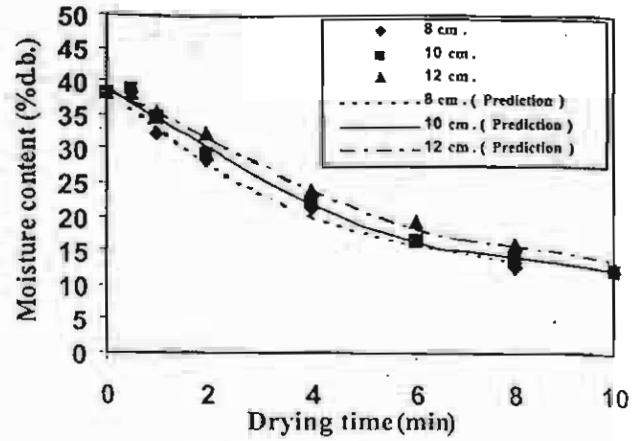
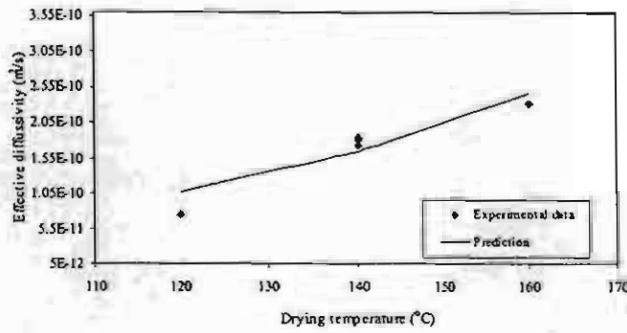


ก) ความสูงเบต ๑๐ เซนติเมตร

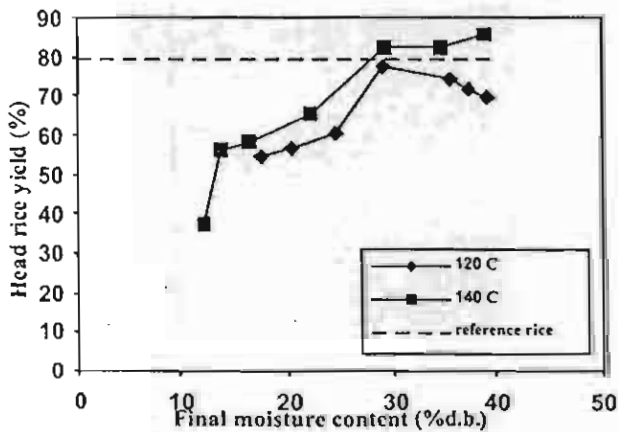


ข) อุณหภูมิไอน้ำร้อนขนาดย้ง ๑๔๐ องศาเซลเซียส

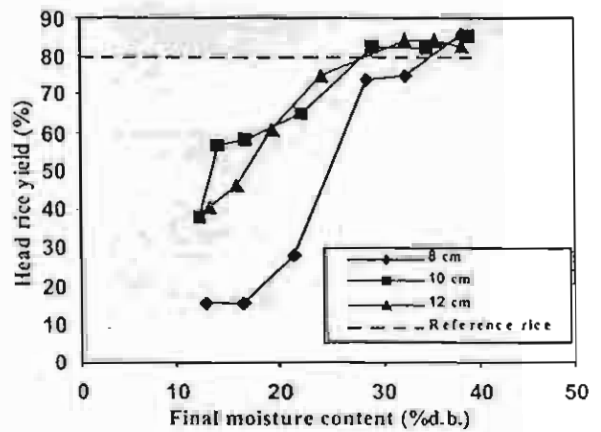
รูปที่ ๕ เปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นของข้าวกล้องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง ณ เวลาต่าง ๆ



รูปที่ ๖ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการทดลองและค่าทำนาย

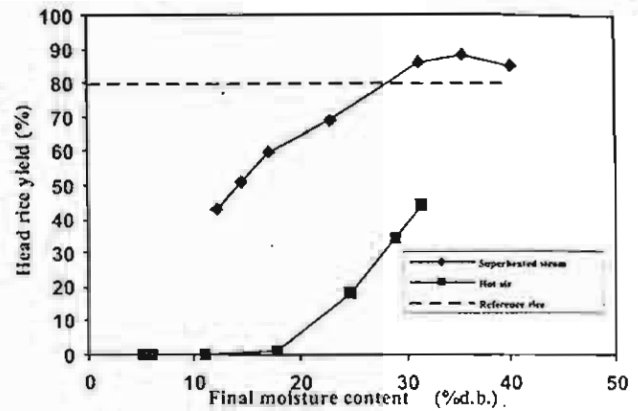
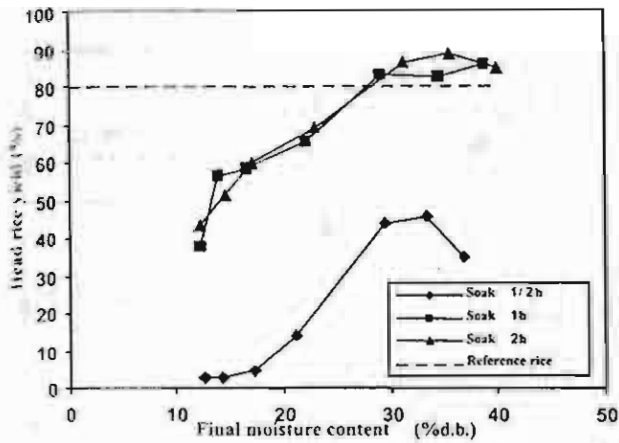


