



อัตราการอบแห้งสูงและสามารถกำจัดกลิ่นของผลิตภัณฑ์ได้^{๔,๕}

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาลักษณะและสมบัติบางประการของข้าวที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เงื่อนไขต่าง ๆ ได้แก่ โครงสร้างระดับจุลภาค, สมบัติทาง pasting ตลอดจนสมบัติทางกายภาพ ซึ่งประกอบด้วยปริมาณต้นข้าว, ความขาว และ white belly

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดแบบงวด รูปทรงกระบอก ทำด้วยเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ๑๕ เซนติเมตร และสูง ๑๐๐ เซนติเมตร อุปกรณ์ให้ความร้อนมีขนาด ๑๓.๕ กิโลวัตต์ ใช้เพื่อเปลี่ยนสถานะของไอน้ำอัดตัวเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามอุณหภูมิที่ต้องการซึ่งควบคุมโดย PID $\pm$ ๑ องศาเซลเซียส พัดลมเป็นแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ใบพัดโค้งหลัง (backward-curved centrifugal blower) ขับด้วยมอเตอร์ขนาด ๒.๒ กิโลวัตต์ อัตราการไหลของไอน้ำสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับความเร็วรอบของพัดลม เครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลน ทำด้วยเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม เครื่องกำเนิดไอน้ำความดันสามารถผลิตไอน้ำอัดตัว ๓.๑ กิโลกรัม/ชั่วโมง ภายใต้อัตราความดันบรรยากาศ ดังรายละเอียดในรูปที่ ๑

ลักษณะการทำงานของระบบอบแห้ง เริ่มต้นจากการอุ่นระบบให้ร้อน

ด้วยอากาศ โดยเปิดวาล์ว V.3 และ V.5 ส่วนวาล์วที่เหลือปิดหมด แล้วเปิดพัดลมและอุปกรณ์ให้ความร้อนเพื่อให้ระบบร้อนขึ้นจนได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำที่จะป้อนเข้าระบบ เมื่ออุณหภูมิภายในระบบสูงเท่ากับค่าที่ต้องการแล้วจึงเริ่มป้อนไอน้ำจากเครื่องกำเนิดไอน้ำเข้าในระบบโดยเปิดวาล์ว V.1 เนื่องจากในระบบมีอากาศอยู่จึงต้องไล่อากาศออกโดยเปิดวาล์ว V.8 และ V.9 ไอน้ำจะปนออกมากับอากาศ รอจนกระทั่งแน่ใจว่าไม่มีอากาศแล้วจึงปิดวาล์ว V.8 และ V.9 ปรับความดันเกจในระบบจากวาล์ว V.1 ให้ได้ประมาณ ๕,๐๐๐ พาสคัล ปรับอุณหภูมิอบแห้งจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิและปรับความเร็วของไอน้ำในระบบจากความเร็วยวดยิ่งของพัดลมให้ได้ตามต้องการ ก่อนป้อนข้าวเปลือกเข้าห้องอบแห้งต้องสลับเส้นทางการไหลของไอน้ำ เพื่อความปลอดภัย โดยปิดวาล์ว V.3 และ V.5 ขณะเดียวกันก็เปิดวาล์ว V.2 และ V.4 แล้วจึงป้อนข้าวเปลือกเข้าทางวาล์ว V.10 หลังจากนั้นก็สลับเส้นทางการไหลของไอน้ำกลับสู่ตำแหน่งเดิม คือเปิดวาล์ว V.3 และ V.5 แล้วปิดวาล์ว V.2 และ V.4 เมื่อได้เวลาอบแห้งตามที่ต้องการแล้วจึงนำข้าวเปลือกออกโดยเปิดวาล์ว V.9 แล้วนำข้าวเปลือกที่ได้ไปทดสอบต่อไป ลักษณะรายละเอียดของเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่แสดงในรูปที่ ๑

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยอบแห้งข้าวเปลือกโดยการนำข้าวเปลือกแช่น้ำร้อนที่อุณหภูมิ ๘๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา

ประมาณ ๓.๕ ชั่วโมง จากนั้นรินน้ำที่แช่ข้าวออก แล้วเก็บไว้ในที่อบอากาศประมาณ ๑ ชั่วโมง ซึ่งทำให้ได้ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกประมาณร้อยละ ๔๒ มาตรฐานแห้ง จากนั้นนำตัวอย่างมาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ ความสูงเบดข้าวเปลือก ๑๐-๑๕ เซนติเมตร อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งอยู่ในช่วง ๑๕๐-๑๗๐ องศาเซลเซียส ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่า ๓.๑ เมตร/วินาที และความดันไอน้ำในระบบอบแห้งประมาณ ๑๐๖.๑ กิโลพาสคัล ซึ่งเป็นความดันเหนือบรรยากาศเล็กน้อย ทั้งนี้เพื่อป้องกันการรั่วเข้าของอากาศ จากนั้นนำข้าวที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องภายในถุงปิดสนิทเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แล้วนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนมีความชื้นเหลือร้อยละ ๑๖ มาตรฐานแห้ง สุดท้ายนำข้าวไปทดสอบคุณภาพต่อไป

การหาความชื้นของข้าวเปลือกใช้ตู้อบไฟฟ้า โดยอบแห้งข้าวเปลือกตัวอย่างที่อุณหภูมิ ๑๐๓ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๗๒ ชั่วโมง การวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ค่าความถูกต้อง $\pm$ ๑ องศาเซลเซียส และการวัดความเร็วไอน้ำใช้ inclined manometer และ pitot static tube

สำหรับคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

- ร้อยละต้นข้าว

คือน้ำหนักของต้นข้าวที่ผ่านการอบแห้งหารด้วยน้ำหนักข้าวเปลือกแล้วคูณด้วย ๑๐๐

- ความขาว



วัดได้จากเครื่องวัดความขาว (Kett model C-300) โดยใช้ความขาวอ้างอิงเท่ากับ ๘๖.๓

- ร้อยละ white belly

คือจำนวนของข้าวที่เป็นจุดขาว ขุ่นเกินร้อยละ ๕๐ ของเมล็ด จากการสุ่มตัวอย่างของข้าวจำนวน ๑๐๐ เมล็ด

- โครงสร้างระดับจุลภาค

นำตัวอย่างเมล็ดข้าวที่ผ่านการอบแห้งมาหักครึ่งและเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบทอง (Hitachi E-1010 10N, Tokyo, Japan) แล้วส่องด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, S-4500, Hitachi, Tokyo, Japan) ที่กำลังขยาย ๕๐๐ เท่า

- ความหนืดของแป้ง

ในการวัดสมบัติทาง pasting ของข้าวหนึ่งโดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyser, RVA model-4 (Newport Scientific Pty Ltd., Warriewood, Australia) ทำตามวิธีการของ AACC method ๖๑-๐๒* โดยการนำตัวอย่างแป้งข้าวปริมาณ ๓ กรัม (ความชื้นร้อยละ ๑๔) ผสมกับน้ำกลั่น ในถ้วยอะลูมิเนียมโดยน้ำหนักรวม ๒๔ กรัม จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้เข้าเครื่อง RVA อุณหภูมิที่ ๕๐ องศาเซลเซียส คงไว้ ณ อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา ๑ นาที ต่อจากนั้นให้ความร้อนแก่ของผสมด้วยอัตรา ๑๒ องศาเซลเซียส/นาที จนถึงอุณหภูมิ ๙๕ องศาเซลเซียส คงไว้ที่อุณหภูมิ ๙๕ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๒.๕ นาที จากนั้นทำให้เย็นลงมาที่ ๕๐ องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการทำให้เย็น ๑๒ องศาเซลเซียส/นาที แล้วคงไว้ที่

๕๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๒.๑ นาที ทำการทดสอบสองซ้ำ พล็อตสมบัติ pasting ต่าง ๆ เทียบกับเวลา ค่าต่าง ๆ ที่ได้จาก pasting properties ได้แก่ peak viscosity (PV), trough, final viscosity (FV), breakdown viscosity (BKV = PV- trough) and setback viscosity (SBV = FV- trough)

- ไขมัน (lipid)

ปริมาณไขมันทั้งหมดในข้าว วัดตามวิธีของ Folch และคณะ โดยการชั่งแป้งข้าว ๑ กรัม ใส่ในหลอดทดลองแล้วเติมด้วยสารละลาย chloroform : methanol ในอัตราส่วน ๒ : ๑ (ปริมาตร : ปริมาตร) ปริมาณ ๑๐ มิลลิลิตร เขย่าหลอดทดลองเป็นเวลา ๕ นาที ตั้งทิ้งไว้ ๓๐ นาที จนกระทั่งสารละลายตกตะกอน ดูเฉพาะส่วนใส แล้วเติมน้ำ ๐.๒๕ เท่าของสารละลายที่ดูได้ เขย่าให้เข้ากัน สารละลายจะแยกเป็นสองชั้น ไขมันจะละลายในชั้นล่าง นำมาเป่าให้ตัวทำละลายระเหยจนแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ซึ่งน้ำหนักไขมันที่ได้ ปริมาณไขมันที่ได้คิดเป็นร้อยละของไขมันต่อน้ำหนักแห้งของแป้ง

ผลและวิจารณ์

- อิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความสูงเบดที่มีต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

รูปที่ ๒ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก ความชื้น และเวลาในการอบแห้ง เนื่องจากช่วงแรกของการอบแห้งเกิด

การควบแน่นของไอน้ำเกิดขึ้น กล่าวคือทันทีที่ไอน้ำร้อนยวดยิ่งไหลผ่านเบดของข้าวเปลือก ไอน้ำจะเริ่มเกิดการควบแน่นที่เบดข้าวเปลือกซึ่งเกิดในช่วงแรกเป็นเวลาสั้น ๆ เป็นผลให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิแวดล้อมจนถึงอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ ต่อจากนั้นอุณหภูมิของข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลง

ความสูงเบดมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกน้อยกว่าอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น ๑๗๐ องศาเซลเซียส อุณหภูมิของข้าวเปลือกจะเพิ่มสูงขึ้นและความชื้นจะลดลงรวดเร็วขึ้นกว่าเดิม (ที่ ๑๕๐ องศาเซลเซียส)

- ข้าวต้นทาง

รูปที่ ๓ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละต้นข้าวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิและความสูงเบดต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า ร้อยละต้นข้าวมีค่าค่อนข้างคงตัว (ร้อยละ ๖๕-๗๐) ในช่วงความชื้นสุดท้ายสูงกว่าร้อยละ ๑๘ มาตรฐานแห้งเนื่องจากเกิด gelatinisation ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อข้าวที่มีความชื้นสูงได้รับความร้อนสูงเบดที่ถูกน้ำเกิดการพองตัวและถูกทำให้สุก นอกจากนี้ ยังทำให้โปรตีนแตกตัวและเกิดการแทรกเข้าไปภายในช่องว่างระหว่างเม็ดแป้ง (รูปที่ ๔) ทำให้ช่องว่างหรือรอยร้าวและรอยแตกภายในเมล็ดข้าวประสานกันอย่างสนิทเมื่อนำไป



ทำให้แห้ง เมล็ดข้าวจะมีลักษณะแข็งใส เหนียวและทนทานต่อการขัดสี จึงทำให้ได้ร้อยละต้นข้าวสูง เมื่อความชื้นสุดท้ายต่ำกว่าร้อยละ ๑๘ มาตรฐานแห้ง พบว่าร้อยละต้นข้าวลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความแตกต่างของความชื้นภายในเมล็ดที่มีมากเกินไป ทำให้เกิดแรงเค้นขึ้น เป็นผลให้เกิดรอยร้าวภายในเมล็ด เมื่อนำไปขัดสีจึงได้ร้อยละต้นข้าวลดลง

- White belly

White belly คือ ข้าวที่เป็นจุดขุนขาวที่บ่งแสดงภายในเมล็ดข้าว ซึ่งเกิดจากข้าวผ่านการนึ่งแล้วเกิดกระบวนการเจลาไทไนซ์ในเมล็ดข้าวไม่สมบูรณ์ โดยส่วนมากจะปรากฏจุดขุนขาวบริเวณแกนกลางในเมล็ดข้าวสาร รูปที่ ๕ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ white belly กับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิและความสูงเบตต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อร้อยละ white belly โดยที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นทำให้ร้อยละ white belly ลดลง แต่ความสูงเบตไม่มีผลต่อร้อยละ white belly

- ความขาว

รูปที่ ๖ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความขาวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิและความสูงเบตต่าง ๆ โดยความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกร้อยละ ๔๒ มาตรฐานแห้ง จากการทดลองพบว่าช่วงระยะเวลาการอบแห้ง ๒ นาทีแรก ความขาวของข้าวลดลงอย่างรวดเร็ว (ความขาวเริ่ม

ต้น ๔๑-๔๓) และมีค่าค่อนข้างคงตัว (๓๐-๓๕) ที่ความชื้นสุดท้ายในช่วงร้อยละ ๑๘-๓๐ มาตรฐานแห้ง การเปลี่ยนแปลงสีของข้าวอันเนื่องมากระบวนการเกิดสีน้ำตาลแบบเมลลาร์ด โดยสภาพที่เหมาะสมของน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดแอมิโนที่มีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสีน้ำตาลและอีกสาเหตุอันเนื่องมาจากช่วงที่เกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของข้าวเปลือกอาจทำให้สีของเปลือกที่หุ้มเมล็ดข้าวอยู่นั้นซึมเข้าสู่เนื้อเมล็ดข้าว มีผลให้ข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีสีคล้ำขึ้น ปริมาณรำที่ได้หลังการขัดสี พบว่ามีค่าร้อยละ ๕.๓-๗.๑ ซึ่งน้อยกว่าตัวอย่างอ้างอิงครึ่งหนึ่ง นอกจากนี้จากตารางที่ ๑ พบว่าปริมาณไขมันในข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีสูงกว่าข้าวตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง สาเหตุเนื่องจากเอนโดสเปิร์ม (endosperm) ของเมล็ดข้าวเปลือกได้ดูดซึมไขมันที่แพร่จากชั้นของรำในระหว่างการอบแห้งเอาไว้

- Pasting behaviour

รูปที่ ๗ และตารางที่ ๒ แสดงสมบัติ pasting ของข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและข้าวที่ไม่ผ่านการอบแห้ง ผลการทดลองพบว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งภายใต้อุณหภูมิ ๑๕๐-๑๗๐ องศาเซลเซียส ให้ค่า PV, BKV และ SBV ต่ำกว่าข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง การที่ค่า PV สูงเกิดจากการที่เมล็ดสตาร์ชมีความสามารถในการจับกับน้ำได้ปริมาณมากกว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง ทำให้เมล็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวเป็นผลทำให้ค่าความ

หนืดสูงขึ้น ส่วนข้าวผ่านการอบแห้งค่า PV ลดลงตามอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น ในช่วงเวลา ๓ นาทีแรกระหว่างการอบแห้งข้าวที่มีความชื้นสูงได้รับความร้อนสูง เมล็ดสตาร์ชที่ถูกน้ำจะพองตัวและกลายเป็นเจล และทำให้โปรตีนแตกตัวและแทรกเข้าไปภายในช่องว่างระหว่างเมล็ดสตาร์ช เมื่อนำไปวัดสมบัติ pasting มีผลทำให้ความสามารถในการจับน้ำของเมล็ดสตาร์ชลดลง ซึ่งทำให้เมล็ดสตาร์ชพองตัวได้น้อยลงด้วย มีผลทำให้ค่า PV ลดลงสำหรับค่า FV และ SBK แสดงถึงสมบัติความแข็งกระด้างของข้าวสุก^{๒๖,๒๗} ข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงให้ค่า FV และ SBK ต่ำกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำและที่ไม่ผ่านการอบแห้งตามลำดับ ข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีลักษณะความแข็งกระด้างต่ำกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการอบแห้ง หลังจากการหุงสุกและปล่อยให้ข้าวเย็นตัวลง

สรุป

จากกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งโดยการนำข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๔๒ มาตรฐานแห้ง มาผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไชเบตภายใต้อุณหภูมิ ๑๕๐-๑๗๐ องศาเซลเซียสด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และความสูงเบต ๑๐-๑๕ เซนติเมตร พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าความสูงเบต ความขาวของข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีสีที่คล้ำขึ้นมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ร้อยละ white belly ลดลงเมื่ออุณหภูมิ



ที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น หากต้องการให้ได้ร้อยละต้นข้าวสูงควรอบแห้งโดยการลดความชื้นไม่ต่ำกว่าร้อยละ ๑๘ มาตรฐานแห้ง ส่วนสมบัติทาง pasting ให้ค่า PV, BKV และ SBV ลดต่ำลง เมื่อเทียบกับข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนนวดยิ่ง และเมื่อดูลักษณะของโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าไม่ปรากฏโครงสร้างของเมล็ดสตาร์ช หลังจากผ่านการอบแห้งแล้ว ซึ่งข้าวสารที่หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคนี้มีลักษณะเป็นข้าวเหนียว

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบสมบัติ

pasting ของข้าว ขอขอบคุณศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบคุณภาพข้าว และขอขอบคุณบริษัทฟิลิปส์เซมิคอนดักเตอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารอ้างอิง

- AACC. Approved method of the American Association of Cereal Chemist 9th ed., 1995; St. Paul, MN : AACC.
- Ali SZ, Bhattacharya KR. Pasting behaviour of parboiled rice, *J. Texture Stud.*, 1980; 11 : 239-245.
- Dimopoulos JS, Muller HG. Effect of processing conditions on protein extraction and composition and on some other physicochemical characteristics of parboiled rice, *Cereal Chemistry*, 1972; 49 : 54-62.
- Folch J, Lees M, Sloane-Stanley GH. A simple method for isolation and

purification of total lipids from animal tissues. *J. Bio. Chem.* 1957; 226: 497-509.

- Iyota H, Nishimura N, Onuma T, Nomura T. Drying of sliced raw potatoes in superheated steam and hot air, *Drying Technology*, 2001; 19 (7) : 1411-1424.
- Priestley RJ. Studies on parboiled rice. I. Comparison of the characteristics of raw and parboiled rice, *Food Chemistry*, 1976; 1, 5-14.
- Ranghavedra RSN, Juliano BO. Effect of parboiling on some physicochemical properties of rice, *Journal Agricultural Food Chemistry*, 1970; 18 : 289-294.
- Tang Z, Cenkowski S, Muir WE. Dehydration of sugar-beet pulp in superheated steam and hot air, *Trans. of the ASAE*, 2000; 43(3) : 685-689.
- Tatemoto Y, Mawatari Y, Sakurai K, Noda K, Komatsu N. Drying characteristics of porous material in superheated steam fluidized bed, *Proceedings of the 13th International Drying Symposium*, Beijing, China, 27-30 August 2002, Vol. A, 624-633.

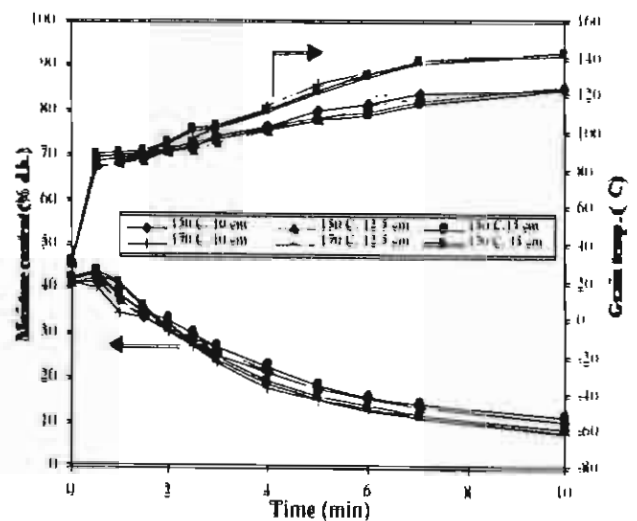
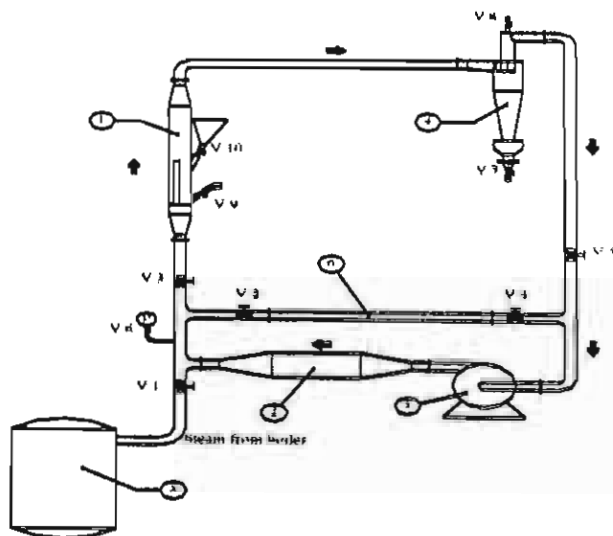
ตารางที่ ๑ ปริมาณไขมันของข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิและความสูงต่าง ๆ

			Lipid content (%g/g _{dry matter flour})
Raw white rice			0.2 ± 0.02
	150°C	10 cm	0.4 ± 0.03
		12.5 cm	0.23 ± 0.04
		15 cm	0.23 ± 0.04
Rice	160°C	10 cm	0.43 ± 0.03
		12.5 cm	0.3 ± 0.04
		15 cm	0.21 ± 0.03
	170°C	10 cm	0.65 ± 0.02
		12.5 cm	0.35 ± 0.02
		15 cm	0.21 ± 0.03



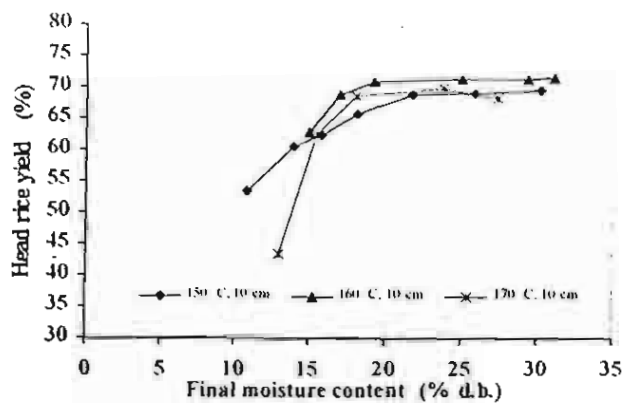
ตารางที่ ๒ สมบัติ pasting ของข้าวที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

	Pv	Trough	BKV	FV	SBV	P _{Temp}
	rvu	rvu	rvu	rvu	rvu	°C
Raw rice	296	218	78	399	181	79.9
150°C 15 cm	120	113	7	205	92	89.7
160°C 15 cm	57	47	10	81	34	88
170°C 15 cm	25	20	5	35	15	89.7
170°C 12.5 cm	23	19	4	32	13	89.7
170°C 10 cm	14	12	2	21	9	89.7

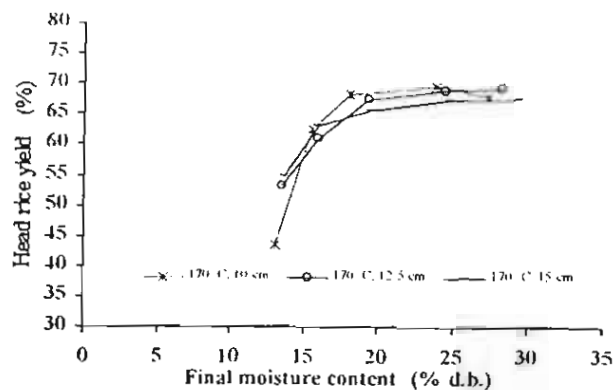


รูปที่ ๑ แผนภาพระบบอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง : (๑) ห้องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด; (๒) อุปกรณ์ให้ความร้อน; (๓) พัดลม; (๔) เครื่องตัดฝุ่น; (๕) เครื่องกำเนิดไอน้ำ; (๖) Bypass line, (V) วาล์ว; (P) มาตรความดัน

รูปที่ ๒ อิทธิพลของความสูงและอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกและอุณหภูมิของเมล็ดข้าว

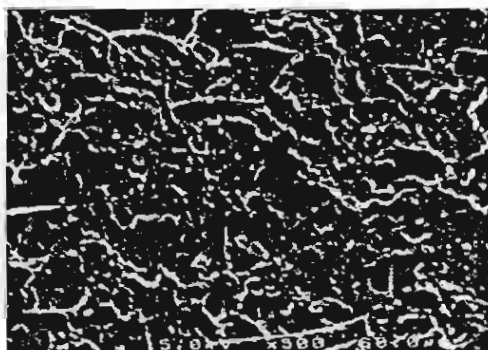


ก) ความสูง ๑๐ เซนติเมตร

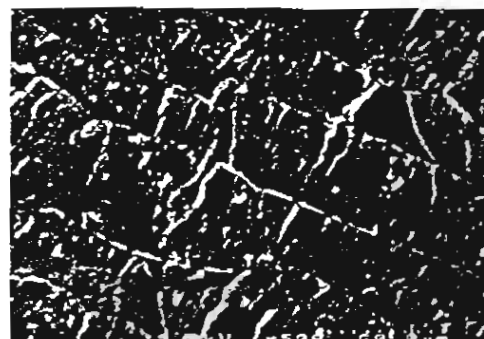


ข) อุณหภูมิไอน้ำร้อนยาวถึง ๑๗๐ องศาเซลเซียส

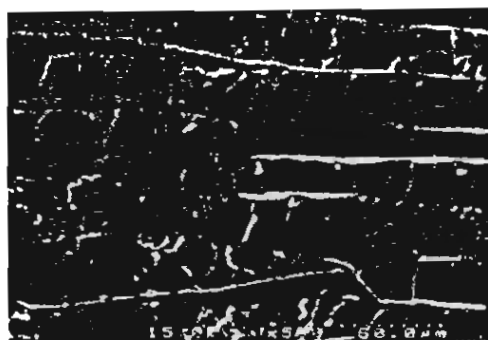
รูปที่ ๓ ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละข้าวต้นทางกับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยาวถึงและความสูงเบตต่าง ๆ (ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๔๒ มาตรฐานแห้ง)



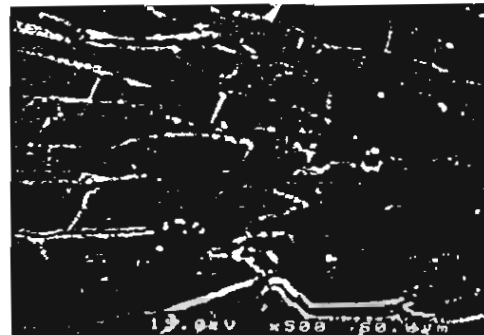
ก) ตัวอย่างข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง



ข) ข้าวที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ ๑๕๐ องศาเซลเซียส (ความชื้นสุดท้ายร้อยละ ๑๔.๔ มาตรฐานแห้ง)

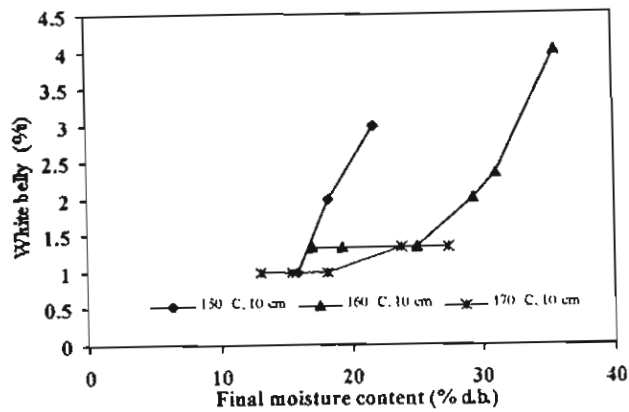


ค) ข้าวที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ ๑๖๐ องศาเซลเซียส (ความชื้นสุดท้ายร้อยละ ๑๑.๔ มาตรฐานแห้ง)

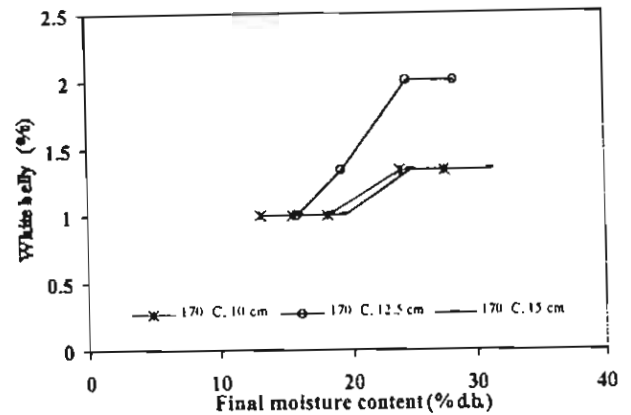


ง) ข้าวที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ ๑๗๐ องศาเซลเซียส (ความชื้นสุดท้ายร้อยละ ๑๔.๕ มาตรฐานแห้ง)

รูปที่ ๔ อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้อบแห้งต่อโครงสร้างระดับจุลภาค

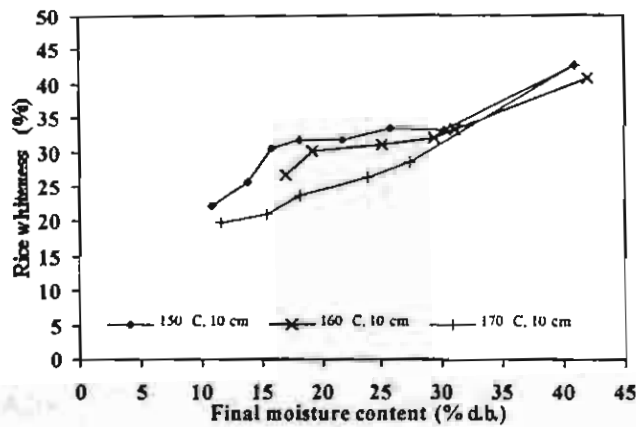


ก) ความสูง ๑๐ เซนติเมตร

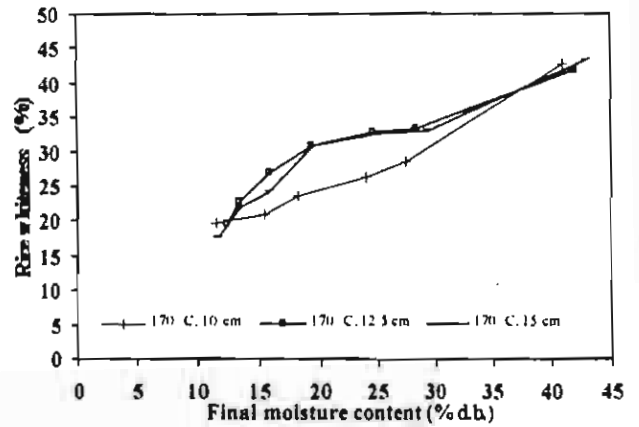


ข) อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ๑๗๐ องศาเซลเซียส

รูปที่ ๕ ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ white belly กับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความสูงเบตต่าง ๆ (ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๔๒ มาตรฐานแห้ง)

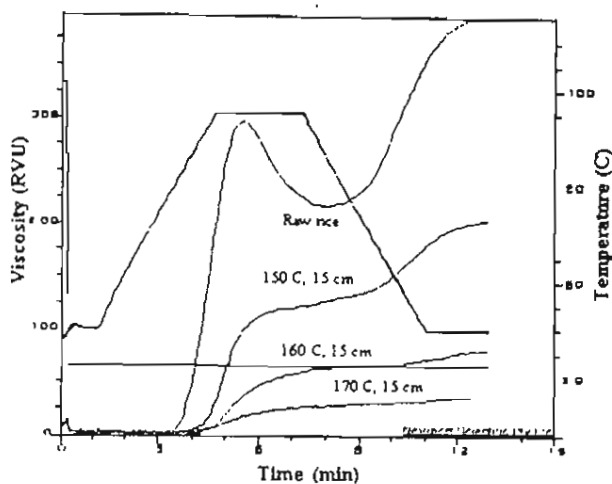


ก) ความสูง ๑๐ เซนติเมตร

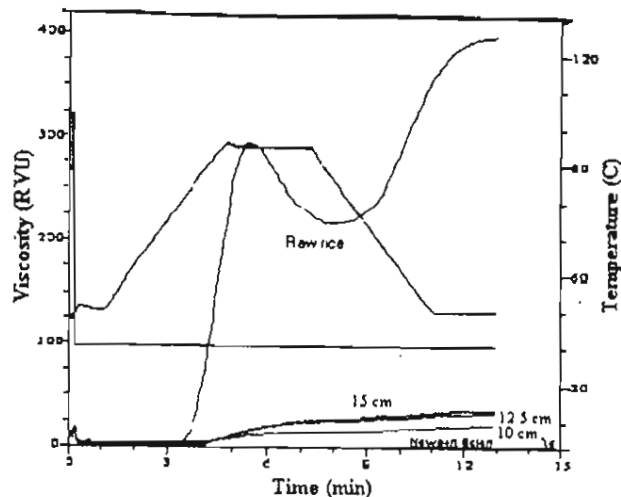


ข) อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ๑๗๐ องศาเซลเซียส

รูปที่ ๖ ความสัมพันธ์ระหว่างความขาวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความสูงเบตต่าง ๆ (ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๔๒ มาตรฐานแห้ง ความขาว = ๔๑-๔๓)



ก) ความสูงเบด ๑๕ เซนติเมตร



ข) อุณหภูมิไอน้ำร้อนเฉลี่ย ๑๗๐ องศาเซลเซียส

รูปที่ ๗ ความหนืดของข้าวที่ผ่านและผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนเฉลี่ย

Abstract

The present method of production of parboiled rice takes time. Therefore, the objective of this work is to investigate a new technique for producing parboiled rice by superheated-steam fluidised-bed drying. The operating conditions were carried out at the initial moisture contents of 41-42.5% dry basis, three bed heights of 10, 12.5 and 15 cm, superheated steam temperatures of 150-170°C with a constant pressure of 106.1 kPa and a fixed superficial velocity of 3.1 m/s. The experimental results showed that the inlet temperature had much more effect on removal of moisture content than the bed height. For the paddy quality, the head rice yield after reducing moisture content to 18% dry basis was higher than 60% (average reference value of 52%) whereas the colour indicating rice whiteness became darker and white belly was significantly affected by the inlet temperature. In addition, the lower values of peak viscosity, breakdown viscosity and setback viscosity were found under high temperatures.

Keywords : drying, head rice yield, whiteness

การทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อน

Water Heating Using Heat Pump

อาทิตย์ ไชยอรันนท์ สมชาติ ไสภณรณฤทธิ์ และวารุณี เตย
คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถนนประชาอุทิศ บางมด กรุงเทพฯ 10140

โทร 02 470-8632-3 โทรสาร 02 470-8635

E-Mail: warunee.tia@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบ สร้างและประเมินสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อน สำหรับบ้านพักอาศัยขนาด 4 คน เครื่องทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนประกอบด้วยถังเก็บน้ำร้อนขนาด 100 ลิตร เครื่องอัดไอขนาด 1.4 kW เครื่องทำระเหยขนาด 3.5 kW และเครื่องควบแน่นขนาด 4.5 kW ระบบปั๊มความร้อนใช้ R22 เป็นสารทำงาน จากการประเมินสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อน โดยผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 50.5°C สำหรับอาบน้ำครั้งละ 150 ลิตร ที่อัตราการไหล 2.5 ลิตร/นาที เป็นจำนวน 2 ครั้งต่อวัน ใช้ไฟฟ้า 3.89 kWh/วัน สัมประสิทธิ์สมรรถนะเฉลี่ยของระบบปั๊มความร้อนเท่ากับ 3.25 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานเฉลี่ยใน 1 วันของเครื่องทำน้ำร้อนเท่ากับ $2.02 \text{ kW}_\text{h}/\text{kW}_\text{elec}$ สามารถประหยัดไฟฟ้าได้ประมาณ 50% ของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้า ในกรณีพิจารณาที่อายุการใช้งาน 10 ปี อัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 3 บาท/kWh ต้นทุนรวมของน้ำร้อนที่ผลิตได้เท่ากับ 3.50 บาท/kWh ซึ่งคิดเป็นค่าเครื่อง 43 % ค่าไฟฟ้า 42 % และค่าบำรุงรักษา 15 % ตามลำดับ

คำสำคัญ(keywords): การทำน้ำร้อน / ปั๊มความร้อน / การอนุรักษ์พลังงาน

ABSTRACT

In this paper, the design, construction and performance evaluation of a residential heat pump water heater (HPWH) for a family of 4 persons were conducted. The HPWH unit consists of a 100-liter storage tank integrated with a heat pump having 1.4 kW compressor, 3.5 kW evaporator, and 4.5 kW condenser. The performance of HPWH had been evaluated by using hot water of 150 liters at water flow rate of 2.5 liters/min with temperature of 50.5°C in the morning and by the same conditions in the evening. It was found that the electricity consumption was 3.89 kWh/d. The average coefficient of performance (COP_hp) and energy efficiency ratio (EER) were 3.25 and 2.02 $\text{kW}_\text{h}/\text{kW}_\text{elec}$, respectively. However the energy saving was

approximately 50% when it was compared with the conventional electric water heater. In case of 10-year life time and 3 Baht/kWh electricity rate, the total cost of hot water was 3.50 Baht/kWh, of which capital cost, electricity cost and maintenance cost were 43%, 42%, and 15%, respectively.

Keywords: Water Heating/ Heat Pump/ Energy Conservation

1. บทนำ

เครื่องทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้าเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในที่พักอาศัย เนื่องจากมีขนาดกระทัดรัด การใช้งานสะดวกอีกทั้งราคาเครื่องไม่สูงมากนัก แต่การทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้าต้องเสียค่าใช้จ่ายไฟฟ้าสูงและมีแนวโน้มที่ค่าไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามอัตราค่าไฟฟ้าที่การไฟฟ้าจัดเก็บ แนวทางหนึ่งในการลดความต้องการใช้ไฟฟ้าหรือลดค่าไฟฟ้าในที่พักอาศัย คือ การใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น [1] การทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้าได้ ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 50 % [2], [3] เนื่องจากสามารถนำความร้อนจากอากาศแวดล้อมมาใช้ ได้มีการทดลองใช้ระบบปั๊มความร้อนในการทำน้ำร้อนสำหรับที่พักอาศัยสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายพลังงาน และประหยัดพลังงานได้โดยใช้พลังงานเพียง 80% ของการใช้ก๊าซทำน้ำร้อน และ 75% ของการใช้ไฟฟ้าทำน้ำร้อน [4] และได้มีการใช้ระบบปั๊มความร้อนสำหรับอุ่นน้ำเพื่อผลิตน้ำร้อนในร้านชาตรัด[5] พบว่ามีค่าใช้จ่ายในการทำน้ำร้อนลดลงเหลือเพียง 1/3 ถึง 1/2 เท่าของการทำน้ำร้อนด้วยหม้อไอน้ำโดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นเพื่อให้มีการใช้เครื่องทำน้ำร้อนที่มีประสิทธิภาพสำหรับที่พักอาศัยในประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะออกแบบและสร้าง รวมถึงประเมินสมรรถนะและวิเคราะห์ต้นทุนของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเพื่อใช้ในบ้านพักอาศัยสำหรับครอบครัวขนาด 4 คน

2. การออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อน

เครื่องทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนนี้ได้ออกแบบเพื่อใช้งานในบ้านพักอาศัยสำหรับครอบครัวขนาด 4 คน เพื่อทำน้ำอุ่นสำหรับการอาบน้ำ การออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ การออกแบบถังเก็บน้ำร้อน และการออกแบบระบบปั๊มความร้อน

2.1 การออกแบบถังเก็บน้ำร้อน

เนื่องจากระบบปั๊มความร้อนทำน้ำอุ่นได้ช้ากว่าเครื่องทำน้ำอุ่นทั่วไปที่ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีถังเก็บน้ำร้อนเพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานได้อย่างต่อเนื่องสำหรับ 4 คน

การหาขนาดถังเก็บน้ำร้อน ได้พิจารณาตามสมมติฐานดังนี้

- อุณหภูมิทำน้ำอุ่นที่ใช้ในการอาบน้ำเท่ากับ 40°C
- การอาบน้ำเป็นไปในลักษณะแบบใช้ฝักบัว ซึ่งปริมาณน้ำอุ่นที่ใช้ในการอาบน้ำประมาณ 40 ลิตร/คน/ครั้ง [6]
- อุณหภูมิน้ำร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนมีค่าประมาณ 50°C
- อุณหภูมิน้ำจากท่อประปา 25°C

จากข้อสมมติฐานนี้ หาปริมาณน้ำร้อน (50°C) ที่ต้องการใช้แต่ละครั้งสำหรับ 4 คนได้ 96 ลิตร/ครั้ง ดังนั้นจึงเลือกถังเก็บน้ำร้อนขนาด 100 ลิตร การหาความหนาของถังเก็บน้ำร้อน ถังน้ำร้อนที่ออกแบบมีลักษณะเป็นแบบบิวด์ซึ่งตัวถังจะต้องทนความดันของน้ำในระบบได้ ดังนั้นในการพิจารณาเลือกวัสดุที่ใช้ทำถังเก็บน้ำร้อน จะต้องเป็นวัสดุที่ทนการกัดกร่อนและแรงดันเนื่องจากการขยายตัวของน้ำเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นได้ ถังเก็บน้ำร้อนแบบบิวด์นี้จะต้องมีวาล์วนิรภัย ซึ่งเลือกใช้วาล์วที่สามารถทนความดันได้ 8 บาร์ จากมาตรฐานของ ASME Boiler and Pressure Vessel [7] การออกแบบถังเก็บน้ำร้อนจะต้องทนความดันได้ 16 บาร์ และกำหนดค่าแฟคเตอร์เพิ่มที่ใช้ในการออกแบบ (safety factor) เท่ากับ 1.5 ดังนั้นจึงเลือกใช้สแตนเลสสตีล เบอร์ 304 ซึ่งสามารถรับแรงดันได้ 207 Mpa ที่มีขายท้องตลาดมีขนาด 1.2 ม. x 2.4 ม. หนา 3 มม. ซึ่งนำมาขึ้นเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.382 ม. สูง 0.873 ม. และความสูงของท่อนหัวของถังทรงกระบอกเท่ากับ 0.0175 ม.

