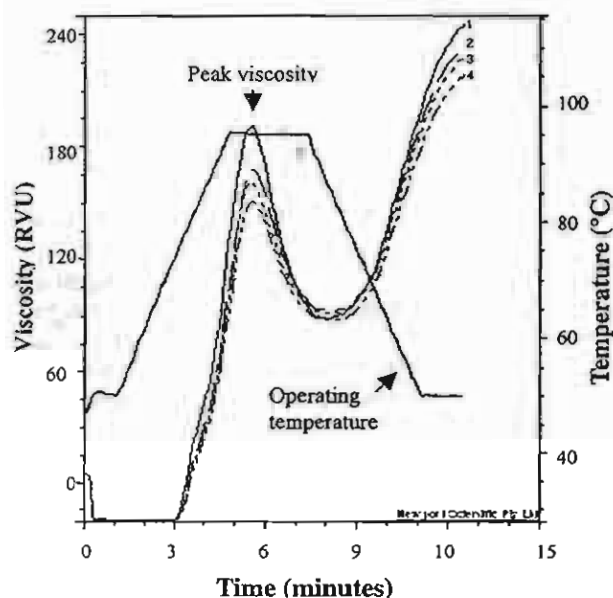


Fig. 11. Pasting curves of milled rice flour during condition D: (1) before drying, (2) after fluidized bed drying, (3) after FIR irradiation and (4) after ambient air ventilation.

3.2.2. Whiteness

The results of paddy whiteness are shown in Tables 2–5, indicated that whiteness of paddy after each drying

stage was not significantly changed. Its value was approximately 50, which is in a good commercial criterion.

4. Conclusions

Intensity of FIR was more effective in moisture reduction of wet paddy than dry paddy. The moisture content of paddy from the fluidized bed drying stage was limited to not lower than 23% d.b. but with integrating FIR irradiation into the paddy drying process, the moisture content could be further reduced to around 21% d.b. without any significant grain damage. Nevertheless, tempering was still necessary to achieve high head rice yield for the multi-stage drying process. Studying the microstructure of rice kernels and the pasting behavior of rice flours indicated partial gelatinization during fluidized bed drying, FIR irradiation and tempering processes reflected in head rice yield improvement.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Thailand Research Fund for financial support, Pathumtani Rice Research Center for testing quality of milling and Department of Microbiology, King Mongkut's Uni-

versity of Technology Thonburi for providing a FIR dryer.

References

- AACC (1995). Approved method of the American Association of Cereal Chemists (9th ed.). St. Paul, MN.
- Afzal, T. M., & Abe, T. (1998). Diffusion in potato during infrared radiation drying. *Journal of Food Engineering*, 37, 353–365.
- Afzal, T. M., Abe, T., & Hikida, Y. (1999). Energy and quality aspects during combined FIR-convective drying of barley. *Journal of Food Engineering*, 42, 177–182.
- Bekki, E. (1991). Rough rice drying with a far-infrared panel heater. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 53(1), 55–63 (in Japanese).
- Datta, A. K., & Ni, H. (2002). Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture. *Journal of Food Engineering*, 51, 355–364.
- Fasina, O. O., Tyler, R. T., & Pickard, M. D. (1998). Modelling the infrared radiative heating of agriculture crops. *Drying Technology*, 16(9&10), 2065–2082.
- Institute of Agricultural Machinery, Japan (2003). Recirculating batch grain dryer using far-infrared radiation. <http://www.brain.go.jp/Organ/sei0301e.htm>.
- Nindo, C. I., Kudo, Y., & Bekki, E. (1995). Test model for studying sun drying of rough rice using far-infrared radiation. *Drying Technology*, 13(1&2), 225–238.
- Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Terdyothin, A., & Prachayawarakron, S. (2001). Head rice yield after drying by fluidization technique and tempering. In *Proceedings of ADC 2001* (pp. 717–726). Penang, Malaysia.
- Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakron, S., & Terdyothin, A. (2002). Effect of tempering on subsequent drying of paddy using fluidization technique. *Drying Technology*, 20(1), 195–210.
- Ratti, C., & Mujumdar, A. S. (1995). Infrared drying. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (pp. 567–588). New York: Marcel Dekker.
- Sakai, N., & Hanzawa, T. (1994). Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Science and Technology*, 5, 357–362.
- Sanders, J. P. M. (1996). Starch manufacturing in the world. In: Advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology, AIT, Bangkok, Thailand.
- Sandu, C. (1986). Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis. *Biotechnology Progress*, 2, 109–119.
- Soponronnarit, S. (1995). Strategy for managing moist paddy. *The Royal Institute Journal*, 20(4), 115–125 (in Thai).
- Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Swasdisevi, T., & Poomsa-ad, N. (1999). Managing moist paddy by drying tempering and ambient air ventilation. *Drying Technology*, 17(1&2), 335–344.
- Steffe, J. F., & Singh, R. P. (1980). Theoretical and practical aspects of rough rice tempering. *Transactions of the ASAE*, 23, 775–782.
- Steffe, J. F., Singh, R. P., & Bakshi, A. S. (1979). Influence of tempering time and cooling on rice milling yields and moisture removal. *Transactions of the ASAE*, 22, 1214–1218.