ก) ความสูงเบต ๑๐ เซนติเมตร



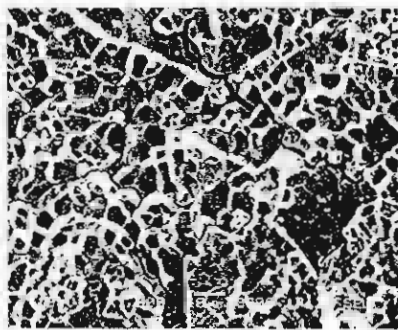
ข) อุณหภูมิไอน้ำร้อนขนาดย้ง ๑๔๐ องศาเซลเซียส

รูปที่ ๗ ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละต้นข้าวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนขนาดย้งและ ความสูงเบตต่าง ๆ ระยะเวลาในการแช่ ๑ ชั่วโมง

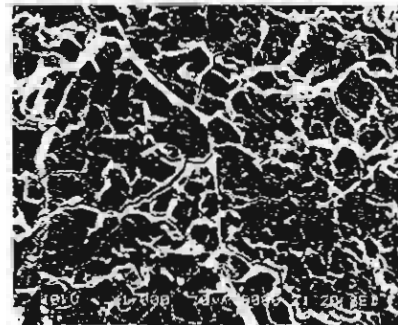


รูปที่ ๘ ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละต้นข้าวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องที่ระยะเวลาในการแช่ต่าง ๆ อุณหภูมิอบแห้ง ๑๕๐ องศาเซลเซียส และ ความสูงเบด ๑๐ เซนติเมตร

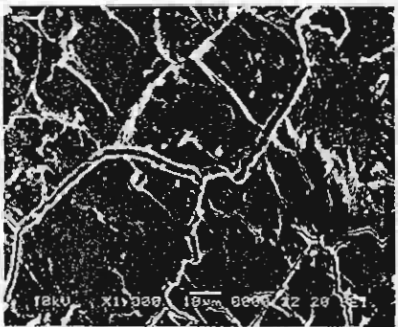
รูปที่ ๙ ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละต้นข้าวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่ระยะเวลาในการแช่ข้าวโม่ อุณหภูมิในการอบแห้ง ๑๕๐ องศาเซลเซียส



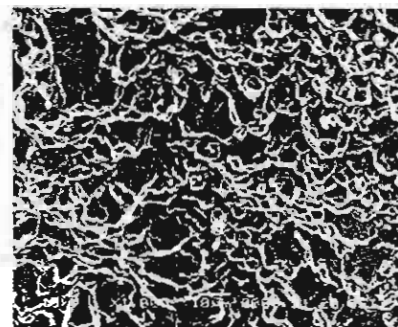
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

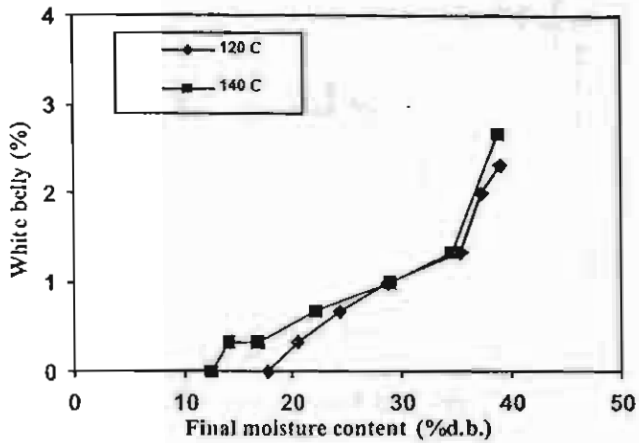
รูปที่ ๑๐ ลักษณะการเกิดเจลาทีไนเซชันของข้าวที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลา ๒ ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (กำลังขยาย ๑,๐๐๐ เท่า)