2.2 การออกแบบระบบปั๊มความร้อน

สมมติฐานและข้อมูลที่ให้

- น้ำเข้าเครื่องทำน้ำร้อนมีอุณหภูมิ 25°C
- น้ำออกจากเครื่องทำน้ำร้อนอุณหภูมิ 50°C

- อัตราการไหลของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 0.042 kg/s หรือ 2.5 ลิตร/นาที่
- การอาบน้ำแบบฝักบัวมีอัตราการไหลของน้ำอุ่น 4 ลิตร/นาที่
- ระบบปั๊มความร้อนใช้สารทำงาน R22
- อุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องความเย็น 55°C
- อุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องทำระเหย 10°C
- ประสิทธิภาพทางกลของเครื่องอัดไอเท่ากับ 0.8 และประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.85 เป็นข้อมูลที่ได้จากผู้ผลิตเครื่องอัดไอ

ในการออกแบบเริ่มจากการคำนวณหาอัตราความร้อนที่ใช้ทำน้ำร้อนจากน้ำอุณหภูมิ 25°C ถึง 50°C ได้จาก

$$Q_w = m_w c_{p,w} \Delta T_w \quad (1)$$

เมื่อ m_w คือค่าอัตราการไหลของน้ำร้อนออกจากถัง, $c_{p,w}$ คือค่าความจุความร้อนของน้ำ ΔT_w คือค่าผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนที่ออกจากถังและน้ำที่เข้าถัง จากนั้นคำนวณหาขนาดของเครื่องอัดไอ โดยหาอัตราการไหลของสารทำงาน (m_r) ก่อน ซึ่งคำนวณจากอัตราความร้อนที่ต้องการใช้ในการทำน้ำร้อนได้จากสมการดังนี้

$$Q_{con} = m_r (h_{com,o} - h_{con,o}) \quad (2)$$

เมื่อ Q_{con} คืออัตราความร้อนที่ถ่ายเทออกจากเครื่องความเย็น, $h_{com,o}$ และ $h_{con,o}$ คือค่าเอนทัลปีของสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอและที่ออกจากเครื่องความเย็นตามลำดับ จากนั้นคำนวณหากำลังงานที่ใช้ในการอัดไอ (W_{com}) ได้จากสมการ

$$W_{com} = m_r (h_{com,o} - h_{com,i}) \quad (3)$$

เมื่อ $h_{com,i}$ คือค่าเอนทัลปีของสารทำงานที่เข้าเครื่องอัดไอ จากนั้นหา กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่เครื่องอัดไอ (P_{com}) ได้จาก

$$P_{com} = \frac{W_{com}}{\eta_m \eta_c} \quad (4)$$

เมื่อ η_m และ η_c คือประสิทธิภาพทางกลของเครื่องอัดไอ และมอเตอร์ไฟฟ้า นำค่าที่คำนวณได้ไปเลือกขนาดของเครื่องอัดไอที่มีขนาดตามท้องตลาดที่มีค่า

ใกล้เคียงกับที่คำนวณได้ ถ้าไม่มีก็ให้เลือกขนาดที่ใหญ่กว่า จากนั้นคำนวณหาขนาดของเครื่องควบแน่นจากขนาดของเครื่องอัดไอที่เลือกใช้ โดยคำนวณย้อนกลับโดยใช้สมการ (4), (3), (2) แล้วคำนวณหาขนาดของเครื่องทำระเหย (Q_e) ได้จาก

$$Q_e = m_r (h_{com,i} - h_{e,i}) \quad (5)$$

เมื่อ $h_{e,i}$ คือค่าเอนทัลปีของสารทำงานที่เข้าเครื่องทำระเหย

ผลการออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนสำหรับบ้านพักอาศัยขนาด 4 คน แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. ถังเก็บน้ำร้อนเป็นรูปทรงกระบอกขนาด 100 ลิตร ทำด้วยสแตนเลสสตีล เบอร์ 304 หนา 3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง 0.382 ม. สูง 0.873 ม. และความสูงของส่วนหัวของถังทรงกระบอกเท่ากับ 0.0175 ม.
2. เครื่องอัดไอแบบถูกสูบของบริษัท TECUMSEH รุ่น AW 5515EK ขนาดกำลังไฟฟ้า 1.39 kW ใช้ R-22 เป็นสารทำงาน
3. เครื่องทำระเหยขนาดการทำความเย็น 3.51 kW
4. เครื่องควบแน่นขนาดการทำความร้อน 4.46 kW มีลักษณะเป็นท่อทองแดงขดอยู่ภายในถังเก็บน้ำร้อน

3. การทดสอบสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อน

ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อน ได้ประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะระบบปั๊มความร้อน (COP_{HP}) อัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงานของเครื่องทำน้ำร้อน (EER) ได้จาก

$$COP_{HP} = \frac{Q_{con}}{W_{com}} \quad (6)$$

$$EER = \frac{m_w c_{p,w} (\Delta T_w)}{P_T} \quad (7)$$

เมื่อ P_T คือ ค่ากำลังไฟฟ้ารวมที่ให้แกเครื่องทำน้ำร้อน

วิธีการทดลอง

1. หาสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อนตามสภาพการใช้งานจริง สำหรับ 4 คนที่อาบน้ำอย่างต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลของน้ำร้อน 2.5 ลิตร/นาที โดยตั้งค่าอุณหภูมิควบคุมน้ำในถังเก็บน้ำร้อนไว้ที่ 50 °C ในแต่ละวันอาบน้ำ 2 ครั้ง คือ ช่วงเช้า และ

ช่วงเย็น ในแต่ละช่วงเปิดน้ำร้อนอย่างต่อเนื่องครั้งละ 150 ลิตร ขณะที่ปล่อยน้ำร้อนออกจากถังจะมีน้ำเย็นไหลเข้าดังตลอดเวลา บันทึกค่าอุณหภูมิและความดันของสารทำงาน อุณหภูมิน้ำที่เข้าและออกจากถังเก็บน้ำร้อน ตำแหน่งที่ทำการวัดแสดงดังรูปที่ 1 วัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดไอและพัลลภของเครื่องทำระเหย ทุก 2 นาทีในช่วงที่ใช้ น้ำร้อนและวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ให้แกเครื่องทำน้ำร้อนตลอดทั้งวัน

2. หาอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ออกจากถังในกรณีที่มีการใช้น้ำอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหล 2, 3, 4, 5 ลิตร/นาที อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองได้แก่
 - เทอร์โมคัปเปิลชนิดเคต่อเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ มีค่าความถูกต้อง $\pm 1\%$
 - บรูคเกอร์แบบวัดความดันต่ำ มีค่าความถูกต้อง ± 6.9 kPa และแบบวัดความดันสูง มีค่าความถูกต้อง ± 34.5 kPa
 - มาตรวัดกำลังไฟฟ้า (clip-on-meter) มีค่าความถูกต้อง ± 0.1 kW
 - มาตรวัดกิโลวัตต์ชั่วโมง มีค่าความถูกต้อง ± 0.1 kWh

4. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนพบว่าที่อัตราการไหลของน้ำร้อน 2.5 ลิตร/นาที อัตราการใช้ น้ำร้อน 4 ลิตร/นาที ได้อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำร้อนที่ออกจากถังเท่ากับ 50.5 °C พลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ตลอดวันเท่ากับ 3.89 kWh ค่า COP_{HP} เฉลี่ยเท่ากับ 3.25 และอัตราส่วนประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนเฉลี่ยใน 1 วัน (EER_{HP}) เท่ากับ 2.02 kW/kWh ซึ่งค่านี้ได้รวมผลการสูญเสียความร้อนทั้งวันซึ่งปั๊มความร้อนจะต้องทำงานเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิน้ำให้ได้ตามที่ตั้งไว้ จากการทดลองสังเกตได้ว่าตลอด 24 ชั่วโมงในช่วงที่ไม่มีการใช้น้ำปั๊มความร้อนจะทำงานประมาณ 3 ครั้ง รวมเป็นพลังงานไฟฟ้าใช้ 1.04 kWh คิดเป็น 27% ของไฟฟ้าที่เครื่องทำน้ำร้อนใช้ตลอด 24 ชั่วโมง

ผลการทดสอบอุณหภูมิ น้ำร้อนที่ผลิตได้ ในกรณีที่มีการใช้น้ำร้อนอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหลน้ำร้อน 2, 3, 4, 5 ลิตร/นาที ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำร้อนดังแสดงในรูปที่ 2-5 จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงแรกจะได้น้ำร้อนอุณหภูมิค่อนข้างสูงแล้วลดต่ำลงเรื่อยๆจนอุณหภูมิกำลังที่ต่ำกว่าหนึ่ง เนื่องจากเครื่องควบแน่นมีอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ ค่าอัตราการไหลของน้ำร้อนและอุณหภูมิของน้ำร้อนที่คงที่สรุปได้ดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่ายังคงผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงกว่า 40 °C และค่าอุณหภูมิคงที่ของน้ำร้อนที่ออกจากถังลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ ส่วนค่า COP_{HP} มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการควบแน่นต่ำลง

ตารางที่ 1 ค่า COP_{hp} และอุณหภูมิของน้ำร้อนเมื่อมีการใช้งานอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหลค่าต่างๆ

อัตราการไหลของน้ำร้อน (ลิตร/นาท)	อุณหภูมิของน้ำร้อนเมื่อมีการใช้งานอย่างต่อเนื่อง ($^{\circ}C$)	COP_{hp}
2	52.5	3.65
3	47.0	3.79
4	43.0	3.85
5	41.0	3.93

5. การประเมินต้นทุนในการทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อน

ข้อมูลทางด้านเทคนิคของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อน ได้แก่ ปริมาณการใช้ไฟฟ้า 300 ลิตร/วัน วันละ 2 ครั้ง คือ ตอนเช้า และ ตอนเย็น ครั้งละ 150 ลิตร ที่อัตราการไหล 2.5 ลิตร/นาท จากผลการทดลองได้อุณหภูมิของน้ำร้อน $50.5^{\circ}C$ อุณหภูมิน้ำเข้าถึงน้ำร้อน $28^{\circ}C$ ปริมาณการใช้ไฟฟ้า 3.89 kWh/วัน

- สมมติฐานและข้อมูลทางการเงินที่ใช้ในการประเมิน ได้แก่
 - ต้นทุนในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อน 30,060 บาท
 - มูลค่าซากคิด 10% ของต้นทุนเครื่องทำน้ำร้อน
 - ค่าบำรุงรักษารายปีคิดเป็น 5% ของต้นทุนสร้างเครื่องทำน้ำร้อน
 - ค่าอัตราส่วนลด (discount rate) 8%
 - อายุการใช้งาน 5 ปี
 - อัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 3 บาท/kWh
 - จำนวนชั่วโมงการทำงาน 365 วัน/ปี

ผลการประเมินหาต้นทุนรวมของน้ำร้อน(ไม่คิดค่าน้ำ)สรุปได้ดังนี้ ต้นทุนรวมของน้ำร้อน(ไม่คิดค่าน้ำ)ต่อหน่วยความร้อนที่ผลิตได้ เท่ากับ 1.24 บาท/MJ หรือ 4.46 บาท/kWh ซึ่งคิดเป็นต้นทุนค่าเครื่องทำน้ำร้อน 55%, ค่าไฟฟ้า 33%, และค่าบำรุงรักษา 12%

เนื่องจากชั่วโมงการทำงานต่อวันของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนมีค่าต่ำมาก ดังนั้นอายุการใช้งานน่าจะสูงกว่า 10 ปี กรณีที่พิจารณาอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นเป็น 10 ปี ต้นทุนรวมของน้ำร้อนลดลงเหลือ 0.97 บาท/MJ หรือ 3.50 บาท/kWh ซึ่งคิดเป็นต้นทุนค่าเครื่องทำน้ำร้อน 43%, ค่าไฟฟ้า 42%, และค่าบำรุงรักษา 15% จะเห็นได้ว่าถึงแม้จะสามารถลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าได้ประมาณ 50 % แต่เงินลงทุนค่าเครื่องปั๊มความร้อนค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้าที่ใช้กันทั่วไปประมาณ 5 เท่า (เป็นกรณีที่ไม่มีถังเก็บน้ำร้อน หากมีถังเก็บน้ำร้อน

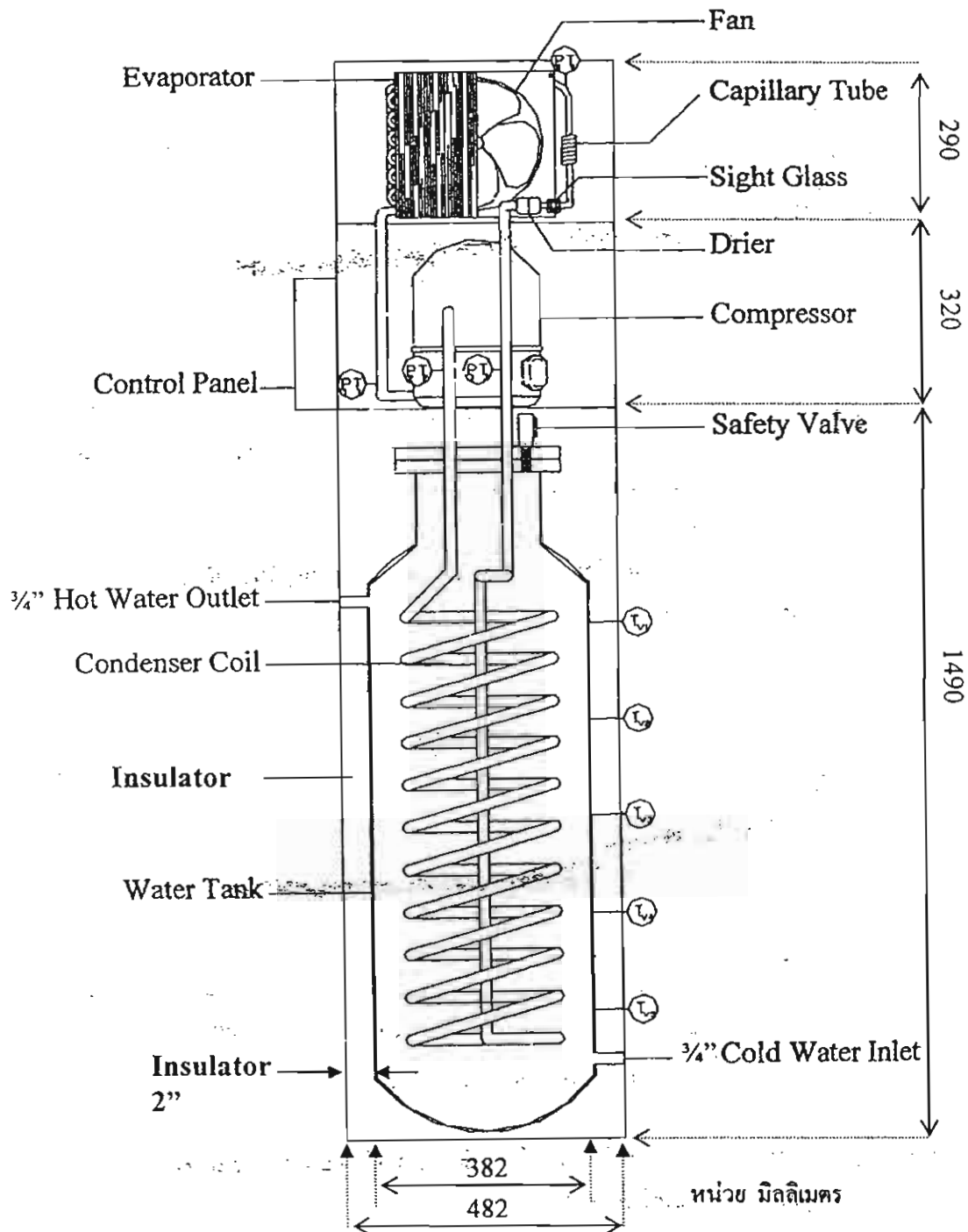
ตัวเลขจะต่ำกว่านี้) ซึ่งอัตราค่าไฟฟ้าปัจจุบันจึงทำให้ระบบปั๊มความร้อนมีต้นทุนใกล้เคียงกับเครื่องทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้า อย่างไรก็ตามอัตราค่าไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆซึ่งทำให้เครื่องทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนมีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้ทดแทนเครื่องทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้าได้คุ้มค่ามากขึ้น

6. สรุป

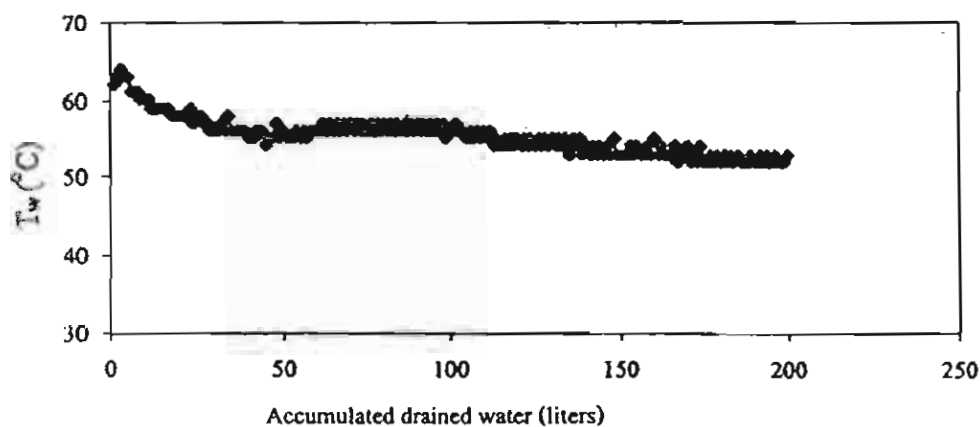
เครื่องทำน้ำร้อนขนาดเก็บน้ำร้อน 100 ลิตร ซึ่งมีระบบปั๊มความร้อนประกอบด้วยเครื่องอัดไอแบบถูกสูบขนาดกำลังไฟฟ้า 1.39 kW ใช้ R-22 เป็นสารทำงาน เครื่องที่ระเหยขนาดการทำความเย็น 3.51 kW และ เครื่องควบแน่นขนาดการทำความร้อน 4.46 kW มีลักษณะเป็นท่อทองแดงขดอยู่ภายในถังเก็บน้ำร้อน เหมาะสำหรับบ้านพักอาศัยขนาด 4 คน สามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิเฉลี่ย $50.5^{\circ}C$ ที่อัตราการไหล 2.5 ลิตร/นาท เพื่อใช้ทำน้ำอุ่นสำหรับอาบน้ำ ใช้พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดวันเท่ากับ 3.89 kWh ได้ค่า COP_{hp} เฉลี่ยเท่ากับ 3.25 และอัตราส่วนประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนเฉลี่ยใน 1 วัน (EER_{hp}) เท่ากับ $2.02 \text{ kWh/kWh}_{\text{elec}}$ สามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้ประมาณ 50% เมื่อพิจารณาเทียบกับเครื่องทำน้ำอุ่นด้วยไฟฟ้าทั่วไป ที่อัตราค่าไฟฟ้าค่า 3 บาท/kWh และอายุการใช้งาน 10 ปี ต้นทุนรวมของน้ำร้อน(ไม่คิดค่าน้ำ)ต่อหน่วยความร้อนที่ผลิตได้ เท่ากับ 0.97 บาท/MJ หรือ 3.50 บาท/kWh ซึ่งคิดเป็นต้นทุนค่าเครื่องทำน้ำร้อน 43%, ค่าไฟฟ้า 42%, และค่าบำรุงรักษา 15%

7. เอกสารอ้างอิง

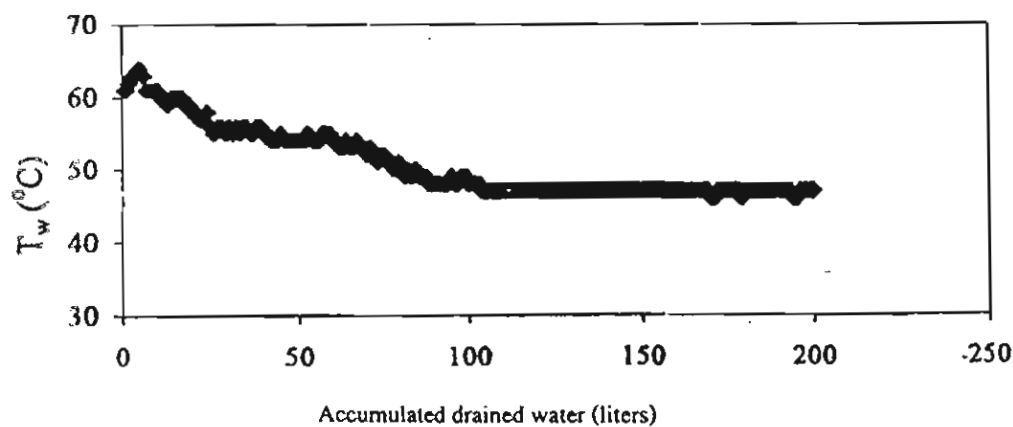
- [1] <http://www.nepo.go.th>, 2002.
- [2] <http://www.chilipepperapp.com/hpwh.htm>, 2002.
- [3] http://www.pnl.gov/fta/3_res.htm, 2002.
- [4] Wiebusch, B., "Pump Efficiently Heat Water", Design News, Boston, Vol.56, 2001.
- [5] Robert, O. and Schowalter, P.E., 1997, "Heat Pump Water for Laundry". ASHRAE Journal, Vol.39, No.7, pp 77-79.
- [6] วรวิทย์ อึ้งภากรณ์, 2526, การออกแบบระบบท่อภายในอาคาร, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, หน้า 145-191.
- [7] American Society of Mechanical Engineers, 1977, ASME Boiler and Pressure Vessel Code: An American National Standard ANSI/ASME BPV-VIII-1, Section VIII; Rules for Construction of Pressure Vessels, Division 1, New York, ASME, pp.245-280.



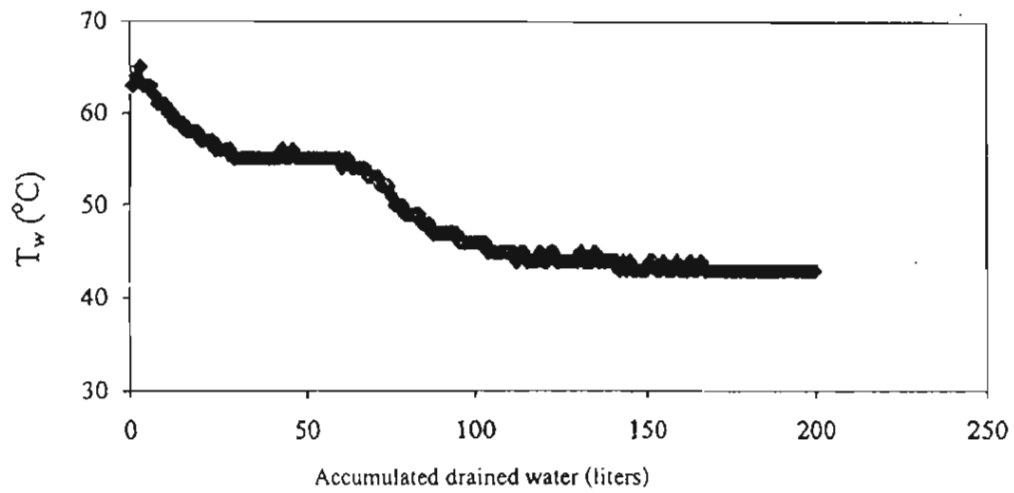
รูปที่ 1 แผนภาพเครื่องทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อน และตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิและความดัน



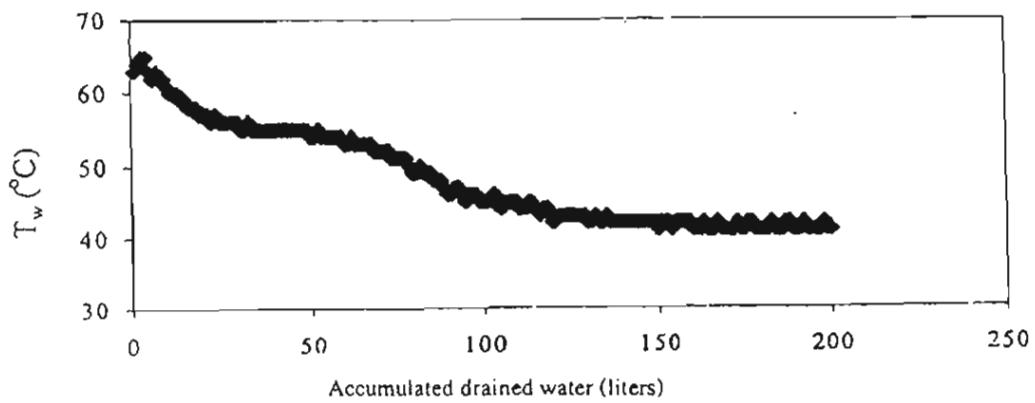
รูปที่ 2 อุณหภูมิน้ำร้อนปล่อยจากถังที่อัตราการไหล 2 ลิตร/นาที เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าถัง 28°C และ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 30°C



รูปที่ 3 อุณหภูมิน้ำร้อนปล่อยจากถังที่อัตราการไหล 3 ลิตร/นาที เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าถัง 28°C และ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 30°C



รูปที่ 4 อุณหภูมิน้ำร้อนปล่อยจากถังที่อัตราการไหล 4 ลิตร/นาที เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าถัง 28°C และ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 30°C



รูปที่ 5 อุณหภูมิน้ำร้อนปล่อยจากถังที่อัตราการไหล 5 ลิตร/นาที เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าถัง 28°C และ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 30°C

สถานภาพและแนวทางการวิจัย พลังงานมวลชีวภาพในประเทศไทย

วราณี เตีย*

พิมพ์ แจ่มพอย*

กัสดาณ ชฤตพงษ์มาลี**

สมชาติ ไสภณณฤทธิ์***

ราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์

ราชบัณฑิตยสถาน

บทคัดย่อ

มวลชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูงสำหรับประเทศไทย รัฐบาลได้มีการวางแผนและกำหนดนโยบายในการส่งเสริมเพื่อพัฒนาและใช้ประโยชน์จากมวลชีวภาพ บทความนี้นำเสนอสถานภาพและแนวโน้มงานวิจัยด้านมวลชีวภาพ โดยได้ศึกษา มวลชีวภาพ ๔ รูปแบบ ได้แก่ เชื้อเพลิงมวลชีวภาพ เอทานอล ไบโอดีเซล และแก๊สชีวภาพ ข้อจำกัดโดยทั่วไปของการใช้มวลชีวภาพ คือ แหล่งมวลชีวภาพที่นำมาใช้ได้มักเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งมวลชีวภาพจากอุตสาหกรรมเกษตร เพื่อขยายประโยชน์จากการใช้มวลชีวภาพให้มากขึ้นจึงควรทำการวิจัยทางด้านการจัดการแหล่งมวลชีวภาพ การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ หรืออุปกรณ์ การลดต้นทุน นอกจากนี้ ควรมีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่นร่วมกันในการเผาไหม้ และการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าด้วยมวลชีวภาพสำหรับไบโอเอทานอลและไบโอดีเซล ควรมีการศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ระยะยาว รวมถึงการกำหนดมาตรฐานลักษณะเฉพาะของน้ำมันไบโอดีเซล นอกจากนี้ ควรมีการศึกษากการใช้ประโยชน์และเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับแก๊สชีวภาพด้วย

คำสำคัญ : มวลชีวภาพ, พลังงานหมุนเวียน, แนวทางการวิจัย

บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ ประเทศไทยเป็นประเทศที่ต้องนำเข้าพลังงานเชิงพาณิชย์ เนื่อง

จากแหล่งพลังงานเชิงพาณิชย์ที่ผลิตได้ภายในประเทศไม่เพียงพอต่อความต้องการ จึงต้องนำเข้าพลังงานมากกว่าร้อยละ ๖๐ ของความต้องการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ของประเทศ*

ใน พ.ศ. ๒๕๔๕ มูลค่าการนำเข้าพลังงาน เชิงพาณิชย์สุทธิรวมทั้งสิ้นสูงถึง ๒๖๖, ๕๘๖ ล้านบาท^๑ รัฐจึงได้กำหนดนโยบายให้ส่งเสริม จัดหา พัฒนา และใช้พลังงานทดแทนอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดการพึ่งพาแหล่งพลังงานจากต่างประเทศ เนื่องจากประเทศไทยมีผลผลิตทางการเกษตรมาก จึงมีของเหลือทางการเกษตรที่สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ ถึงแม้ปัจจุบันได้มีการใช้มวลชีวภาพเป็นแหล่งเชื้อเพลิงทั้งในภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือนแล้วบางส่วน แต่ก็ยังมีมวลชีวภาพเหลืออีกมากที่สามารถพัฒนามาใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ และบางส่วนยังมีการใช้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้น ในบทความนี้จะกล่าวถึงสถานการณ์และแนวทางการวิจัยเพื่อพัฒนาและส่งเสริมให้มีการใช้มวลชีวภาพมากขึ้น และเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

* รองศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

** นักศึกษาปริญญาโท คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

*** ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



วิธีดำเนินงานวิจัย

มวลชีวภาพที่ทำการศึกษามี ๔ รูปแบบ ได้แก่ เชื้อเพลิงมวลชีวภาพ เอทานอล ไบโอดีเซล และแก๊สชีวภาพ การดำเนิน งานวิจัยได้รวบรวมข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ ได้แก่ รายงานและบทความวิจัย ด้านพลังงานมวลชีวภาพ เพื่อนำมาศึกษาและเสนอแนวทางวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ก. ศึกษาศักยภาพของแหล่งพลังงานมวลชีวภาพ ได้แก่

- มวลชีวภาพจากการเกษตร ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม เช่น แกลบ ชานอ้อย ฯลฯ และมวลชีวภาพที่เป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง เช่น มันสำปะหลัง พืชน้ำมัน ฯลฯ

- มวลชีวภาพจากปศุสัตว์ เช่น ของเสียจากการขบถ่ายของสัตว์

- มวลชีวภาพจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมและขยะ

ข. ศึกษาสถานการณ์ภาพการใช้และงานวิจัยด้านพลังงานมวลชีวภาพของประเทศไทย

ค. วิเคราะห์ข้อมูลศักยภาพของแหล่งพลังงานมวลชีวภาพ สถานภาพการใช้และงานวิจัยที่ผ่านมา นำมาสรุปเสนอเป็นแนวทางงานวิจัยที่ควรดำเนินการต่อไปพลังงานมวลชีวภาพ

ผลการศึกษาและวิจารณ์ศักยภาพมวลชีวภาพของประเทศไทย

ปริมาณมวลชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรขึ้นอยู่กับผลผลิตทางการเกษตรและการใช้ในแต่ละปี ใน พ.ศ. ๒๕๔๓ ได้มีการประเมินศักยภาพมวลชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ๑๐ ชนิด ดังแสดงในตารางที่ ๑ จะเห็นได้ว่ามีปริมาณมวลชีวภาพเหลือใช้ทางการเกษตรที่ยังไม่ได้นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงยังมีอยู่อีกมาก คิดเป็นพลังงานรวมทั้งสิ้น $604,822 \times 10^6$ จูล

มูลสัตว์น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และขยะ สามารถนำมาผลิตเป็นแก๊สชีวภาพได้ ใน พ.ศ. ๒๕๔๓ ได้มีการประเมินศักยภาพศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลสัตว์ ๖ ชนิด ดังแสดงในตารางที่ ๒ มีศักยภาพรวมทั้งสิ้น $11,740 \times 10^6$ จูล (คิดที่ค่าความร้อนแก๊สชีวภาพผลิตจากมูลสัตว์เท่ากับ ๒๑ เมกะจูลต่อลบ.ม.) ซึ่งนับว่าเป็นพลังงานที่มาก สำหรับน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ๑๑ ประเภท ดังแสดงในตารางที่ ๓ มีศักยภาพรวมทั้งสิ้น $10,446 \times 10^6$ จูล (คิดที่ค่าความร้อนแก๊สชีวภาพผลิตจากน้ำเสียเท่ากับ ๒๔ เมกะจูลต่อลบ.ม.) จะเห็นได้ว่าโรงงานแป้งมันและโรงงานน้ำตาลมีศักยภาพสูงมากในส่วนของการผลิตแก๊สชีวภาพ

จากการฝังกลบขยะมีศักยภาพรวมทั้งสิ้น $23,042 \times 10^6$ จูล (คิดที่ค่าความร้อนแก๊สชีวภาพผลิตจากขยะเท่ากับ ๑๙.๕ เมกะจูลต่อลบ.ม.) ดังแสดงในตารางที่ ๔ ศักยภาพรวมของการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และขยะที่ได้จากการฝังกลบรวมทั้งหมดเท่ากับ $44,248 \times 10^6$ เมกะจูลต่อปี ถึงแม้ว่าศักยภาพที่ได้จากการฝังกลบจะมีค่ามาก แต่ในปัจจุบันการรวบรวมทำได้ยาก ดังนั้นจึงจะพิจารณาการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นสำคัญ

มวลชีวภาพสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ประเทศไทยมีพืชน้ำมันที่ทำการเกษตรอย่างเป็นระบบและเชิงพาณิชย์ ได้แก่ ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ปาล์มน้ำมัน มะพร้าว ละหุ่ง ซึ่งมีผลผลิตดังแสดงในตารางที่ ๕ จะเห็นได้ว่าปาล์มน้ำมันมีศักยภาพสูงที่สุด การนำน้ำมันพืชมาใช้มีปัญหาหลักคือ ความหนืด การนำน้ำมันพืชมาสังเคราะห์เป็นเอสเตอร์ หรือไบโอดีเซลจะทำให้น้ำมันปาล์มมีความหนืดลดลงและมีความคงตัวมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จุดวาบไฟของไบโอดีเซลสูงกว่าน้ำมันดีเซลจึงมีความปลอดภัยในการใช้และการขนส่ง



ตารางที่ ๑ ศักยภาพพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พ.ศ. ๒๕๕๓

ชนิด	ผลผลิต/ปี (พันตัน)	วัสดุเหลือใช้	ปริมาณ วัสดุเหลือใช้ (พันตัน)	แพคเกจวัสดุ เหลือใช้ที่ยัง ไม่มีการใช้	ปริมาณวัสดุ เหลือใช้ที่ยัง ไม่มีการใช้ (พันตัน)	ค่าพลังงาน ความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพ พลังงาน (*10 ⁶ MJ)
อ้อย	๕๓,๔๖๔	ชานอ้อย	๑๕,๕๖๗	๐.๒๐๗	๓,๒๒๒	๑๔.๔๐	๔๖,๔๐๑
		ส่วนยอดและใบ	๑๖,๑๕๕	๐.๙๕๖	๑๕,๙๒๙	๑๗.๓๙	๒๗๗,๐๐๖
ข้าว	๒๔,๑๗๒	แกลบ	๕,๕๖๐	๐.๔๙๓	๒,๗๔๑	๑๔.๒๗	๓๙,๑๑๒
		ฟาง (ส่วนบน)	๑๐,๘๐๕	๐.๖๘๔	๗,๓๙๑	๑๐.๒๔	๗๕,๖๗๙
ปาล์ม	๓,๒๕๖	ทะลายเปล่า	๑,๓๗๔	๐.๕๘๔	๘๑๔	๑๗.๘๖	๑๔,๕๓๕
น้ำมัน		สันไยปาล์ม	๔๗๙	๐.๑๓๔	๖๔	๑๗.๖๒	๑,๑๓๐
		กะลาปาล์ม	๑๖๐	๐.๐๓๗	๖	๑๘.๔๖	๑๐๙
		ก้าน	๘,๔๗๙	๑.๐๐๐	๘,๔๗๙	๙.๘๓	๘๓,๓๔๕
	ทะลายตัวผู้	๗๕๙	๑.๐๐๐	๗๕๙	๑๖.๓๓	๑๒,๓๘๙	
มันสำปะหลัง	๑๙,๐๖๔	ลำต้น	๑,๖๗๘	๐.๔๐๗	๖๘๓	๑๘.๔๒	๑๒,๕๗๗
ข้าวโพด	๔,๒๘๖	ซังข้าวโพด	๑,๑๗๐	๐.๖๗๐	๗๘๔	๑๘.๐๔	๑๔,๑๔๒
มะพร้าว	๑,๔๐๐	เปลือก	๕๐๗	๐.๕๙๕	๓๐๒	๑๖.๒๓	๔,๘๙๔
	กะลา	๒๒๗	๐.๓๗๘	๘๕	๑๗.๙๓	๑,๕๑๘	
		ทะลาย	๖๙	๐.๘๔๓	๕๘	๑๕.๔๐	๘๙๑
		ทางมะพร้าว	๓๑๕	๐.๘๐๙	๒๕๕	๑๖.๐๐	๓,๐๗๗
ถั่วเหลือง	๓๑๙	ลำต้น, ใบ, เปลือก	๘๔๙	๐.๗๖๐	๖๙๖	๑๙.๔๔	๑๒,๕๕๑
ข้าวฟ่าง	๑๔๒	ใบ, ต้น	๑๗๘	๐.๖๔๘	๑๑๕	๙.๒๓	๒,๒๑๕
ฝ้าย	๓๖	ลำต้น	๑๑๖	๑.๐๐๐	๑๑๖	๑๔.๔๙	๑,๖๘๖
ถั่วลิสง	๑๓๘	เปลือก	๔๕	๑.๐๐๐	๔๕	๑๒.๖๖	๕๖๔
รวม							๖๐๔,๘๒๒

ที่มา : กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน



ตารางที่ ๒ ศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลสัตว์ พ.ศ. ๒๕๔๓

ชนิดสัตว์	จำนวน (ตัว)	ปริมาณมูล สัตว์ (กก./ ตัว/วัน)	อัตรา ส่วนมูลที่ เก็บได้	อัตราส่วน ของแข็ง ระเหย (ร้อยละ)	อัตราส่วน แก๊สชีวภาพ ที่ผลิตได้ (ลบ.ม./กก. ของแข็ง ระเหย)	ปริมาณแก๊ส ชีวภาพ (10 ⁶ ลบ.ม./ ปี)	ศักยภาพ พลังงาน (*10 ⁶ MJ)
สุกร	๗,๗๖๑,๐๕๖	๒.๐	๐.๘	๒๔.๘๔	๐.๒๑๗	๑๓๔.๖๗	๒,๘๒๘
โคเนื้อ	๔,๙๐๐,๖๑๔	๕.๐	๐.๕	๑๓.๓๗	๐.๓๐๗	๑๘๓.๕๕	๓,๘๕๕
โคนม	๓๐๗,๕๒๗	๑๕	๐.๘	๑๓.๓๗	๐.๓๐๗	๕๕.๓๖	๑,๑๖๓
กระบือ	๑,๗๐๒,๒๒๓	๘.๐	๐.๕	๑๓.๖๔	๐.๒๘๖	๙๖.๙๕	๒,๐๓๖
ไก่	๑๗๒,๒๔๗,๕๖๑	๐.๐๓	๐.๘	๒๒.๓๔	๐.๒๔๒	๘๑.๕๗	๑,๗๑๓
เป็ด	๒๗,๘๘๔,๐๔๑	๐.๐๓	๐.๔	๑๗.๔๔	๐.๓๑๐	๖.๖๐	๑๓๙
ช้าง	๒,๑๗๘	๔๐	๐.๕	๒๑.๖๑	๐.๒๔๑	๐.๘๓	๑๗
รวม						๕๕๙.๕๔	๑๑,๗๕๐

ที่มา : กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน

และไบโอดีเซลยังมีค่าซีเทนสูงกว่าน้ำมันดีเซลอีกด้วย กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ ได้ศึกษาพื้นที่ที่เหมาะสมและพื้นที่ปลูกจริงของปาล์มน้ำมัน พบว่าสามารถขยายพื้นที่เพาะปลูกได้อีก ๑๑.๙๙๓,๒๑๔ ไร่ ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลอยู่ในช่วง ๔.๐๐-๑๔.๕๐ บาทต่อลิตร ขึ้นกับราคาวัตถุดิบ ต้นทุนสำหรับกระบวนการ transesterification อยู่ในช่วง ๒.๕๐- ๓.๐๐ บาทต่อลิตร

สำหรับเอทานอลสามารถผลิตได้จากผลผลิตทางเกษตรและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ วัตถุดิบ

ประเภทแป้ง เช่น มันสำปะหลัง วัตถุดิบประเภทน้ำตาล เช่น อ้อย กากน้ำตาล และเศษวัสดุที่เป็นเซลลูโลส เช่น ฟางข้าว ชีเสื่อย ฯลฯ สำหรับประเทศไทย วัตถุดิบที่เหมาะสมและสามารถนำมาผลิตเอทานอล ได้แก่ มันสำปะหลัง กากน้ำตาล และอ้อย พื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังของประเทศไทยประมาณ ๖.๕ ล้านไร่ จะผลิตมันสำปะหลังได้ ๒๐ ล้านตันต่อปี (เมื่อคิดที่ปริมาณผลผลิต ๓ ตันต่อไร่) หัวมันสำปะหลังได้นำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังประมาณ ๔ ล้านตันต่อปี ผลิตมัน

เส้น/มันอัดเม็ดอีกประมาณ ๘ ล้านตันต่อปี จะทำให้มีหัวมันสำปะหลังเหลืออยู่ประมาณ ๔ ล้านตันต่อปี สามารถนำไปผลิตเป็นเอทานอลได้ ๑.๘๓ ล้านลิตรต่อวัน การใช้มันสำปะหลังควรใช้ในรูปแบบของมันเส้นเพราะสามารถแปรรูปได้ง่าย และสามารถเก็บไว้ใช้ได้ตลอดปี ต้นทุนการผลิตเอทานอลจากมันสดอยู่ในช่วง ๑๑.๙ - ๑๔.๓ บาทต่อลิตร (ที่ราคามันสำปะหลังอยู่ในช่วง ๑,๐๐๐ - ๑,๔๐๐ บาท/ตัน) และจากมันเส้น ๑๑.๕๕-๑๒.๕๕ บาทต่อลิตร