Comparative study of heating processes for full-fat soybeans

Songchai Wiriyaumpaiwong ^{a,*}, Somchart Soponronnarit ^b, Somkiat Prachayawarakorn ^c

^a Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kamreang, Kuntarawichai, Mahasarakham 44150, Thailand

^b School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Pracha-utit Rd., Thungkru, Bangkok 10140, Thailand

^c Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Pracha-utit Rd., Thungkru, Bangkok 10140, Thailand

Received 24 July 2003; accepted 26 January 2004

Abstract

Heating is very important to inactivate anti-nutritional factors and enhance quality of soybean products. Four heating techniques i.e. extrusion, fluidized bed, spouted bed and infrared radiation have been investigated along with their performances, regarding moisture reduction, urease inactivation, protein solubility and lysine. The rate of moisture diffusion for soybean kernel in the spouted bed and infrared dryer was described by a semi-empirical drying equation for which the drying constant was determined using non-linear regression. The experimental results have shown that the water mobility is more rapidly accelerated by infrared radiation. Every technique has a potential to reduce the urease activity to the standard range, with the quantity of remaining lysine being insignificantly different ($p < 0.05$) under the testing conditions. The extent of urease inactivation in each technique depends on the moisture content, time and temperature, the latter being the most important factor. High moisture content induces rapid urease inactivation for the soybeans treated by the convection and radiation-type equipments. Conversely, inhibited inactivation is encountered with the extruded soybeans due to the strong cohesive forces amongst ground soybeans at a higher moisture content of 24% d.b., inducing poor mixing behaviour in the barrel. The results from the lab- and commercial-scale equipment are shown to have higher soluble protein content in 0.2% KOH for the infrared-treated soybeans, comparing to the other techniques. Extrusion consumed the largest quantity of energy followed by the fluidized bed with no recycled air and the micronizer becomes the most effective energy utilization.

© 2004 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Anti-nutritional factors; Protein solubility; Urease; Soybean

1. Introduction

Osborne and Mendel (1917) first proposed the necessity of heating raw soybeans in order to improve their nutritional values since raw soybeans contain anti-nutritional factors, i.e. trypsin inhibitors, hemagglutinins, lectins and saponins, which cause ineffective food utilization, thereby depressing the growth rate of animals (Hensen, Flores, Tanksley, & Knabe, 1987; Liener, 1994; Vandergrift, Knabe, Tanksley, & Anderson, 1983). Methods of heat treatment used in the feed meal industries can generally be divided into three techniques: radiation, conduction and convection (Fasina, Tyler, Pickard, Hua Zheng, & Wang, 2001; Mustakas & Griffin, 1964; Soponronnarit, Swasdisevi, Wetchacama, & Wutiwivatchai, 2001).