(ก) ข้าวที่ไม่ได้ผ่านการแช่และการอบแห้ง

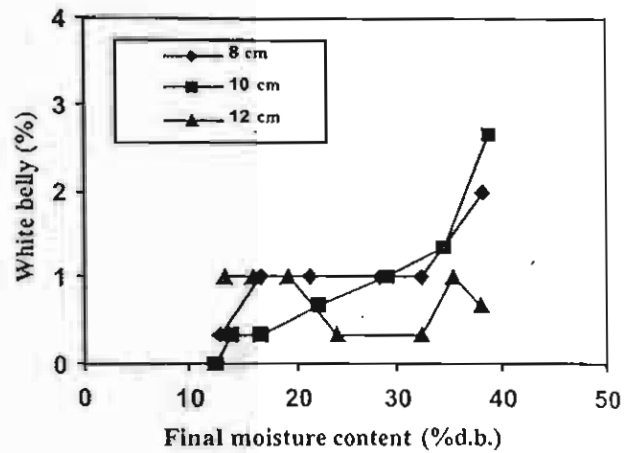
(ค) ข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

(ข) ข้าวที่ผ่านการแช่และไม่ผ่านการอบแห้ง

(ง) ข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

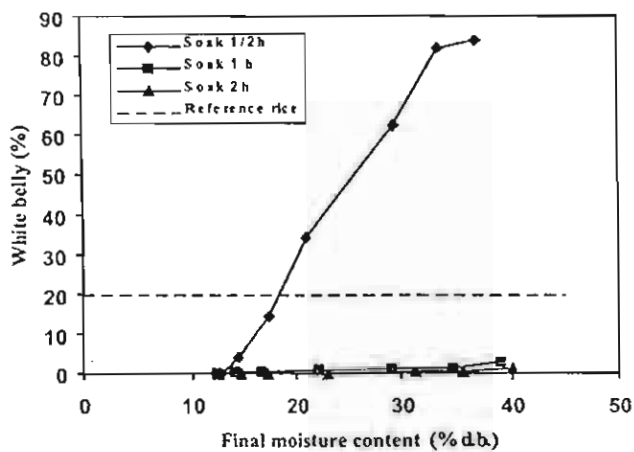


ก) ความสูงเบต ๑๐ เซนติเมตร

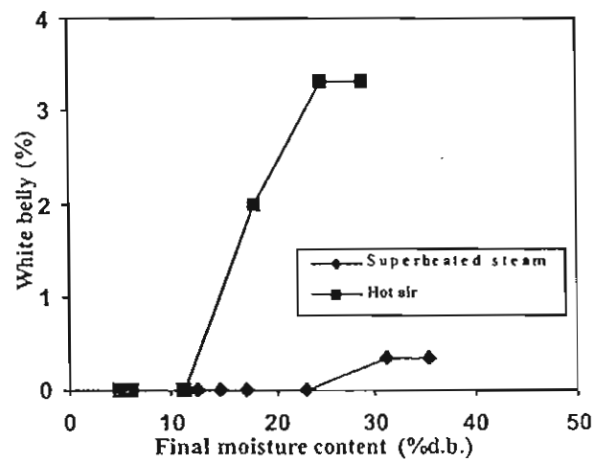


ข) อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ๑๔๐ องศาเซลเซียส

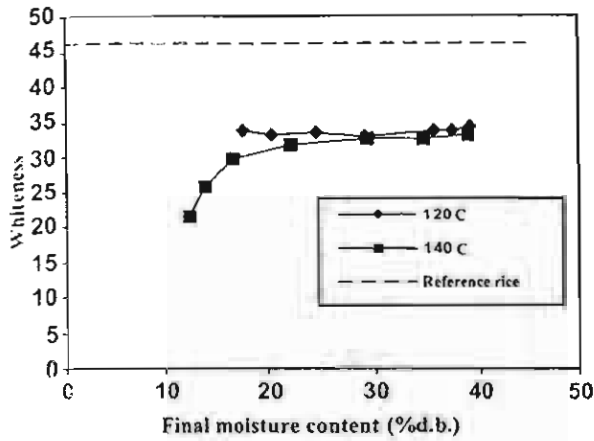
รูปที่ ๑๑ ความสัมพันธ์ระหว่าง white belly กับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความสูงเบตต่าง ๆ ระยะเวลาในการแช่ ๑ ชั่วโมง (ร้อยละ white belly ของข้าวอ้างอิง = ร้อยละ ๒๐)