ตารางที่ ๓ ศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรม พ.ศ. ๒๕๕๓

ประเภท อุตสาหกรรม	หน่วย	ผลผลิต (หน่วย/ปี)	น้ำเสีย/ ผลผลิต (ลบ.ม./ตัน)	ปริมาณ น้ำเสีย (ลบ.ม./ปี)	แก๊สชีวภาพ (ลบ.ม./ปี)	ศักยภาพ พลังงาน (*10 ⁶ MJ)
โรงฆ่าสัตว์	ตัน	๒๒๕,๘๕๖	๗๔.๕๕	๑๖,๘๓๔,๕๖๑	๑๕,๓๙๐,๐๕๕	๓๖๙
โรงงานน้ำตาล	ตัน	๖,๔๔๗,๐๐๐	๑๑.๘๒	๗๖,๒๐๓,๕๔๐	๘๙,๓๗๑,๕๑๒	๒,๑๔๕
โรงงานสุรา	ลิตร	๗๕,๓๘๐,๐๐๐	๓.๔๐	๒๕๖,๒๙๒	๒,๕๕๓,๖๗๕	๖๒
โรงงานเบียร์	ลิตร	๑,๑๖๕,๐๐๐,๐๐๐	๔.๑๒	๔,๗๙๙,๘๐๐	๔,๕๔๖,๓๗๑	๑๐๙
โรงงานน้ำมันดิบ	ตัน	๔๙๑,๓๗๐	๔.๐๕	๑,๙๙๐,๐๔๙	๑,๐๑๔,๙๒๕	๒๔
โรงงานสับปรด กระป๋อง	ตัน	๓๙๑,๒๘๒	๔.๙๘	๑,๙๔๘,๕๘๔	๑๒,๘๔๙,๗๔๕	๓๐๘
โรงงานอาหารทะเล แช่แข็ง	ตัน	๔๙๕,๑๗๔	๓๑.๑๔	๑๕,๔๑๙,๗๑๘	๑๖,๐๓๖,๕๐๗	๓๘๕
โรงงานอาหารทะเล กระป๋อง	ตัน	๕๕๘,๒๙๗	๓๑.๑๔	๑๗,๓๘๕,๓๖๙	๔๗,๒๙๕,๑๕๗	๑,๑๓๕
โรงงานน้ำอัดลม	ตัน	๑,๓๘๑,๐๐๐	๙.๓๐	๑๒,๘๔๓,๓๐๐	๑๒,๒๔๗,๓๗๑	๒๙๔
โรงงานแป้งมัน	ตัน	๒,๒๒๕,๑๒๕	๒๔.๗๒	๕๕,๐๐๕,๐๙๐	๑๖๖,๒๖๙,๓๘๖	๓,๙๙๐
โรงงานน้ำมันปาล์ม	ตัน	๓,๒๕๖,๐๐๐	๑.๐๐	๓,๒๕๖,๐๐๐	๖๗,๗๒๔,๘๐๐	๑,๖๒๕
รวม					๔๓๕,๓๒๙,๕๐๒	๑๐,๔๔๖

ที่มา : กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน

(ที่ราคามันสำปะหลังเส้นอยู่ในช่วง ๒,๕๐๐-๒,๙๐๐ บาท/ตัน) ปัจจุบันสามารถใช้เทคโนโลยีการผลิตเอทานอลโดยวิธี Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF) สามารถลดต้นทุนการผลิตเอทานอลลงได้ร้อยละ ๒๕ ในส่วนของ ต้นทุนการหมักปรกติ



ตารางที่ ๔ ศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากขยะที่ได้จากการฝังกลบ พ.ศ. ๒๕๔๓

ภูมิภาค	ปริมาณขยะ (ตัน/ปี)	สัดส่วนขยะ ที่ฝังกลบ (ร้อยละ)	ปริมาณ ขยะที่ ฝังกลบ (ตัน/ปี)	ปริมาณแก๊ส ชีวภาพจากการ ฝังกลบ (*10 ⁶ ลบ.ม.)	พลังงานจากแก๊ส ชีวภาพจากการฝัง กลบ (*10 ⁶ MJ)
กรุงเทพและปริมณฑล	๓,๓๓๒,๔๕๐	๘๕	๒,๘๓๒,๕๘๓	๒๘๓.๒๖	๕,๕๒๓.๓๔
เขตเทศบาลและเมืองพัทยา					
-ภาคกลางและตะวันออก	๑,๘๖๘,๘๐๐	๘๕	๑,๕๘๘,๔๘๐	๑๕๘.๘๕	๓,๐๙๗.๕๔
-ภาคเหนือ	๗๓๗,๖๖๕	๘๕	๖๒๗,๐๑๕	๖๒.๗๐	๑,๒๒๒.๖๘
-ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	๙๘๙,๑๕๐	๘๕	๘๔๐,๗๗๘	๘๔.๐๘	๑,๖๓๙.๕๒
-ภาคใต้	๗๐๕,๙๑๐	๘๕	๖๐๐,๐๒๔	๖๐.๐๐	๑,๑๗๐.๐๕
นอกเขตเทศบาล	๖,๒๙๘,๐๗๕	๘๕	๕,๓๕๓,๓๖๔	๕๓๕.๓๔	๑๐,๔๓๙.๐๖
รวม	๑๓,๙๓๒,๐๕๐		๑๑,๘๕๒,๓๖๔	๑,๑๘๔	๒๓,๐๙๒.๓๗

ที่มา : กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน*

ตารางที่ ๕ พื้นที่และผลผลิตของพืชน้ำมันที่สำคัญของไทย ปีเพาะปลูก ๒๕๔๔/๒๕๔๕

พืชน้ำมัน	พื้นที่เพาะปลูก (*พันไร่)	ผลผลิต (พันตัน)	ผลผลิต/ไร่ (กก./ไร่)
ปาล์มน้ำมัน	๑,๔๕๗	๔,๐๘๙	๒,๘๐๗
มะพร้าว	๒,๐๓๗	๑,๓๙๖	๖๘๕
ถั่วเหลือง	๑,๓๒๔	๒๙๒	๒๒๗
ถั่วลิสง	๕๒๑	๑๒๙	๒๔๒
งา	๓๙๔	๓๙	๙๙
ละหุ่ง	๘๔	๙	๑๐๗

ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร



การใช้้อยเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลนั้นไม่เหมาะสม เนื่องจากปริมาณ้อยไม่เพียงพอต่อความต้องการของอุตสาหกรรมน้ำตาล กากน้ำตาลเป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล ในการผลิตน้ำตาลจาก้อยประมาณ ๕๐ ล้านตันต่อปี จะได้กากน้ำตาลประมาณร้อยละ ๕ หรือประมาณ ๒.๕ ล้านตันต่อปี กากน้ำตาลนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารภายในประเทศประมาณ ๑.๕ ล้านตัน และส่งออกประมาณ ๑ ล้านตัน เนื่องจากราคาการส่งออกของกากน้ำตาลต่ำกว่าราคาของเอทานอลมาก การนำกากน้ำตาลในส่วนของการส่งออกมาเพิ่มมูลค่าโดยการผลิตเป็นเอทานอล ถ้าสามารถส่งออกเอทานอลแทนกากน้ำตาลได้จะเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่ประเทศ โดยกากน้ำตาล ๑ ล้านตัน จะสามารถนำมาผลิตเอทานอลได้ประมาณ ๘๐๐,๐๐๐ ลิตรต่อวัน ต้นทุนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลอยู่ในช่วง ๑๑.๓ - ๑๕.๓ บาทต่อลิตร (ที่ราคากากน้ำตาลอยู่ในช่วง ๑,๕๐๐ - ๒,๕๐๐ บาทต่อตัน)

สถานการณ์การใช้พลังงานมวลชีวภาพของประเทศไทย

ในพ.ศ. ๒๕๔๕ ประเทศไทยได้จัดหามวลชีวภาพมาใช้ในพลังงานขั้นต้นรวมทั้งสิ้น ๔๕,๑๖๗ พันตัน หรือเท่ากับ ๑๓,๘๒๑ พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็นร้อยละ ๑๖.๑ ของการจัดหาพลังงานขั้นต้นทั้งหมดของประเทศ ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตได้ภายในประเทศ รวมทั้งสิ้น ๑๓,๘๑๔ พันตัน

เทียบเท่าน้ำมันดิบ ได้แก่ ไม้พินร้อยละ ๗๐.๔ ที่เหลือเป็นขาน้อย และแกลบ คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ ๒๐.๒ และ ๘.๘ ตามลำดับ ปริมาณร้อยละ ๖๕ ของไม้พินนำไปใช้ในการแปรรูปเป็นถ่านไม้ มีการนำเข้าถ่านไม้เล็กน้อยรวมทั้งสิ้น ๑๐ พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็นมูลค่าประมาณ ๓๔ ล้านบาท และมีการส่งออกถ่านไม้รวมทั้งสิ้น ๓ พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็นมูลค่า ๖๔,๘๐๒ ล้านบาท รัฐบาลได้สนับสนุนให้มีการใช้มวลชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า โดยรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตรายเล็กและเล็กมากที่ใช้พลังงานนอกรูปแบบเป็นเชื้อเพลิง ใน พ.ศ. ๒๕๔๕ มีการใช้แกลบ ขาน้อยและไม้พินและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอื่น ๆ เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น ๒,๒๔๘ พันตัน ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตจากโรงงานน้ำตาลประมาณร้อยละ ๗๕ นอกจากนี้ ยังมีการใช้แบล็กลิเคอร์ และแก๊สเหลือใช้จากกระบวนการผลิตอีกประมาณ ๒,๓๑๘ x ๑๐^๖ จูล มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าซึ่งส่วนใหญ่ผลิตจากโรงงานกระดาษประมาณร้อยละ ๗๕ ที่เหลือผลิตจากโรงงานผลิตเม็ดพลาสติก

สำหรับการใช้มวลชีวภาพในพลังงานขั้นสุดท้ายในสาขาเศรษฐกิจต่าง ๆ รวมทั้งสิ้น ๔,๐๔๓ พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ได้แก่ ไม้ (ร้อยละ ๓๗.๐) ถ่านไม้ (ร้อยละ ๒๕.๕) ขาน้อย (ร้อยละ ๒๗.๖) และแกลบ (ร้อยละ ๙.๙) ซึ่งใช้ในครัวเรือนประมาณร้อยละ ๕๕.๗ ส่วนใหญ่ใช้ไม้และถ่านไม้ ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ ๔๔.๓ ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ขาน้อยและแกลบ

ไบโอดีเซล ปัจจุบันยังมีปริมาณวัตถุดิบไม่เพียงพอที่จะนำมาผลิตไบโอดีเซล ในพ.ศ. ๒๕๔๓ ประเทศไทยสามารถผลิตน้ำมันปาล์มดิบภายในประเทศได้ทั้งหมด ๕๙๗,๒๘๑ ตัน ในขณะที่มีความต้องการใช้ในอุตสาหกรรมต้องการถึง ๕๗๖,๘๕๘ ตัน ซึ่งเกือบทั้งหมดถูกใช้ไปเพื่อการบริโภค

เอทานอล จากความเป็นไปได้ของการผลิตเอทานอลในเชิงพาณิชย์ รัฐบาลจึงมีนโยบายในการสนับสนุนส่งเสริมการผลิตเอทานอลจากพืชเป็นเชื้อเพลิง ส่งผลให้มีการจัดตั้งโรงงานผลิตเอทานอลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงแล้วจำนวน ๘ ราย มีกำลังการผลิตรวม ๑,๕๐๒,๐๐๐ ลิตรต่อวัน

แก๊สชีวภาพ ในพ.ศ. ๒๕๔๖ ประเทศไทยมีระบบผลิตแก๊สชีวภาพรวมทั้งสิ้น ๑๒๒,๘๕๔ ลบ.ม จากการเลี้ยงสัตว์มีทั้งประเภทครัวเรือนและเพื่อการค้า ส่วนน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมจากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ประมาณ ๖๑,๓๒๐ ลบ.ม. ต่อวัน ที่ค่าความร้อนของแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียมี่ค่าเท่ากับ ๒๕ เมกะจูลต่อลบ.ม. จะได้เป็นพลังงานรวมประมาณ ๑,๔๗๑,๖๘๐ เมกะจูลต่อวัน

สถานการณ์วิจัยด้านพลังงานมวลชีวภาพของประเทศไทย

งานวิจัยด้านเชื้อเพลิงมวลชีวภาพได้มีการปรับปรุงเสาะหาให้มีมวลชีวภาพเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น เตา



ถ่านไม้^{๖๖} เตาเผาถ่านแบบไซโคลน^{๖๗} เตาฟลูอิดไสบีค^{๖๘} เนื่องจากมวลชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงแข็งจึงได้มีการวิจัยเพื่อเปลี่ยนให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊สก่อนที่จะมีการเผาไหม้เพื่อใช้ประโยชน์ได้กว้างมากขึ้น^{๖๙} สำหรับการนำมวลชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า ได้มีงานวิจัยที่ประเมินศักยภาพด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของการใช้ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม^{๗๐} โรงสีข้าว^{๗๑} โรงงานน้ำตาล^{๗๒} โรงงานไม้ยางพารา^{๗๓} ถ้าพบว่าเดิมโรงงานบางแห่งได้มีการผลิตกำลังงานจากมวลชีวภาพอยู่แล้ว แต่ใช้ไอน้ำที่ความดันไม่สูงมากนักก็จะพิจารณาปรับปรุงระบบให้ใช้ไอน้ำที่ความดันสูงขึ้นเพื่อจะผลิตกำลังงาน/ไฟฟ้าได้มากขึ้น นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยเพื่อนำความร้อนจากการเผาไหม้ไปใช้ประโยชน์ เช่น การอบแห้งข้าวเปลือก^{๗๔}

งานวิจัยด้านไบโอดีเซล มีการวิจัยด้านกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำมันปาล์ม^{๗๕} น้ำมันพืชใช้แล้ว^{๗๖} พบว่าไบโอดีเซลมีสมบัติสามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้ และมีงานวิจัยที่ทดสอบการใช้งานน้ำมันไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์เพื่อดูสมรรถนะและปัญหาต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดได้ นอกจากนี้ มีการทดลองนำน้ำมันดีเซลไปผสมกับน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ โดยตรงในสัดส่วนต่าง ๆ ^{๗๗, ๗๘} แล้วไปทดสอบเดินเครื่องยนต์ พบว่าปริมาณแคว้นต่ำขึ้นอยู่กับสัดส่วนน้ำมันพืชที่ผสม อย่างไรก็ตาม การทดสอบกับเครื่องยนต์ส่วนใหญ่

เป็นการทดสอบระยะสั้น

งานวิจัยด้านเอทานอล มีการวิจัยหาแนวทางลดต้นทุนในกระบวนการผลิตในการกลั่นโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาเสริม^{๗๙} และการหมัก^{๘๐} การประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตเอทานอลจากผลผลิตทางเกษตร^{๘๑, ๘๒} และนำเอทานอลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์แก๊สโซลีนเพื่อทดสอบสมรรถนะและการสึกหรอของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยด้านบูรณาการกระบวนการผลิตเอทานอลกับโรงงานน้ำตาล และโรงงานแปรรูปมะพร้าว^{๘๓} สามารถลดต้นทุนค่าขนส่งวัตถุดิบส่วนการบูรณาการด้านพลังงานสามารถลดต้นทุนด้านพลังงานได้

งานวิจัยด้านแก๊สชีวภาพ ได้มีการวิจัยระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลสัตว์ และน้ำเสียจากอุตสาหกรรมทั้งระบบเดี่ยว ๆ ของแต่ละแห่ง และระบบบำบัดรวมขนาดใหญ่^{๘๔, ๘๕} รวมถึงการใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพและการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของการลงทุน

แนวทางวิจัยพลังงานมวลชีวภาพของประเทศไทย

ปัญหาโดยทั่วไปของการใช้มวลชีวภาพ คือ แหล่งมวลชีวภาพที่นำมาใช้ได้มีไม่สม่ำเสมอ เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล โดยเฉพาะจากอุตสาหกรรมเกษตร โดยส่วนใหญ่มวลชีวภาพแต่ละชนิดจะปลูกและมีผลผลิตตามฤดูกาล และยังขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับราคา และความต้องการของตลาดซึ่งส่งผลให้เกษตรกรปรับเปลี่ยน

ชนิดของพืชที่เพาะปลูก และการเปลี่ยนแปลงพื้นที่การเกษตรไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นอีกด้วย เนื่องจากมวลชีวภาพมีอยู่อย่างกระจัดกระจาย ทำให้รวบรวมได้ยากและมีปริมาณมากทำให้ค่าขนส่งสูง ดังนั้น การพัฒนาเพื่อนำมวลชีวภาพที่ยังไม่ได้ใช้มาผลิตพลังงานได้เพิ่มขึ้น จึงควรมีการวิจัยด้านการจัดการมวลชีวภาพที่ใช้เป็นวัตถุดิบ เช่น การจัดหา รวบรวม และจัดเก็บ เพื่อสามารถนำมาผลิตพลังงานได้ต่อเนื่องไม่ขาดช่วง และมีต้นทุนวัตถุดิบต่ำ นอกจากนี้ ควรมีการวิจัยเชิงนโยบายหามาตรการส่งเสริมเพื่อจูงใจให้มีการใช้มวลชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนมากขึ้น

ในการใช้มวลชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง ควรทำการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเตาหรือห้องเผาไหม้มวลชีวภาพด้วย และควรใช้กับเชื้อเพลิงมวลชีวภาพได้หลาย ๆ ประเภท เนื่องจากเตาเผามวลชีวภาพแต่ละเตาจะออกแบบมาเพื่อใช้กับมวลชีวภาพแต่ละชนิด ดังนั้นถ้ามวลชีวภาพชนิดดังกล่าวมีปริมาณไม่เพียงพอจำเป็นต้องพึ่งพามวลชีวภาพประเภทอื่น ก็จะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ต่ำ นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาการเผาไหม้มวลชีวภาพร่วมกับเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์บางชนิด เช่น ถ่านหิน เพื่อหาแนวทางเสริมการให้ใช้เชื้อเพลิงมวลชีวภาพทดแทนถึงแม้จะมีเชื้อเพลิงมวลชีวภาพไม่เพียงพออย่างต่อเนื่องตลอดช่วงความต้องการใช้งานและควรมีการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงมวลชีวภาพอื่นที่ยังไม่ได้นำมาใช้ให้มากขึ้น



สำหรับไบโอดีเซล จากการศึกษาพบว่า ปาล์มน้ำมันมีศักยภาพมากที่สุด ประเทศไทยถึงแม้จะมีพื้นที่ที่เหมาะสมในการปลูกปาล์มน้ำมันหลายพื้นที่ แต่มีข้อจำกัดบางประการทำให้ไม่ได้ใช้พื้นที่เหล่านั้นในการเพาะปลูก และเมื่อเปรียบเทียบกับต่างประเทศ ประเทศไทยยังมีผลผลิตต่อไร่ต่ำ ทำให้ต้นทุนการผลิตมีค่าสูง เนื่องจากการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวยังไม่ดีพอจึงทำให้คุณภาพปาล์มน้ำมันที่สกัดได้ยังไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้น ควรมีงานวิจัยด้านการเกษตรเพื่อใช้พื้นที่ในการเพาะปลูกที่เหมาะสม การคัดเลือกและปรับปรุงพันธุ์ปาล์ม เพื่อหาวิธีขยายพันธุ์ที่ดี การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชาวไร่ เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวและหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อควบคุมคุณภาพของปาล์มน้ำมันทั้งหมดนี้เพื่อเพิ่มผลผลิตต่อไร่ให้มีค่าสูงขึ้น ลดต้นทุนของวัตถุดิบ และให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาวิจัยเพื่อลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากไบโอดีเซลที่ผลิตมาจากวัตถุดิบหลายชนิดที่มีคุณภาพและต้นทุนการผลิตแตกต่างกัน จึงควรมีการศึกษาเพื่อกำหนดมาตรฐานคุณภาพของไบโอดีเซล และควรมีการศึกษาผลกระทบระยะยาวของเครื่องยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

การวิจัยด้านเอทานอล จากการศึกษาข้อมูลพบว่าวัตถุดิบที่เหมาะสมจะนำมาผลิตเอทานอล ได้แก่ มัน

สำปะหลัง และกากน้ำตาล เพราะไม่มีผลกระทบต่อการใช้บริโภค สำหรับมันสำปะหลังควรศึกษาวิธีการวางแผนการกำหนด พื้นที่เพาะปลูกเพื่อให้เก็บเกี่ยวผลผลิตได้อย่างต่อเนื่อง และควรมีการวิจัยเพื่อกำหนดมาตรฐานอัตราส่วนผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำมันเบนซิน และควรมีการศึกษาผลกระทบระยะยาวเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินผสมนี้ด้วย

สำหรับแก๊สชีวภาพ ยังมีโรงงานและฟาร์มเป็นจำนวนมากที่มีศักยภาพ แต่ยังไม่มีระบบการผลิตแก๊สชีวภาพ จึงควรมีงานวิจัยด้านการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตและประยุกต์ใช้แก๊สชีวภาพในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้ได้รูปแบบ ขนาดระบบ และการนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสม ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์บางแห่งยังพบว่ามีปัญหาในด้านความเสียหายของอุปกรณ์ที่ใช้เนื่องจากเกิดการกัดกร่อนที่เกิดจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เมื่อรวมกับน้ำจะเป็นกรดซัลฟิวริกมีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของแก๊สชีวภาพที่ได้จากมูลสัตว์ หรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม จึงควรมีแนวทางวิจัยของระบบกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพด้วย

สรุป

การศึกษาศักยภาพของแหล่งพลังงานมวลชีวภาพ สถานภาพของการใช้และงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อเสนอ

แนวทางวิจัยเพื่อพัฒนาการผลิต และใช้พลังงานจากมวลชีวภาพให้มากขึ้น มวลชีวภาพที่ศึกษามี ๔ รูปแบบ ได้แก่ เชื้อเพลิงมวลชีวภาพ ไบโอดีเซล เอทานอล และแก๊สชีวภาพ พบว่ายังมีแหล่งมวลชีวภาพอีกมากที่ยังไม่ได้นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง และข้อจำกัดโดยทั่วไปของการใช้มวลชีวภาพ คือ แหล่งวัตถุดิบที่นำมาใช้มีปริมาณเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เก็บรวมยาก และมีต้นทุนสูง ดังนั้นเพื่อลดข้อจำกัดของแหล่งพลังงานมวลชีวภาพ ควรมีแนวทาง วิจัยด้านการจัดการแหล่งวัตถุดิบ และการลดต้นทุนวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตพลังงาน การเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานมวลชีวภาพ รวมทั้งหาแนวทางเพิ่มการใช้มวลชีวภาพที่ยังไม่มีการพัฒนามาใช้มาผลิตพลังงาน เช่น ชังข้าวโพด ฟางข้าว ทะลายปาล์มเปล่า ด้านเอทานอลและไบโอดีเซล ควรมีงานวิจัยด้านการศึกษасรรณณะและผลกระทบระยะยาวของเครื่องยนต์ และการกำหนดมาตรฐานคุณภาพของเชื้อเพลิง สำหรับแก๊สชีวภาพควรมีงานวิจัยในการศึกษาการใช้ประโยชน์ และศึกษาความเป็นไปได้ของเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตและใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย



เอกสารอ้างอิง

๑. คณะทำงานวารสารนโยบายพลังงาน, สถานการณ์พลังงานของไทยปี ๒๕๔๕, วารสารนโยบายพลังงาน, ๒๕๔๖, ฉบับที่ ๕๕, หน้า ๓๔-๕๐.
๒. รายงานพลังงานของประเทศไทยปี ๒๕๔๕, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรุงเทพฯ, ๒๕๔๖.
๓. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, สกอกภาพพลังงานชีวภาพ, http://๒๐๓.๕๕๐.๒๕๔.๔/dedc/renew/bio_p.htm, เมษายน ๒๕๔๖.
๔. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, สถิติการเกษตรของประเทศไทยปีเพาะปลูก พ.ศ. ๒๕๔๔-๒๕๔๕, <http://๐๔๔.๐๔๔.๐๔๔.๔/statistic/yearbook/๒๐๐๔-๐๔๔.๔>, เมษายน ๒๕๔๖.
๕. สุรศักดิ์ ศรีกุล, สุวิทย์ นิตยภัทรพงศ์ และราช ไชยวิธ, เอกสารประกอบการประชุมระดมความคิด เรื่อง แนวทางการวิจัยและพัฒนาไบโอดีเซลสู่เชิงพาณิชย์, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ๒๕๔๔, หน้า B-1-B-18.
๖. ถนัดพร ศรีรอด, พูนสุข ประเสริฐธรรม, สมพร อภิธานนท์ และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, รายงานการวิจัยการศึกษาศาสนาภาพวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ, ๒๕๔๔, ๑๑๒ หน้า.
๗. คณะกรรมการพลังงาน ตามรัฐธรรมนูญ, วัตถุดิบสำหรับผลิตเอทานอล, พลังงานทดแทน เอทานอล และไบโอดีเซล, กรุงเทพฯ, ๒๕๔๕, หน้า ๑๐๗-๑๐๘.
๘. ถนัดพร ศรีรอด, เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์ทิพย์, เอื้อ ธีโรบล, พิพัฒน์ วีระदार และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, รายงานการวิจัยการศึกษาศาสนาภาพวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแก๊สโซฮอล์, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ, ๒๕๔๔, ๑๑๔ หน้า.
๙. รายงานไฟฟ้าของประเทศไทย ๒๕๔๕, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรุงเทพฯ, ๒๕๔๖.
๑๐. ธนาคารกรุงเทพ : Bangkok Bank, ความคืบหน้าการผลิตเอทานอลเป็นเชื้อเพลิง, เมษายน ๒๕๔๖, http://www.bangkokbank.com/download/special_Ethanol.pdf, ๒๐๐๓.
๑๑. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, สถานภาพการไฟฟ้าพลังงานชีวภาพ:

น้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม, มกราคม ๒๕๔๖, <http://๒๐๓.๕๕๐.๒๕๔.๔/renew/status.asp>.

๑๒. ภาพยนตร์ ถัดจากวังวาล, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, ๒๕๔๖.
๑๓. บุญเรือง ศรีสวัสดิ์, การปรับปรุงสมรรถนะเตาเผาแกลบ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, ๒๕๔๕.
๑๔. สุวิทย์ เตอ, ภัทวิศ หุกอมพันธ์, พรเทพ จิตลิก, แสง แซ่เต๋ และ ทนงค์ ฉายาวัฒน์, "การเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาฟลูอิดไจซ์เบด", วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ๒๕๔๖, ปีที่ ๒๒, ฉบับที่ ๒, หน้า ๔๖-๖๓.
๑๕. นิรมล สุทธิเลิศวิทยาการ และคณะ, ๒๕๓๗, การหาสภาวะที่เหมาะสมกับบอมมอนนอกโซลที่ติดตั้งของเครื่องผลิตก๊าซชีวภาพแบบไหลขึ้นโดยวิธีการคั่นหาแบบ Simplex, รายงานการประชุมทางวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๕-๑๑ พฤษภาคม ๒๕๓๗, หน้า ๗๖.
๑๖. สุรศักดิ์ สุวณัฐ, การวิเคราะห์ระบบผลิตพลังงานร่วมในโรงงานปาล์มน้ำมัน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, ๒๕๓๕.
๑๗. วรวิทย์ เตอ, สมชาติ โสภณพฤกษ์ และ สุวิทย์ เรืองเดช, "ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมในโรงสีข้าวขาวของประเทศไทย", วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, ๒๕๔๕, ปีที่ ๑๑, ฉบับที่ ๒, หน้า ๕๐-๕๖.
๑๘. จิระพันธุ์ เมืองจากนิล, บูรณาการระบบพลังงานความร้อนและไฟฟ้าในโรงงานน้ำตาล, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, ๒๕๔๖.
๑๙. สุธีระ ประเสริฐธรรม, การจำลองโรงจักรผลิตพลังงานร่วมความร้อนและไฟฟ้าโดยชีวภาพ, สำนักงานคณะกรรมการนโยบายแห่งชาติ, ๒๕๔๖, ๕๕๓ หน้า.
๒๐. เอกรินทร์ โขภกรนิฏ, สมชาติ โสภณพฤกษ์, และ วรวิทย์ เตอ, การอบแห้งข้าวหนึ่งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไจซ์เบด, รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๔, ๒๕๔๖, หน้า ๒๕๗-๓๐๔.
๒๑. กนกพร รณากิจ, พงษ์ศักดิ์ คำบุญ และ จินดา เจริญพรพาณิชย์, การทำไบโอดีเซลจากไขมันปาล์มบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์

จุลระเบิดด้วยการอัด, รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๑๖, ๒๕๔๕, หน้า ๖๖-๖๗.

๒๒. วีระระ ถอยสมุทร, อุทราวิศร, ทรงฤทธิ์, สุรชัย หินแก้ว และ ศิริกุล จันทร์สว่าง, การปรับปรุงน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล, RSU JET, ๒๕๔๖, ฉบับที่ ๑, เล่มที่ ๑, หน้า ๓๔-๓๗.
๒๓. สุพัฒน์ หวังวงศ์วัฒนา, "ผลกระทบของการใช้น้ำมันดีเซลผสมน้ำมันพืช ต่อเครื่องยนต์และมลพิษทางอากาศ", เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องแนวทางการวิจัยและพัฒนาไบโอดีเซลไปสู่เชิงพาณิชย์, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ๒๕๔๔, หน้า F-๑-F-๗.
๒๔. อภิชาติ เสงศรี, บณพณ ใจกุล และ จินดา เจริญพรพาณิชย์, การใช้น้ำมันพืชผสมสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กแบบฉีดตรงเข้าห้องเผาไหม้, รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๑๖, ๒๕๔๕, หน้า ๑๐๘-๑๑๓.
๒๕. จิระพันธุ์ ว่องรัตนไพศาล, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และ วัชร วรศ, เอกสารประกอบการสัมมนาเผยแพร่ผลงานวิจัยด้านพลังงานทดแทน เรื่อง การผลิตเอทานอลโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อน, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ๒๕๔๖, หน้า B-1-B-13.
๒๖. เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์ทิพย์, ถนัดพร ศรีรอด, สุวิทย์ เตอ, บณพณ นิตยภัทร, เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, สุทธิพันธุ์ แก้วสมพงษ์ และ สิทธิโชค วัลลาภกิจ, เอกสารประกอบการสัมมนาเผยแพร่ผลงานวิจัยด้านพลังงานทดแทน เรื่อง โครงการศึกษาค้นแบบโรงงานเอทานอลโดยการพัฒนาศักยภาพการผลิตจากมันสำปะหลัง, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ๒๕๔๖, หน้า A-๑-A-๕.
๒๗. สุวิทย์ เตอ, บุญศักดิ์ สุภานิช และ สุทธิธาดา, แบบสรุปผลการวิจัย เรื่อง โครงการประเมินความเป็นไปได้ของการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทย, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ๒๕๔๔, ๖ หน้า.
๒๘. สุวิทย์ เตอ, การสัมมนาเรื่องศักยภาพของประเทศไทยในการผลิตเอทานอลเพื่อทดแทนการนำเข้า, กลุ่มงานเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, กองโครงการและประสานงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ๒๕๔๔, หน้า D-1 - D-19.



๒๘. บุญพัชร สุภานิช, สุวิทย์ เตีย และปณิศา ภูอาภาส, เอกสารประกอบการสัมมนาเผยแพร่ผลงานวิจัยด้านพลังงานทดแทน เรื่อง การบูรณาการกระบวนการผลิตเอทานอลกับ โรงงานน้ำตาลและโรงงานแป่งมันสำปะหลัง และการประเมินเทคโนโลยีในการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ๒๕๔๖, หน้า C-๑-C-๑๓

๓๐. อาณัติ มีป้อม, การศึกษาความเป็นไปได้ในการจัดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียรวมเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพในจังหวัดนครปฐม ๑) ของเสียที่เกิดจากฟาร์มเลี้ยงสุกรและโรงงาน, อุตสาหกรรมอาหารขนาดกลางและเล็ก, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, ๒๕๔๔.

๓๑. นันทนิตย์ ทศน์เอี่ยม, การเปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำขี้เป็ดเปลือกสับปะรด ในอึ่งปฏิกิริยาแบบขั้นการย่อยระหว่างกระบวนการหมักแบบขึ้นตอนเดียวและสองขั้นตอน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, ๒๕๓๑.

Abstract Status and Research Trends on Biomass Energy in Thailand

Warunee Tia

Pimporn Jangploy

Kangsadan Sakunpongmalce

Somchart Soponronnarit

Biomass, which is a high-potential renewable energy resource for Thailand, has been planned and set up the policy by the government to promote the biomass development and utilization. This paper presents the status and research trends on biomass. Four types of biomass applications, namely biomass fuel, bio-ethanol, bio-diesel and biogas, were studied. The common limitation of using biomass was their resources availability, which showed seasonal variation especially those from agro-industries. To extend the utilization of biomass the research management, system-efficiency improvement and cost reduction should be conducted. Additional research on the co-combustion system and project feasibility should be considered for power generation. For bio-ethanol and bio-diesel, the long-term performance of the engine and standard specification of bio-fuel should be studied. The study on appropriate technology and utilization should be carried out as well on biogas.

Key words : biomass, renewable energy, research trend

เตาเผาไหม้วอร์เทก-ฟลูอิไดซ์เบดแบบสองห้องเผาไหม้ สำหรับเชื้อเพลิงแกลบ

ฐานิตย์ เมธิยานนท์¹ นวัตกรรม รุ่งโรจน์² และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์³

Abstract

Madhiyanon, T.¹, Piriyaungroj, N.¹ and Soponronnarit, S.²

**A novel vortex-fluidized bed combustor with two combustion chambers
for rice-husk fuel**

Songklanakarin J. Sci. Technol., 2004, 26(6) : 875-893

A novel vortexing-fluidized bed combustor (VFBC) using rice-husk as fuel was developed and presented. The combined characteristics of vortex combustion and fluidized bed combustion are the main features of the VFBC, which was designed to achieve high thermal capacity ($MW_u m^{-3}$), high thermal efficiency and low diameter to height ratio. The VFBC comprises a vertical cylinder chamber and a conical base, which provides a bed for incompletely combusted fuel. The overall dimensions are 1.10 m in height and 0.40 m in diameter. To evaluate combustor performance, the specific feed rate of fuel and mass flow rates of the primary, secondary, and tertiary air were varied independently of one another. The combustion appeared into two zones characterized by different combustion behaviors, i.e. 1) vortex combustion above the vortex ring and 2) fluidized bed combustion below the vortex ring. The fluidized bed zone has uniform

¹Department of Mechanical Engineering, Mahanakorn University, 51 Cheum-Sampan Road, Nong Chok, Bangkok 10530 Thailand. ²School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 91 Prachauthit Road (Suksawad 48), Bangmod Thung Kharu District, Bangkok 10140 Thailand.

¹Ph.D.(Energy Technology), ²M.Sc.(Mechanical Engineering), ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 51 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530 ³Ph.D.(Production and Processing of Vegetable Raw Materials), ศาสตราจารย์, คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ล.ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10400

Corresponding e-mail: thanid_m@yahoo.com

รับต้นฉบับ 6 กุมภาพันธ์ 2547

รับลงพิมพ์ 27 มิถุนายน 2547

temperature distributions across the cross-section of the combustor. The swirling of air above the vortex ring and the vortex ring itself played important roles in preventing the escape of combustion particulates. Bottom ash appeared as fine black and grey particles of ash, which ranged in size from 200 to 600 μm . Fluidization could be initiated without the assistance of any inert material mixed into the bed. The experimental results indicated that thermal efficiency did not depend on the secondary or tertiary airflows, but was significantly influenced by the excess air resulting from the combined total of the three airflows. The introduction of the tertiary airflow helped maintaining the temperature inside the combustor within acceptable levels. According to experimental conditions, i.e. a specific feed rate of $240 \text{ kg h}^{-1} \text{ m}^{-3}$ and excess air (157%), it was found that the VFBC could achieve an exit gas temperature of 1060°C , thermal efficiency of 95%, and thermal capacity of $0.91 \text{ MW}_\text{th} \text{ m}^{-3}$. The amounts of CO_2 , CO , and O_2 gases emitted were directly related to thermal efficiency, and the amounts of CO and NO_x were 50 and 380 ppm, respectively.