Within radiation techniques, infrared is one of the common methods. Infrared radiation is not entirely a surface heating method, but the energy rather penetrates inside the kernel in a non-contact mode. Two conventional types of infrared radiators are commercially used, namely, electric radiators and gas-fired radiators, the latter mostly available to the feed meal industries. For conduction heating, the material is heated at the surface and heat is thereafter transferred to the interior of the material. Solids are directly contacted with the energy source. Extrusion employs this heating method to inactivate such anti-nutritional factors (Camire, Camire, & Krumhar, 1990; Mustakas & Griffin, 1964). In this process, whole or ground soybeans receive the heat not only from the barrel wall, but also from the friction forces between screw and barrel while being passed through the barrel. The extruder is operated in a continuous manner at high temperature for a relatively short time. Some experimental works have shown that soybeans treated by extrusion yield higher weight gain

* Corresponding author.

E-mail address: wsongchai@hotmail.com (S. Wiriyaumpaiwong).

and animal growth than the infrared roasted soybeans (Faber & Zimmerman, 1973; White, Greene, Waldroup, & Stephenson, 1967).

Convective heating involves the transfer of heat between the kernels and the heating media, in which heat from the media is conveyed to the kernels. Heating efficiency depends on how well the media and kernels contact. Fluidized bed and spouted bed heating systems are two of the most popular convective heating techniques. A rigorous mixing between solids and media occur in these heating systems, consequently enhancing heat and mass transfer rates. The important characteristics of fluidization and spouted bed are that the particles are suspended in the medium and move randomly like a fluid. This behaviour makes it less variable in quality. The use of a hot air temperature above 120 °C for the fluidized bed can reduce the urease activity to a pH difference of 0.3 or lower (Osella, Gordo, González, Tosi, & Ré, 1997; Soponronnarit et al., 2001). This value is an upper limit which is still safe for the feed meal products (ASA, 1990) and the lower limit should not be below 0.02 pH difference: if lower, it becomes overcooked.

In the present work, three processes were used on a laboratory-scale to investigate the urease inactivation and protein solubility of soybeans. These were spouted bed, infrared radiation and twin-screw extrusion. Besides the urease inactivation and protein solubility, the drying rate was studied using only the spouted bed and infrared radiation since the moisture contents at any time of extrusion process cannot be measured. In addition, the three different heat treatments being operated in the feed meal industries were comparatively studied. These were micronization, single-screw extrusion and fluidized bed. Their performance was evaluated in terms of energy consumption in addition to their urease activity and protein solubility. It was anticipated that this work would lead to an understanding of the behaviour of urease inactivation for each heat treatment technique and give some information about what technique should be appropriate for treating the raw soybeans for the feed milling or related industries.

2. Materials and methods

2.1. Heat treatment technique

2.1.1. Fluidized bed

An industrial-scale fluidized bed dryer with a feed rate of 2 ton/h capacity as shown in Fig. 1 was used, consisting of a drying chamber with a dimension of 0.7 × 2.1 × 1.3 m³. A diesel oil burner was used to heat the air with an average temperature of 164.5 °C. A thermostat was used to control the temperature with an accuracy of ±1 °C. A backward curved blade centrifugal

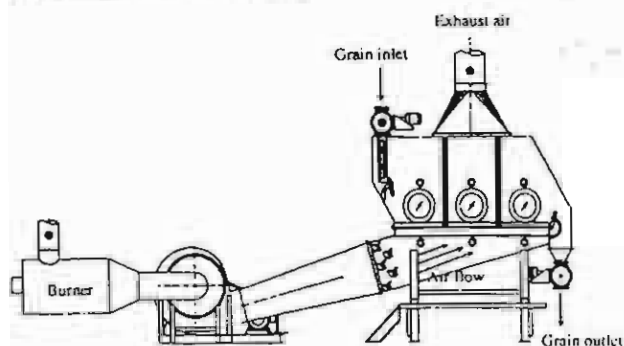


Fig. 1. Schematic diagram of fluidized bed dryer (industry).

fan driven by a 50 kW motor was used to supply hot air to the dryer. The exhausted air was discharged to the atmosphere. Grain in the drying chamber was forced by the hot air to move forward until it reached the dryer exit.