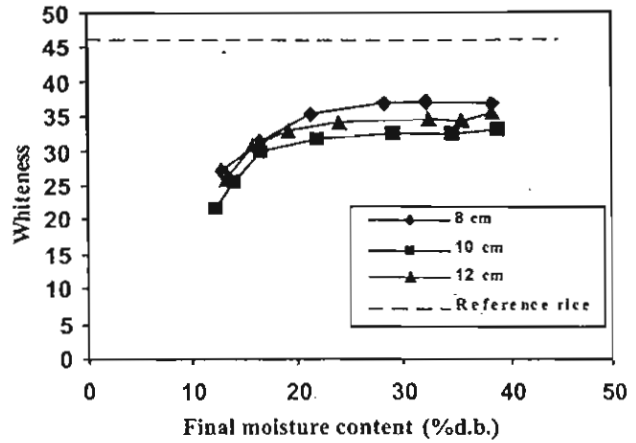
รูปที่ ๑๒ ความสัมพันธ์ระหว่าง white belly กับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องที่ระยะเวลาในการแช่ต่าง ๆ อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ๑๔๐ องศาเซลเซียสและความสูงเบต ๑๐ เซนติเมตร



รูปที่ ๑๓ ความสัมพันธ์ระหว่าง white belly กับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่ระยะเวลาในการแช่ ๒ ชั่วโมง อุณหภูมิในการอบแห้ง ๑๔๐ องศาเซลเซียส

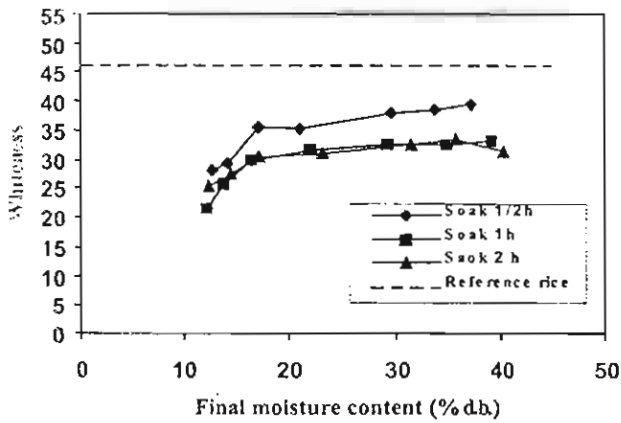


ก) ความสูงเบต ๑๐ เซนติเมตร

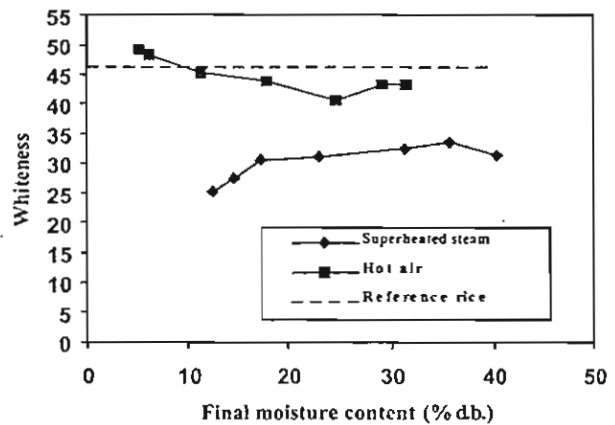


ข) อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ๑๔๐ องศาเซลเซียส

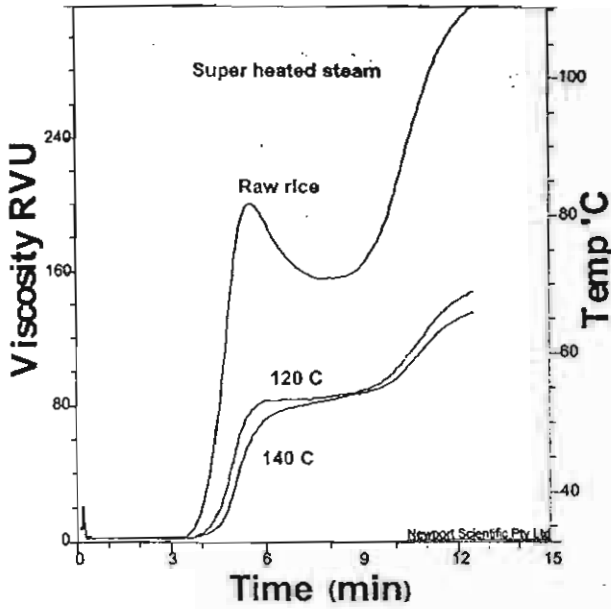
รูปที่ ๑๔ ความสัมพันธ์ระหว่างความขาวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความสูงเบตต่าง ๆ ระยะเวลาในการแช่ ๑ ชั่วโมง (ความขาวของข้าวสารอ้างอิง ๔๔.๖)