Key words : biomass, combustor, cyclone, fluidization, solid fuel, vortex ring

บทคัดย่อ

ฐานิตย์ เมธิยานนท์ นวัตกรรม พริยะรุ่งโรจน์ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์
เตาเผาไหม้วอร์เทก-ฟลูอิดซ์เบดแบบสองห้องเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแกลบ
ว. สงขลานครินทร์ วท. 2547 26(6) : 875-893

ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทก-ฟลูอิดซ์เบด (Vortexing-Fluidized bed Combustor, VFBC) ที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงโดยออกแบบให้มีการร่วมลักษณะเด่นของการเผาไหม้แบบวอร์เทกและฟลูอิดซ์เบดไว้ด้วยกัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อต้องการเตาเผาไหม้แบบใหม่ที่ทำให้ค่าพิกัดความร้อน ($\text{MW}_\text{th} \text{ m}^{-3}$) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง แต่ในขณะเดียวกันมีค่าสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำ เตาเผาที่ใช้ในการทดลองมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความสูงเท่ากับ 0.4 และ 1.10 เมตร ตามลำดับ และมีฐานเป็นรูปกรวยสำหรับรองรับอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมด ในการทดสอบสมรรถนะของเตาได้มีการแปรเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะและอัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง สอง และสาม ในแต่ละการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าภายในเตาเผาไหม้จะถูกแบ่งออกเป็นห้องเผาไหม้สองส่วนตามลักษณะการเผาไหม้คือ 1) บริเวณที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทกขึ้นไปซึ่งมีลักษณะการเผาไหม้แบบวอร์เทก และ 2) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ด้านล่างวงแหวนวอร์เทกลงมาเกิดการเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบด ซึ่งสอดคล้องกับผลของการกระจายอุณหภูมิภายในเตาที่มีการกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดเตาในส่วนนี้นอกจากนี้การหมุนวนของอากาศเหนือวงแหวนและตัววงแหวนเองมีส่วนสำคัญในการดักจับอนุภาคขนาดใหญ่ที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่ให้หนีออกไปจากเตาทำให้เถ้าที่ออกมาจะมีลักษณะละเอียดสีดำนเทาโดยมีขนาดอยู่ในช่วง 200 ถึง $600 \mu\text{m}$. การเกิดฟลูอิดซ์เซชันภายในเตาไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยลงในเบด ประสิทธิภาพเชิงความร้อนไม่ขึ้นกับปริมาณอากาศส่วนที่สองหรือสาม แต่จะขึ้นกับปริมาณอากาศส่วนเกินทั้งหมดซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอากาศทั้งสามส่วน ผลของการจ่ายอากาศส่วนที่สามจะช่วยควบคุมอุณหภูมิภายในเตาไม่ให้สูงเกินไป จากการทดลองพบว่าที่อัตราการป้อนแกลบ $240 \text{ kg h}^{-1} \text{ m}^{-3}$ ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% จะได้แก๊สร้อนตรงทางออกเตามีอุณหภูมิ $1,060^\circ\text{C}$ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 95% และพิกัดความร้อนเตาที่ทำได้เท่ากับ $0.91 \text{ MW}_\text{th} \text{ m}^{-3}$ โดยปริมาณ CO_2 , CO และ O_2 เป็นไปในแนวทางที่สอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยปริมาณ CO และ NO_x ที่ปล่อยออกมาจากเตามีค่า 50 และ 380 ppm ตามลำดับ

เนื่องจากในแต่ละปี อุตสาหกรรมโรงสีข้าว ใช้ในการอบแห้ง ผลิดไอน้ำ เป็นต้น ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่าย
อุตสาหกรรมแปรรูปอาหารสัตว์ มีความต้องการพลังงาน ในการดำเนินการสูงและประเทศต้องนำเข้าน้ำมันจากต่าง
ความร้อนไปใช้ในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก เช่น ประเทศเข้ามาปีละจำนวนมาก จึงได้มีผู้ประกอบการหลาย

รายภายในประเทศผลิตเตาเผาไหม้ที่ใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวล เช่น แกลบ ชังข้าวโพด เป็นต้น เพื่อใช้กับอุตสาหกรรม ดังกล่าวโดยเตาที่ผลิตขึ้นภายในประเทศ ได้แก่ เตาเผาไหม้แบบปล่องควันและตะแกรงเอียง และเตาเผาไหม้ไฮโดรลิก ซึ่งในกรณีเตาเผาไหม้ไฮโดรลิก (Gupta *et al.*, 1984) มีการเผาไหม้จะใช้หลักการของการไหลวนหรือการไหลแบบวอร์เทคได้เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายมาหลายทศวรรษแล้ว ซึ่งนอกจากทำหน้าที่ผลิตความร้อนแล้วยังทำหน้าที่ดักเก็บไม่ให้หลุดลอยออกไปพร้อมกับแก๊สเผาไหม้ด้วย ต่อมาได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ (Singh *et al.*, 1980; Soponronnarit *et al.*, 2000 and Tumambig, 1984) สำหรับเตาเผาไหม้ฟลูอิด์เบดก็ได้มีการพัฒนามานานแล้วเช่นกัน ส่วนใหญ่จะใช้กับเชื้อเพลิงถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแต่ก็มีการนำมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลเช่นกัน (Armesto *et al.*, 2002; Natarajan *et al.*, 1998 and Werther *et al.*, 2000) แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่เป็นทรงกลมและมีความหนาแน่นต่ำ เช่น แกลบ ชี้อยู่ เป็นต้น ทำให้ยากต่อการทำให้เกิดฟลูอิด์เบดขึ้น จึงมีความจำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจำพวกทรายซิลิกา อลูมินา ผสมลงในเบดในอัตราส่วนที่เหมาะสม (Natarajan *et al.*, 1998 and Rao *et al.*, 2000) อย่างไรก็ตาม การผสมวัสดุเฉื่อยเหล่านี้ลงไปจะทำให้ความดันตกคร่อมห้องเผาไหม้มีค่าสูงมากจำเป็นต้องใช้พัดลมที่มีขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในส่วนนี้สูง และเมื่อประมาณ 10 กว่าปีมานี้ได้มีการพัฒนาเตาเผาไหม้ฟลูอิด์เบดซึ่งใช้กับถ่านหินบดและเป็นเตาชนิดที่ป้อนเชื้อเพลิงเข้าทางด้านล่างของเบด (Nieh *et al.*, 1992;

Yang *et al.*, 1987 and Yang *et al.*, 1989) และได้มีการพัฒนาขึ้นโดยมีการเพิ่มอากาศส่วนที่สอง ซึ่งถูกฉีดเข้าไปในแนวสัมผัสในบริเวณ free board โดยจะทำให้เกิดการหมุนวนของแก๊สเผาไหม้และอนุภาคขึ้นในบริเวณ free board การฉีดอากาศส่วนที่สองสามารถทำได้ทั้งระดับความสูงต่างๆ ของตัวเตา ผลของการเกิดวอร์เทคจากการฉีดอากาศเข้าไปในแนวสัมผัสจะทำให้สามารถดักอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่ให้หลุดลอยออกไปจากเตาและยังทำให้เกิดการหมุนเวียนของอนุภาคเชื้อเพลิง ระหว่างบริเวณเบดด้านล่างกับบริเวณที่เกิดวอร์เทคใน free board ส่งผลให้สามารถลดความสูงของเตาฟลูอิด์เบดลงได้ งานวิจัยเหล่านี้ (Nieh *et al.*, 1992; Yang *et al.*, 1987 and Yang *et al.*, 1989) คล้ายคลึงกับ U.S. Patent no. 4,867,079 (Sang *et al.*) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งเตาเผาไหม้ฟลูอิด์เบดที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทย ยังไม่มีการผลิตขายแต่ในต่างประเทศได้มีการทำวิจัยในห้องปฏิบัติการ พบว่ามีจุดเด่นที่น่าสนใจอยู่หลายประการ ซึ่งสามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับเตาเผาไหม้ไฮโดรลิกได้ดังแสดงใน Table 1 และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาพฤติกรรมของการไหลของแก๊ส-อนุภาค ภายในเตาเผาไหม้วอร์เทคพบว่าบริเวณใกล้ผนังเตาอากาศที่จะมีการไหลในทิศทางลง (สู่ด้านล่างเตา) ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนเวียนของอนุภาคภายในเตา และมีส่วนสำคัญให้ residence time นานขึ้น (Nieh *et al.*, 2000)

ขั้นตอนการออกแบบเตาเผาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิด์เบด (Vortex-Fluidized Bed Combustor, VFBC)

จากผลการศึกษาพฤติกรรมของอากาศ-แกลบภายใน

Table 1. Comparative characteristic of cyclone and the fluidized bed combustor (Natarajan, *et al.*, 1998 and Soponronnarit *et al.*, 2000)

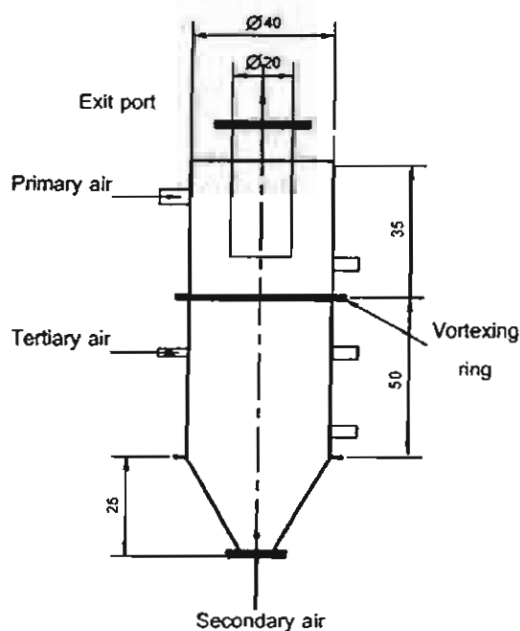
Fluidized bed Combustor	Cyclone Combustor
1. Thermal capacity approximately 1 MW/m ³	1. Thermal capacity approximately 0.34 MW/m ³
2. Height to inside diameter (H/D), approximately 13	2. Height to inside diameter (H/D) approximately 2.5
3. Thermal efficiency 80-95%	3. Thermal efficiency 60-80%
4. Need insert materials such as silica or alumina mixed into the bed	4. No need inert materials
5. Ash is conveyed from combustor through exhaust pipe	5. Require mechanical transportation for ash conveying

เตาเผาไหม้จำลอง (Madhiyanon *et al.*, 2003(a) and Madhiyanon *et al.*, 2003(b)) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่สามารถจะนำหลักการดังกล่าวไปใช้กับเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (Vortexing-fluidized bed combustion, VFBC) จริงได้จึงได้นำข้อมูลจากการศึกษาในข้างต้นมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเตาเผา VFBC ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งเตาเผา VFBC เป็นเตาเผาที่ถูกออกแบบมาเพื่อรวมเอาลักษณะเด่นของเตาเผาแบบไซโคลนและเตาเผาแบบฟลูอิดซ์เบดเข้าด้วยกันโดยเตาเผา VFBC มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาเท่ากับ 40 ซม. สูง 110 ซม. ดังแสดงใน Figure 1a และสามารถแบ่งเตาเผาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งรูปร่างของเตาเผาแบบทรงกระบอก และส่วนที่สองรูปร่างของเตาเผาแบบทรงกรวยหงายโดยบริเวณปลายกรวยถูกตัดเพื่อติดตั้งแผ่นกระจายอากาศ (Air Distributor) สำหรับอากาศส่วนที่สอง ซึ่งอากาศที่ถูกใช้ในการเผาไหม้แกลบภายในเตาเผา VFBC สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังแสดงใน Figure 1b คือ อากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air) คือ

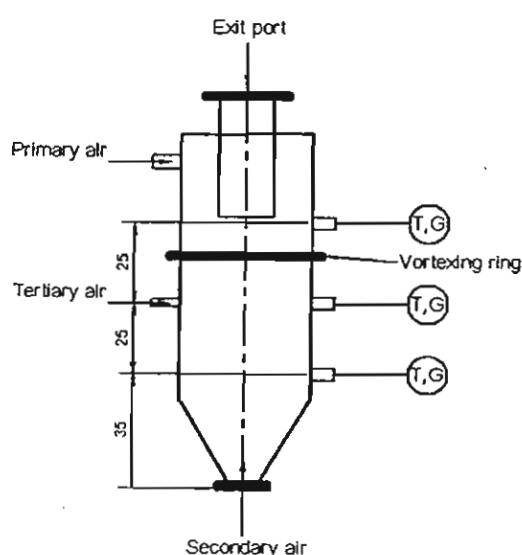
อากาศที่นำแกลบเข้าสู่เตาเผาซึ่งจะถูกป้อนในแนวสัมผัสทางด้านบนของห้องเผาไหม้แบบทรงกระบอก เพื่อทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศและแกลบแบบวอร์เทค อากาศส่วนที่สอง (secondary air) จะถูกจ่ายผ่านแผ่นกระจายลมเข้าสู่เตาเผา VFBC ที่บริเวณด้านล่างของห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะเป็นทรงกรวยหงายทำให้เกิดพฤติกรรมแบบฟลูอิดซ์เบดทั่วในบริเวณของห้องเผาไหม้ที่อยู่ถัดจากวงแหวนวอร์เทคลงมา โดยรูปร่างของเตาเผาแบบทรงกรวยหงายจะช่วยทำให้แกลบลอยตัวได้ง่ายและอนุภาคในเบดมีการหมุนเวียนทั่วถึงโดยไม่ต้องใช้วัสดุเฉื่อยมาผสมลงในเบด และอากาศส่วนที่สาม (tertiary air) จะเป็นอากาศที่ถูกจ่ายในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งด้านข้างเตาเผาแบบทรงกระบอกในระดับความสูงเท่ากับ 60 ซม. เพื่อลดอุณหภูมิในห้องเตาเผา

วิธีการทดลอง

แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ



(a) Dimensions of VFBC



(b) Temperature (T) and combustion gas component (G) measure positions.

Figure1. Dimensions and Temperature measure positions of VFBC. (unit : cm.)

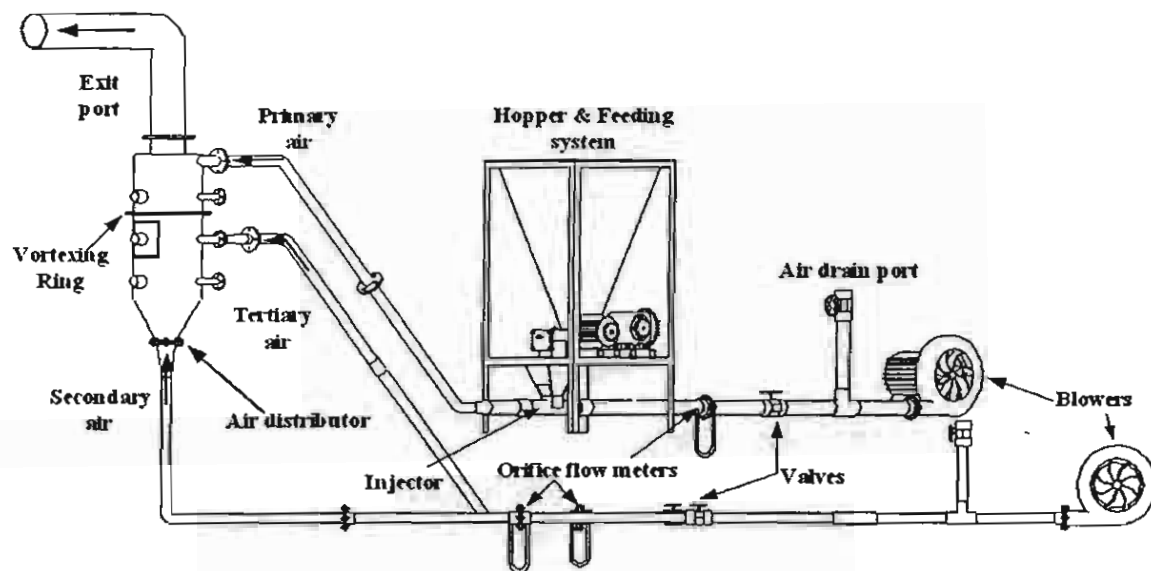


Figure 2. Schematic diagram of the overall experimental set-up of VFBC.

1. การทดลองเบื้องต้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC

เตรียมอุปกรณ์การทดลองดังแสดงใน Figure 2 ทำการติดเตาเผาโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงและอุ่นเตาจน

อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ประมาณ 600°C จึงเริ่มทำการทดลอง

1. ปรับอัตราการไหลของอากาศและแกลบให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลองที่ 1-6 ใน Table 2 ในการทดลอง

Table 2. The operating conditions of VFBC

	Run No.	Specific Rice husk feed rate (kg/h-m ³)	Primary air		Secondary air		Tertiary air		Excess air (%)
			Flow rate (m ³ /min)	Velocity (m/s)	Flow rate (m ³ /min)	Velocity (m/s)	Flow rate (m ³ /min)	Velocity (m/s)	
The preliminary study of VFBC operation condition	1	160	2.75	22.7	0.97	2	-	-	288
	2	187	2.75	22.7	0.97	2	-	-	233
	3	213	2.75	22.7	0.97	2	-	-	192
	4	240	2.2	18.2	0.97	2	-	-	117
	5	240	2.33	19.2	0.97	2	-	-	125
	6	240	2.75	22.7	0.97	2	-	-	157
The study of the effects of tertiary airflow on performance of VFBC	7	240	2.06	17	0.85	1.75	-	-	108
	8	240	2.06	17	0.85	1.75	0.37	12.3	133
	9	240	2.06	17	0.85	1.75	0.76	25.0	157
	10	240	2.06	17	0.85	1.75	1.12	37.0	182
The study of the effects of secondary airflow on performance of VFBC	11	240	2.06	17	0.66	1.35	0.75	25.0	145
	12	240	2.06	17	0.93	1.92	0.75	25.0	163
	13	240	2.06	17	1.22	2.5	0.75	25.0	182

จะใช้พัดลมอัดอากาศ 2 ตัว ตัวละ 2.2 kW ในการวัดอัตราการไหลของอากาศใช้ออร์ฟิสมิเตอร์ซึ่งถูกปรับเทียบจาก Hot wire anemometer ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 3% ของค่าที่วัดได้ และสามารถควบคุมอัตราการป้อนของแกลบโดยใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ป้อนแกลบ

2. เริ่มบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งท่อทางออกเตาเผา VFBC ทุก 5 นาที จนครบ 120 นาที โดยใช้ Thermo-couple type K และใช้ตัวขับเคลื่อน ซึ่งมีความละเอียด $\pm 1^\circ\text{C}$

2. การศึกษาผลของอากาศส่วนที่สองและสามต่อสมรรถนะของ VFBC

(อุปกรณ์การทดลองเป็นชุดเดียวกับชุดศึกษาการทดลองเบื้องต้น เพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC)

1. การปรับอัตราการไหลของแกลบและอากาศให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลองที่ 7-13 ใน Table 2

2. เริ่มบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $Y = 0.35$ เมตร โดยอ้างอิงตำแหน่งความสูงจากแผ่นกระจายลม (Air distributor) ที่ตำแหน่ง $r/R = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95$ และ 1.0 หลังจากนั้นทำการเก็บข้อมูลที่ได้อาจจากการเผาไหม้ (เมื่อ r คือ ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิในแนวรัศมีของเตาเผาไหม้ VFBC และ R คือ รัศมีของเตาเผาไหม้ VFBC ซึ่งเท่ากับ 20 ซม.)

3. บันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกและตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้เครื่อง Gas analyzer รุ่น Testo 350 XL

4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2-3 โดยบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $Y = 0.60$ เมตร และ 0.85 เมตร ตามลำดับ

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ของเตานิยามได้ด้วยสมการดังนี้

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_a (c_{p,g} T_g - c_{p,a} T_a)}{\dot{m}_f HHV} \quad (1)$$

เมื่อ

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลของอากาศ, kg/s

$\dot{m}_f$ = อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ, kg/s

$c_{p,g}, c_{p,a}$ = ค่าความจุความร้อนของแก๊สเสียและอากาศที่เข้าเผาไหม้

HHV = ค่าความร้อนสูงของแกลบ 14.5 MJ/kg

T_g = อุณหภูมิแก๊สเสียที่ตำแหน่งทางออกของ VFBC

T_a = อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าของ VFBC

โดยกำหนดให้ $c_{p,g}$ ที่ตำแหน่งทางออกเท่ากับ $c_{p,a}$ ที่มีอุณหภูมิแก๊สเสีย

สมการที่ (1) อยู่บนสมมติฐานที่ว่า $\dot{m}_g \ll \dot{m}_f$ ดังนั้นมวลของแก๊สเสียจึงประมาณเท่ากับมวลของอากาศที่เข้าเผาไหม้

ผลการทดลอง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเบื้องต้น ดังนั้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของเตาเผา VFBC จึงได้กำหนดเงื่อนไขทดลองออกเป็น 6 เงื่อนไขโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของแกลบและอากาศต่างๆ กันดังแสดงใน Table 2 เงื่อนไขการทดลองที่ 1-6

1. การทดลองเบื้องต้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC

จากผลการทดลองสามารถสรุปในประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1.1 จากการสังเกตการเผาไหม้ผ่านช่องมองของเตาเผา VFBC พบว่าการเกิดฟลูอิดิเซชันจะครอบคลุมบริเวณตั้งแต่ด้านล่างของเตาเผา VFBC จนถึงบริเวณที่เป็นที่ตั้งของวงแหวนวอร์เทิล (Vortexing ring) ทุกเงื่อนไขการทดลองดังแสดงใน Table 2 ซึ่งการเกิดฟลูอิดิเซชันของแก๊สเผาไหม้กับอนุภาคภายในของเตาเผาจะสอดคล้องกับการเกิดฟลูอิดิเซชันของอากาศ-แกลบในกรณีเตาเผาไหม้จำลอง (Madhiyanon et al., 2003(a) and Madhiyanon et al., 2003(b))

1.2 การเกิดฟลูอิดิเซชันภายในเตาเผา VFBC ไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยจำพวกทรายซิลิกาหรือลูมินาลงในเบดเหมือนเช่นในเตาเผาไหม้ฟลูอิดิเซชันโดยทั่วไป

1.3 เตาเผา VFBC สามารถทำอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific rice husk feed rate = SFR) ได้ 240 kg/h/m^3 ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% เมื่อคำนวณเป็นค่าพิกัดความร้อนของเตา (โดยกำหนดให้ HHV ของแกลบ = 14.5 MJ/kg) ที่ η_{th} เท่ากับ 95% จะมีพิกัดความร้อนเท่ากับ $0.91 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ ซึ่งความจริงอาจสามารถป้อนเชื้อเพลิงด้วยอัตราที่มากกว่านี้ได้ ถ้าเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินให้มากขึ้นโดยการจ่ายอากาศส่วนที่สามเข้าไปในเตา จากการทดลองจะเห็นว่า SFR ที่เตาเผา VFBC ทำได้มีค่าใกล้เคียงกับของเตาเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงขี้มูลซึ่ง SFR มีค่าประมาณ 265 kg/h/m^3 (Natarajan *et al.*, 1998) และสูงกว่าที่เตาเผาไหม้

ไซโคลนที่ผลิตขายอยู่ภายในประเทศทำได้ ซึ่ง SFR มีค่าสูงสุดประมาณ 110 kg/h/m^3 สำหรับในงานวิจัยนี้เนื่องจากมีข้อจำกัดของพัดลมอัดอากาศที่ใช้ในการทดลองจึงได้กำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไว้สูงสุดเท่ากับ 240 kg/h/m^3

1.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา (η_{th}) ในกรณีที่ค่า SFR เท่ากับ 240 kg/h/m^3 เมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 157% ดังแสดงใน Figure 3 (เส้นกราฟ F) พบว่าค่า η_{th} จะเพิ่มขึ้นไปตามเวลาที่เตาทำงาน โดยจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 90 นาที (และเป็นจริงสำหรับในกรณีอื่นๆ ด้วย) โดย η_{th} จะมีค่าประมาณ 95% ซึ่งเท่ากับในกรณีของเตาเผาไหม้ฟลูอิโดซ์เบดซึ่ง η_{th}

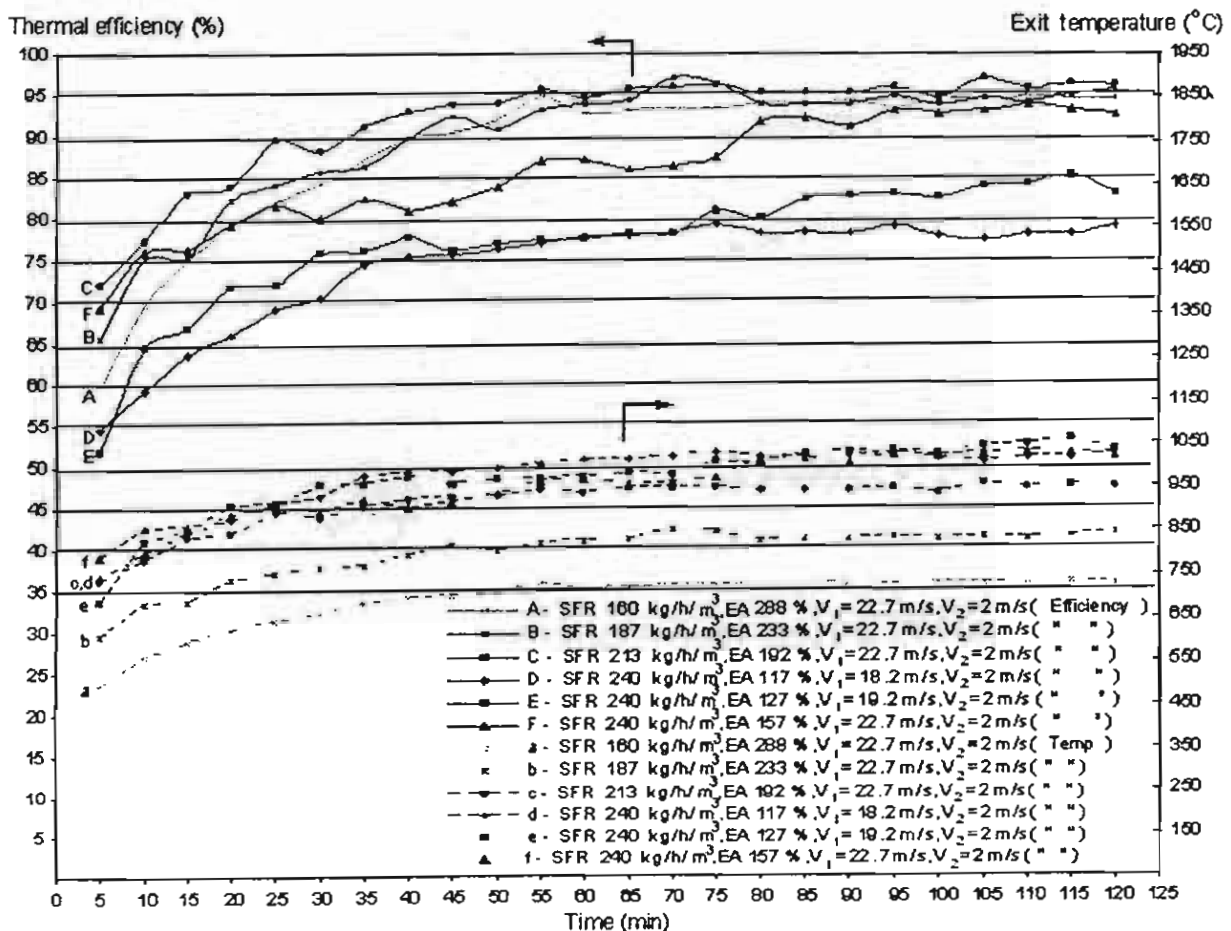


Figure 3. The variation of thermal efficiency of VFBC and exhaust gas temperature with a variety of specific rice husk feed rate(SFR) and primary air velocities (v_1). (Secondary air velocity (v_2)= 2 m/s; EA = Excess air)

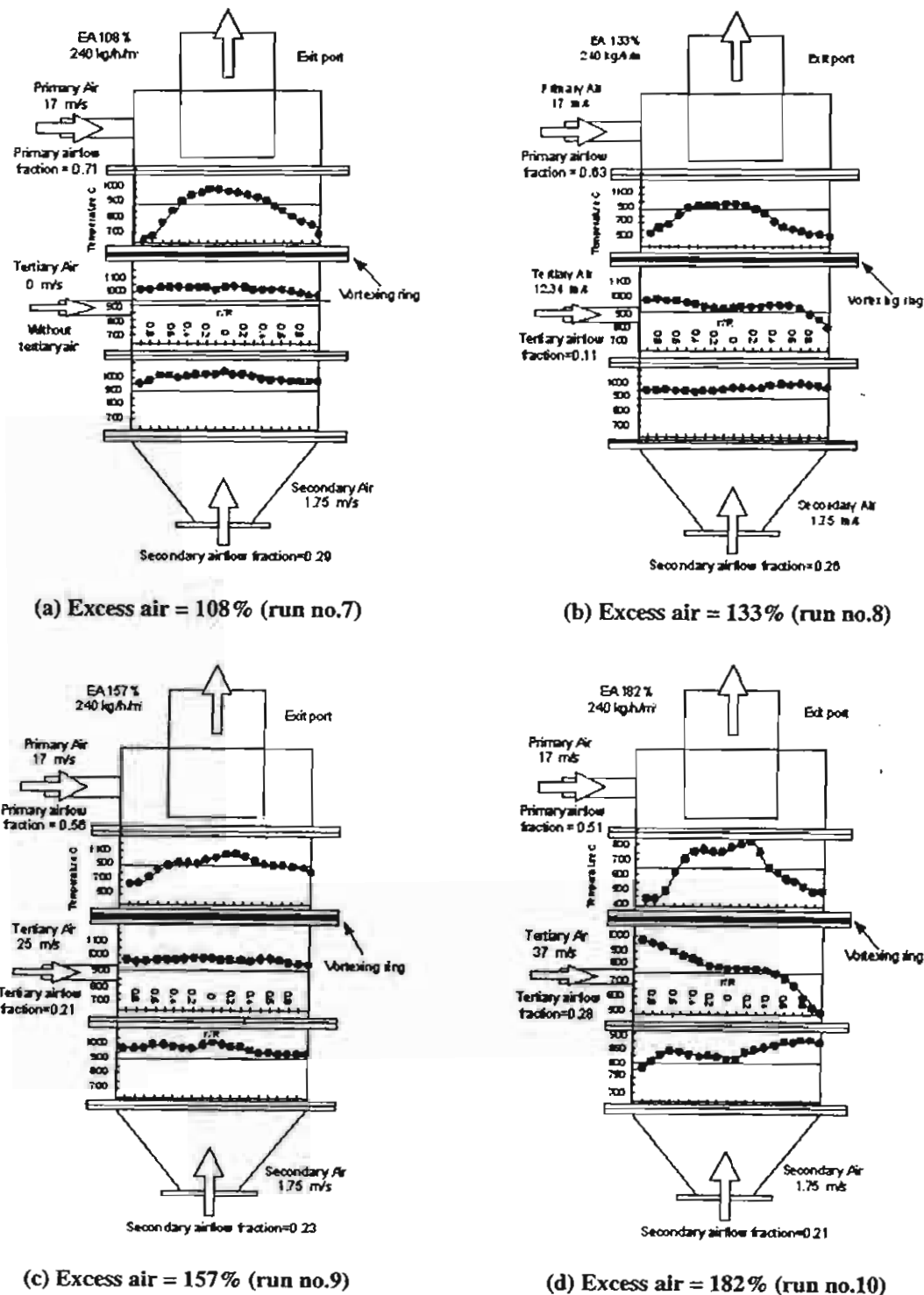


Figure 4. Temperature distributions inside VFBC at distance of 0.35, 0.6 and 0.8 M. above air distributor according to run nos. 7-10

มีค่าในช่วง 90-95% และสูงกว่าของเตาไฮโคลนมาก ซึ่ง η_{th} มีค่าประมาณ 65-80%

1.5 อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ทางออกของเตาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 30 นาทีแรกของการทดลอง และจากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็จะเริ่มลดน้อยลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้จะมีอุณหภูมิประมาณ 900°C ในเวลาเพียง 20 นาที และถึง 1,000°C ในเวลาประมาณ 80 นาที ดังแสดงใน Figure 3 (เส้นกราฟ f)

1.6 ในกรณีที่ค่า SFR 240 kg/h/m³ ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% ซึ่งได้ที่ออกจากเตาเผาจะมีลักษณะเป็นเถ้าป่นขนาดประมาณ 200-600 μm . มีสีดำปนเทา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนคาร์บอนในเชื้อเพลิงไปเป็นแก๊สเผาไหม้ (carbon conversion efficiency) ได้ดี ซึ่งมีสาเหตุจากการหมุนวนแบบวอร์เทคที่รุนแรงในบริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนและตัววงแหวนเองทำหน้าที่ดักอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้ไม่หลุดออกจากเตาเผา VFBC ได้ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมกาเกิดมานอากาศที่ใช้ดักอนุภาคภายในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดแบบจำลอง (Madhiyanon *et al.*, 2003(a) and Madhiyanon *et al.*, 2003(b))

จากผลการทดลองข้างต้นจึงได้เลือกเงื่อนไขที่ทำให้เตาเผา VFBC ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาสูงสุดคือที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุด (SFR) เท่ากับ 240 kg/h/m³ ดังแสดงใน Figure 3 (เส้นกราฟ F) โดยใช้เป็นเงื่อนไขที่มีการใช้อากาศส่วนที่สาม

2. การศึกษาผลของปริมาณอากาศส่วนที่สามต่อสมรรถนะของ VFBC

2.1 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา VFBC

ในการทดลองนี้กำหนดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจำเพาะ 240 kg/h/m³ และทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สามดังแสดงในเงื่อนไขการทดลองที่ 7-10 ใน Table 2 การกระจายอุณหภูมิภายใน VFBC สามารถแบ่งออกเป็นสองบริเวณคือ 1) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทค พบว่าการกระจายอุณหภูมิของทั้งสี่การทดลองดังแสดงใน Figure 4(a-d) กระจายอุณหภูมิที่คล้ายคลึงกันเป็นรูปพาราโบลาคว่ำ โดยบริเวณ

ขอบผนังจะมีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากใกล้ตำแหน่งที่จ่ายอากาศส่วนที่หนึ่งและส่วนบริเวณแกนกลางของเตาเผาจะมีอุณหภูมิสูงเนื่องจากเป็นบริเวณที่แก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไหลผ่านเพื่อเข้าสู่ท่อทิ้งเถ้าที่อยู่ด้านบนของเตาเผา 2) คือบริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทค พบว่าที่ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 108, 133 และ 157% มีการกระจายอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดเตาที่ความสูงเท่ากับ 0.35 เมตร และ 0.60 เมตร ดังแสดงใน Figure 4(a-c) ซึ่งสะท้อนให้เห็นการเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบดขึ้นภายในเตาที่ระดับความสูงดังกล่าวโดยทั้งอากาศและอนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทางแน่นอน (Random movement) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของอากาศภายในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดในแบบจำลอง (Madhiyanon *et al.*, 2003(a) and Madhiyanon *et al.*, 2003(b)) ส่งผลให้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะ (SFR) 240 kg/h/m³ สำหรับที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 182% ดังแสดงใน Figure 4(d) อุณหภูมิบริเวณผนังจะต่ำกว่าที่บริเวณอื่นภายในเตาเผาค่อนข้างมาก สาเหตุมาจากการจ่ายอากาศส่วนที่สามในบริเวณนี้มากเกินไปทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปกับการทำให้ไนโตรเจนในอากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นสำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตานับจากบริเวณที่ถัดจากวงแหวนวอร์เทคลงมา พบว่าที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 108% จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ในช่วง 990-1,025°C และเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเป็น 133 และ 157% จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า 1,000°C โดยมีค่าในช่วง 930-975°C โดยที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% จะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) สูงสุดเท่ากับ 95% (กรณี C Figure 5) และพบว่าอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ตรงทางออกของเตามีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 1,060°C

2.2 สมรรถนะของเตา VFBC

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและพิกัดความร้อนของเตาเป็นค่าดัชนีที่ใช้บอกสมรรถนะของเตา โดยค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นดัชนีที่ใช้ บอกความคุ้มค่าของการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง ส่วนพิกัดความร้อนของเตาซึ่งมีหน่วยเป็น MW_{th}/m³ เป็นตัวบ่งบอกถึงความคุ้มค่าในการใช้พื้นที่ภายในเตาโดยในทางเศรษฐศาสตร์แล้ว

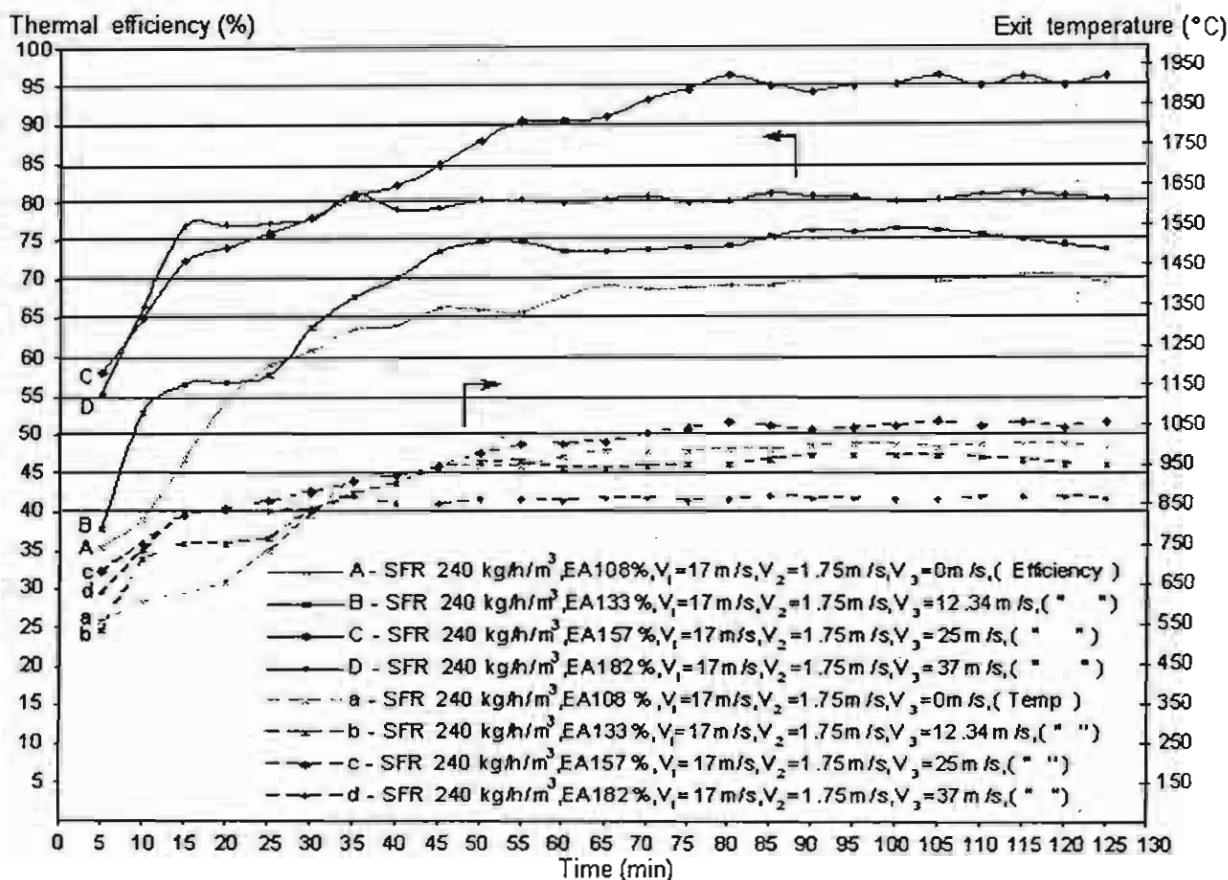


Figure 5. The variation of thermal efficiency of VFBC and exhaust gas temperature with a variety of tertiary air velocity (v_3). (Specific rice husk feed rate(SFR) = 240 kg/h/m³; Primary air velocities (v_1) = 17 m/s; Secondary air velocity (v_2) = 1.75 m/s; EA = Excess air)

ค่าพิกัดความร้อนของเตาจะแปรผกผันกับเงินทุนในการก่อสร้าง ดังนั้นในการประเมินสมรรถนะของเตาต้องพิจารณาจากดัชนีทั้งสองตัวไปพร้อมๆ กัน จาก Figure 3 และ 5 พบว่าที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% η_{th} จะมีค่าสูงสุดประมาณ 95% โดยมีค่าพิกัดความร้อนเตาเท่ากับ 0.91 MW_{th}/m³ (คำนวณโดยใช้ค่า HHV ของแกลบเท่ากับ 14.5 MJ/kg) ซึ่งทั้งค่า η_{th} และพิกัดความร้อนของเตาเผา VFBC ใกล้เคียงกับของเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคสเบด (Natarajan et al., 1998) แต่สูงกว่าเตาเผาไฮโคลน (Soponronnarit et al., 2000) จากการทดลองเบื้องต้นที่ไม่มีการใช้อากาศส่วนที่สาม (เงื่อนไขการทดลองที่ 1-6 ใน Table 2) และการทดลองที่มีการเพิ่มอากาศส่วนที่สาม

เข้าไป (เงื่อนไขการทดลองที่ 7-10) พบว่า η_{th} จะแปรผันตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกิน ซึ่งจากการทดลองพบว่า การใช้หรือไม่ใช้อากาศส่วนที่สามจะไม่มีผลต่อค่า η_{th} ซึ่งได้จากกราฟ Figure 6 แต่การใช้อากาศส่วนที่สามจะมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในเตาไม่ให้เป็น 1,000°C ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศส่วนเกินและ η_{th} ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะเท่ากับ 240 kg/h/m³ แสดงใน Figure 6 ซึ่งจะพบว่าในช่วงแรก η_{th} จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศส่วนเกินและหลังจากปริมาณอากาศส่วนเกินมากกว่า 157% ค่า η_{th} จะลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่าในช่วงแรกที่มีการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินน้อย ความปั่นป่วน (Turbulent) ที่เกิดจากความเร็วของอากาศ

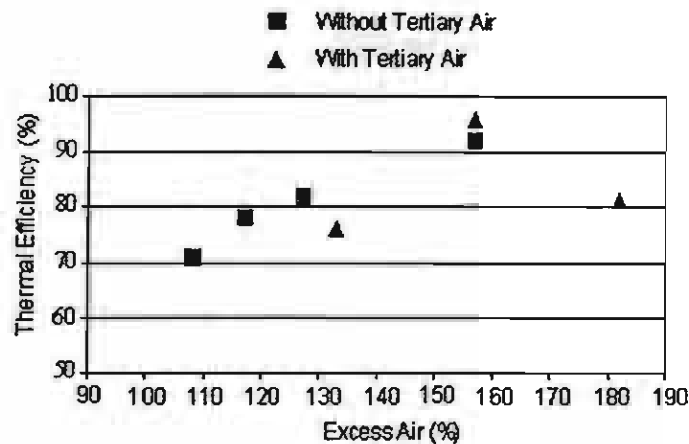


Figure 6. The effect of excess air on thermal efficiency.(run nos. 4-10; SFR = 240 kg/h-m³)

ภายในเตาไม่มากพอที่จะทำลายชั้นฟิล์มของเถ้าที่ปกคลุมพื้นผิวอนุภาคของแข็งที่ยังเผาไหม้ไม่หมดทำให้ O₂ แพร่ไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่พื้นผิวอนุภาคได้น้อยการเผาไหม้จึงไม่ค่อยสมบูรณ์และเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มมากขึ้นการเผาไหม้ก็จะสมบูรณ์ขึ้นจนกระทั่งได้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 95% ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% และจากนั้นถ้าเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นไปอีกจะทำให้ต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งกับการทำให้อากาศส่วนเกินมีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิในเตาเผา ผลก็คืออุณหภูมิในเตาจะต่ำลงดังแสดงใน Figure 5 (เส้นกราฟ d) ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่ดีพอจึงทำให้ η_{th} ต่ำลง

2.3 องค์ประกอบของแก๊สเสีย

จากการทดลองพบว่า CO₂ และ CO ที่เกิด

ขึ้นจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกินและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาดังแสดงใน Figure 7 (a,b) โดยถ้าใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมเท่ากับ 157% จะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นสมบูรณ์และส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาสูง (η_{th} = 95 %) และเกิดปริมาณ CO₂ ในสัดส่วนที่สูงในขณะที่สัดส่วนปริมาณของ CO จะมีค่าน้อยที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาสูงสุด ปริมาณ CO จะมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 50 ppm และปริมาณ O₂ ส่วนเกินในแก๊สเสียที่ออกมาจากเตาดังแสดงใน Figure 8(a) จะแปรผันตรงกับ η_{th} โดยที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 87% จะมีค่า η_{th} ค่าที่สุด จึงมีปริมาณ O₂ ส่วนเกินเหลืออยู่ในแก๊สเสียมากที่สุดประมาณ 9.5% ในขณะที่ถ้าใช้ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% ค่า η_{th} จะมี

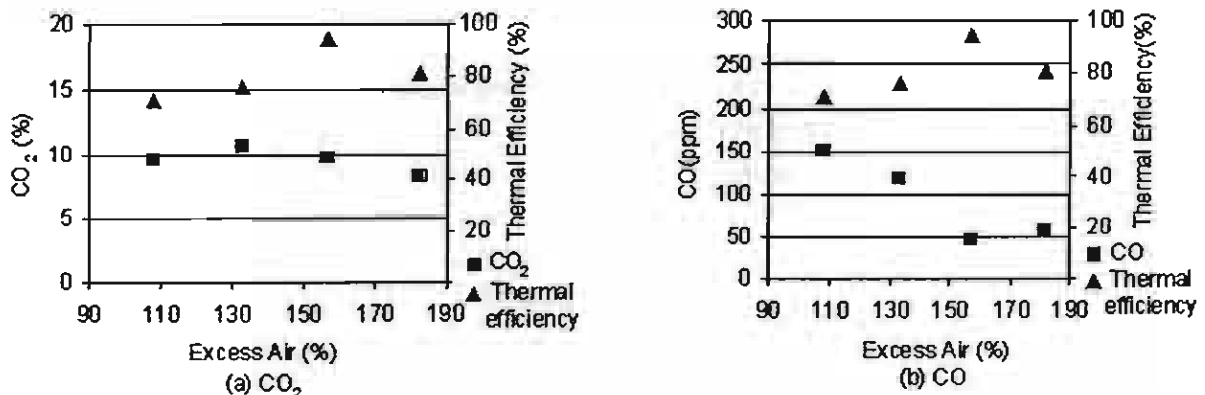


Figure 7. The effect of excess air on emitted gases and thermal efficiency. (run nos. 7-10)