2.1.2. Spouted bed

The schematic diagram of a two-dimensional spouted bed dryer with draft plates in a laboratory-scale unit is shown in Fig. 2. The inlet cross sectional area was 4 × 15 cm², drying chamber 60 × 15 × 50 cm³, spout width 8 cm and entrance height 12.5 cm. The selected values of spout width and entrance height were appropriate for steadily maintaining the spouting behaviour and the transport of soybeans from the downcomer to the spout region, where intensive mixing between hot air and soybeans takes place. A 24 kW electrical heater was used to heat the air. A PID controller handled temperature with an accuracy of ±1 °C. A backward-curved blade centrifugal type fan driven by a 2.2 kW motor was used to supply hot air into the dryer. The airflow rate was controlled by a variable speed unit. The heated air flowed through the spouted bed dryer in which 90% of total airflow rate passed between the draft plates, with the remaining proportion flowing through the downcomer. After that, some of the exhaust air was discharged to the atmosphere and the remaining air was recycled and then mixed with fresh air.

2.1.3. Extrusion

The extruders used in this study were the single-screw type for soybean treatment on a commercial-scale (95 kW insta-pro model 2500) and a counter-rotating, intermeshing twin-screw type for the laboratory-scale experiments (4.8 kW Thermo Haake). Fig. 3 shows the schematic diagram of the commercial single-screw extruder with a pre-conditioner. The pre-conditioner is an additional part and acts as a pre-heating unit for the product before it enters the system, thereby increasing the extruder capacity and reducing the wear and tear on the machine. A steam jacket in the pre-conditioner was