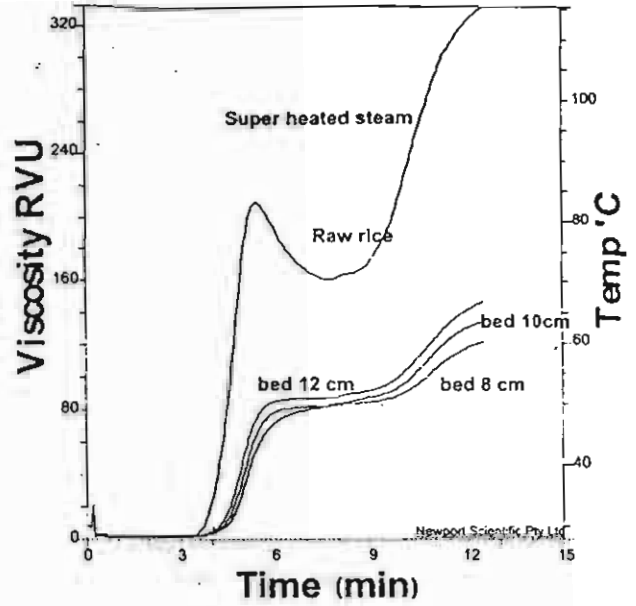
รูปที่ ๑๕ ความสัมพันธ์ระหว่างความขาวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องที่ระยะเวลาในการแช่ต่าง ๆ อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ๑๔๐ องศาเซลเซียส และความสูงเบต ๑๐ เซนติเมตร (ความขาวของข้าวสารอ้างอิง ๔๔.๖)



รูปที่ ๑๖ ความสัมพันธ์ระหว่างความขาวกับความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่ระยะเวลาในการแช่ ๒ ชั่วโมง อุณหภูมิในการอบแห้ง ๑๔๐ องศาเซลเซียส (ความขาวของข้าวสารอ้างอิง ๔๔.๖)

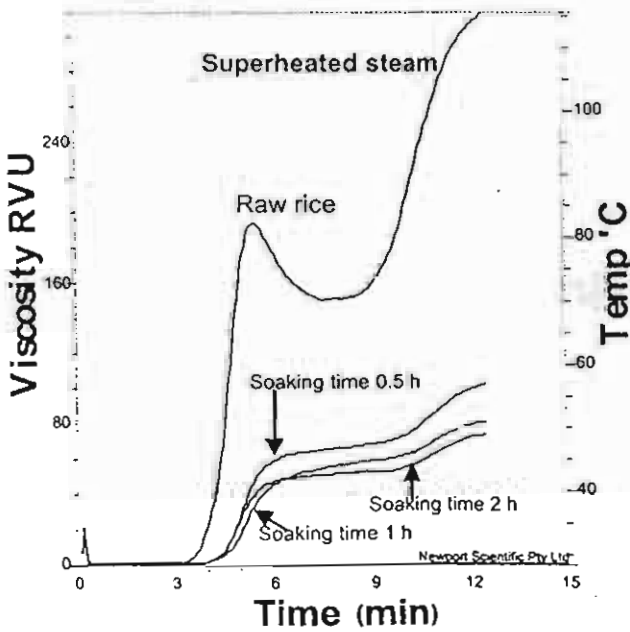


ก) ความสูงเบต ๑๐ เซนติเมตร

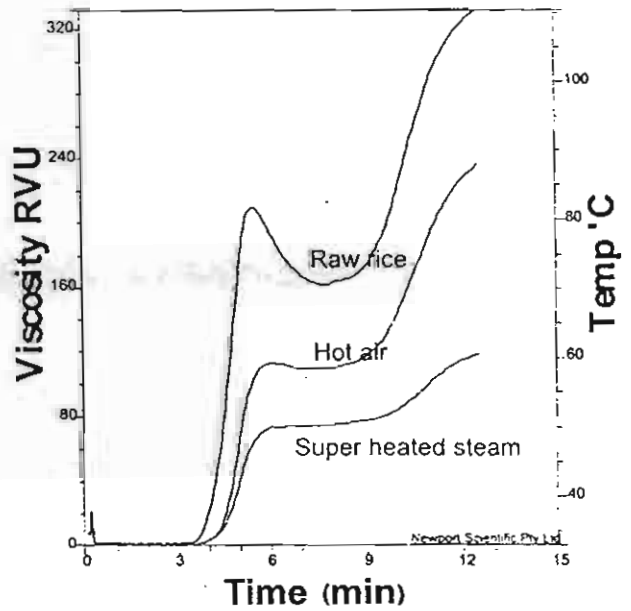


ข) อุณหภูมิไอน้ำร้อนขนาดบึง ๑๕๐ องศาเซลเซียส

รูปที่ ๑๗ ความหนืดของแป้งข้าวที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนขนาดบึงและ ความสูงเบตต่าง ๆ ที่ระยะเวลาในการแช่ ๑ ชั่วโมง