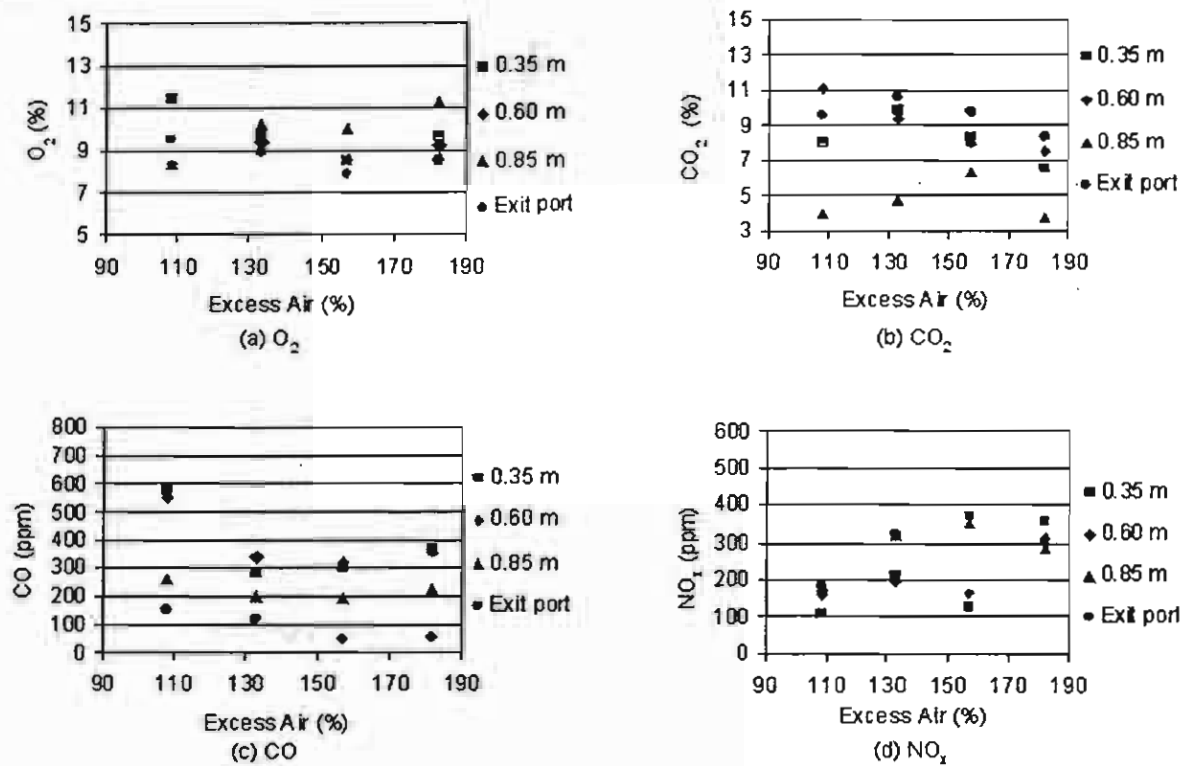


Figure 8. The variation of emitted gases with excess air at different heights of combustor. (run nos. 7-10)

ค่าสูงสุดทำให้ O_2 ถูกใช้ไปในการเผาไหม้มาก ปริมาณ O_2 ที่ออกมากับแก๊สเสียตรงทางออกจึงเหลือน้อยที่สุดประมาณ 7.8% การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊ส CO_2 , CO, O_2 และ NO_x ตามระดับความสูงของเตาแสดงใน Figure 8(a-d) โดยพบว่าปริมาณ CO_2 , O_2 และ NO_x ยังไม่สามารถสรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับความสูงของเตา มีเฉพาะ CO เท่านั้นที่พบว่าที่ทุกปริมาณอากาศส่วนเกินค่า CO จะเกิดขึ้นมากที่สุดที่ระดับความสูง 0.35 เมตร เพราะปริมาณอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดซึ่งมากองรวมกันเป็นเบดที่บริเวณด้านล่างเตาซึ่งมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับปริมาณอากาศส่วนที่สองที่จ่ายจากด้านล่างทำให้การเผาไหม้ยังไม่สมบูรณ์หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยา reduction

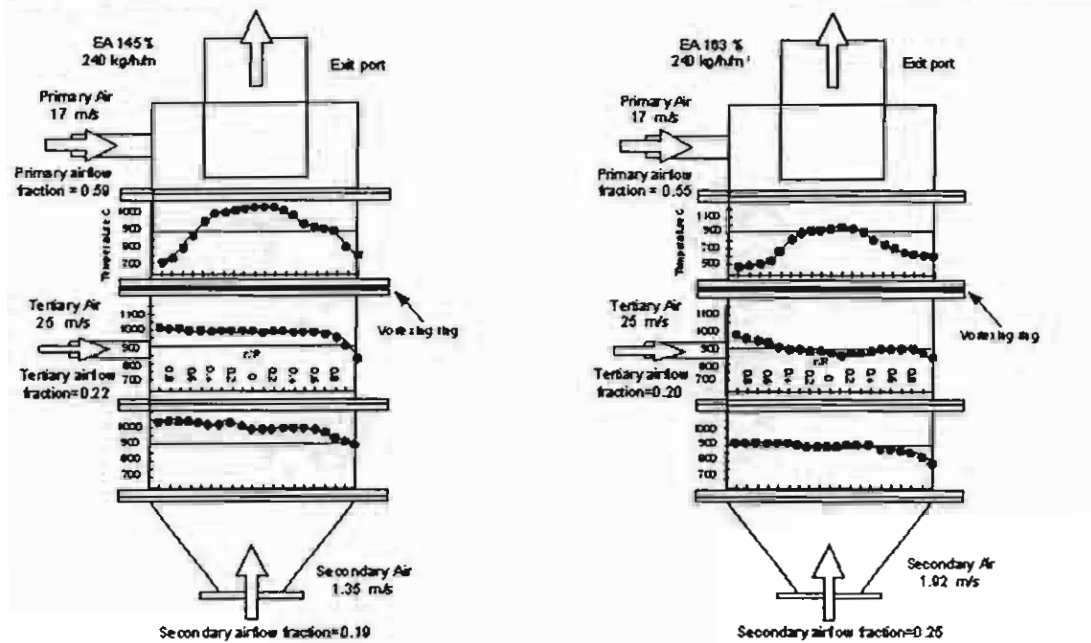
3. การศึกษาผลของปริมาณอากาศส่วนที่สองต่อสมรรถนะของ VFBC

ในการทดลองนี้ได้กำหนดอัตราการใช้ของ

เชื้อเพลิงจำเพาะ 240 kg/h/m^3 อัตราการใช้ของอากาศส่วนที่สองและส่วนที่สามเท่ากับ $2.06 \text{ m}^3/\text{min}$ และ $0.75 \text{ m}^3/\text{min}$ ตามลำดับ และปรับเปลี่ยนอัตราการใช้ของอากาศที่สอง ดังแสดงใน Table 2 เงื่อนไขการทดลองที่ 11-13

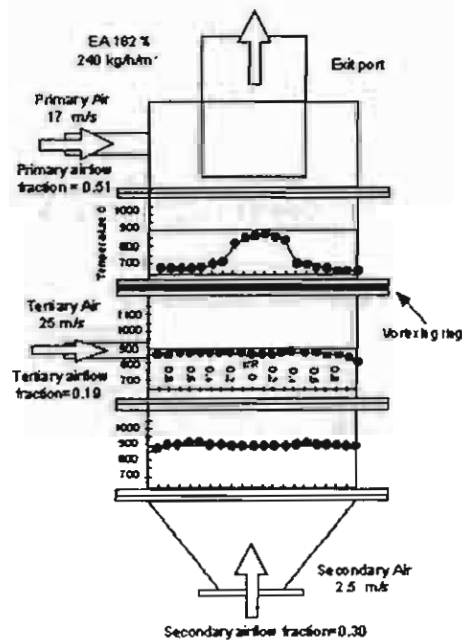
3.1 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา VFBC

Figure 9(a-c) แสดงให้เห็นว่าอัตราการใช้ของอากาศส่วนที่สองเท่ากับ $0.66 \text{ m}^3/\text{min}$ และ $1.22 \text{ m}^3/\text{min}$ ($V_2 = 1.35 \text{ m/s}$ และ 2.5 m/s) ซึ่งเป็นอัตราการใช้ที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดในการทดลองของทั้ง 13 การทดลอง พบว่ายังคงก่อให้เกิดพฤติกรรมการเผาไหม้แบบวอร์เทคและฟลูอิดเบด โดยการกระจายอุณหภูมิภายใน VFBC แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทค ลักษณะการกระจายอุณหภูมิมีลักษณะคล้ายพาราโบลาคว่ำ 2) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทค พบว่าที่ระดับความสูงของเตาเท่ากับ



(a) Excess air = 145 % (run no.11)

(b) Excess air = 163 % (run no.12)



(c) Excess air = 182 % (run no.13)

Figure 9. Temperature distributions inside VFBC at distance of 0.35, 0.6 and 0.8 M. above air distributor according to run nos. 11-13

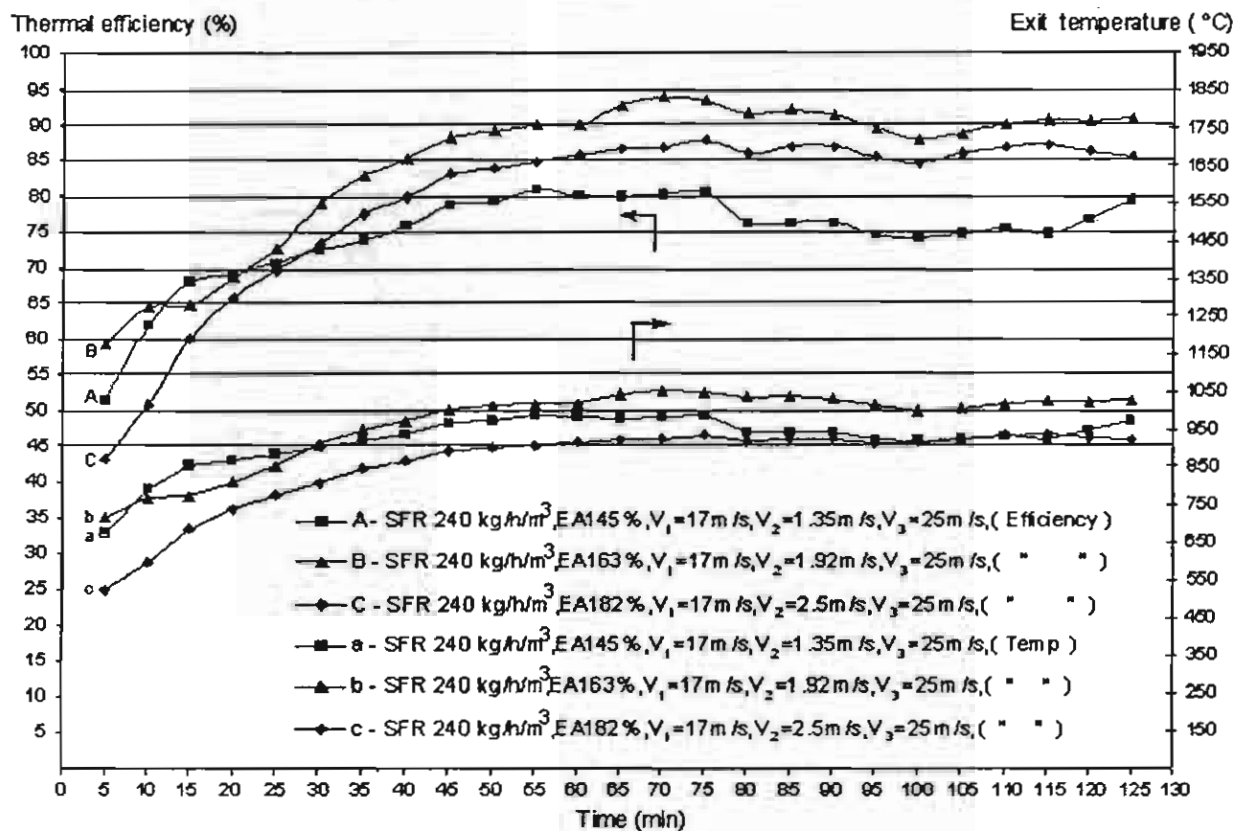


Figure 10. The variation of thermal efficiency of VFBC and exhaust gas temperature with a variety of secondary air velocity (v_2). (Specific rice husk feed rate (SFR) = 240 kg/h/m³; Primary air velocities (v_1) = 17 m/s; tertiary air velocity (v_3) = 25 m/s; EA = Excess air)

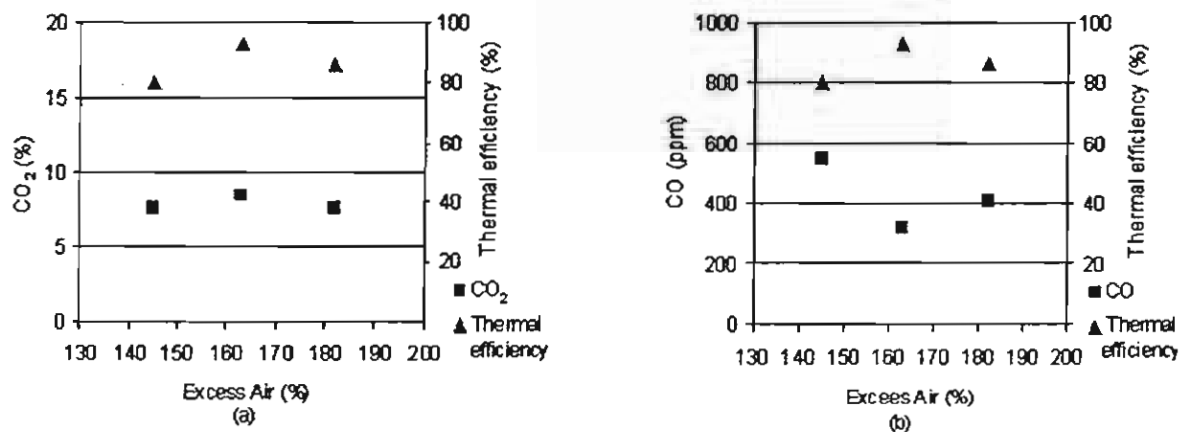


Figure 11. The effect of excess air on emitted gases and thermal efficiency. (run nos. 11-13)

0.35 เมตร, 0.6 เมตร มีการกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ ซึ่งลักษณะการกระจายอุณหภูมิทั้ง 2 ส่วนคล้ายกับลักษณะการกระจายอุณหภูมิในหัวข้อ 2.1

3.2 สมรรถนะของเตา VFBC

จากการทดลอง เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สองซึ่งมีผลทำให้ได้ค่าปริมาณอากาศส่วนเกิน 145% ($V_2 = 1.35$ m/s) และ 182% ($V_2 = 2.5$ m/s) ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนดังแสดงใน Figure 10 และ 11 เป็นไปในลักษณะคล้ายคลึงกับของกรณีการศึกษาเบื้องต้นที่ไม่มีการจ่ายอากาศส่วนที่สาม (หัวข้อ 1 Figure 3) และการศึกษาผลของอากาศส่วนที่สาม (หัวข้อ 2.2 Figure 5) กล่าวคือ ถ้าผลของการปั่นป่วนไม่มากพอ (กรณีนี้คือปริมาณอากาศส่วนที่สองน้อย) ทำให้ η_{th} ต่ำ ซึ่งเท่ากับ 78% และเมื่อเพิ่มอัตราการปั่นป่วน (กรณีเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สอง) จะทำให้ η_{th} สูงขึ้น ซึ่งเท่ากับ 92% (คือกรณีอากาศส่วนเกิน 163% ตาม Figure 10 เส้นกราฟ B) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินมากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ตกลง ประกอบกับการที่ความเร็วในการทำให้เกิดฟลูอิดซ์เซชันสูงทำให้อุณหภูมิที่ยังเผาไหม้ไม่หมดหลุดออกจากเตาเผาได้ จึงจะทำให้ η_{th} ลดลง เหลือเท่ากับ 87% (คือกรณีอากาศส่วนเกิน 182% ตาม Figure 10 เส้นกราฟ C) นอกจากนี้ที่สำคัญจะเห็นได้จากผลการทดลองทั้งหมดตั้งแต่ต้น (หัวข้อ 1 เป็นต้นมา) จะพบว่าถึงแม้ว่าปริมาณอากาศในแต่ละส่วนจะแตกต่างกันไปแต่ถ้ารวมกันแล้วได้ปริมาณอากาศส่วนเกินใกล้เคียงกันจะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ไม่แตกต่างกันดังจะเห็นได้จากผลการทดลองดังต่อไปนี้

ในการศึกษาผลของอากาศส่วนที่สองในหัวข้อนี้พบว่าเมื่อใช้อากาศส่วนเกิน 145% ($V_2 = 1.35$ m/s) ในการเผาไหม้ ทำให้มีอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยเท่ากับ 950°C และ η_{th} เท่ากับ 78% ดังแสดงใน Figure 10 (เส้นกราฟ a และ A) เมื่อนำมาคำนวณจะมีพิกัดความร้อนเท่ากับ $0.76 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ ซึ่งค่า η_{th} ดังกล่าวมีค่ามากกว่า η_{th} ที่ได้จากการใช้อากาศส่วนเกิน 108% และ 133% ของกรณีการศึกษาผลของอากาศส่วนที่สามในหัวข้อ 2.2 ซึ่งมีค่า η_{th} เท่ากับ 70% และ 75% ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 5 (เส้นกราฟ A และ B) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าค่า η_{th} ที่

เพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นผลมาจากความปั่นป่วนของปริมาณอากาศทั้งหมดที่ใช้มากกว่าที่จะขึ้นกับปริมาณอากาศที่ใช้ในแต่ละส่วน (อากาศส่วนที่สองหรือสาม) และเมื่อใช้อากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นเท่ากับ 163% ($V_2 = 1.92$ m/s) ของกรณีศึกษาผลของอากาศส่วนที่สองทำให้มีอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยเท่ากับ $1,025^\circ\text{C}$ และ η_{th} เท่ากับ 92% ดังแสดงใน Figure 10 (เส้นกราฟ b และ B) ทำให้ได้พิกัดความร้อนของเตาเท่ากับ $0.9 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ ซึ่งทั้งค่า η_{th} และพิกัดความร้อนเตาจะใกล้เคียงกับของกรณีอื่นๆ ที่มีปริมาณอากาศส่วนเกินใกล้เคียงกันคือ 1) กรณีใช้อากาศส่วนเกิน 157% (กรณีมีการจ่ายอากาศส่วนที่สามเข้าสู่เตาเผา VFBC, run no.9 หัวข้อ 2) ทำให้มีอุณหภูมิทางออกสูงสุดเท่ากับ $1,060^\circ\text{C}$ และ η_{th} สูงสุดเท่ากับ 95% ดังแสดงใน Figure 5 (เส้นกราฟ c และ C) โดยให้พิกัดความร้อนของเตาเท่ากับ $0.92 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ 3) กรณีใช้อากาศส่วนเกิน 157% (กรณีไม่มีการจ่ายอากาศส่วนที่ 3 เข้าสู่เตาเผา VFBC, run no.6 หัวข้อ 1) ทำให้มีอุณหภูมิทางออกเท่ากับ $1,020^\circ\text{C}$ และ η_{th} เท่ากับ 92% ดังแสดงใน Figure 3 (เส้นกราฟ f และ F) นอกจากนี้พบว่าถ้าเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินให้มากขึ้นเท่ากับ 182% ($V_2 = 2.5$ m/s) ในการเผาไหม้จะทำให้มีอุณหภูมิทางออกลดลงเหลือเท่ากับ 924°C และ η_{th} ลดลงเหลือเท่ากับ 87% ดังแสดงใน Figure 10 (เส้นกราฟ c และ C) ทำให้พิกัดความร้อนของเตาลดลงเหลือเท่ากับ $0.85 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่มากเกินไปปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ส่วนหนึ่งต้องสูญเสียให้กับไนโตรเจนในอากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ลดลง ซึ่งคล้ายกับกรณีใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ 182% ที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2

3.3 องค์ประกอบแก๊สไอเสีย

ในการวิเคราะห์ถึงปริมาณแก๊ส CO_2 , CO และ O_2 ที่ตำแหน่งทางออกของเตาเผา VFBC เมื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้ พบว่าทุกเงื่อนไขของการทดลองปริมาณแก๊ส CO_2 , CO และ O_2 ที่เกิดขึ้นให้ผลที่สอดคล้องกับค่า η_{th} ที่ได้จากการเผาไหม้ในทิศทางที่เมื่อค่า η_{th} สูงขึ้น ปริมาณ CO_2 จะเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ CO และ O_2 จะลดลง

จาก Figure 11(a) แสดงให้เห็นว่า CO_2 ที่

ตำแหน่งทางออกจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการไหม้ โดยเมื่อใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ 145% ทำให้ η_{th} ต่ำ ซึ่งเท่ากับ 78% เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.2) จึงทำให้มี CO_2 ที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณน้อย ซึ่งเท่ากับ 7.5% แต่เมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินในการไหม้ให้มากขึ้น ซึ่งเท่ากับ 163% พบว่า η_{th} เพิ่มขึ้นเป็น 92% เนื่องจากการเกิดการปั่นป่วนในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณ CO_2 เพิ่มขึ้น ซึ่งเท่ากับ 8.5% อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 182% ทำให้ปริมาณ CO_2 ลดลงเหลือเท่ากับ 7.5% เนื่องจากการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ 1) เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับ η_{th} ที่ลดลงต่ำลง ซึ่งเท่ากับ 87% (ดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.2) และ 2) สัดส่วนของปริมาณ CO_2 ลดลงเพราะสัดส่วนของอากาศทั้งหมดที่นำมาใช้ในการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้น ส่วนการพิจารณาปริมาณ CO ที่

เกิดจากการเผาไหม้พบว่า จาก Figure 11(b) แสดงให้เห็นว่า CO ที่ตำแหน่งทางออกจะแปรผันกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการไหม้ เมื่อใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ 145% ในการเผาไหม้พบที่เกิด CO ออกมาปริมาณมาก มีค่าเท่ากับ 547 ppm แสดงให้เห็นว่าเป็นเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้ได้ η_{th} ต่ำเท่ากับ 78% แต่เมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 163% พบว่าปริมาณ CO ลดลงเหลือเท่ากับ 315 ppm เนื่องจาก 1) ปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ η_{th} ที่เพิ่มขึ้นเป็น 92% และ 2) การที่ใช้อากาศส่วนเกินมากขึ้นทำให้สัดส่วนของ CO ลดลง (เช่นเดียวกับกรณีของ CO_2 ที่ EA = 182%) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินขึ้นไปอีกเป็น 182% ทำให้ CO กลับมาเพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับ 404 ppm เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับค่า η_{th} ที่ลดลงเหลือเท่ากับ 87% (ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศส่วนเกินกับ η_{th} ที่ได้จากการเผาไหม้ ได้กล่าวไว้แล้ว

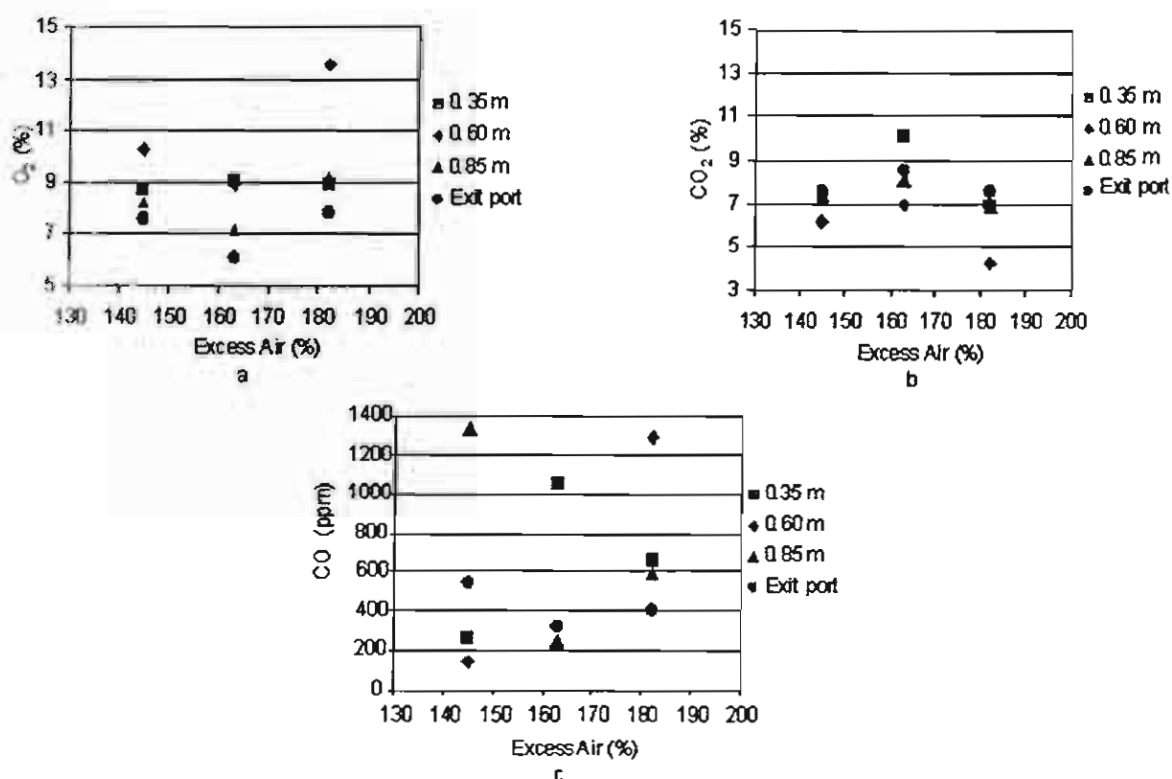


Figure 12. The variation of emitted gases with excess air at different heights of combustor. (run nos. 11-13)

Table 3. The specification of Gas analyzer model Testo 350 XL

GAS	Range
O ₂	0-25%
CO	0-10,000 ppm
NO	0-3,000 ppm
SO ₂	0-5,000 ppm

ในหัวข้อ 2.2) และในการพิจารณาปริมาณ O₂ ที่เกิดจากการเผาไหม้ จาก Figure 12(a) แสดงให้เห็นว่า O₂ ที่ตำแหน่งทางออก จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการไหม้ โดยเมื่อใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ 145% ทำให้ η_{th} ที่ต่ำ ซึ่งเท่ากับ 78% ทำให้เหลือ O₂ ที่ไม่ได้ใช้ในการเผาไหม้จำนวนมาก ซึ่งเท่ากับ 7.6% แต่เมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินในการไหม้เท่ากับ 163% ทำให้ η_{th} เพิ่มขึ้น ซึ่งเท่ากับ 92% ซึ่งทำให้ O₂ ถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้มากขึ้น จึงทำให้เหลือ O₂ ออกมาน้อย ซึ่งเท่ากับ 6.1% และเมื่อปริมาณอากาศส่วนเกินใช้ในการไหม้เท่ากับ 182% ทำให้ O₂ เพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับ 7.8% เนื่องจาก 1) ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เหลือ O₂ ที่ไม่ได้ใช้ในการเผาไหม้จำนวนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ η_{th} ที่ลดลงเหลือเท่ากับ 87% และ 2) การเพิ่มอากาศส่วนเกินมากขึ้น เป็นการทำให้สัดส่วนของปริมาณ O₂ ในแก๊สเสียที่ได้จากการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้นตาม และจากผลการทดลองนี้ทำให้พบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊ส CO₂, CO และ O₂ ที่เกิดขึ้น สอดคล้องกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วตั้งแต่ต้น ส่วนในการวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊ส CO₂, CO และ O₂ ตามระดับความสูงของเตาแสดงใน Figure 12(a-c) โดยพบว่า ปริมาณ CO₂, CO และ O₂ ยังไม่สามารถสรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์อย่างใดกับความสูงของเตาซึ่งคล้ายกับผลการทดลองที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.3

สรุปผลการทดลอง

ในการวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิด์เบดสำหรับเชื้อเพลิงแกลบซึ่งสามารถ

สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. เตาเผา VFBC ที่มีสัดส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงมีค่าต่ำเพียง 2.75 สามารถรวมพฤติกรรม การไหลของอากาศและแกลบแบบวอร์เทคและฟลูอิด์เบด ขณะที่เกิดการเผาไหม้ได้ซึ่งสังเกตได้จากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาที่สามารถแบ่งออกเป็นสองบริเวณคือ 1) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทคโดยมีลักษณะการกระจายอุณหภูมิคล้ายรูปพาราโบลาคว่ำแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลแบบวอร์เทค และ 2) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทคการกระจายอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดเตาแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเผาไหม้แบบฟลูอิด์เบด

2. จากการรวมพฤติกรรมการเผาไหม้แบบวอร์เทคและฟลูอิด์เบดขณะที่เกิดการเผาไหม้จะทำให้เกิดการเผาไหม้ตลอดทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของเตาเผา VFBC ทำให้เตาสามารถผลิตพิกัดความร้อนจำเพาะได้สูงสุด 0.91 MW_{th}/m³ ที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 95% และปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% โดยอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ทางออกประมาณ 1,060°C

3. การเกิดฟลูอิด์เซชันภายในเตาไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยจำพวกทรายซิลิกาหรือลูมินา ลงไปในเบด

4. การติดตั้งวงแหวนวอร์เทคจะช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่หมุนวนอย่างรุนแรงบริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทค โดยอนุภาคที่มีน้ำหนักมากจะไม่สามารถเคลื่อนที่ออกจากเตาเผาได้ ขี้เถ้าที่ออกจากเตาเผา VFBC จึงมีขนาดเล็กละเอียดประมาณ 200-600 μ m. และมีสีดำนเทา

5. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะแปรผันตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกิน ในลักษณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศ

ส่วนเกินประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณอากาศส่วนเกินมีค่ามากเกินไปประสิทธิภาพเชิงความร้อนก็จะลดต่ำลง โดยปริมาณอากาศส่วนที่สองและสามจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเตา แต่ถ้าความเร็วอากาศส่วนที่สองทำให้เกิดฟลูอิด์เซชันมากเกินไปก็จะทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดมีโอกาสดูดออกมาจากเตาได้ และอากาศส่วนที่สามจะมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาไม่เกิน $1,000^{\circ}\text{C}$

6. ปริมาณ CO_2 , CO และ O_2 สอดคล้องกับปริมาณอากาศส่วนเกินและประสิทธิภาพของเตาโดยที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 95% จะให้ปริมาณ CO และ NO_x ที่ปล่อยออกมาจากเตาค่าไม่เกิน 50 ppm และ 380 ppm ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย คุณวิบูรณ์ เทเพนท์ สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรมกลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวที่กรุณาให้คำแนะนำต่องานวิจัยนี้ และนักศึกษาระดับปริญญาโทวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ช่วยเหลือในการทดลอง โดยมีรายชื่อดังต่อไปนี้ นายอำนาจ มากกลาง นายสิงห์ชัย ทรัพย์อุดมมาก นายวสันต์ ศรีคำมูล นายธีระวัชร อ่อนดี นายไกรสร ล้อสุวรรณ นายสุวิทย์ ภูเมือง นายอนุชา ไกล้ว นายสุรัตน์ จตุรสุขสกุล นายอดิเรก สีส่อง นายวีระ ศรีอริยะกุล นายเสรี อรพัฒนานนท์ นายวรรณ วัณณ์ นายค่านวน เพ็ญรักษา และ นายสิทธิโชค นพคุณขจร

เอกสารอ้างอิง

- Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, k., Cabanillas, A. and Otero, J. 2002. Combustion Behavior of Rice Husk in a Bubbling Fluidized Bed, B Bioenergy, 23(3): 171-179.
- Becker *et al.*, Patent Number: 4,881,476. Cyclone Reactor with Internal Separation and Axial Recirculation.
- Gupta, A.k., Lilley, D.G and Syred, N. 1984. Swirl Flows. Abacus Press, Tunbridge Wells, England.
- Madhiyanon, T., Piriyaungroj, N., Nathakarannakule, A. and Soponronnarit, S. 2003(a). A Study on Air-Rice Husk Flow Behavior Cold Model, In Proc 4th the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering., Kasetsart University, Bangkok, Thailand, Much. 13-14, 2003: 332-343.
- Madhiyanon, T., Piriyaungroj, N., Nathakarannakule, A. and Soponronnarit, 2003(b). The Vortexing-Fluidized bed Combustor Cold Model: Experiment Study of Air-Rice Husk Flow Behavior, K & D Journal of EIT., 14(4): 59-67.
- Natarajan, E., Nordin A and Rao A.N. 1998. Overview of Combustion and Gasification of Rice Husk in Fluidized Bed Reactor, B Bioenergy, 14(5/6): 533-546.
- Nieh, S. and Zhang, J. 2000. Swirling, Reacting, Turbulent Gas-Particle Flow in a Vortex Combustor, Powder Technol., 122: 70-78.
- Nigh, S., Yang, G., Zhu, A.Q. and Zhao, C.S. 1992. Measurements of Gas-Particle Flows and Elutriation of an 18 i.d. Cold Vortexing Fluidized-Bed Combustor Model, Powder Technol., 69: 139-146.
- Patent Number: 4,867,079. Combustor with Multistage Internal Vortices.
- Patent Number: 4,881,476. Cyclone Reactor with Internal Separation and Axial Recirculation.
- Rao, T.R., and Bheemarasetti, J.V. Ram. 2000. Minimum Fluidization Velocities of Mixtures of Biomass and Sands, Energy., 26(6): 633-644.
- Shang *et al.*, Patent Number: 4,867,079. Combustor with Multistage Internal Vortices.
- Singh, R., Maheshwari, R.C and Ojha, T.P. 1980. Development of a Husk Fired Furnace. J. agric Engng Res., 25: 119-120.
- Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Wetchacama, S., Shujinda, A. and Srisawat, B. 2000. Cyclone Rice Husk Furnace and Its Application on Paddy Drying, Int. Energy J., 1(2): 67-75.
- Tumambig, J.A. 1984. Testing and Evaluation of Rice Hull-Fed Furnace for Grain Drying, National Post Harvest Institute for Research and Extension., pp. 197-214.

Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.U., Ogada, T. and Siagi, Z. 2000. Combustion of Agricultural residues, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 26(1): 1-27.

Yang, G. and Nieh, S. 1987. Particle Flow Pattern in the Freeboard of a Vortexing Fluidized Bed, *Powder Technol.*, 50: 121-131.

Yang, G. and Nieh, S. 1989. On the Suspension Layers in the Freeboard of Vortexing Fluidized Beds, *Powder Technol.*, 57: 171-179.

บทความพิเศษ

การจำลองแบบปัญหาทางคณิตศาสตร์ของการ อบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคผสมผสาน

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์¹⁾ และสมเกียรติ ปรัชญาวารการ²⁾

¹⁾ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถนนสุขสวัสดิ์ 48 กรุงเทพฯ 10140 ประเทศไทย

²⁾ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถนนสุขสวัสดิ์ 48 กรุงเทพฯ 10140 ประเทศไทย

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันได้มีการผลิตเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดเป็นเชิงการค้า และส่งออกไปยังหลายประเทศ ศักยภาพของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ค่อนข้างสูงโดยเฉพาะเมื่อนำมาอบแห้งเมล็ดพืชที่มีความชื้นสูง เช่น ข้าว ข้าวโพด และถั่วเหลือง อัตราการลดความชื้นของเครื่องอบแห้งชนิดนี้สูงกว่าเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรม จากข้อดีดังกล่าวจึงกล่าวทำให้เครื่องอบแห้งมีขนาดกะทัดรัดเมื่อเทียบกับความสามารถในการอบแห้งของเครื่อง ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งต่ำ คุณภาพของเมล็ดพืชหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคนี้อยู่ในเกณฑ์ดี ในบทความนี้เป็นการบรรยายถึงงานวิจัยและพัฒนาการอบแห้งเมล็ดพืชด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด โดยเริ่มตั้งแต่การศึกษาการอบแห้งแบบเป็นงวดในระดับห้องปฏิบัติการ จนมาถึงการพัฒนาเครื่องอบแห้งชนิดต่อเนื่องเพื่อผลิตเป็นเชิงการค้า นอกจากนี้ยังกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการอบแห้ง การพัก และการเป่าลมเย็น ในแบบจำลองดังกล่าวนี้ยังได้รวมสมการของข้าวเต็มเมล็ดซึ่งจะทำให้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้มีประโยชน์สำหรับงานออกแบบหาเงื่อนไขในการอบแห้ง เพื่อให้ได้อัตราการผลิตและคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ดี

คำสำคัญ: ข้าวเปลือก คุณภาพ ระบบอบแห้ง

MATHEMATICAL MODELLING AND SIMULATION OF FLUIDISED-BED DRYING, TEMPERING AND VENTILATION OF GRAINS

Somehart Soponronnarit ¹⁾ and Somkiat Prachayawarakorn ²⁾

¹⁾ School of Energy and Materials King Mongkut's University of Technology Thonburi Suksawat 48 Road, Bangkok 10140, Thailand

²⁾ Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi Suksawat 48 Road, Bangkok 10140, Thailand

ABSTRACT

The fluidized-bed grain dryer is now fully commercialized and exported to several countries. Its potential is great especially for high moisture grains such as paddy, parboiled rice, maize and soybean. Its drying rate is very fast as compared to conventional grain dryers. Consequently, the size of drying unit is very compact relative to its capacity. Its energy consumption is relatively low while grain quality is maintained. In this paper, the research and development effort on fluidised bed grain drying is described, starting with an experimental batch dryer and culminating with a commercial continuous-flow dryer. A mathematical model of the fluidised bed grain drying system including a series of drying, tempering, ambient air ventilation and head-rice equation is derived. The model provides the useful information about designing and operating condition for the drying system in order to optimize the drying capacity and quality, both of which show the contradict results.

Keywords: Drying system, paddy, quality

Introduction

It has been suggested that high moisture paddy should be dried quickly to approximately 23% moisture content (dry basis)¹ then subjected to ambient air drying in storage (Soponronnarit et al. 1994; Driscoll and Szrednicki 1991). Following two-stage drying, cost and product quality appear to be optimised. During the first stage, fluidised bed drying is an alternative to conventional hot-air drying. Its advantages are: (1) uniform product moisture content, and thus high drying air temperature can be employed but with less overdried grain; (2) high drying capacity due to better heat and mass transfer; (3) a much smaller drying chamber and thus a significantly lower initial cost; and (4) significant spin-off in terms of increasing head rice yield and potential for producing aging rice.

Sutherland and Ghaly (1992) were probably the first research group who investigated feasibility of using fluidisation technique for paddy drying. Japanese researcher may have conducted similar research work before. Experimental results reported by Sutherland and Ghaly (1992) showed that head yield was 58-61% when paddy was dried from 28.2 to 20.5% but was 15-24% when the final moisture content was 19%. Tumambing and Driscoll (1993) found that drying rate was affected by drying air temperature and bed thickness under experimental conditions as follows: drying air temperature of 40-100°C; bed thickness of 5-20 cm and air velocity of 1.5-2.5 m/s. They also developed a mathematical model for continuous fluidised bed paddy dryer.

Soponronnarit and Prachayawarakorn (1994) have reviewed the research and development work on fluidised bed drying of grain, and conducted both experimental and simulation studies on batch fluidised bed drying of paddy. Soponronnarit et al. (1996) described the development of a cross-flow fluidised bed paddy dryer with a capacity of 200 kg/hour (Fig. 1). Experimental results showed that final moisture content of paddy should not be lower than 23% if quality in terms of both whiteness and head yield were to be maintained. Drying air temperature was 115°C. Simulation results indicated that the appropriate operating parameters should be as follows: air speed, 2.3 m/s; bed thickness, 10 cm; and fraction of air recycled of 0.8. With these conditions, energy consumption was close to the minimum, while drying capacity was near maximal. In this study, moisture of paddy was reduced from 30 to 24%.

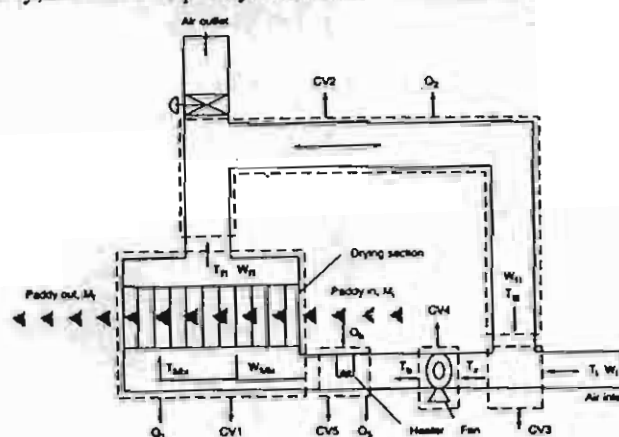


Figure 1 Control volumes of continuous cross-flow fluidised bed drying system: $\leftarrow$ grain flow; $\rightarrow$ air flow; T , temperature; W , humidity ratio; M , grain moisture content; Q , heat; CV , control volume.

¹ Unless otherwise stated, the moisture contents (m.c.) quoted in this paper are dry basis.

Following the success of the development of the cross-flow fluidised bed paddy dryer, Rice Engineering Supply Co. Ltd., a private company in Thailand, showed interest in collaborating in the development of a prototype with a capacity of approximately 1 t/hour as shown in Figure 2 (Soponronnarit et al. 1995). It comprises a drying section, a 7.5 kW backward curved blade centrifugal fan, a diesel fuel-oil burner, and a cyclone. The bed length, width and height of the drying section are 1.7, 0.3 and 1.2 m, respectively. The depth of the paddy bed is controlled by a weir. Paddy is fed in and out by rotary feeders. In operation, hot air (temperature controlled by thermostat) is blown into the drying section through a perforated steel sheet floor. The air and grain flows are perpendicular to each other. A small portion of the air leaving the drying chamber is vented to the atmosphere, while the remainder, after cleaning in a cyclone, is recycled to the dryer, mixed with ambient air and reheating to the desired temperature, respectively. The feed rate of paddy can be varied from less than 1 t/hour to more than 1.5 t/hour. More detail is given in Yapha (1994). Experimental results showed that the unit operated efficiently and yielded high product quality in terms of head yield and whiteness. In reducing the moisture content from 45 to 24% using air temperature of 100-120°C, fraction of air recycled of 0.66, specific airflow rate of 0.05 kg/s/kg dry matter, superficial air velocity of 3.2 m/s, and bed depth of 0.1 m, total primary energy consumption was 2.32 MJ/kg of water evaporated, of which 0.35 was primary energy from electricity (electrical energy multiplied by 2.6) and 1.79 was primary energy in terms of heat energy.