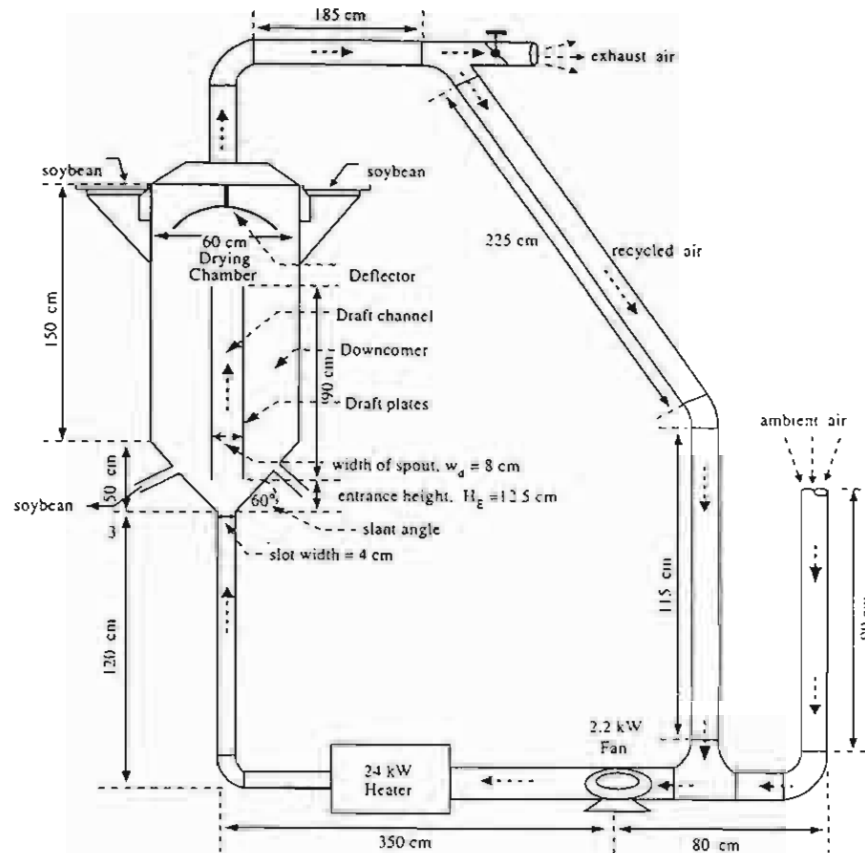


Fig. 2. Schematic diagram of a two-dimensional spouted bed dryer (lab-scale).

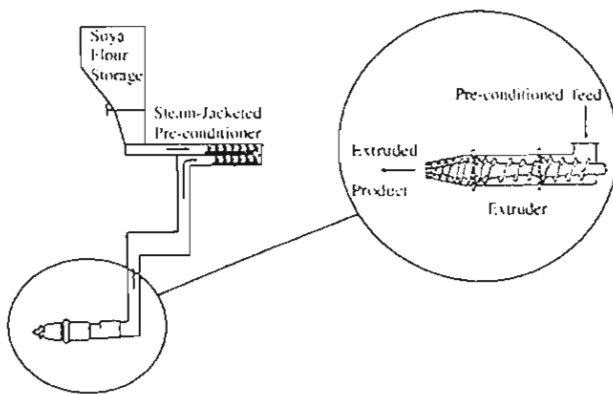


Fig. 3. Schematic diagram of single-screw extruder with a pre-conditioner (industry).

fed with low-pressure steam (0.9 MPa). The product was then forced through a barrel with variable screw configurations and eventually reached a die at the end of the barrel. The heat generated from the friction and shearing forces in the extruder barrel typically raised the temperature to 104–115 °C at a feed rate of 1 ton/h, corresponding to a retention time of 2.9 min. In the laboratory experiment, the extruder used was the twin-

screw type for which the screw configuration is shown in Fig. 4. At the inter-screw region, it exhibited very complex flow. This would induce the shear and extensional flows required for mixing. The twin-screw extruder consists of a barrel, a 4.8 kW motor to drive the screws and a 1 kW electrical heater.

2.1.4. Infrared radiation

Both an industrial-scale micronizer and a laboratory-scale single layer infrared dryer were used. The micronizer, with a capacity of 1.5 ton/h as shown in Fig. 5, consisted of the three main components, namely, a

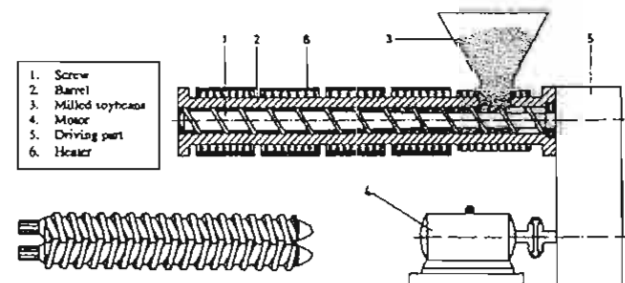


Fig. 4. Schematic diagram of twin-screw extruder (laboratory).

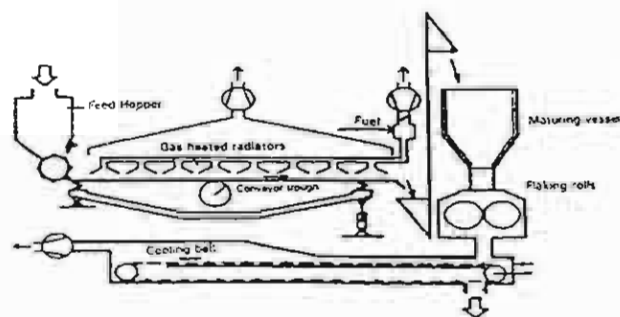


Fig. 5. Schematic diagram of micronizer being operated in feed meal industry (Micro Red 20 purchased from Micronizing Company (UK) Limited).