รูปที่ ๑๘ ความหนืดของแป้งข้าวที่ผ่านการแช่ในระยะเวลาต่าง ๆ อุณหภูมิอบแห้ง ๑๕๐ องศาเซลเซียส และ ความสูงเบต ๑๐ เซนติเมตร



รูปที่ ๑๙ ความหนืดของแป้งข้าวที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขนาดบึงกับอากาศร้อนที่ระยะเวลาในการแช่ ๒ ชั่วโมง อุณหภูมิอบแห้ง ๑๕๐ องศาเซลเซียสและ ความสูงเบต ๑๐ เซนติเมตร



การพัฒนาเครื่องต้นแบบอบแห้ง ข้าวหนึ่งแบบฟลูอิดเบดโดยใช้ ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

วาทัญญู รอดประพัฒน์^๑
อดิศักดิ์ นาทกรณกุล^๒
วารุณี เตีย^๓
สมชาติ โสภณรณฤทธิ์^๔
ราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์
ราชบัณฑิตยสถาน

บทคัดย่อ

กรรมวิธีการผลิตข้าวหนึ่งในปัจจุบันมีเครื่องจักรอุปกรณ์จำนวนมาก และใช้เวลาในการผลิตยาวนาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องต้นแบบฟลูอิดเบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ขนาดกำลังผลิต ๑๐๐ กิโลกรัมต่อชั่วโมง ข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิเริ่มต้น ๘๐ และ ๗๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๓ และ ๗-๘ ชั่วโมง ซึ่งจะได้ความชื้นประมาณร้อยละ ๒๘.๗ และ ๓๑.๓ มาตรฐานเปียก ตามลำดับ เมื่อผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ ๑๒๘-๑๖๔ องศาเซลเซียส และใช้ความสูงเบตข้าวเปลือก ๘ เซนติเมตร ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ๓.๘ เมตรต่อวินาที เวลาในการอบแห้งประมาณ ๔-๕ นาที พบว่าสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกลงเหลือร้อยละ ๑๗.๔-๒๒.๘ มาตรฐานเปียก โดยที่ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งจะมีลักษณะเป็นข้าวหนึ่ง ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ร้อยละต้นข้าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง ความขาวของข้าวสารจะลดลงตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติความหนืดของแป้ง มีค่า peak viscosity และค่า final viscosity ลดต่ำลง เมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง และมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบฟลูอิดเบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่านอกจากจะลดความชื้นข้าวเปลือกลงได้แล้วยังทำให้แป้งภายในเมล็ดข้าวเปลือกสุกหรือเกิดเจลลิตินในเซชันไดโนชั้นตอนเดียวกันด้วย จึงเป็นการรวมการึ่งและอบแห้งไว้ในขั้นตอนเดียวกัน ซึ่งมีผลทำให้ลดต้นทุนและระยะเวลาในการผลิตข้าวหนึ่งลง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการผลิตข้าวหนึ่งในเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ : การแช่, ข้าวหนึ่ง, เจลลิตินเซชัน, ฟลูอิดเบด, สมบัติทางกายภาพ, ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

^๑ นักศึกษาปริญญาเอก คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
^๒ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
^๓ รองศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
^๔ ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



๑. บทนำ

ประเทศไทยสามารถส่งออกข้าวเป็นอันดับหนึ่งของโลกติดต่อกันมาหลายปี แต่ต้นทุนในการผลิตข้าวในประเทศไทยพบว่ายังคงสูงอยู่ โดยเฉพาะข้าวหนึ่งที่กระบวนการผลิตมีหลายขั้นตอน คือ ๑) การแช่ (soaking) เพื่อให้ข้าวเปลือกนั้นมีความชื้นเพิ่มขึ้นระหว่างร้อยละ ๓๐-๔๕ มาตรฐานแห้งโดยแช่ข้าวเปลือกในน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ ๖๐-๘๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ ๓-๘ ชั่วโมง ๒) การนึ่ง (steaming) ด้วยไอน้ำอิ่มตัว ขั้นตอนนี้จะทำให้เม็ดแป้งเกิดเจลลาทีไนซ์ ๓) การอบแห้งเพื่อลดความชื้นข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นเมื่อผ่าน ๒ ขั้นตอนแรก ในการอบแห้งจะแบ่งออกเป็น ๒ ช่วง คือ ช่วงความชื้นสูงร้อยละ ๑๘ มาตรฐานเปียกขึ้นไป และช่วงความชื้นต่ำกว่าร้อยละ ๑๘ มาตรฐานเปียก