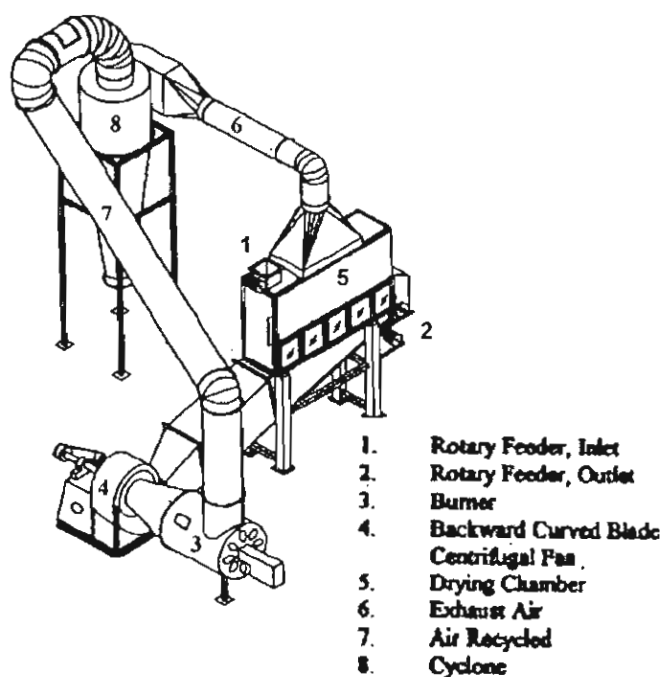


Figure 2 Commercial fluidised-bed paddy dryer

As a result of the success of the prototype, commercial fluidised bed paddy dryers with capacities of 5, 10 and 20 t/hour are now available. More than 200 units have been sold since the beginning of 1995. The fluidised bed dryer is mainly composed of a drying chamber, a backward curved blade centrifugal fan, a burner using diesel oil or fuel oil for heating air, and a cyclone or a cyclo-fan. Commercial cyclonic rice husk furnace is now available commercially. More than

200 units have been sold since the beginning of 1999.

Operation of the commercial fluidised bed paddy dryer is similar to the prototype except that a small portion of exhaust air is vented to the atmosphere after being cleaned by the cyclone.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL

It was assumed that there is thermal equilibrium between the drying air and the product, and that the air and grain flow were in plug type. Experimental results reported by Sripawatakul (1994) indicated that the flow regime of paddy was between near plug flow and high dispersion flow. Though dispersion was a known factor in the fluidised bed, the mathematical model assumed plug flow in order to simplify calculation. The model is similar to that presented by Soponronnarit and Prachayawarakorn (1994). Figure 1 shows control volumes (CVs) for the derivation of energy and mass balance equations.

Equation of mean residence time

The empirical equation of mean residence time of paddy developed by Sripawatakul (1994) was used. It is written as follows:

$$\tau = hu/F \quad (1)$$

where τ = mean residence time, second (s)

hu = hold up, kg

F = feed rate, kg/s

and $hu = \{ \{-0.0095000 + 0.59870 F - (0.00020000 + 0.17360 F) V\} + \{1.1728 - 0.082300 V + (2.2093 - 0.15050 V) F\} h \} \rho_p A$

where A = paddy bed area, m^2

V = air velocity, m/s

ρ_p = average product density, kg/m^3

h = weir height, m

It is valid for weir heights in the range 0.04 - 0.10 m, air velocities in the range 1.7 - 2.3 m/s, and paddy feed rates in the range 0.025 - 0.058 kg/s. For a rough calculation, hu is approximately equal to $hA\rho_p$ and can be applied to other grains.

Dividing the paddy bulk into n layers, changes in moisture content of paddy, temperature, and the humidity ratio of air were calculated for each layer. The following basic equations were employed.

Equation for the drying rate

The empirical equation for fluidised bed paddy drying in the form of the equation of Page (1949), developed by Sripawatakul (1994), was used. It is written as follows:

$$MR = \exp \{-x(t/60)^y\} \quad (2)$$

where $MR = (M - M_{eq}) / (M_{in} - M_{eq})$
 t = drying time, s
 $x = 0.00163100 T_{mix} - 1.16202 (m_{mix}/hu)$
 $+ 0.00415300 (m_{mix}/hu) T_{mix}$
 $+ 0.147383 \ln (m_{mix}/hu) + 0.474743$
 $y = -0.00322000 T_{mix} - 0.835960 (m_{mix}/hu)$
 $+ 0.0203190 (m_{mix}/hu) T_{mix}$
 $- 0.143150 \ln (m_{mix}/hu) + 0.548493$

Equation (2) is similar to that developed by Soponronnarit and Prachayawarakorn (1994) for higher specific airflow rate (m_{mix}/hu). It is valid for temperatures of 90 - 140°C and specific airflow rates of 0.03 - 0.16 kg/s/kg dry matter of paddy. The symbols are defined as follows:

M = moisture content of paddy at time t , decimal dry basis
 M_{in} = moisture content of paddy at the inlet of drying section, decimal dry basis
 M_{eq} = equilibrium moisture content, decimal dry basis
 T_{mix} = air temperature at the inlet of drying section, °C
 m_{mix} = airflow rate at the inlet of drying section, kg/s

During calculation, Equation (2) was differentiated with time, and finite difference was employed to obtain the solution. Equilibrium moisture content was determined using the equation developed by Laithong (1987).

For the drying rates of maize and soybean, they are available in Soponronnarit et al. (1997) and Soponronnarit et al. (2001), respectively.

Equation of mass conservation

$$W_{n,i} = R_i(M_i - M_f) + W_{mix} \quad (3)$$

where $W_{n,i}$ = humidity ratio of outlet air at the i^{th} layer, kg water/kg dry air
 W_{mix} = humidity ratio of inlet air at the i^{th} layer, kg water/kg dry air
 M_i = moisture content of paddy at the inlet of i^{th} layer, decimal dry basis
 M_f = moisture content of paddy at the outlet of i^{th} layer, decimal dry basis
 R_i = ratio of dry mass of paddy to mass of dry air.

Equation of energy conservation

$$T_{n,i} = [Q_1/m_{mix} + C_a T_{mix} + W_{mix}(h_{fg} + C_v T_{mix}) - W_{n,i} h_{fg} + R_i C_{pw} \theta_g] / (C_a + W_{n,i} C_v + R_i C_{pw}) \quad (4)$$

where $T_{n,i}$ = temperature of outlet air at the i^{th} layer, °C
 θ_g = grain temperature, °C
 Q_1 = heat loss, kW
 C_a = specific heat of dry air, kJ/kg °C
 C_v = specific heat of vapour, kJ/kg °C
 C_{pw} = specific heat of moist paddy, kJ/kg °C

$$h_{fg} = \text{latent heat of moisture vaporisation, kJ/kg}$$

Average temperature and humidity ratio of the outlet air from n layers were determined by arithmetic mean.

For other calculations such as mixing of air streams, and consumption of energy at the fan and the heater, solutions can be achieved by the application of first law of thermodynamics [see Soponronnarit and Prachayawarakorn (1994) for details].

The equations were solved by iteration. Firstly, the value of exit humidity ratio of air was assumed. The equations presented by Wilhelm (1976) were used to determine properties of moist air.

The accuracy of the mathematical model was tested and found to be in good agreement with the experimental results. The model was employed to investigate optimum operating parameters such as air temperature, specific airflow rate, and fraction of air recycled. Details for paddy drying and maize drying are available in Soponronnarit et al. (1996) and Soponronnarit et al. (1997), respectively.

Further development of the mathematical model

In simulation of multi-stage drying including the tempering between each stage, the moisture profile in a grain kernel at the end of each drying stage must be known. Unfortunately, the moisture profile in a grain kernel cannot be predicted by the empirical drying equations such as Equation (2). But, it can be determined only by using a theoretical equation, mostly described by the Fick's unsteady state diffusion equation in which an effective moisture diffusion coefficient is taken into account.

Poomsa-ad et al. (2002) developed the mathematical model for the simulation of multi-stage drying including the tempering between each stage. It was assumed that water moves in the combined radial and axial direction and paddy is an isotropic solid. The partial differential equation of moisture diffusion for a single paddy kernel considered geometrically to be a finite cylindrical shape can be written as follows:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r} \right) \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right] \quad (5)$$

where D = effective moisture diffusion coefficient, m^2/s

r = coordinate along the radius of cylinder, m

z = coordinate along the length of cylinder, m

The initial and boundary conditions for paddy drying are given by

$$t = 0, \quad 0 \leq r \leq r_0 \quad M = M_{in} \quad \text{or} \quad M = M(r, z)$$

$$-\ell \leq z \leq +\ell \quad M = M_{in} \quad \text{or} \quad M = M(r, z)$$

$$t > 0, \quad r = r_0 \quad M = M_{eq}$$

$$z = \pm \ell \quad M = M_{eq}$$

$$t > 0, \quad r = 0 \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0$$

where ℓ = half length of cylinder, m

r_0 = radius of cylinder, m

The effective moisture diffusion coefficient described by the Arrhenius type equation is given as follows:

$$D = 5.41141 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-28436.4}{R(273.15 + T)}\right) \quad (6)$$

where R = universal gas constant, kJ/kmol-K

For tempering process, moisture profile at the end of the first stage drying is used as the initial condition. During this period, the moisture inside a paddy kernel transports to the exterior surface, but it does not evaporate to the environment. The redistribution of moisture inside the kernel can be described again by Equation (5) with the new boundary and initial conditions as follows:

$$\begin{aligned} t = 0, & \quad M = M(r, z) \\ t > 0, \quad r = r_o & \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \\ z = \pm \ell & \quad \frac{\partial M}{\partial z} = 0 \\ t > 0, \quad r = 0 & \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \end{aligned}$$

The degree of uniformity of moisture content in this stage is described by the tempering index, I_c ,

$$I_c = \frac{(M_{s,1} - M_{s,t=0})}{(M_{s,t=\infty} - M_{s,t=0})} \quad (7)$$

where M_s is the surface moisture content, decimal dry basis. Theoretically, the uniform distribution of moisture, corresponding to the tempering index of unity, required infinite time.

After tempering stage, the grains are cooled to room temperature, using ambient air temperature, to stop formation of yellow pigment. Yellowing can be a severe problem in rice drying because temperature stimulates the development of rice yellowness, a non-enzymatic browning reaction (Taweerattanapanish et al., 1999; Soponronnarit et al., 1998a; Yap et al., 1988). Ventilation was stopped when the grain temperature approached or was slightly above ambient air temperature. While the air ventilated through the heated grains, there was the simultaneous heat and mass transfer from the grain to air, making the air slightly warmer and more humid. The heat-transfer phenomenon in this unit was opposite to that occurring in the dryer section. Assuming that the air flowed through a thin bed in the cross-flow dryer, the outlet-air temperature, T_n , is thus given by

$$T_n = \frac{(C_a T_i + W_i(h_{fg} + C_v T_i) - W_i h_{fg} + R_i C_{pv} \theta_{in})}{(C_a + W_n C_v + R_i C_{pv})} \quad (8)$$

where θ is the grain temperature ($^{\circ}\text{C}$) and W_n is the outlet humidity ratio at the ventilation unit. Using such a simplified assumption, the properties of air change insignificantly along the bed height, thereby providing economic computation by a single-step approach. For the moisture transport in the ventilation, it is calculated by using Equation (5) again, with the following initial and boundary conditions:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad M = M(r, z) \quad t > 0, \quad r = r_0 \quad M = M_{eq} \\ z = \pm l \quad M = M_{eq} \end{aligned}$$

In the determination of moisture reduction, the grain temperature is replaced in Equation (6), instead of the inlet-air temperature, because the grain temperature at the beginning of ventilation was approximately 50°C higher than the ambient-air temperature.

Head-rice yield equation

Poomsa-ad et al. (2001) reported that the amount of head rice yield related with tempering time, grain temperature or tempering temperature and the moisture content after fluidised-bed drying. A head rice equation was simply described by

$$RHY = A + Bt + Ct^2 \quad (9)$$

where $A = -39.232 + 8.4227M_f - 0.34060T - 0.029105TM_f$
 $B = 25.945 - 1.1878M_f - 0.2443T + 0.012302TM_f$
 $C = -0.33610 + 0.015028M_f + 0.003259T - 0.00015762TM_f$

t is the tempering time (minute), M_f is the moisture content (%d.b.) after drying and T is the tempering temperature (°C).

SIMULATION RESULTS

Figure 3 shows the change of moisture content and grain temperature after passing through the units i.e. drying, tempering and ventilation in the process of paddy drying. This experiment was carried out with a batch fluidized-bed drying and the details were given in Poomsa-ad et al. (accepted to be published). As shown in this Figure, the moisture content is reduced from 27.5% d.b. to 22.5% d.b. in the fluidised-bed dryer followed the unchanged value of moisture content in the tempering stage. In the last stage, the moisture content is decreased to 17.5% d.b. The model proposed reasonably predicts the changes of moisture content and grain temperature at various units of the paddy drying process. As seen in Figure 3b, the temperature steeply drops during a small interval of ventilation, thus causing a high reduction of head rice yield, due to the thermal and moisture gradients, if the grains are not tempered. The poor head-rice yield can be seen in Figure 4 for zero tempering time, with a relative head-rice yield of 20% for the case of B. The relative head-rice yield is defined as the ratio of head-rice yield obtained by drying paddy at high temperature to that at ambient temperature. For the case of A, on the other hand, the head-rice yield quality does not drop although the sample is not subjected to temper.

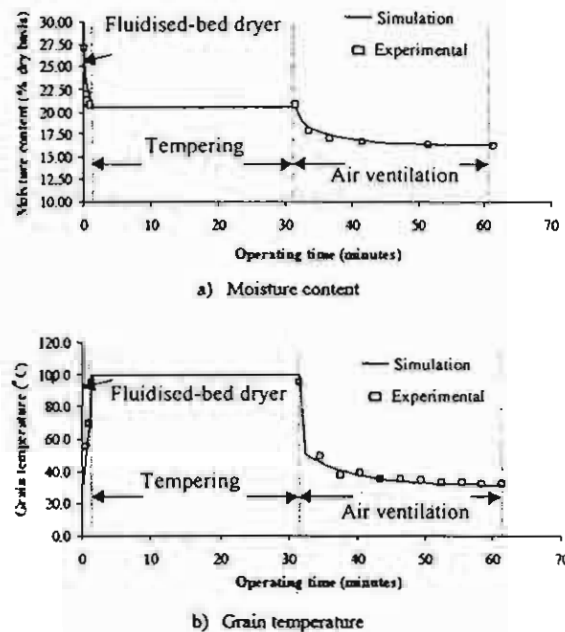


Figure 3 Comparisons of moisture content and grain temperature obtained from the experiment and prediction. (Poomsa-ad et al. (accepted to be published))

The insignificant reduction of head-rice yield for the case of 35% d.b. moisture content is probably attributed to the gelatinization effect, making paddy to withstand the milling forces. When the tempering time increases, the head-rice yield is improved and higher than that at zero tempering time. According to this result, it is questionable whether the paddy should be tempered for how long after drying with fluidised-bed dryer. To answer such a question, the proposed model is used to estimate the suitable tempering time. The criterion indicating the appropriate tempering time is related to the tempering index. Poomsa-ad et al. (2002) recommended the tempering index of 0.95, corresponding to the calculated tempering time of 35 minutes for high-temperature drying. This agrees with the experiment results shown in Figure 4, indicating insignificant change of head-rice yield after tempering for 30 minutes. In addition to the aforementioned quality, the fastest drying rate at the subsequent stage is achieved, giving the benefit of effective energy utilisation. From this figure, it also shows that the head-rice yield equation when included in the heat and mass transfer equations reasonably explains the quality change with the tempering time.

The similar result was also reported by several workers (Steffe et al., 1979; Soponronnarit et al., 1998b; Soponronnarit et al., 1999), showing a higher head-rice yield when the tempering was included between drying stages.

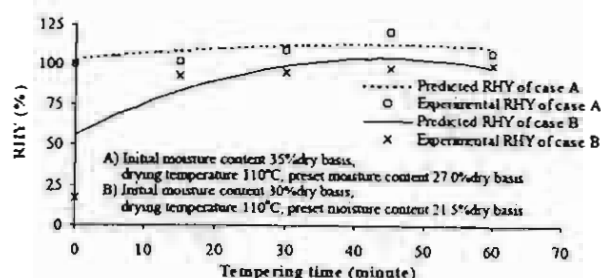


Figure 4 Effect of tempering time on relative head-rice yield
(Poomsa-ad et al. (accepted to be published))

SIGNIFICANCE OF SIMULATION RESULTS

Reducing moisture content of paddy by using only fluidised-bed dryer seems an inappropriate method since the transport of water is controlled by internal resistances, resulting in wastage of energy. Besides, the amount of broken rice is enormous, due to excessive stresses produced inside the kernel, and the colour of white rice changes from white to yellow, causing by the non-enzymatic browning reaction (Soponronnarit and Prachayawarakorn, 1994; Sutherland and Ghaly, 1992). To optimise the drying time and energy consumption, along with high head-rice yield, moist paddy should be followed with three stages in series i.e. fluidised bed, tempering and ambient air ventilation to remove its moisture content to a certain level for safe storage. Both experiments and simulations agree well that fluidised-bed dryer, with inlet air temperature of 150°C, is used to decrease the moisture content of paddy to 19.5% d.b. followed with tempering for 30 minutes. In the last stage, the paddy is cooled by ambient air (temperature and relative humidity of 30°C and 55-60%, respectively with air velocity of 0.15 m/s) for 20 minutes. Quality of paddy in terms of head-rice yield and whiteness is acceptable. Under the specified conditions, the thermal and electrical energy consumptions were in the respective ranges of 5-7 MJ/kg-water evaporated and 0.54-0.61 MJ/kg-water evaporated. For drying paddy within high moisture range using fluidized bed technique only, it was reported by Soponronnarit (2000) that energy consumption was lower, i.e. 2.2-3.9 MJ/kg-water evaporated in terms of thermal energy and 0.15-0.43 MJ/kg-water evaporated in terms of electrical energy. Under proper conditions such as high initial moisture content of paddy (higher than 30%) and high air temperature (140 - 150°C), head yield can be increased up to 50% compared to ambient-air drying. For consumer acceptance, tested rice with fluidised bed drying is insignificantly different from that dried by ambient air.

Conclusion

Fluidised bed grain drying has been developed for almost 10 years in Thailand. The first fluidised bed paddy dryer was first commercialized in Thailand in 1995. It is probably the first commercial continuous fluidised bed dryer for paddy drying. Since then, more than 200 commercial units with capacities of 5, 10 and 20 tons/hour have been sold in Thailand, Cambodia, Indonesia, Laos, Malaysia, Mexico, Myanmar, the Philippines, Taiwan and Venezuela.

A basic study including drying kinetics and factors affecting grain quality, moisture reduction rate and energy consumption was conducted for paddy, maize and soybean. Important results are presented in this paper. Finally, a complete mathematical model for the fluidised bed grain drying system including a series of drying, tempering and subsequent ventilation was derived.

In conclusion, the fluidised bed paddy dryer is competitive with conventional hot air dryers especially at high moisture level, i.e. low energy consumption, low cost and acceptable paddy quality. Important operating parameters are: drying air temperature of 140 - 150°C, fraction of air recycled of 0.8, air velocity around 2.0 - 2.3 m/s and bed thickness of 10 - 15 cm. Under proper conditions such as high initial moisture content of paddy (higher than 30%) and high air temperature (140 - 150°C), head yield can be increased up to 50% compared to ambient-air drying. For consumer acceptance, tested rice with fluidised bed drying is not significantly different from that dried by ambient air.

Acknowledgment

Thanks are due to the Thailand Research Fund for financial support to the Research Group on Drying Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.

References

- Driscoll, R.H. and Srzednicki, G.S., 1991. **Design for a complete grain drying system under Southeast Asian climates**. Proceedings of the 12th ASEAN Technical Seminar on Grain Post-harvest Technolog; 29-31 August 1989; Surabaya; Indonesia.
- Laithong, C., 1987. **Study of physico-thermal properties of rough rice**. [Master's thesis]. Bangkok, Thailand: King Mongkut's Institute of Technology Thonburi.
- Page, G.E., 1949. **Factors influencing the maximum rate of drying shelled corn in layers**. [Master of Science]: Purdue University.
- Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Terdyothin, A. 2002. Effect of tempering on subsequent drying of paddy using fluidisation technique. **Drying Technology** 20: 195-210.
- Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Terdyothin, A. and Prachayawarakorn, S., 2001. **Head rice yield after drying by fluidization technique and tempering**. Proc. the 2nd Asian-Oceania Drying Conference; 20-23 August 2001; Penang, Malaysia.
- Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. Investigation on head-rice yield and operating time in drying process: Experiment and Simulation. **Journal of Stored Product Research**. (Accepted to be published)
- Soponronnarit, S., 2000. Fluidised bed grain drying. In: Mujumdar, A. and Suvachittanont, S. (Eds.), **Developments in Drying Vol. II. Drying of Food and Agro-Products** : 135-148
- Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. 1994. Optimum strategy for fluidized bed paddy drying. **Drying Technology** 12: 1667-1686.
- Soponronnarit, S., Kittiporn, K. and Prachayawarakorn, S. 1997. Appropriate operating parameters for fluidized bed corn drying. **ERIC International Energy Journal** 19: 1-13.
- Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Sripawatakul, O., 1996. Development of cross-flow fluidized bed paddy dryer. **Drying Technology** 14: 2397-2410.
- Soponronnarit, S., Srisubati, N., Yoovidhya, T., 1998a, Effect of temperature and relative humidity on yellowing rate of paddy. **Journal of Stored Products Research**. 34: 323-330.
- Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Wetchacama, S. and Wutiwatchai, W., 2001, Fluidised bed drying of soybeans. **Journal of Stored Product Research**. 37: 133-151.
- Soponronnarit, S., Taweerattanapanish, A., Wetchacama, S., Kongseri, N. and Wongpiyachon, S. 1998b. **Spin-off from paddy drying by fluidization technique**. Keynote paper in

- Proc. at the 7th International Working Conference on Stored-Product Protection; 14-19 October 1998; Beijing, China.
- Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Swasdisevi, T. and Poomsa-ad, N., 1999, Managing moist paddy by drying, tempering and ambient air ventilation. **Drying Technology** 17: 335-344.
- Soponronnarit, S., Wongvirojtana, P., Nathakarakakule, A. and Prachayawarakorn, S., 1994. **Maintaining paddy quality by appropriate ventilation under tropical climate.** Proceedings of the 9th International Drying Symposium; 1-4 August 1994; Gold Coast; Australia.
- Soponronnarit, S., Yapha, M. and Prachayawarakorn, S., 1995, Cross-flow fluidized bed paddy dryer: prototype and commercialization. **Drying Technology** 13: 2207-2216.
- Sripawatakul, O., 1994. **Study of drying paddy by cross-flow fluidization technique.** [Master's thesis Faculty of Engineering]. Bangkok. Thailand: King Mongkut's Institute of Technology Thonburi.
- Steffe, J.F., Singh, R.P. and Bakshi, A.S., 1979, Influence of tempering time and cooling on rice milling yields and moisture removal. **Trans. of the ASAE**. 17: 1214-1218.
- Sutherland, J.W. and Ghaly, T.F., 1992. **Rapid fluid bed drying of paddy rice in the humid tropics.** Proceedings of the 13th ASEAN Conference on Grain Post-harvest Technology. 4-7; September 1990; Brunei Darussalam.
- Taweerattanapanish, A., Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Kongseri, N., Wongpiyachon, S., 1999. Effects of drying in head rice yield using fluidization technique. **Drying Technology** 17: 345-353.
- Tumambing, J.A. and Driscoll, R.H. 1993. **Modeling the performance of continuous fluidized bed paddy dryer for rapid pre-drying of paddy.** *Proceedings of the 14th ASEAN seminar on Grain Post-harvest Technology*; 5-8 November 1991; Manila, Philippines.
- Wilhelm, L.R. 1976. Numerical calculation on psychrometric properties in SI units. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers** 19: 318-321, 325
- Yapha, M., 1994. **Design and testing of pilot continuous fluidized bed paddy dryer.** [Master's thesis, School of Energy and Materials]. Bangkok. Thailand; King Mongkut's Institute of Technology Thonburi.
- Yap, A.B., Juliano, B.O., Perez, C.M. 1988. **Artificial yellowing of rice at 60°C.** In: **Naewbanij, J.O. (Ed).** Proceedings of the Eleventh ASEAN Technical Seminar on Grain Postharvest Technology; 23-26 August, 1988; Kuala Lumpur, Malaysia. ASEAN Grain Postharvest Programme. Bangkok. Thailand.



ประวัติส่วนตัว

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2495 ที่ กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีเกียรตินิยมอันดับ 1 จากมหาวิทยาลัยขอนแก่นด้าน วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเกษตร ปริญญาโทจาก Asian Institute of Technology และระดับ ปริญญาเอกด้าน Agricultural Process Engineering จาก Ecole National Supérieure Agronomique de Toulouse สมรสกับนางเจิมใจ (อัครเสนา) โสภณรณฤทธิ์ มีบุตร 3 คน คือนางสาวกุลยา นางสาวกชพร และนายกานต์ โสภณรณฤทธิ์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งศาสตราจารย์ระดับ 11 คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และรักษาการคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม ปี พ.ศ. 2539 ได้รับรางวัลนักวิจัยดีเด่นแห่งชาติ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรม วิจัย จากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ และได้รับทุนเมธีวิจัยอาวุโส สกว.รุ่นที่ 2 พ.ศ. 2539-2542 ปี พ.ศ. 2543 ได้รับรางวัลนักวิทยาศาสตร์ดีเด่น และได้รับทุนทุนเมธีวิจัยอาวุโส สกว.รุ่นที่ 5 พ.ศ. 2543-2546 ในปี 2546 ได้รับรางวัลนักวิทยาศาสตร์ขององค์การยูเนสโก (2003 UNESCO SCIENCE PRIZE) และในปี พ.ศ. 2547 ได้รับพระราชทานเครื่องราชอิสริยาภรณ์ ม.ป.ช. มหาปรมาภรณ์ช้างเผือก

ผลงานเด่นได้แก่ การร่วมมือกับภาคเอกชนพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับอบแห้งข้าวเปลือกและ เตาเผาแกลบ จนนำไปสู่การจดสิทธิบัตร ผลิตขาย และส่งออกอย่างแพร่หลาย ปฏิบัติการหลังการเก็บเกี่ยวเป็นขั้นตอนที่สำคัญต่อคุณภาพของผลผลิต โดยเฉพาะขั้นตอนการลดความชื้นซึ่งสำคัญต่อการ รักษาคุณภาพ และลดการสูญเสีย ผลผลิตรวมของข้าวเปลือกมีมูลค่ากว่า 80,000 ล้านบาทต่อปี หาก สามารถลดการสูญเสียเพียง 1% ก็จะสามารถลดความเสียหายได้ถึง 800 ล้านบาท การอบแห้งโดย เทคนิคฟลูอิดไอเซชัน (fluidization) เป็นวิธีการใหม่ที่นำมาใช้ลดความชื้นของข้าวเปลือก สามารถลดทั้ง ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิต นอกจากนี้เตาเผาแกลบไซโคลน (cyclone) ที่พัฒนาขึ้น สามารถลด การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงได้อย่างน้อยปีละ 200-300 ล้านบาท และได้มีเอกชนหลายบริษัทนำต้นแบบ เครื่องอบแห้งฟลูอิดไอเซชันและเตาเผาแกลบไซโคลนไปผลิตขายเชิงการค้าทั้งในประเทศและต่าง ประเทศแล้วไม่ต่ำกว่า 500 เครื่อง เป็นมูลค่าไม่ต่ำกว่า 500 ล้านบาท

การรวมกระบวนการผลิตของการนึ่งและการอบแห้ง ข้าวหนึ่งสำหรับข้าวหอม

Combination Process of Steaming and Drying for Parboiling Aromatic Rice

เฉลิมพร เอี่ยมมณี¹⁾, พชร ตั้งตระกูล²⁾, ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์³⁾, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์⁴⁾

Chalermporn Eiammi¹⁾, Pacharee Tangtrakul²⁾, Chaiyong Tachapairoj³⁾, Somchart Sophonronnarit⁴⁾

Abstract

This research is the feasible study for the combination process of steaming and drying for parboiling aromatic rice using superheated steam fluidized bed drying. The effects of soaking times and drying times on the head rice yield, color, white belly, cooking quality, pasting viscosity of rice flour and gelatinization are considered. In the experiments, paddy with initial moisture content of 15.7% d.b. was soaked by hot water at temperature of 80 °C for 0.5 - 3 hours. Next, paddy was dried at 150 °C for 0.5 - 7 minutes, superheated steam velocity of 3.0 m/s and bed height of 10 cm. Experimental results found the soaking time of 3 hour and drying time of 2 minutes provide considerable increase in head rice yields which lines in the rang of 67.9%. Moreover, whiteness are the good criteria; however, it will be reduced with increase in soaking and drying time. White belly of all condition are increased more than rice reference. In the texture test, the cooked rice is moderately hardened and flaked with increase in drying time. Besides, the peak and the final viscosity are reduced, but the pasting temperature will be increased. For the gelatinization analysis by DSC, paddy with soaking time of 3 hours and drying 2 minutes appears to have the gelatinization more than paddy of soaking time of 2 hours and drying 2 minutes (degree of gelatinization of 88.5 and 78% for soaking time of 3 and 2 hours respectively).
Keywords: Parboiling aromatic rice, Fluidized bed, Paddy drying, Rice quality, Superheated steam

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการรวมกระบวนการผลิตของการนึ่งและการอบแห้งข้าวหนึ่งสำหรับข้าวหอม โดยการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดมีไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลาง ซึ่งพิจารณาถึงอิทธิพลของระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ข้าวเปลือกและระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ที่มีต่อการเพิ่มปริมาณต้นข้าว สี White belly คุณภาพการหุงต้ม ความหนืดของน้ำแป้ง และการเกิดเจลลิตไนเซชัน (Gelatinization) ทำการทดลองโดยใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นก่อนแช่ 15.7% มาตรฐานแห้ง แช่ในน้ำอุณหภูมิ 80 °C. เป็นเวลา 0.5 - 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาอบแห้ง ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150 °C. เป็นเวลา 0.5-7 นาที ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากับ 3.0 ม./วินาที และความสูงของเบด 10 ซม. จากผลการศึกษาพบว่า การแช่และการอบแห้งสามารถเพิ่มปริมาณต้นข้าวได้สูงสุด 67.9% เมื่อแช่เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง และอบแห้ง 2 นาที โดยความขาวของข้าวจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้นของการแช่และการอบแห้ง ส่วน White belly จะเพิ่มสูงขึ้นกว่า

ข้าวอ้างอิงทุกเงื่อนไขการทดลอง จากการทดสอบเนื้อสัมผัสพบว่า ข้าวสุกจะแข็งและร่วนขึ้น เมื่อใช้เวลาในการอบแห้งมากขึ้นที่ระยะเวลาการแช่เท่ากัน นอกจากนี้เวลาในการอบแห้งที่มากขึ้น ยังทำให้ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) และความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) มีค่าลดลง แต่ค่าอุณหภูมิที่แป้งเริ่มพองตัว (Pasting temperature) สูงขึ้น การวิเคราะห์การเกิดเจลลิตไนเซชันด้วยเครื่อง DSC ข้าวที่แช่นาน 3 ชั่วโมงและอบแห้ง 2 นาที เกิดการเจลลิตไนเซชันมากกว่าข้าวที่แช่เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงและอบแห้ง 2 นาทีโดยมี ระดับของเจลลิตไนเซชัน (Degree of gelatinization) เท่ากับ 88.5% และ 78% ตามลำดับ

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตข้าวหอมที่สำคัญ ผลผลิตข้าวหอมนอกจากใช้บริโภคในประเทศ ยังสามารถส่งออกในปีหนึ่งๆ นั้นมีมูลค่าหลายพันล้านบาท ข้าวหนึ่งเป็นส่วน

- 1) นักศึกษาปริญญาโท, 4) ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ, กรุงเทพฯ
- 2) นักวิจัยชำนาญการ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร, กรุงเทพฯ
- 3) อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร สนามจันทร์, นครปฐม

หนึ่งของมูลค่าข้าวที่ประเทศไทยส่งออกในแต่ละปี การผลิตข้าวหนึ่งแ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ การแช่ (Soaking) การนึ่ง (Steaming) และการอบแห้ง (Drying) ถ้าสามารถลดขั้นตอนการผลิตโดยการรวมกระบวนการในการผลิตซึ่งจะสามารถลดต้นทุนและประหยัดพลังงานในขั้นตอนเหล่านั้นด้วย ก็จะทำให้ประเทศไทยสามารถแข่งขันและมีความได้เปรียบทางการค้ามากขึ้น

Kar และคณะ (1999) พบว่าความร้อนจะทำให้น้ำแพร่เข้าไปในเมล็ดได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งแ่งลงได้มาก แต่ระยะเวลาและอุณหภูมิตลอดจนน้ำที่ใช้ในการแช่มีอิทธิพลต่อคุณภาพข้าวหนึ่งแ่งที่ได้ Bhattacharya (1996) ได้นำข้าวเปลือกไปทำการแช่น้ำอุณหภูมิ 70 °ซ. เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปนึ่งด้วยไอน้ำภายใต้ความดันต่างๆ คือ 101-304 กิโลปาสกาล (ระบบปิด) ระยะเวลา 0-60 นาที พบว่าการเปลี่ยนสีของข้าวหนึ่งแ่งทั้งหมดเป็นไปตามจลนศาสตร์อันดับศูนย์ ถ้าระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตนานและความดันที่ใช้เพิ่มมากขึ้น จะมีผลทำให้ข้าวสารที่ได้มีความเหลืองเพิ่มขึ้น

Toshinori และคณะ (1993) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาในการนึ่ง พบว่าเมื่ออุณหภูมิหนึ่งสูง ความขาวของเมล็ดข้าวจะลดลง และเมื่อระยะเวลาในการนึ่งมากขึ้นความขาวของเมล็ดข้าวมีแนวโน้มลดลง Taechapairoj และคณะ (2003) ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไธเบตด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความชื้นเริ่มต้น 44.4% มาตรฐานแห้ง ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 16-28% มาตรฐานแห้ง โดยใช้อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 150-170 °ซ. ความสูงของเบต 10-15 ซม. และความดันสมบูรณ์ของไอน้ำในระบบเหนือบรรยากาศเล็กน้อย พบว่าอุณหภูมิของไอน้ำมีผลต่อการอบแห้งมากกว่าความสูงของเบต และความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกมีอิทธิพลต่อร้อยละ และได้เสนอแนะว่าควรใช้อุณหภูมิในการแช่ข้าวเปลือกประมาณ 80 °ซ. เพื่อให้ข้าวเปลือกเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) ได้ดีขึ้นซึ่งเป็นการลดปริมาณ White belly นอกจากนี้ พบว่าทำให้ได้ปริมาณต้นข้าวเพิ่มขึ้น แต่สีของข้าวสารที่ขัดสีแล้วมีสีที่เข้มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น และเมื่อนำไปทดสอบคุณภาพจะมีลักษณะคล้ายข้าวหนึ่งแ่งมาก

Rordprapat และคณะ (2002) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไธเบต ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150 °ซ. ความสูงเบต 10 ซม. ความเร็วที่ใช้อบแห้งเท่ากับ 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไธเซชัน พบว่า

ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีร้อยละต้นข้าวสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่ความขาวของข้าวสารต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งมีสีน้ำตาลอ่อน จากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมาจึงสามารถรวมกระบวนการนึ่งและการอบแห้งเข้าด้วยกันได้โดยวิธีการเทคนิคฟลูอิดไธเบตที่มีไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลาง

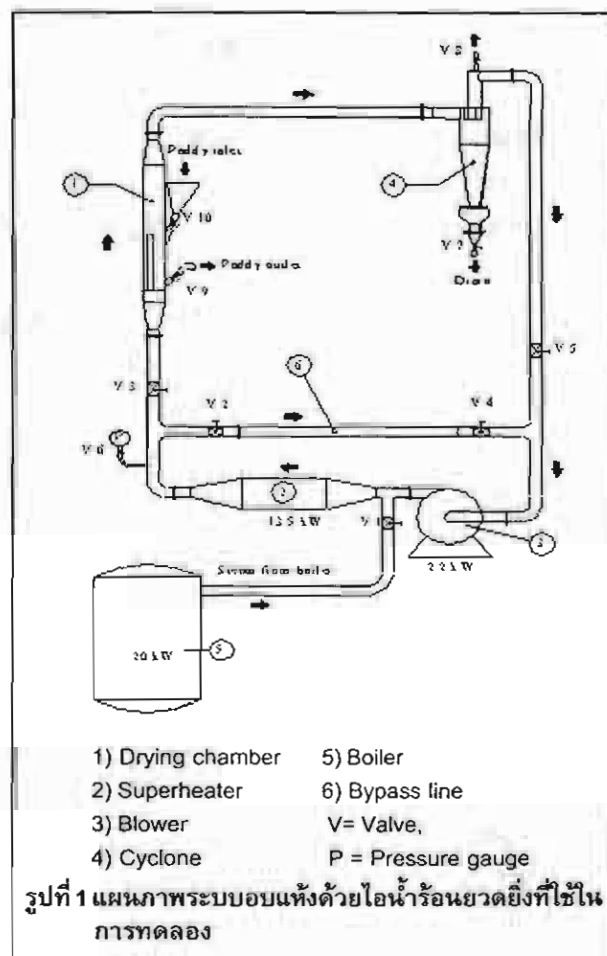
จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของการผลิตข้าวหนึ่งแ่งโดยการรวมกระบวนการนึ่งและการอบแห้งข้าวหนึ่งแ่งข้าวหอมไว้ด้วยกัน ตลอดจนสมบัติของข้าวทางด้านกายภาพและเคมีกายภาพของข้าวหอมที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งข้าวหนึ่งแ่งโดยเทคนิคฟลูอิดไธเบตที่ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลาง

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์

1. เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธเบต โดยมีไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางชนิดอบแห้งเป็นวงวด แสดงดังรูปที่ 1 มีส่วนประกอบคือ

- ห้องอบแห้ง (Drying chamber) เป็นรูปทรงกระบอก



ทำด้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. และสูง 100 ซม.