feeder, vibrating unit and infrared radiation source. This generated infrared wavelengths of 1.8–3.4 μm . Radiation is emitted when ceramic tiles are heated by the ignition of a pre-mixed air and natural gas or LPG. Soybeans, moved on the vibrating screen, driven by a 6 kW motor, then absorbed the energy from the heated ceramics. The environmental temperature within chamber was approximately 180–220 °C which was high enough to eliminate the anti-nutritional factors. For the laboratory infrared equipment, the system contains a drying chamber fitted with two 650 W electrical infrared bulbs and a tray to hold the soybeans. The temperature used in the experiments was in the range of 100–160 °C, the highest temperature that the components of dryer could withstand without any damage. A schematic diagram for the single layer infrared dryer is shown in Fig. 6.

2.2. Materials

2.2.1. Commercial-scale operation

Raw soybeans, with a moisture content of 12% d.b., used for producing the animal feed, were stored in silos in order to prepare the raw material before treating by the fluidized bed dryer and micronizer. Soybeans treated by these techniques possessed full kernels. The residence

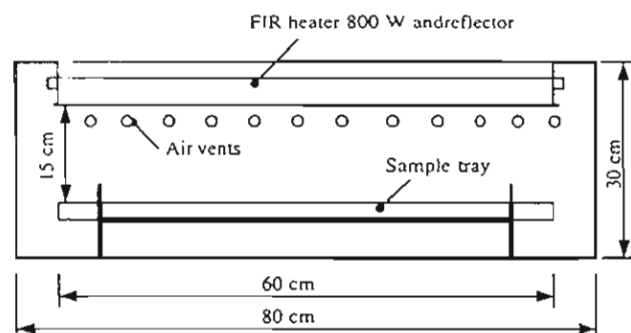


Fig. 6. Schematic diagram of single layer infrared dryer (laboratory).

times of soybeans in the processes were approximately 3–4 min for the micronizer and 10 min for the fluidized bed. However, the kernels were ground to soy flour for the extrusion process due to the constraint of the screw gap. The initial moisture content ranged from 13% to 14% d.b. for the extrusion. The moisture contents of samples were determined at a temperature of 103 °C for 72 h, according to ASA standard (1990). The product temperature was measured by using a type K thermocouple submerged into the grains in the container at the end of the heating system.

2.2.2. Laboratory-scale operation

Soybeans were rewetted to obtain moisture contents between 14% and 28% d.b. and then kept in a temperature-controlled room between 8 and 10 °C for 5 or 7 days. Before starting the experiments, the soybeans were placed in ambient condition until the grain temperature rose to room temperature.

2.3. Thin layer drying model

Drying of most agricultural materials occurs in the falling rate period, during which diffusion mechanisms dominate. When the main resistance to the water diffusion inside a kernel occurs at the outer layer of the kernel, a semi-empirical grain drying model can reasonably be used to describe its transport. In the model, the rate of moisture loss of a single kernel surrounded by air is proportional to the difference between the kernel moisture and its equilibrium moisture content, and the drying rate can thus be expressed by

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_{eq}) \quad (1)$$

By integrating Eq. (1) from time 0 to t , corresponding to moisture content change from M_{in} to M , the grain drying equation is obtained as

$$\frac{M(t) - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \exp(-kt) \quad (2)$$

where k is the drying constant, M_{in} is the initial moisture content and M_{eq} is the equilibrium moisture content. The drying constant relies upon the heat treatment used, in addition to temperature and moisture content. The equilibrium moisture content for drying at above the normal boiling point temperature may be reasonably assumed to be zero.

2.4. Quality

Urease activity was determined by following the AACC method 22–90 (AACC, 1995). Urease was used as a measure of the level of trypsin inhibitor (Cheong, 1997). The difference between the pH of the test sample and the pH of the blank was used as an index of urease