Taweerattanapanish และคณะ^๑ ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด โดยใช้อากาศร้อน พบว่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกมีผลต่อร้อยละต้นข้าว ถ้าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกต่ำกว่าร้อยละ ๑๘ มาตรฐานเปียก เมื่อนำไปสีจะได้ร้อยละต้นข้าวลดลง^๒ ได้ศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไชน์เบด โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน (แบบววด) ที่อุณหภูมิอบแห้ง ๑๕๐ และ ๑๗๐ องศาเซลเซียส ความสูงของเบด ๑๐-๑๕ เซนติเมตร พบว่าความเร็วต่ำสุดในการ

เกิดฟลูอิดไชน์เบดเท่ากับ ๒.๖ เมตรต่อวินาที อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าความสูงของเบด และยังพบอีกว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแล้วจะมีร้อยละต้นข้าวเพิ่มสูงขึ้น แต่ความขาวของข้าวสารจะลดลง (สึคล้ายกับข้าวหนึ่ง) และเมื่อนำไปทดสอบการหุง ข้าวมีลักษณะคล้ายกับข้าวหนึ่ง Rordprapat และคณะ^๓ ได้ศึกษาเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยอากาศร้อน พบว่าได้ร้อยละต้นข้าวที่สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด และจากงานวิจัยยังพบว่าการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีข้อดีบางประการ เช่น มีอัตราการอบแห้งสูงและสามารถกำจัดกลิ่นของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดสามารถลดขั้นตอนการผลิตข้าวหนึ่งดังกล่าวข้างต้นได้ โดยสามารถรวมขั้นตอนการนึ่งและการอบแห้งช่วงแรกเข้าเป็นขั้นตอนเดียว ดังนั้น จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อออกแบบ สร้างและทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งต้นแบบฟลูอิดไชน์เบด โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง สำหรับนึ่งและอบแห้งข้าวเปลือก โดยศึกษาเฉพาะสมบัติของข้าวที่ผ่านการอบแห้ง เช่น ร้อยละต้นข้าว ความขาว และร้อยละข้าวท้องไข้ โครงสร้างระดับจุลภาค (micro-structure) สมบัติทาง pasting และเปรียบเทียบกับการผลิตข้าวหนึ่งในโรงสีข้าวจริง

๒. อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไชน์เบดอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ ๑) ประกอบด้วย (๑) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (boiler) ความสามารถผลิตไอน้ำได้ประมาณ ๑๖๐ กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความดันไอน้ำสูงสุด ๘ บาร์ ใช้สำหรับผลิตไอน้ำอิ่มตัวเพื่อป้อนเข้าระบบเครื่องอบแห้ง (๒) อุปกรณ์ให้ความร้อนขนาด ๓๐ กิโลวัตต์ มีหน้าที่เปลี่ยนสถานะของไอน้ำอิ่มตัวเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheated steam) อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งก่อนเข้าห้องอบแห้งควบคุมด้วย PID ซึ่งมีค่าความถูกต้อง ± 1 องศาเซลเซียส (๓) พัดลม (blower) เป็นแบบเหวี่ยงไปพัดโค้งหลัง (backward-curved centrifugal blower) ขับด้วยมอเตอร์ขนาด ๕.๕ แรงม้า ใช้สำหรับเวียนอากาศและไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายในระบบเครื่องอบแห้ง (๔) ห้องอบแห้ง (drying chamber) ขนาดพื้นที่หน้าตัดตะแกรง ๒๐ x ๐.๘๕ ตารางเมตร (๕) เครื่องดักฝุ่น (cyclone) ทำหน้าที่ดักฝุ่นและข้าวลีบที่ปนมากับข้าวเปลือก (๖) โรตารีวาล์ว (rotary valve) ติดตั้งใต้เครื่องดักฝุ่นเพื่อทำหน้าที่ลำเลียงฝุ่นออกและป้องกันการรั่วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งออกจากระบบอบแห้ง ส่วนการป้อนและปล่อยข้าวเปลือกใช้ความหนาของข้าวเปลือกเป็นตัวป้องกันการรั่วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งซึ่งอุปกรณ์ทุกชิ้นทำด้วยเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม (stainless steel) หุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา ๒.๕ เซนติเมตร



๒.๑ การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

นำข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง ที่ผ่านการแช่ (soaking) เพื่อเพิ่มความชื้น มาทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

๑. เริ่มเดินเครื่องอบแห้งต้นแบบ ตั้งอุณหภูมิอบแห้งไว้ที่ ๑๓๐ องศาเซลเซียส เมื่อเครื่องอบแห้งทำงานเข้าสู่ภาวะคงตัว จึงเริ่มปล่อยข้าวเปลือกเข้าไปในห้องอบแห้ง ปริมาณของไอน้ำร้อนยวดยิ่งให้กระจายทั่วห้องอบแห้ง ปรับระดับความสูงของแผ่นกัน (weir) ประมาณ ๘ เซนติเมตร วัดความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