- อุปกรณ์ให้ความร้อน (Superheater) มีขนาด 13.5 กิโลวัตต์ โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID มีค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

- พัดลม (Blower) เป็นแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง (Backward - curved centrifugal blower)

- มอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ สามารถปรับความเร็วรอบของพัดลมได้

- เครื่องดักฝุ่น (Cyclone) เป็นแบบ Reverse flow ทำด้วยสแตนเลส

- เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) ออกแบบความดันใช้งานสูงสุด 3.5 บาร์ โดยมีวาล์วระบายไอน้ำเพื่อระบายไอน้ำเมื่อความดันเกินปกติ ตั้งที่ค่าความดัน 3.5 บาร์ ความสามารถผลิตไอน้ำได้ 31 กก./ชม. ที่อุณหภูมิ 100°C . ความดันบรรยากาศ หรือเทียบได้กับพลังงานความร้อน 20 กิโลวัตต์ ใช้ไฟฟ้า 380 V, 3 phase, 50 Hz

2) เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องวัดอุณหภูมิ ใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ต่อเข้ากับเครื่องอ่านและบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) มีความละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

- เครื่องมือวัดความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ใช้ Pitot static tube ต่อเข้ากับมานอมิเตอร์

- เครื่องชั่งน้ำหนักเพื่อหาความชื้น ใช้เครื่องชั่งแบบดิจิตอลที่มีความละเอียด ± 0.01 กรัม ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 500

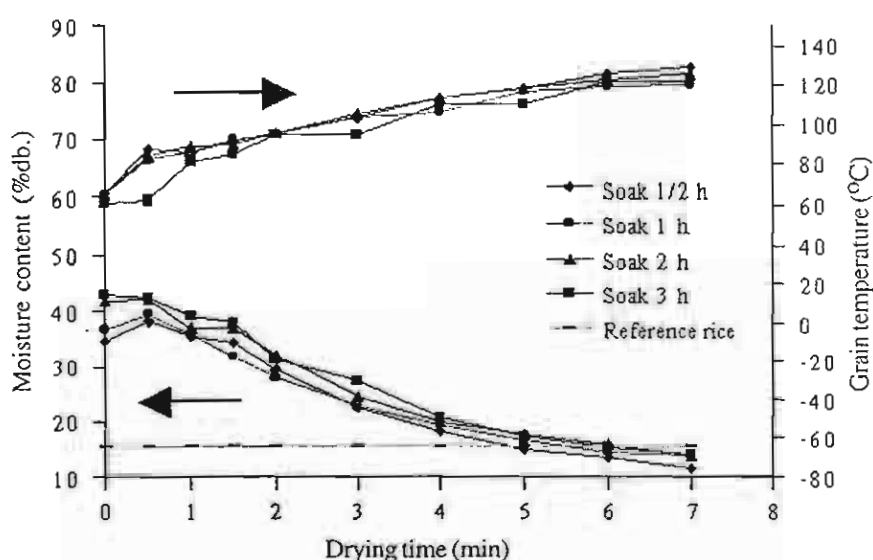
กรัม

- เครื่องชั่งน้ำหนักเพื่อหาคุณภาพ ใช้เครื่องชั่งแบบดิจิตอลที่มีความละเอียด ± 0.1 กรัม ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 500 กรัม

วิธีการ

แช่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิน้ำแช่ 80°C . เวลาในการแช่ 0.5 - 3 ชั่วโมง นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 150°C . เวลาในการอบแห้ง 0.5 - 7 นาที ความสูงเบดของข้าวเปลือก 10 ซม. ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 3.0 ม./วินาที ความดันของระบบเหนือบรรยากาศเล็กน้อยเพื่อป้องกันการรั่วเข้าของอากาศ

คุณภาพทางกายภาพของข้าวที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ร้อยละต้นข้าว ความขาวใช้อุปกรณ์วัดความขาวแบบอิลิคตรอนิค (Kett C-300) ร้อยละ White belly โดยการนับจำนวนของข้าวที่เป็นจุดขาวขึ้นในเมล็ดข้าวใน 100 เมล็ดจากการสุ่มตัวอย่าง และคุณภาพการหุงต้มคุณภาพทางเคมีกายภาพของข้าวที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความหนืดของน้ำแป้งหาโดยเครื่อง Rapid Visco Analyser model-4 (Newport Scientific Pty Ltd., Warriewood, Australia) ตามวิธีการของ AACC method 61-02 (AACC, 1995) ความแข็งและการบีดเกาะตัวของข้าวสุกโดยเครื่อง Texture Analyzer (TA.XT2, UK) การเกิดเจลลิตในเซชันหาโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) (Pyris-1, Perkin) และ Scanning Electron Micrographs (JSM-5600LV/JSM5600 Japan)



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของร้อยละความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่เวลาในการแช่และการอบแห้งต่าง ๆ

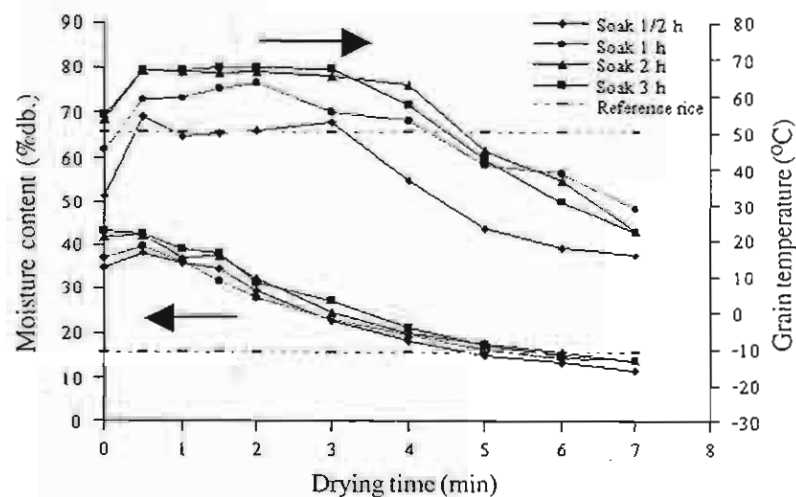
ผลและวิจารณ์

1. การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก

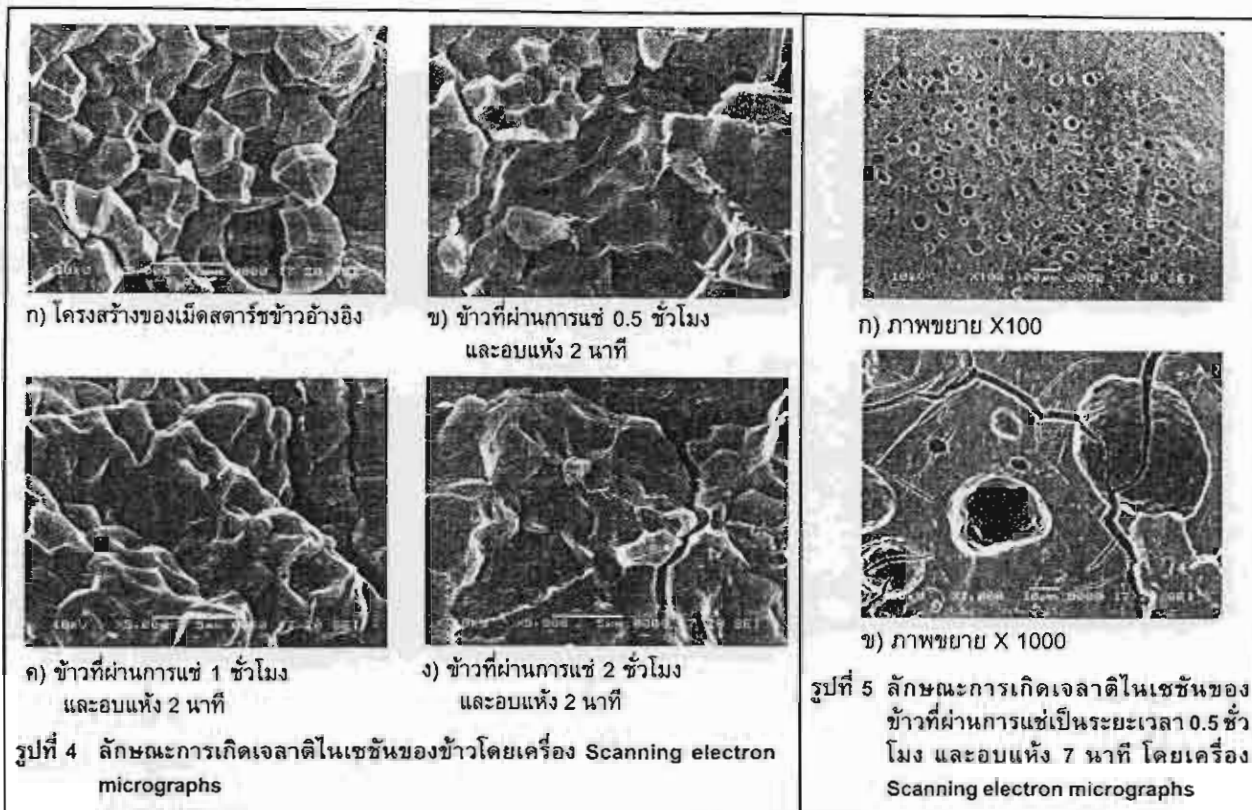
จากผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกโดยทำการทดลอง 2 ซ้ำได้ผลการทดลองคล้ายกัน แสดงผลดังรูปที่ 2 พบว่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นเดียวกัน (15.7% มาตรฐานแห้ง) เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการแช่ และเมื่อนำไปอบแห้งที่เวลาการอบแห้งต่างกัน พบว่าในช่วงเวลาการอบแห้ง 0.5 นาที่ ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นเนื่องจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก จึงทำให้ไอน้ำเกิดการควบแน่นและเกิดชั้นฟิล์มของของเหลวขวางกั้นทิศทางการไหลของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มมากขึ้นซึ่งเปรียบเทียบกับช่วงการนึ่ง (Steaming) ของการผลิตข้าวหนึ่ง และเมื่อระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มมากขึ้นความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกลดลงมีแนวโน้มใกล้เคียงกันเป็นไปตามจลนศาสตร์ของการอบแห้ง เพราะว่าความชื้นของเมล็ดส่วนใหญ่จะอยู่ที่ภายในเมล็ด อุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกจึงเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการอบแห้งโดยอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่ระยะเวลาด้านเพิ่มมากขึ้นเร็วกว่าเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านระยะเวลาการแช่นาน เนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่ระยะเวลาด้านมีความชื้นน้อยกว่าทำให้เกิดช่วงระยะเวลาการอบแห้งลดลงเร็วกว่า ส่งผลให้ผิวของเมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลานาน เมล็ดข้าวเปลือกยังมีความชื้นสูง จึงมีช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นาน อุณหภูมิเมล็ดจึงเพิ่มขึ้นช้ากว่า

2. ปริมาณต้นข้าว

ปริมาณต้นข้าวทำการทดลอง 2 ซ้ำได้ผลการทดลองคล้ายกันแสดงผลดังรูปที่ 3 พบว่าเมื่อความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเริ่มต้นที่ผ่านการแช่อย่างเดียวกัน (เวลาการอบแห้ง 0 นาที่) มีค่าต่ำ จะได้ร้อยละต้นข้าวลดลงต่ำกว่าข้าวอ้างอิง (50.2%) และถ้าความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกสูงขึ้นตามระยะเวลาการแช่ที่นานขึ้น ร้อยละต้นข้าวจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ร้อยละต้นข้าวของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งตามระยะเวลาต่าง ๆ จะสูงขึ้นและค่อนข้างคงที่ (66-68% มาตรฐานแห้ง) ที่ความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกสูงและจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 18-20% มาตรฐานแห้ง เนื่องจากการเกิดเจลลิตในเซชัน สามารถอธิบายได้ดังนี้ ภายในเมล็ดข้าวนั้นประกอบด้วยกลุ่มแป้งและโปรตีนเกาะตัวกันส่วนที่เป็นอมิโนสจะละลายและดูดซับน้ำทำให้เกิดการพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นและทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับไม่ได้ เช่นส่วนผลึกหายไป (Crystalline melting) ไม่เห็นลักษณะการหักเห (Loss of birefringence) โดยโมเลกุลจะยึดเกาะเข้าด้วยกันทำให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lai, H (2000) รอยร้าวหรือรอยแตกภายในเมล็ดสามารถประสานกันมากขึ้นดังรูปที่ 4 และเมื่อนำมาทำให้แห้งเมล็ดข้าวจะมีลักษณะแข็งใสเหนียวทนต่อการขัด เมื่อนำเมล็ดไปขัดสีจะได้ร้อยละต้นข้าวสูง การเกิดเจลลิตในเซชันมากหรือน้อยขึ้นกับอุณหภูมิ ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก และระยะเวลาที่เหมาะสม ถ้าความชื้นเริ่มต้นสูงจะทำให้ช่วงระยะเวลาการเกิดเจลลิตในเซชันมากขึ้นส่งผลให้ร้อยละต้นข้าวสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การเกิดเจลลิตในเซชันของข้าวที่



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของร้อยละความชื้นและร้อยละต้นข้าว ที่เวลาในการแช่และการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ

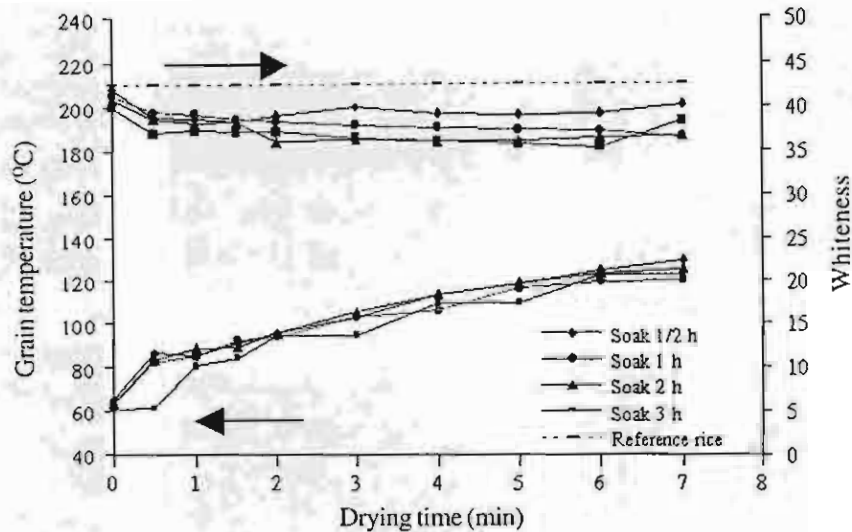


ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์การเกิดเจลลิตในเซชันของข้าวโดยใช้เครื่อง DSC

ตัวอย่างข้าว	อุณหภูมิ (°ซ.)			ΔH (J/g)	Degree of gelatinization
	T_{onset}	T_{peak}	$T_{conclusion}$		
อ้างอิง 15.7% มาตรฐานแห้ง	63.8	69.0	72.3	3.32	0
แช่ 0.5 ชั่วโมง	63.7	68.8	70.9	3.27	1.5
แช่ 1 ชั่วโมง	63.9	68.7	72.2	3.11	6.3
แช่ 2 ชั่วโมง	63.6	68.7	72.3	2.9	12.6
แช่ 3 ชั่วโมง	63.7	68.7	72.0	2.62	21.1
แช่ 0.5 ชั่วโมง อบแห้ง 2 นาที	63.8	68.8	71.9	2.28	31.3
แช่ 1 ชั่วโมง อบแห้ง 2 นาที	63.9	68.8	72.0	1.29	61.1
แช่ 2 ชั่วโมง อบแห้ง 2 นาที	68.2	68.8	71.7	0.73	78.0
แช่ 3 ชั่วโมง อบแห้ง 2 นาที	68.2	68.8	71.7	0.38	88.5

ผ่านกระบวนการโดยเครื่อง DSC ดังตารางที่ 1 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ข้าวที่แช่ระยะเวลานานขึ้นมีร้อยละต้นข้าวสูงขึ้นจากการทดลองใช้อุณหภูมิน้ำแช่เริ่มต้น 80 °ซ. ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันประมาณ 64-68 °ซ. (ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี, 2542) ในกรณีนี้ที่ร้อยละต้นข้าวที่เวลาการแช่ 0.5 และ 1 ชั่วโมง ต่ำกว่าข้าวอ้างอิง เนื่องจากช่วงเวลาในการเกิดเจลลิตในเซชันทำให้ได้ร้อยละต้นข้าวลดลง และสาเหตุที่ความชื้นสุดท้ายต่ำที่เวลาการอบแห้งต่างๆ ได้ร้อยละ

ละต้นข้าวลดลงต่ำมาก เนื่องจากใช้เวลาการอบแห้งนานเกินไปทำให้ปริมาณความร้อนส่วนใหญ่นำไปเพิ่มอุณหภูมิแก่เมล็ดข้าวเปลือก เมล็ดข้าวจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากเกินไป โครงสร้างเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงถึงขั้นเกิดเป็นโพรงอากาศลักษณะคล้ายการเดือดของน้ำแป้งขึ้นภายในเมล็ดข้าวดังรูปที่ 5 ทำให้เกิดการแตกหักได้ง่ายและอีกประการหนึ่งเมื่อนำเมล็ดข้าวเปลือกออกจากห้องอบแห้ง เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงและเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว จึงเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นที่



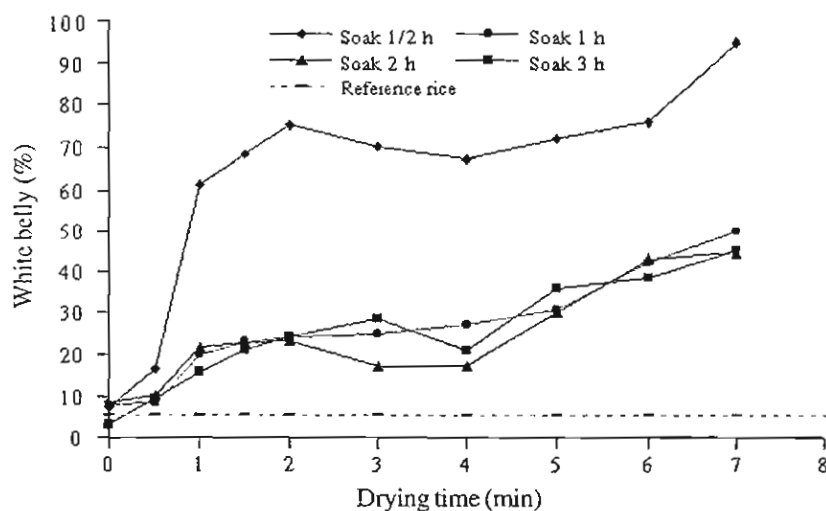
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกและความขาวของข้าวสาร ที่เวลาในการแช่และการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ

บริเวณผิวและแกนกลางของเมล็ด ทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในเมล็ดนำไปสู่การเกิดรอยร้าว เมื่อนำไปขัดสีจึงได้ร้อยละต้นข้าวลดลง

3. ความขาวของข้าวสาร

ความขาวของข้าวสารโดยทำการทดลอง 2 ซ้ำได้ผลการทดลองคล้ายกันแสดงผลดังรูปที่ 6 พบว่าข้าวที่ผ่านการแช่และการอบแห้งจะมีความขาวลดลงต่ำกว่าข้าวอ้างอิงในทุกเงื่อนไขการทดลอง การเปลี่ยนแปลงความขาวของข้าวดังกล่าวเป็นผลเนื่องมาจากสารประกอบที่อยู่ในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Browning reaction) แบบเมลลาร์ด โดยมีความ

ร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อน้ำตาลที่มีอยู่ในข้าวได้รับความร้อน ซึ่งความร้อนจะไปทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลภายในน้ำตาลหลุดออกจากกันกลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลต่ำและเมื่อให้ความร้อนต่อไป พันธะภายในน้ำตาลโมเลกุลต่ำจะหลุดออกจากกันและเกิดเป็นสารประกอบคีโตนขึ้นมา ซึ่งสารดังกล่าวเป็นสารที่ทำให้เกิดสีคล้ำในเมล็ดข้าว และสีน้ำตาลอาจมีส่วนเกิดจากสีของเปลือกข้าวซึมแพร่เข้าสู่เนื้อเมล็ดขณะแช่และติดแน่นขณะอบแห้ง ระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีช่วงการเกิดการควบแน่นของไอน้ำอุณหภูมิของเมล็ดต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความแตกต่างของ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของปริมาณ White belly ของข้าวสาร ที่เวลาในการแช่และการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ

ความดันไอกายในเมล็ดข้าวเปลือก ความดันไอกายนอกเมล็ดจะสูงกว่าภายในเมล็ด จึงเกิดการแพร่ความชื้นเข้าภายในเมล็ดและพาเอาสารประกอบและสารสีของข้าวเปลือกและข้าวกล้องที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสแพร่เข้าไปภายในเมล็ด ด้วยเหตุดังกล่าวจึงทำให้ข้าวมีความขาวลดต่ำลง หรือมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการแช่และอบแห้ง

4. ร้อยละ White belly

ร้อยละ White belly โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำได้ผลการทดลองคล้ายกัน แสดงผลดังรูปที่ 7 พบว่าปริมาณ White belly ของข้าวสารเพิ่มขึ้นมากกว่าข้าวอ้างอิงในทุกเงื่อนไขการทดลอง ข้าวที่ผ่านการแช่ระยะเวลานานและอบแห้งระยะเวลานานจะมีแนวโน้มการเพิ่มในปริมาณที่สูงขึ้นกว่าข้าวที่แช่ระยะเวลาการแช่มากขึ้นและระยะเวลาการอบแห้งน้อยลง

จากคุณสมบัติของข้าวที่ใช้ในการทดลองคือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นพันธุ์ข้าวที่มีปริมาณอมิโลสต่ำ จากการ

ทดลองพบว่าปริมาณ White belly เพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้คือ White belly เกิดจากการหักเหของแสงที่ส่องผ่านเมล็ดข้าวทำให้มองเห็นมีลักษณะขาวขุ่นตรงกลางเมล็ดข้าวสาร (Kim et al., 2000) เนื่องจากอมิโลเพกตินมีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นกิ่งก้านสาขา เมื่อเกิดการพองตัวเป็นเจลโมเลกุลซ้อนทับกันแสงที่ส่องผ่านจึงเกิดการหักเหทำให้มองเห็นเมล็ดข้าวมีลักษณะขาวขุ่น ส่วนอมิโลสโครงสร้างของโมเลกุลเป็นเส้นตรงการหักเหของแสงจึงน้อยกว่า ดังนั้นในช่วงที่ใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่มากขึ้น ข้าวที่มีปริมาณอมิโลสต่ำเมื่อเกิดเจลาติไนเซชันภายในเมล็ดขึ้น ปริมาณอมิโลสไม่สามารถไปแทรกสอดตามโครงสร้างของอมิโลเพกตินภายในเมล็ดได้ทั่วถึง และนอกจากนี้โครงสร้างของเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลงมีลักษณะเกิดเป็นโพรงอากาศคล้ายการเดือดของน้ำแป้ง (รูปที่ 5) ทำให้เกิดการหักเหของแสงมากขึ้น จึงมีปริมาณ White belly เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความแข็งของข้าวสุก (Hardness) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ใช้เวลาในการแช่ข้าว และระยะเวลาในการอบแห้งต่าง ๆ

ระยะเวลาการอบแห้ง (นาทีก)	ความแข็งของข้าวสุก (Hardness), (นิวตัน)				
	ข้าวที่แช่ระยะเวลาระยะต่าง ๆ				
	0 ชั่วโมง	0.5 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง
0	108.38 a	104.7 a	102.7 a	112.8 a	107.0 a
0.5	-	106.9 a	105.2 a	117.1 a	106.6 a
2	-	112.8 a	107.3 a	119.3 a	117.0 a
3	-	115.6 a	115.4 a	119.1 a	117.8 a
4	-	117.8 a	114.7 a	122.1 a	114.1 a

หมายเหตุ: ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการยึดเกาะตัวของข้าวสุก (Stickiness) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ใช้เวลาในการแช่ข้าว และระยะเวลาในการอบแห้งต่าง ๆ

ระยะเวลาการอบแห้ง (นาทีก)	ความแข็งของข้าวสุก (Hardness), (นิวตัน)				
	ข้าวที่แช่ระยะเวลาระยะต่าง ๆ				
	0 ชั่วโมง	0.5 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง
0	18.8 fdec	26.1 a	22.0 bac	24.0 ba	25.1 ba
0.5	-	13.2 b	20.0 bdac	16.6 gfdeh	21.0 bdac
2	-	18.5 gfdec	14.5 gfih	15.9 gfeh	16.5 gfdeh
3	-	14.0 gfih	14.4 gfih	14.9 gfih	13.9 gfih
4	-	13.1 gh	16.4 gfdeh	14.6 gfih	12.6 h

หมายเหตุ: ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

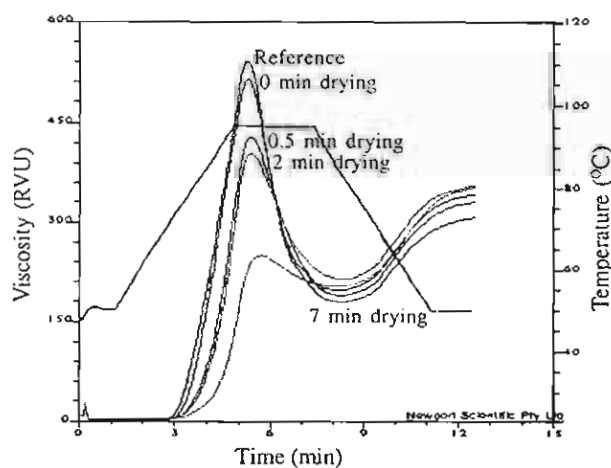
5. ความแข็งของข้าวสุก และการยึดเกาะตัวของข้าวสุก

จากการทดสอบหาค่าความแข็ง (Hardness) และค่าการยึดเกาะตัว (Stickiness) ของข้าวสุก โดยใช้ข้าวสารที่ได้จากการทดลองมาหุงและทำการวัดโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ ได้ผลการทดลองคล้ายกันแสดงผลดังตารางที่ 2 และ 3 จากการทดสอบพบว่า ความแข็งของข้าวสุก (Hardness) ที่ผ่านการแช่และอบแห้งไม่มีความแข็งเพิ่มขึ้นจากข้าวอ้างอิง อย่างมีนัยสำคัญ (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) แรงที่ใช้ในการยึดเกาะตัวของข้าวสุก (Stickiness) ที่ผ่านการแช่และอบแห้งจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) เมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง นั่นแสดงว่าข้าวสุกมีความเหนียวลดลงหรือมีความร่วนมากขึ้น ความร่วนจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น ส่วนระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ไม่มีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อการยึดเกาะตัวของข้าวสุก

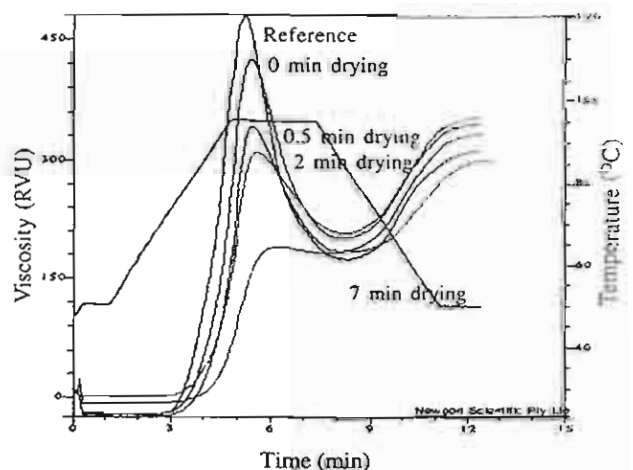
การแช่และอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดโดยมีไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลาง จะมีผลทำให้ข้าวสุกแข็งขึ้น และมีความร่วนมากขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดเจลลาคีในเซชัน อมิโลสจะละลายน้ำและดูดน้ำได้มาก ทำให้เกิดการพองตัวขึ้น และเมื่อนำมาอบแห้ง จะทำให้สตาร์ชที่เป็นเจลแล้วจัดเรียงตัวกันจับกับโปรตีนและไขมัน ทำให้เมล็ดแข็งแรงขึ้น เมื่อนำมาหุงทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำและละลายน้ำลดลง มีผลทำให้ข้าวสุกที่ได้มีความแข็งและความร่วนมากขึ้น

6. ค่าความหนืดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)

จากการศึกษาความหนืดของน้ำแป้งของข้าวขาว



ก) แช่เป็นระยะเวลา 0.5 ชั่วโมงและอบแห้งที่เวลาต่างๆ



ข) แช่เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมงและอบแห้งที่เวลาต่างๆ

รูปที่ 8 ความหนืดของแป้งจากเครื่อง RVA

ดองเมล็ด 105 โดยเครื่อง RVA ของข้าวที่ผ่านการแช่และอบแห้งที่ระยะเวลาต่างๆ จะให้กราฟที่มีค่าอุณหภูมิที่แป้งเริ่มพองตัว (Pasting temperature), ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity), ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และ ค่าความคงตัวของแป้งสุก (Setback) แตกต่างกันโดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ ได้ผลการทดลองคล้ายกัน แสดงผลดังรูปที่ 8 ในช่วงแรกเม็ดแป้งกระจายตัวในน้ำที่อุณหภูมิ 50 °ซ. อุณหภูมิยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เม็ดแป้งพองตัว ความหนืดจึงต่ำ เมื่อให้ความร้อนถึงอุณหภูมิที่แป้งเริ่มพองตัว เม็ดแป้งดูดซับน้ำแล้วพองตัวขึ้น ให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิที่แป้งเริ่มพองตัวของข้าวที่ผ่านการแช่และการอบแห้ง มีค่าสูงกว่าข้าวอ้างอิง และสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาในการแช่ไม่มีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่ออุณหภูมิที่แป้งเริ่มพองตัว

ความหนืดสูงสุด เป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าเม็ดแป้งมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี ทำให้แป้งเกิดการพองตัวเป็นผลให้ค่าความหนืดสูงขึ้น ความหนืดสูงสุดของข้าวที่ผ่านการแช่และอบแห้งมีค่าต่ำกว่าข้าวอ้างอิง และลดต่ำลงเมื่อใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องมาจากข้าวที่ผ่านการแช่และอบแห้งได้เกิดการเจลลาคีในซ์มาบางส่วนแล้ว (ดังตารางที่ 1) โดยข้าวที่ผ่านการแช่จะมีความชื้นสูงเมื่อได้รับความร้อนจากการอบแห้งทำให้เม็ดแป้งที่ถูกน้ำเกิดการพองตัวและถูกทำให้สุก เมื่อนำมาวัดความหนืดทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งนั้นลดลงเกิดการพองตัวได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุดที่วัดได้มีค่าลดลง และต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้เกิดการพองตัวอีก

ความหนืดสุดท้าย ที่เกิดขึ้นคือ ความหนืดเมื่อแป้งถูกทำให้เย็นหลังการเกิดเจลละติไนซ์ ส่วนของอิมิลจะเกิดโครงสร้างขึ้นใหม่ในลักษณะโครงร่างสามมิติ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เจลแข็งขึ้น ค่าความหนืดสุดท้าย ของข้าวที่ผ่านการแช่และอบแห้งมีค่าสูงกว่าข้าวอ้างอิง และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น

ค่าความคงตัวของแป้งสุก เป็นผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้าย กับ ความหนืดต่ำสุด (Trough) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก เป็นตัวบ่งชี้ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดหรือ เจลซึ่งเกิดขึ้นหลังจากการหุงต้มและทำให้เย็นลง ถ้าค่าความคงตัวของแป้งสุกที่ได้มีค่าต่ำแสดงว่าข้าวสุกนั้นมีความแข็งแรงต่ำหลังจากการหุงสุกและปล่อยให้ข้าวเย็นตัวลง จากการทดลองพบว่าข้าวที่ผ่านการแช่และการอบแห้งมีค่าความคงตัวของแป้งสุกลดลงตามระยะเวลาการอบแห้ง

7. การเกิดเจลละติไนเซชันของข้าวโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

การวิเคราะห์ค่าเอนทัลปีเปลี่ยนแปลง (ΔH) แสดงผลดังตารางที่ 1 จะเห็นว่า T_{onset} หรืออุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลละติไนซ์ของข้าว, T_{peak} หรืออุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลละติไนซ์ และ $T_{conclusion}$ หรืออุณหภูมิต่ำสุดท้ายในการเกิดเจลละติไนซ์ของข้าวที่ผ่านการแช่และอบแห้งสูงขึ้นจากข้าวอ้างอิง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดความหนืดด้วยเครื่อง RVA แสดงให้เห็นว่าข้าวที่ผ่านการแช่และอบแห้งได้เกิดการเจลละติไนซ์ไปบางส่วนแล้ว ค่า ΔH หรือพลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดเจลละติไนซ์ จะแสดงถึงการใช้พลังงานความร้อนในการทำให้ข้าวสุก จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าข้าวอ้างอิงมีค่า ΔH มากกว่าข้าวที่ผ่านการแช่และเมื่อนำข้าวที่ผ่านการแช่ที่เวลาต่าง ๆ ไปผ่านการอบแห้งที่เวลา 2 นาที ค่า ΔH จะลดลงตามระยะเวลาการแช่เช่นกันนั้น แสดงถึงว่าข้าวที่ผ่านการแช่ ได้เกิดการเจลละติไนซ์ไปบางส่วนแล้ว จึงใช้พลังงานความร้อนในการทำให้ข้าวสุกน้อยลง ข้าวที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีค่า ΔH น้อยกว่าข้าวที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลา 0.5 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าข้าวที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลายาวนานจะเกิดการเจลละติไนซ์มากกว่าข้าวที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลาสั้นซึ่งเมื่อนำมาคิดเป็นระดับของเจลละติไนเซชัน (Degree of gelatinization) ข้าวที่แช่ 0.5 ชั่วโมงจะมีค่า 1.5% และข้าวที่แช่ 3 ชั่วโมงจะมีค่า 21% และเมื่อผ่านการอบแห้งที่ระยะเวลา 2 นาที ข้าว

ที่แช่ 0.5 ชั่วโมงจะมีค่า 31.3% และข้าวที่แช่ 3 ชั่วโมงจะมีค่า 88.5% จากการวิเคราะห์การเกิดเจลละติไนเซชันของข้าวโดยใช้เครื่อง DSC นี่เป็นการยืนยันว่าข้าวที่แช่นานกว่า (แช่ 3 ชั่วโมง) เกิดการเจลละติไนเซชันมากกว่าข้าวที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลาน้อยกว่า (แช่ 0.5 ชั่วโมง) ที่ระยะเวลาในการอบแห้งค่าเดียวกัน

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการรวมกระบวนการผลิตของการนึ่งและการอบแห้งข้าวหนึ่งสำหรับข้าวหอมโดยการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดมีไอน้ำร้อนขนาดยังเป็นตัวกลาง ร้อยละต้นข้าวเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาการแช่และอบแห้งนานขึ้น ซึ่งได้ต้นข้าวสูง 65-67% ที่เวลาการอบแห้ง 1.5-3 นาที และลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาการอบแห้งมากกว่า 3 นาทีขึ้นไป เมื่อใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานความร้อนที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของข้าวจึงส่งผลให้ความขาวของข้าวลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการแช่และการอบแห้ง เมื่อเวลาในการอบแห้งนานขึ้นทำให้ช่วงเวลาการเกิดเจลละติไนเซชันมากขึ้น แต่เนื่องจากพันธุ์ข้าวที่ใช้ทดลองเป็นพันธุ์ข้าวที่มีอิมิลต่ำ ทำให้อิมิลไม่สามารถดูดตามรอยแตกงาได้ทั่วถึงส่งผลทำให้ปริมาณ White belly เพิ่มมากขึ้นในทุกเงื่อนไขการทดลอง การทดสอบเนื้อสัมผัสของข้าวสุก เวลาอบแห้งที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ข้าวสุกมีความแข็งและร่วนมากขึ้น เนื่องจากการเกิด เจลละติไนเซชัน ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำและละลายน้ำลดลง จากการศึกษาความหนืดของแป้งโดยเครื่อง RVA เวลาอบแห้งที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิที่แป้งเริ่มพองตัว (Pasting temperature) มีค่าสูงขึ้น แต่ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ลดต่ำลงเนื่องจากการเกิดเจลละติไนเซชันที่เพิ่มขึ้น ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) มีค่าลดลงตามเวลาอบแห้งที่เพิ่มขึ้นและค่าค่าความคงตัวของแป้งสุก (Setback) ต่ำลงตามเวลาการอบแห้งด้วย และจากการวิเคราะห์การเกิดเจลละติไนเซชันของข้าวด้วยเครื่อง DSC เป็นการยืนยันว่าข้าวที่แช่และอบแห้งที่ระยะเวลานานกว่าจะเกิดการเจลละติไนเซชันมากกว่า โดยมีระดับของเจลละติไนเซชัน (Degree of gelatinization) สูงสุดเท่ากับ 88.5% ที่ระยะเวลาการแช่ 3 ชั่วโมงและอบแห้ง 2 นาที

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนอย่างต่อเนื่อง

เอกสารอ้างอิง

ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี, กรมวิชาการเกษตร, 2542, การวิเคราะห์คุณภาพข้าวหอมมะลิทางเคมี, ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร, 70 หน้า

Bhattacharya, S., 1996, Kinetics on Colour Changes in Rice due to Parboiling, J. of Food Engineering, Vol. 29 pp. 99-106.

Kar, N., Jain, R.K., Srivastav, P.P., 1999, Parboiling of Dehusked Rice, J. of Food Engineering, Vol. 9, pp.17-22.

Kim, S.S., Lee, S.E., Kim, O.W., Kim, D.C., 2000, Physicochemical Characteristics of Chalky Kernels of Cook

Rice, Cereal Chem., Vol.77, pp. 376-379.

Lai, H., 2000, Effects of Hydrothermal Treatment on the Physicochemical Properties of Pregelatinized Rice Flour, Food Chemistry, Vol. 72, pp. 455-463.

Rordprapat, W., Soponronnarit, S., Nathakarakakule, A., Tia, W., 2002, Comparative Study of Fluidised Bed Paddy Drying Using Hot Air and Superheated Steam, Proceeding of International Conference on Innovations in Food processing Technology and Engineering, 11-13 December 2002, AIT Bangkok, Thailand, pp. 453-466.

Taechapairoj, C., Dhuchakallaya, I., Soponronnarit, S., Wetchacama, S., and Prachayawarakorn, S., 2003, Superheated Steam Fluidised Bed Paddy Drying, Journal of food Engineering, pp 67-73.

Toshinori, K., Bhattacharya, K.R., and Ali, S.Z., 1993, Effect of Processing Conditions on the Color Intensity of Parboiled Rice, J. of Soc of Agri. Struc. Japan, Vol. 20, No. 1, pp. 153-160.



การผลิตข้าวกล้องหนึ่งด้วยเทคนิค ฟลูอิดเซชันโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

สมชาติ โสภณธนฤทธิ์^{*}
ราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์
ราชบัณฑิตยสถาน
อริคม จิรจินดาเลิศ^{*}
อดิศักดิ์ นามกรณกุล^{*}
ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์^๔

บทคัดย่อ

กระบวนการผลิตข้าวหนึ่งในปัจจุบันใช้ข้าวเปลือกเป็นวัตถุดิบในการผลิตซึ่งใช้ระยะเวลานานและสิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะลดระยะเวลาในการผลิตข้าวหนึ่งโดยการนึ่งข้าวกล้องด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ผู้วิจัยได้ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการแช่ อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และความสูงเบดที่มีผลต่อคุณภาพข้าวในด้านปริมาณต้นข้าว ความขาวของข้าวสาร white belly และความหนืดของแป้งข้าว และได้ทดลองโดยใช้ข้าวกล้องที่มีความชื้นเริ่มต้นก่อนแช่ร้อยละ ๑๒.๘ มาตรฐานแห้ง แช่ในน้ำที่อุณหภูมิ ๗๐ องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา ๐.๕ - ๒ ชั่วโมง นำมาอบแห้งที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ๑๒๐ - ๑๖๐ องศาเซลเซียส ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากับ ๓.๔ เมตรต่อวินาที และความสูงเบด ๘ - ๑๒ เซนติเมตร ผลการศึกษาแสดงว่า สามารถนึ่งข้าวกล้องที่ผ่านการแช่ ๑ ชั่วโมงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ ๑๔๐ องศาเซลเซียส เจลเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับความชื้นของข้าวกล้องที่ลดลง ความชื้นหลังการนึ่งข้าวกล้องด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เหมาะสมมีค่าประมาณร้อยละ ๒๘ มาตรฐานแห้ง โดยที่ร้อยละต้นข้าวยังสูงอยู่ คุณภาพด้านความขาวและ white belly อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ถ้าลดความชื้นต่ำกว่านี้ร้อยละต้นข้าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความขาวของข้าวสารจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความชื้นต่ำกว่าร้อยละ ๑๘ มาตรฐานแห้ง สำหรับ white belly จะลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์สมบัติความหนืดของแป้งเป็น peak viscosity, breakdown viscosity และ setback viscosity พบว่ามีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องหนึ่ง

คำสำคัญ : ข้าวหนึ่ง, คุณภาพ, ฟลูอิดเซชัน, อบแห้ง

๑. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศผลิตข้าวที่สำคัญ ข้าวจึงถือเป็นสินค้าผลผลิตทางการเกษตรที่มีมูลค่าการส่งออกทางเศรษฐกิจเป็นอันดับแรก ๆ ของ

ประเทศ เนื่องจากความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี ทำให้ประเทศผู้ส่งออกข้าวต่าง ๆ พยายามที่จะใช้เทคโนโลยีมาพัฒนาคุณภาพของข้าวให้มีคุณภาพสูงกว่าคู่แข่ง ในขณะที่ใช้ต้นทุนการ

ผลิตต่อตันต่ำที่สุด ดังนั้น การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าว เช่น ข้าวหนึ่ง ที่กำลังเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคมากขึ้นในขณะนี้ จะช่วยให้มีส่วนแบ่งทางการตลาดประเภทข้าวมากขึ้น ข้าวหนึ่ง

^{*} ศาสตราจารย์ประจำคณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

^๒ บัณฑิตปริญญาโท คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

^๓ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำคณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

^๔ อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สานามจันทร์ นครปฐม



คุณภาพดีของไทยยังมีโอกาสพัฒนาได้อีกมาก เพราะต้นทุนข้าวเปลือกไทยราคาถูกกว่าต่างประเทศ ข้าวหนึ่งจึงนับเป็นผลิตภัณฑ์ที่ควรได้รับการส่งเสริมและพัฒนาอย่างยิ่ง การทำข้าวหนึ่ง (parboiling) เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยให้เก็บรักษาข้าวได้นานขึ้น ลดปริมาณข้าวหักระหว่างการขัดสี ทำให้มีปริมาณต้นข้าวสูงลดการสูญเสียแร่ธาตุอาหารในบางส่วนของเมล็ดข้าวระหว่างการขัดสี

ในปัจจุบัน ผู้บริโภคนิยมรับประทานข้าวกล้องมากขึ้น เพราะให้คุณค่าอาหารทางโภชนาการสูงกว่าข้าวขาว แต่ปัญหาที่สำคัญของข้าวกล้องนั้นคืออายุการเก็บรักษาสั้น คือมีระยะเวลาประมาณ ๓ - ๖ เดือน เกิดกลิ่นหืนได้เร็วกว่าข้าวสารเนื่องจากข้าวกล้องมีปริมาณน้ำมันสูงกว่าข้าวสาร การนึ่งข้าวกล้อง (parboiling of dehusked rice) จึงเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องให้ดียิ่งขึ้น ช่วยเก็บรักษาข้าวกล้องได้นานขึ้น การผลิตข้าวหนึ่งมีขั้นตอนที่สำคัญอยู่ ๓ ขั้นตอน คือ การแช่ (soaking) การนึ่ง (steaming) และการอบแห้ง (drying) โดยเฉพาะการแช่เป็นขั้นตอนที่ใช้เพิ่มความชื้นให้แก่เมล็ดข้าว ในปัจจุบันนิยมแช่ข้าวด้วยน้ำร้อน จะทำให้ความชื้นเข้าไปในเมล็ดข้าว ความร้อนจะทำให้น้ำแพร่เข้าไปในเมล็ดได้อย่างรวดเร็ว ความชื้นนี้ทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวจนเพียงพอที่ทำให้เกิดเจลลิตในเซชันได้ การแช่ข้าวกล้องในน้ำร้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิแวดล้อมเป็นเวลาอย่างน้อย ๒ ชั่วโมง ทำให้น้ำสามารถ

แพร่ผ่านเข้าไปในแกนของเมล็ดข้าวได้ การนึ่งข้าวกล้องประหยัดพลังงานกว่าการนึ่งข้าวเปลือกถึงร้อยละ ๕๐ เนื่องจากเปลือกข้าวมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนเข้าไปในเมล็ดข้าวเปลือกช้ากว่าข้าวกล้อง นอกจากนี้ ยังช่วยลดปัญหาสิ่งสกปรกที่มากับเปลือกข้าวขณะแช่ ลดกลิ่นที่ติดมากับเปลือกข้าว และใช้เวลาในการหุงข้าวเร็วขึ้น* สำหรับการแช่ข้าวเปลือกควรแช่ข้าวที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลลิตในเซชันของข้าว เพื่อให้เมล็ดข้าวปริแตกและทำให้แป้งบางส่วนละลายไปกับน้ำแช่^{๒,๓}

อุณหภูมิและระยะเวลาในการนึ่งมีผลต่อความขาวของข้าว เมื่ออุณหภูมิการนึ่งสูงขึ้นจะได้ร้อยละความขาวของข้าวลดลงและเมื่อระยะเวลาในการนึ่งมากขึ้นทำให้ได้ค่าความขาวของข้าวมีแนวโน้มลดลง^{๔,๕} การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยเทคนิคฟลูอิดไคเซบด พบว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคเซชันมีค่าเท่ากับ ๒.๖ เมตร/วินาที อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าความสูงเบด และปริมาณต้นข้าวจะขึ้นกับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก โดยความชื้นสุดท้ายไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ ๑๘ มาตรฐานแห้ง^๖

ในการเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนโดยเทคนิคฟลูอิดไคเซบด พบว่าร้อยละต้นข้าวของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน เพราะการอบแห้งด้วยอากาศร้อนนั้น

อุณหภูมิของข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันก็จะมีภาระเหี่ยวของน้ำที่เมล็ดข้าวเปลือกด้วย ทำให้ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกไม่สม่ำเสมอ การเกิดเจลลิตในเซชันของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจึงไม่สมบูรณ์ทั่วทั้งเมล็ด ข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเกิดเจลลิตในเซชันได้สมบูรณ์กว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน นอกจากนี้ การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไคเซบดจะได้ค่าความขาวของข้าวต่ำกว่าอบแห้งด้วยอากาศร้อน เนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำที่บริเวณผิวของข้าวเปลือก ทำให้สีของรำถูกดูดซึมเข้าไปในเมล็ดข้าวและพบว่าปริมาณ white belly ขึ้นกับความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก โดยปริมาณ white belly จะน้อยเมื่อความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกสูง และยังพบว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีลักษณะคล้ายข้าวหนึ่ง^{๖,๗}

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาแนวทางที่เหมาะสมของการทำข้าวหนึ่งจากข้าวกล้องด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยเทคนิคฟลูอิดไคเซบดและสมบัติของข้าวทางด้านกายภาพ ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณต้นข้าว ความขาว และ white belly ตลอดจนสมบัติทางด้านเคมีกายภาพ โดยการวัดสมบัติความหนืดของแป้งข้าว โครงสร้างระดับจุลภาค และเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ภาวะเดียวกัน

๒. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง



ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้ง ฟลูอิดไชต์เบดแบบบววด โดยมีไอน้ำร้อน ยวดยิ่งเป็นตัวกลาง แสดงดังรูปที่ ๑๓ ประกอบด้วยห้องอบแห้ง เป็นรูปที่ทรง กระบอก ทำด้วยสแตนเลส ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง ๑๕ เซนติเมตร สูง ๑๐๐ เซนติเมตร อุปกรณ์ให้ความร้อน (heater) ขนาด ๑๓.๕ กิโลวัตต์ โดยมีเครื่องควบคุม อุณหภูมิแบบ PID มีความถูกต้อง ± 1 องศาเซลเซียส พัดลม (blower) เป็น แบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง (backward-curved centrifugal blower) มีมอเตอร์ ขนาด ๒.๒ กิโลวัตต์ สามารถปรับความเร็วรอบของพัดลมได้ เครื่องดักฝุ่น (cyclone) เป็นแบบ reverse flow ทำ ด้วยสแตนเลสเครื่องกำเนิดไอน้ำ (boiler) ออกแบบความดันใช้งานสูงสุด 3.5 bars สามารถผลิตไอน้ำได้ ๓๑ กิโลกรัมต่อ ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ ๑๐๐ องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และเครื่องอบแห้ง ฟลูอิดไชต์เบดแบบบววดโดยมีอากาศร้อน เป็นตัวกลางแสดงดังรูปที่ ๑๔ ประกอบด้วยห้องอบแห้งรูปที่ทรงกระบอก ทำ ด้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ๒๐ เซนติเมตร และสูง ๑๔๐ เซนติเมตร อุปกรณ์ให้ความร้อนขนาด ๑๒ กิโลวัตต์ โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิมีความ ถูกต้อง ± 1 องศาเซลเซียส พัดลมเป็น แบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง มีมอเตอร์ ขนาด ๑.๕ กิโลวัตต์ เป็นตัวขับเคลื่อน พัดลม มีลิ้นปีกผีเสื้อที่ทางออกของ เครื่องอบแห้งและที่ท่ออากาศเวียนกลับ สำหรับใช้ปรับอากาศไหลเวียนกลับ

การเตรียมข้าวกล้องใช้ข้าวเจ้า พันธุ์ชัยนาท ๑ มากะเทาะเปลือกออก จนได้ข้าวกล้อง (เฉพาะต้นข้าวเท่านั้น)

ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๑๒.๘ มาตรฐานแห้ง เนื่องจากได้มีการทดลอง ศึกษาอุณหภูมิในการแช่ข้าวที่ ๗๐, ๘๐ และ ๙๐ องศาเซลเซียสด้วย พบว่า ข้าวกล้องที่แช่น้ำอุณหภูมิ ๙๐ องศาเซลเซียส มีลักษณะโครงสร้างของ เมล็ดข้าวเปลี่ยนไป เกิดการแตกปริ ของเยื่อหุ้มเมล็ด (pericarp) ส่วนที่แช่น้ำ อุณหภูมิ ๘๐ องศาเซลเซียส ให้ผล ที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ ๗๐ องศาเซลเซียส ดังนั้น ใช้อุณหภูมิของ น้ำที่ใช้แช่ข้าวกล้อง ๗๐ องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการแช่ ๑/๒ - ๒ ชั่วโมง แล้วจึงระบายน้ำแช่ทิ้งและปล่อยให้ ถังแช่ข้าวกล้องเย็นตัวลงที่อุณหภูมิ แวดล้อม (tempering) เป็นเวลา ๑/๒ ชั่วโมง ก่อนจะนำข้าวกล้องไปทดลอง อบแห้ง ในการอบแห้งได้ใช้อุณหภูมิ ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ๑๒๐, ๑๔๐ และ ๑๖๐ องศาเซลเซียส ความสูงเบด ๘ - ๑๒ เซนติเมตร เวลาในการอบแห้ง ๐.๕ - ๑๐ นาที และความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เท่ากับ ๓.๘ เมตรต่อวินาที ความดัน ของระบบเหนือบรรยากาศเล็กน้อย เพื่อป้องกันการรั่วเข้าของอากาศ และ เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศ ร้อนที่สภาวะเดียวกัน จากนั้นนำข้าว ที่ผ่านการอบแห้งมาปล่อยให้เย็นตัวลง โดยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนมี ความชื้นสุดท้ายร้อยละ ๑๖ มาตรฐาน แห้ง แล้วจึงนำข้าวไปทดสอบคุณภาพ ต่อไป

การวัดความชื้นได้สุ่มเก็บตัวอย่าง ข้าวกล้องก่อนและหลังการอบแห้ง นำไปเข้าตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ ๑๐๓ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๗๒ ชั่วโมง

ส่วนคุณภาพของข้าวทางกายภาพได้แก่ ร้อยละต้นข้าว ความขาว และร้อยละ white belly ตลอดจนสมบัติทางด้าน เคมีกายภาพได้วัดสมบัติความหนืดของ แป้งข้าวและโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กระจาด (Scanning Electron Micrographs; SEM, JSM-5600LV/JSM5600 Japan)

- ร้อยละต้นข้าว คือน้ำหนักของ ต้นข้าวที่ผ่านการอบแห้งหารด้วยน้ำหนัก ของข้าวกล้อง

- ความขาว วัดได้จากเครื่องวัด ความขาวของ Kett model C-300

- ร้อยละ white belly คือ จำนวนข้าวที่เป็นจุดขาวขึ้นที่บนแสงเกิน กว่าร้อยละ ๕๐ ของเมล็ด จากการสุ่ม ตัวอย่างของข้าวจำนวน ๑๐๐ เมล็ด

- การวัดสมบัติความหนืดของ แป้งข้าว (pasting property) โดยใช้ เครื่อง Rapid Visco Analyzer, RVA (Newport Scientific Pty Ltd., Warriewood, Australia) ทำตามวิธีการของ AACC method 61-02¹⁰ โดยนำ ตัวอย่างแป้งข้าว ๓ กรัม ที่ความชื้น ร้อยละ ๑๔ มาตรฐานแห้ง ใส่ผสมกับ น้ำกลั่นในถ้วยอะลูมิเนียม ใส่พายลงใน กระบอง จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้ เข้าเครื่อง RVA ตัวอย่างจะถูกทำให้ ร้อนที่ ๕๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๑ นาทีต่อจากนั้นให้ความร้อนแก่ของผสม ด้วยอัตรา ๑๒ องศาเซลเซียสต่อวินาที จนถึงอุณหภูมิ ๙๕ องศาเซลเซียส คง ไว้ที่อุณหภูมิ ๙๕ องศาเซลเซียส เป็น เวลา ๒.๕ นาที จากนั้นทำให้เย็นลง ที่ ๕๐ องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา ๑๒ องศาเซลเซียสต่อวินาที แล้วคงที่ไว้ ๕๐



องศาเซลเซียสเป็นเวลา ๒ นาที ทดสอบซ้ำ ๓ ครั้ง นำสมบัติความหนืดของแป้งต่าง ๆ มาพล็อตเทียบกับเวลา ค่าต่าง ๆ ที่วัดได้จากสมบัติความหนืดของแป้งได้แก่ pasting temperature (PT), peak viscosity (PV), final viscosity (FV), breakdown viscosity (BKV = PV-trough) และ setback viscosity (SBV = FV-trough)

๓. ผลและวิจารณ์

๓.๑ การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวกล้อง

๓.๑.๑ อิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความสูงเบดที่มีต่ออัตราการอบแห้งข้าวกล้องด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

รูปที่ ๒ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น อุณหภูมิของเมล็ดข้าวกล้องและเวลา ในช่วงแรกของการอบแห้งของข้าวกล้องเกิดการควบแน่นของไอน้ำ เนื่องจากทันทีที่ไอน้ำร้อนยวดยิ่งไหลผ่านเบดของข้าวกล้อง ไอน้ำจะเกิดการควบแน่นที่เบดของข้าวกล้องซึ่งเกิดในช่วงแรก ๆ ของการอบแห้งในระยะเวลาสั้นเป็นผลทำให้อุณหภูมิของข้าวกล้องเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ ๖๐ องศาเซลเซียส) จนถึงอุณหภูมิของจุดเดือดของน้ำ ต่อจากนั้นอุณหภูมิของข้าวกล้องจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ตามความชื้นที่ลดลง และจากรูปที่ ๒ ความสูงเบดมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งและอุณหภูมิเมล็ดของข้าวกล้องน้อยกว่าอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นเป็น ๑๖๐

องศาเซลเซียส อุณหภูมิของข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วกว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิ ๑๒๐ องศาเซลเซียส

๓.๑.๒ อิทธิพลของระยะเวลาในการแช่ที่มีต่ออัตราการอบแห้ง

รูปที่ ๓ แสดงความสัมพันธ์ของระยะเวลาในการแช่ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง พบว่าความชื้นของเมล็ดข้าวกล้องหลังการแช่จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการแช่ เนื่องจากระยะเวลาในการแช่นานขึ้น ทำให้เมล็ดข้าวสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น ระยะเวลาในการแช่ที่เหมาะสมนั้น ต้องให้ข้าวกล้องมีความชื้นเพียงพอต่อการเจลา-ทิไนเซชันที่สมบูรณ์ของเมล็ดสตาร์ชในเมล็ดข้าว เมื่อนำข้าวกล้องไปอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ พบว่าความชื้นของข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งที่แช่เป็นระยะเวลาสั้นจะลดลงได้เร็วกว่าข้าวกล้องที่แช่เป็นระยะเวลานาน เนื่องจากข้าวกล้องที่แช่เป็นระยะเวลาสั้นจะมีความชื้นต่ำ ทำให้ความชื้นลดลงได้เร็วกว่าเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น ความชื้นในเมล็ดข้าวมีแนวโน้มลดลงใกล้เคียงกันเพราะว่าความชื้นส่วนใหญ่จะอยู่ที่เยื่อหุ้มเมล็ด (รำข้าว) และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวกล้องที่ผ่านการแช่ระยะเวลาสั้นมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเมล็ดข้าวกล้องที่ผ่านการแช่เป็นระยะนาน

๓.๑.๓ ผลการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งข้าวกล้องด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน

รูปที่ ๔ แสดงการ

เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งข้าวกล้องด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน พบว่า เมื่อเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นความชื้นของข้าวกล้องที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนลดลงได้เร็วกว่าข้าวกล้องที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เนื่องจากการอบแห้งด้วยอากาศร้อนไม่มีการควบแน่นของไอน้ำและใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูง ส่งผลทำให้ความชื้นของข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนลดลงอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิของเมล็ดข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน โดยเฉพาะในช่วงเริ่มการอบแห้งเกิดการควบแน่นของไอน้ำเป็นผลทำให้อุณหภูมิของข้าวกล้องเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิเมล็ดข้าวเริ่มต้นถึงอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ ทำให้ความร้อนแฝงจากการควบแน่นของไอน้ำบนผิวของเมล็ดข้าวกล้องถ่ายเทไปยังภายในเมล็ดข้าวกล้อง

๓.๒ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

รูปที่ ๕ เปรียบเทียบการทำนายอัตราการอบแห้งข้าวกล้องระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความสูงเบดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิการแช่ ๗๐ องศาเซลเซียส เวลาในการแช่ ๑ ชั่วโมง พบว่าผลการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกันกับการทดลอง โดยในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้แบ่งอัตราการอบแห้ง เป็น ๒ ช่วง ดังนี้



-ช่วงอัตราการอบแห้งคงตัว

ช่วงเริ่มต้นของอัตราการอบแห้งคงตัว เป็นช่วงที่ข้าวกล้องยังมีความชื้นสูงอยู่และเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของข้าวกล้อง เมื่อข้าวกล้องได้รับความร้อนจะเกิดการถ่ายเท

ความชื้นที่ผิวด้านนอกเท่านั้น ไม่ได้เกิดจากการแพร่ของความชื้นขึ้นในอัตราการอบแห้งช่วงนี้ส่งผลทำให้ความชื้นของข้าวกล้องลดลงอย่างคงที่เป็นเส้นตรงในช่วงแรกๆ ของการอบแห้งเมื่อเทียบกับเวลา ซึ่งอัตราการอบแห้ง

ช่วงนี้สามารถเขียนความสัมพันธ์ของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ความเร็วเชิงมวล และเวลากับอัตราส่วนความชื้นสามารถอธิบายโดยใช้สมการที่ ๑

$$MR = (-1.9594 \times 10^{-3} VT + 0.7586V + 4.004 \times 10^{-5} T - 0.016268)t + 1.030765 \quad (R^2 = 0.92) \quad (๑)$$

เมื่อ

MR	คือ	อัตราส่วนความชื้น
T	คือ	อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง, K
V	คือ	ความเร็วเชิงมวลจำเพาะ, $\text{kg}_{\text{steam}}/\text{s} \cdot \text{kg}_{\text{drymatter}}$
t	คือ	เวลาอบแห้ง, s

ในอัตราการอบแห้งช่วงนี้พบว่าอุณหภูมิไอน้ำยวดยิ่งและความเร็วเชิงมวลมีผลต่ออัตราส่วนความชื้น โดยสมการที่ (๑) ใช้ได้ในช่วงความเร็วเชิงมวลจำเพาะในช่วง 0035 - 0053 $\text{kg}_{\text{steam}}/\text{s} \cdot \text{kg}_{\text{drymatter}}$ และอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ๑๒๐ - ๑๖๐ องศาเซลเซียส จนความชื้นลดลง

ถึงความชื้นวิกฤติ (ความชื้นวิกฤติของข้าวกล้องประมาณร้อยละ ๒๕.๕ - ๒๖ มาตรฐานแห้ง) จะเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

-ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง
หลังจากความชื้นลดลงจนถึงความชื้นวิกฤติ ความชื้นของข้าวกล้อง

เริ่มลดลงแบบ exponential จึงเป็นช่วงที่ความชื้นภายในวัสดุจะแพร่ออกมาที่ผิวนอกแล้วระเหย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลหาได้จากผลเฉลยวิเคราะห์ (analytical solution) ของเมลิตข้าวกล้องรูปทรงกลม ดังสมการที่ (๒)

$$\frac{M_1 - M_{eq}}{M_{cr} - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} \exp\left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 D_{eff}(t - t_{cr}) \quad (๒)$$

เมื่อ M_1 คือความชื้น ณ เวลาใด ๆ M_{eq} คือความชื้นสมดุล R คือรัศมีของเมล็ดข้าวกล้อง (เมตร) t_{cr} คือเวลาของการอบแห้ง ณ จุดความชื้นวิกฤติ (วินาที)
รูปที่ ๖ แสดงความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับ

ความสูงเบดและอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลอยู่ในช่วง 1.0497×10^{-10} - $2.4672 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ สำหรับอุณหภูมิอบแห้ง ๑๒๐-๑๖๐ องศาเซลเซียส และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น การหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นใช้สมการ Arrhenius สมการที่ ๓

$$D_{eff} = 9.95289 \times 10^{-7} \exp\left(\frac{-32915.126}{RT}\right) \quad (R^2 = 0.86) \quad (๓)$$



๓.๓ ปริมาณต้นข้าว

รูปที่ ๗ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละต้นข้าวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความสูงเบตต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า ช่วงแรกของการอบแห้งมีร้อยละต้นข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวสารอ้างอิง (ร้อยละ ๗๙.๔) โดยร้อยละต้นข้าวมีค่าสูงขึ้นในช่วงความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งประมาณร้อยละ ๒๘ - ๒๙ มาตรฐานแห้ง เนื่องจากการเกิดเจลลิตีในเซชันซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อข้าวกล้องที่มีความชื้นสูงนั้นได้รับความร้อนสูงแห้งที่ถูกน้ำเกิดการพองตัวและถูกทำให้สุก นอกจากนี้ ยังทำให้โปรตีนแตกตัวและแทรกเข้าไปภายในโครงสร้างภายในช่องว่างของเม็ดแห้งทำให้เกิดการยึดตัวเข้าด้วยกันและเกาะกันแข็งแรงขึ้น และทำให้อ้อยข้าวภายในเมล็ดข้าวสามารถผสมกันได้อย่างสนิท (ดังรูปที่ ๑๐ค) เมล็ดข้าวมีลักษณะแข็งใสเหนียวและทนต่อการขัดสี เมื่อนำไปขัดสีจึงได้ร้อยละต้นข้าวสูง ถ้าข้าวกล้องได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานานเกินไปในช่วงความชื้นสุดท้ายต่ำกว่าร้อยละ ๒๘ มาตรฐานแห้ง จะทำให้ปริมาณความร้อนส่วนใหญ่ที่ใช้ในการระเหยน้ำถูกนำไปเพิ่มอุณหภูมิให้แก่เมล็ดข้าว ส่งผลให้เมล็ดข้าวกล้องมีอุณหภูมิสูงมากเกินไปจนโครงสร้างของเม็ดสารถเปลี่ยนแปลงเกิดเป็นโพรงช่องว่างขึ้น มีผลทำให้เกิดการแตกหัก และในช่วงขณะที่อัตราการอบแห้งลดลงนี้จะเกิดความแตกต่างของความชื้นที่บริเวณผิวและแกนกลาง

ของเมล็ดข้าวกล้อง ถ้าความแตกต่างของความชื้นนี้เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในเมล็ดมากขึ้นด้วย ซึ่งนำไปสู่การร้าวของเมล็ดขึ้นได้และเมื่อนำข้าวกล้องไปขัดสีจะได้ร้อยละต้นข้าวลดลง

รูปที่ ๘ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละต้นข้าวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการแช่ จากการทดลองพบว่าความชื้นในเมล็ดข้าวกล้องสูงขึ้นตามระยะเวลาในการแช่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละต้นข้าวสูงขึ้น ถ้าความชื้นเริ่มต้นของข้าวกล้องสูงจะทำให้ช่วงเวลากการเกิดเจลลิตีในเซชันนานขึ้นถ้าระยะเวลาในการแช่ข้าวกล้องน้อยกว่า ๑ ชั่วโมง ทำให้ความชื้นในเมล็ดข้าวไม่สม่ำเสมอทั้งเมล็ด และไม่เพียงพอต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันภายในเมล็ดข้าว ทำให้ข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งแล้วมีลักษณะขาวขุ่นที่เมล็ดข้าวเมื่อขัดสีจะได้ร้อยละต้นข้าวลดลง

รูปที่ ๙ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละต้นข้าวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้อง เปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน พบว่าร้อยละต้นข้าวของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน โดยในช่วงแรกของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะมีค่าร้อยละต้นข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวสารอ้างอิง หลังจากนั้นร้อยละต้นข้าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อความชื้นลดลงต่ำกว่าร้อยละ ๒๘ มาตรฐานแห้ง ขณะที่การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะมีค่าร้อยละต้นข้าวลดลง

เมื่อเทียบกับข้าวสารอ้างอิง เนื่องจากการอบแห้งข้าวกล้องด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำในช่วงแรกของการอบแห้งซึ่งเทียบได้กับการนิ่งของกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง ทำให้ช่วงเวลาในการเกิดเจลลิตีในเซชันภายในเมล็ดนานขึ้น (ดังรูปที่ ๑๐ค) จึงมีผลทำให้ร้อยละต้นข้าวที่ได้สูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งการเกิดเจลลิตีในเซชันไม่สมบูรณ์ตลอดทั่วเมล็ด และทำให้การยึดเกาะตัวของกลุ่มแป้งและโปรตีนไม่สามารถประสานกันอย่างสนิท (ดังรูปที่ ๑๐ง) เกิดช่องว่างมากขึ้นภายในเมล็ดข้าว ทำให้เมล็ดข้าวที่ได้จึงมีลักษณะขาวขุ่นมากขึ้น เมื่อนำไปขัดสีทำให้ร้อยละต้นข้าวลดลงต่ำกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

๓.๔ White belly

ปริมาณ white belly แสดงถึงคุณภาพที่ไม่ดีของข้าวหนึ่ง เพราะลักษณะข้าวมีจุดขาวที่บวมและเกิดช่องว่างขึ้นภายในเมล็ดข้าว ซึ่งเกิดจากกระบวนการเจลลิตีในเซชันของแป้งในเมล็ดข้าวที่ไม่สมบูรณ์ โดยส่วนใหญ่จะปรากฏบริเวณแกนกลางในเมล็ดข้าว รูปที่ ๑๑, ๑๒ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง white belly กับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องที่อุณหภูมิ ความสูงเบตและระยะเวลาการแช่ต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาการแช่มีอิทธิพลต่อร้อยละ white belly โดยที่ระยะเวลาการแช่นานขึ้นทำให้อ้อย white belly ลดลง เนื่องจากข้าวกล้องที่ผ่านการแช่ระยะเวลาต่ำกว่า ๑ ชั่วโมงปริมาณน้ำจะซึมเข้าภายในเมล็ดข้าว



ได้น้อย โดยจะเกิดที่บริเวณผิวเท่านั้น ส่งผลให้ความชื้นเพียงพอต่อการเกิดเจลไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งเมล็ด แต่อุดหนุมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความสูงเบต (ข้าวกล้องที่แช่ ๑ ชั่วโมง) ไม่มีผลต่อร้อยละ white belly โดยที่ร้อยละ white belly ที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี^{๑๑}

รูปที่ ๑๓ ความสัมพันธ์ระหว่าง white belly กับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อน พบว่า การอบแห้งข้าวกล้องด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีร้อยละ white belly น้อยกว่าการอบแห้งข้าวกล้องด้วยอากาศร้อนมาก เนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีช่วงการควบแน่นของไอน้ำเกิดขึ้น จึงทำให้เมล็ดข้าวกล้องเกิดเจลลิตในเซชันได้สมบูรณ์กว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ไม่มีการควบแน่นของไอน้ำ (รูปที่ ๑๐ค และ ๑๐ง) เนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำนั้นเทียบได้กับช่วงการนิ่ง ทำให้ช่วงเวลาในการเกิดเจลลิตในเซชันขึ้น จึงทำให้ได้ปริมาณ white belly ต่ำ

๓.๕ ความขาว

รูปที่ ๑๔ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขาวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องที่อุดหนุมิและความสูงเบตต่าง ๆ จากการทดลองพบว่าข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีค่าความขาวของข้าวสารลดลงเมื่อเทียบกับข้าวสารอ้างอิง (๔๖.๔) ผลของอุดหนุมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งไม่มีผลต่อค่าความขาวของข้าวสารมากนัก โดยความขาวของข้าวจะมีค่าคงที่ตลอดช่วงความชื้นค่าหนึ่ง ๆ และ

จะมีค่าความขาวลดลงเมื่อความชื้นลดลงต่ำกว่าร้อยละ ๑๘-๒๐ มาตรฐานแห้ง ผลของความสูงเบตที่มีต่อความขาวของข้าวสาร พบว่าที่ความสูงเบต ๑๒ เซนติเมตรจะมีความขาวของข้าวสารมากกว่าที่ความสูงเบต ๑๐ เซนติเมตร แต่ที่ความสูงเบต ๘ เซนติเมตร มีความขาวของข้าวสารมากกว่าที่ความสูงเบต ๑๒ และ ๑๐ เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งที่ความสูงเบต ๘ เซนติเมตรเกิดช่องว่างภายในเมล็ดข้าว จึงทำให้เกิดการร้าวขึ้น ซึ่งทำให้การวัดค่าความขาวของข้าวสารผิดพลาดได้ เนื่องจากเครื่องที่ใช้วัดความขาวได้ใช้หลักการของการหักเหของแสง นอกจากนี้ ระยะเวลาการแช่ก็มีผลต่อความขาวของข้าวสารเช่นเดียวกัน (รูปที่ ๑๕) พบว่าระยะเวลาในการแช่ ๒ ชั่วโมง และ ๑ ชั่วโมง ค่าความขาวของข้าวสารใกล้เคียงกัน แต่ถ้าระยะเวลาในการแช่น้อยกว่า ๑ ชั่วโมง ค่าความขาวของข้าวสารจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากทำให้ความชื้นในเมล็ดข้าวน้อยและไม่เพียงพอแก่การเกิดเจลลิตในเซชันภายในเมล็ดข้าว ทำให้ข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งแล้วมีลักษณะขาวขุ่นที่เมล็ดข้าว เมื่อนำข้าวสารไปวัดความขาวทำให้ความขาวของข้าวสารเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความขาวของข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน (รูปที่ ๑๖) จากการทดลองพบว่าความขาวของข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีค่าสูงกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เนื่องจากข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศ

ร้อน มีลักษณะขาวขุ่นคล้ายข้าวเหนียว ซึ่งเป็นผลจากเกิดเจลลิตในเซชันไม่สมบูรณ์ตลอดทั่วเมล็ด เกิดช่องว่างขึ้นภายในเมล็ดข้าว และค่าความขาวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องต่ำลง ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงความขาวของข้าวสารสามารถอธิบายได้ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงความขาวเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารประกอบที่อยู่ภายในเมล็ดข้าว ซึ่งเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบเมลลาร์ด โดยสภาพที่เหมาะสมของน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดอะมิโนโดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสีน้ำตาล จึงส่งผลทำให้ค่าความขาวของข้าวที่ผ่านการอบแห้งจะมีสีคล้ำขึ้น

๓.๖ สมบัติความเหนียวของแป้งข้าว (pasting properties)

รูปที่ ๑๗, ๑๘ และ ๑๙ ตารางที่ ๑ แสดงสมบัติความเหนียวของแป้งข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อากาศร้อน และข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการอบแห้ง (ข้าวอ้างอิง) ผลการทดลองพบว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนมีค่า pasting temperature สูงกว่าข้าวอ้างอิง และค่า PV, BKV และ FV ต่ำกว่าข้าวอ้างอิง (รูปที่ ๑๗ และ ๑๘) การที่ค่า PV สูงเกิดจากการที่เมล็ดสารมีความสามารถในการจับกับน้ำได้ปริมาณมากกว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง ทำให้เมล็ดสารเกิดการพองตัวเป็นผลทำให้ค่าความเหนียวสูงขึ้น ส่วนข้าวผ่านการอบแห้งค่า PV ลดลงในช่วงเวลา ๒ นาทีแรกระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ข้าวที่มี



ความชื้นสูงได้รับความร้อนสูง เม็ดสตาร์ชที่ถูกน้ำจะพองตัวและกลายเป็นเจลและทำให้โปรตีนแตกตัวและแทรกเข้าไปภายในช่องว่างระหว่างเม็ดสตาร์ช เมื่อนำไปวัดสมบัติความหนืดของแป้ง จะมีส่วนทำให้ความสามารถในการจับน้ำของเม็ดสตาร์ชลดลง ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้น้อยลงด้วย มีผลทำให้ค่า PV ลดลง สำหรับค่า FV และ SBK แสดงถึงสมบัติความแข็งกระด้างของข้าวสุก^{๑๒, ๑๓, ๑๔} ข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งให้ค่า FV และ SBK ต่ำกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและที่ไม่ผ่านการอบแห้งตามลำดับ ดังนั้น ข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีลักษณะความแข็งกระด้างต่ำกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและข้าวที่ไม่ผ่านการอบแห้ง หลังจากการหุงสุกและปล่อยให้ข้าวเย็นตัวลง

๕. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการนึ่งข้าวกล้องด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบด พบว่า อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้งมากที่สุด ความสูงเบดและระยะเวลาในการแช่มีผลต่ออัตราการอบแห้งน้อย เมื่อความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องหลังการอบแห้งต่ำกว่าร้อยละ ๒๘ มาตรฐานแห้ง พบว่าร้อยละต้นข้าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งไม่มีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อความขาวของข้าว เมื่อความชื้นสุดท้ายต่ำกว่าร้อยละ ๑๘ มาตรฐานแห้ง ความขาวจะลดลง การเพิ่มระยะเวลาในการแช่ให้นานขึ้น

ส่งผลให้ร้อยละต้นข้าวเพิ่มขึ้น ช่วยลดการขาวของข้าว และการเกิด white belly ลดลง เนื่องจากทำให้ช่วงเวลาในการเกิดเจลที่ในเซชันนานขึ้น จากการวัดสมบัติความหนืดของแป้ง ข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งให้ค่า PV, BKV และ SBV ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับข้าวที่อบด้วยอากาศร้อนและข้าวที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน นอกจากนี้เมื่อดูลักษณะโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าไม่ปรากฏโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชหลังจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

๕. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย ขอขอบพระคุณสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบสมบัติทางเคมีกายภาพ

เอกสารอ้างอิง

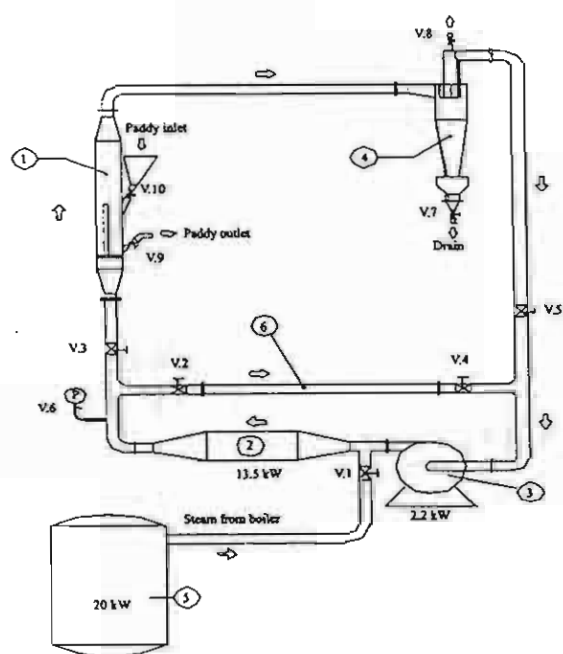
1. Kar N, Jain RK, Srivastav PP. Parboiling of Dehusked Rice. Journal of Food Engineering. 1999; 39 (1) : 17 - 22.
2. Ali, SZ, Bhattacharya, KR. High-Temperature Drying-Cum-Parboiling of Paddy, Journal of Food Process Engineering. 1980; 4 : 123 - 136.
3. Unnikrishnan, KR, Viraktamath, CS, Krishnamurthy, H, Bhattacharya, KR. Parboiling of Paddy by Simple Soaking in Hot Water, Journal Food Tech., 1982; 17 : 499 - 506.
4. Toshinari, K, Bhattacharya, KR, Ali,

- SZ., Effect of Processing Conditions on the Color Intensity of Parboiled Rice, Journal of Soc of Agri Struc. Japan, 1993. 20(1) : pp. 153 - 160.
5. Elbert, G, Marcela, P, Suarez, C. Effect of Drying Condition on Head Rice Yield and Browning Index of Parboiled Rice, Journal of Food Engineering. 2001; 47 : 37 - 41.
6. Taechapairoj, C, Dhuchakallaya, I, Soponronnarit, S, Wetchcama, S, Prachayawarakorn, S. Superheated Steam Fluidised Bed Paddy Drying, Journal of Food Engineering. 2003; 58 : 67 - 73.
7. Taweerattanapanish, A, Soponronnarit, S, Wetchcama, S, Kongseri, N, Wongpiyachon, S. Effects of Drying on Head Yield Using Fluidization Technique, Drying Technology. 1999; 17(1&2) : 345 - 353.
8. Taechapairoj, C, Prachayawarakorn, S, Soponronnarit, S. Characteristics of Rice Dried in Superheated Steam Fluidised Bed, Drying Technology. 2004; 22(4) : 719 - 743.
9. Soponronnarit, S, Taechapairoj, C, Prachayawarakorn, S. New Technique Producing Parboiled Rice, The Journal of the Royal Institute of Thailand. 2004; 29(1) : 78 - 86.
10. AACC. Approved method of the American Association of Cereal Chemists. 8th ed. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN. 1995.
11. Department of Foreign Trade, Available: http://www.dft.moc.go.th/document/grain/rice_standard.pdf [08/30/04].
12. Ali SZ, Bhattacharya KR. Pasting behaviour of parboiled rice, J. Texture Stud., 1980; 11 : 239 - 245.
13. Priestley RJ. Studies on parboiled rice. I. Comparison of the characteristics of raw and parboiled rice, Food Chemistry. 1976; 1, 5 - 14.
14. Ranghavendra RSN, Juliano BO. Effect of parboiling on some physicochemical properties of rice, Journal Agricultural Food Chemistry. 1970; 18 : 289 - 294.

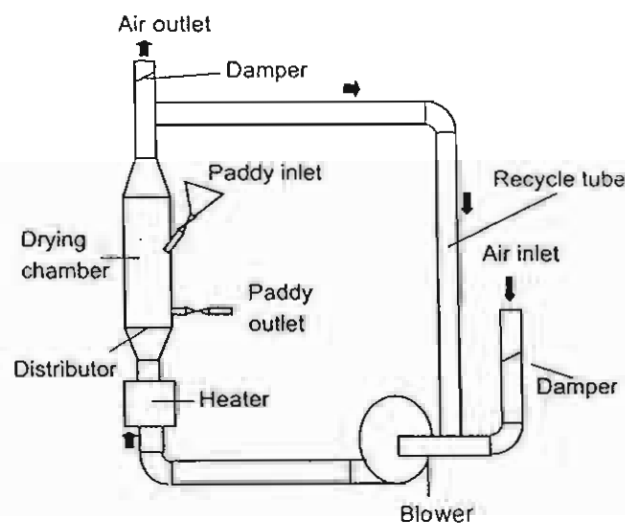


ตารางที่ ๑ สมบัติความหนืดของแป้งข้าวที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการต่าง ๆ

	Peak viscosity (rvu)	Trough 1 (rvu)	Breakdown viscosity (rvu)	Final viscosity (rvu)	Setback viscosity (rvu)	Pasting Temp (C)
ข้าวสารอ้างอิง	209.67	161.92	47.75	332.67	123.00	79
อากาศร้อน 140°C แห่ 2 ชั่วโมง เบด 10 cm	112.92	109.33	3.58	236.67	123.75	89
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120°C แห่ 1 ชั่วโมง เบด 10 cm	84.33	84.42	-0.08	148.58	64.25	89
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 140°C แห่ 1/2 ชั่วโมง เบด 10 cm	84.92	84.83	0.08	139.42	54.50	89
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 140°C แห่ 1 ชั่วโมง เบด 10 cm	80.08	80.50	-0.42	135.92	55.83	89
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 140°C แห่ 2 ชั่วโมง เบด 10 cm	77.75	77.58	0.17	125.08	47.33	89.9
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 140°C แห่ 1 ชั่วโมง เบด 8 cm	82.17	82.17	0.00	123.00	40.83	89
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 140°C แห่ 1 ชั่วโมง เบด 12 cm	87.17	87.17	0.00	148.58	61.42	89

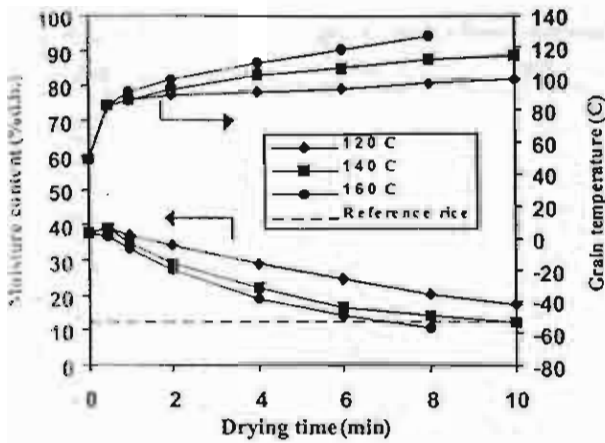


ก) เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

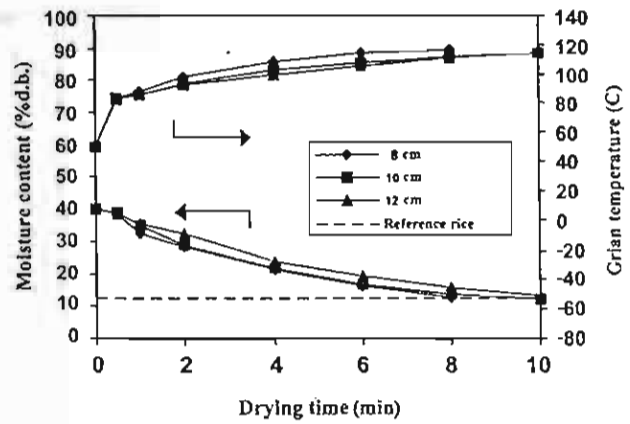


จ) เครื่องอบแห้งด้วยอากาศร้อน

รูปที่ ๑ แผนภาพระบบการอบแห้ง

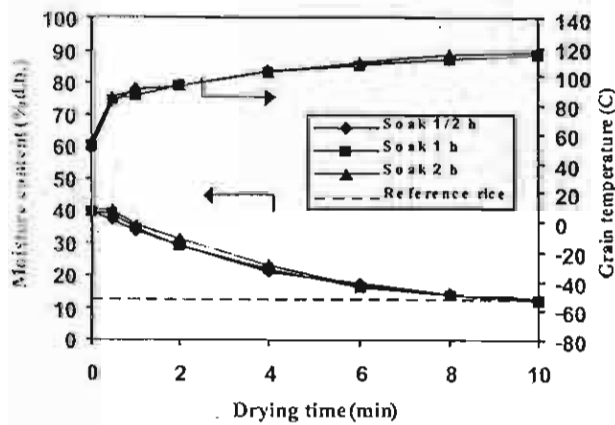


ก) ความสูงเบด ๑๐ เซนติเมตร

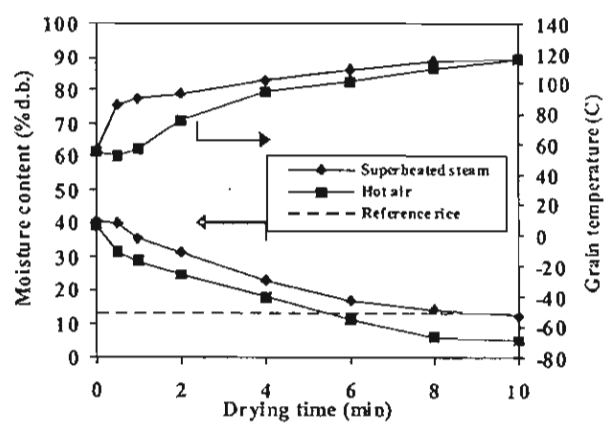


ข) อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ๑๔๐ องศาเซลเซียส

รูปที่ ๒ อิทธิพลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความสูงเบดต่ออัตราการอบแห้งและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวกล้องที่อุณหภูมิในการแช่ ๗๐ เซนติเมตร และเวลาในการแช่ ๑ ชั่วโมง



รูปที่ ๓ อิทธิพลของระยะเวลาการแช่ข้าวกล้องต่ออัตราการอบแห้งและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวกล้องที่อุณหภูมิอบแห้ง ๑๔๐ องศาเซลเซียส ความสูงเบด ๑๐ เซนติเมตร และเวลาในการแช่ ๑ ชั่วโมง



รูปที่ ๔ อิทธิพลของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่มีต่อการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง ๑๔๐ องศาเซลเซียส ที่ความสูงเบด ๑๐ เซนติเมตร อุณหภูมิในการแช่ ๗๐ องศาเซลเซียส และเวลาในการแช่ ๒ ชั่วโมง