๒. ปล่อยให้เครื่องอบแห้งทำงานในภาวะคงตัว วัดอัตราการป้อนข้าวเปลือกทุก ๆ ๑๕ นาที และเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกประมาณ ๕๐๐ กรัม ใส่ถุงพลาสติกร้อนมัดปากถุงให้สนิท ก่อนเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งทุก ๆ ๑๐ นาที และจะทำงานต่อเนื่องประมาณ ๒-๓ ชั่วโมง

๓. นำตัวอย่างของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้ว ไปหาความชื้นด้วยตู้อบไฟฟ้า

๔. นำตัวอย่างข้าวเปลือกที่เหลือไปลดความชื้นให้เหลือประมาณร้อยละ ๑๔ มาตรฐานเปียก แล้วจึงนำไปทดสอบคุณภาพ

๕. ปรับตั้งอุณหภูมิอบแห้งของไอน้ำร้อนยวดยิ่งไว้ที่ ๑๓๐, ๑๕๐ และ ๑๗๐ องศาเซลเซียส และดำเนิน

การตามข้อที่ ๒-๕ ตามลำดับ

๒.๒ ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลอง

ข้าวเปลือกที่นำมาใช้ในการอบแห้งแบ่งออกเป็น ๒ ส่วน คือ

๑. ข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณบุรี ๑ แขน้ที่อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ๘๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ ๓ ชั่วโมง แล้วรินน้ำที่แช่ข้าวเปลือกออก และเก็บข้าวเปลือกไว้ในที่อับอากาศเป็นเวลา ๑ ชั่วโมง ก่อนนำข้าวเปลือกไปอบแห้ง

๒. ข้าวเปลือกที่แช่จากโรงสีข้าวหนึ่งที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ พันธุ์ชัยนาท ๑ โดยแช่น้ำอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ ๗๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ ๗-๘ ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ในที่อับอากาศประมาณ ๒ ชั่วโมง ก่อนนำข้าวเปลือกไปอบแห้ง

๒.๓ หาความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก

การหาความชื้นของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้ง ใช้ตู้อบไฟฟ้า (hot air oven) ด้วยวิธีการของ American Association of Cereal Chemists (AACC)^๕ โดยอบแห้งข้าวเปลือกตัวอย่างที่อุณหภูมิ ๑๐๓ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๗๒ ชั่วโมง เครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับหาความชื้นเป็นแบบดิจิทัลมีความละเอียด ± 0.01 กรัม ชั่งน้ำหนักสูงสุด ๕๐๐ กรัม

๒.๔ คุณภาพการสี

นำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งตามเงื่อนไขต่าง ๆ อบแห้งด้วยอากาศแวดล้อมเพื่อให้ความชื้นเหลือ

ประมาณร้อยละ ๑๔ มาตรฐานเปียก แล้วจึงนำไปทดสอบคุณภาพการสี โดยใช้เครื่องกะเทาะเปลือกแบบลูกยางยี่ห้อ Satake และขัดขาวด้วยเครื่อง McGill Miller ข้าวที่ผ่านการขัดขาวแล้วนำไปคัดแยกข้าวหักด้วยตะแกรงกลม และวัดความขาวด้วยเครื่องวัดความขาวยี่ห้อ Kett model C-300 เครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับหาคุณภาพการสีเป็นแบบดิจิทัล มีความละเอียด ± 0.1 กรัม ชั่งน้ำหนักสูงสุดได้ ๕๐๐ กรัม

๒.๕ วิธีการหาร้อยละข้าวท้องไข่ (white belly)

นำต้นข้าวที่ได้จากการทดสอบคุณภาพการสี จำนวน ๑๐๐ เมล็ด มาแยกข้าวที่เป็น white belly คือเมล็ดข้าวที่มีพื้นที่ขาวขุ่น ทึบแสงเกินร้อยละ ๕๐ ของพื้นที่ทั้งเมล็ดออกจากกลุ่ม โดยใช้แสงไฟส่องจากด้านล่างของเมล็ด ทำซ้ำกันจำนวน ๓ ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยทางสถิติ

๒.๖ ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค (micro-structure)

การหาโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวสารที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง หาได้โดยนำไปส่องด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopes) รุ่น JSM-5600 LV/JSM-5600 Japan ที่มีกำลังขยาย ๑,๐๐๐ เท่า

๒.๗ ความหนืดของแป้ง (viscosity)

ความหนืดของแป้งหาได้จากการวัดสมบัติทาง pasting ของข้าวหนึ่งโดยใช้เครื่อง Rapid Visco



Analyzer model-4 (Newport Scientific Pty Ltd., Warier wood, Australia) ดำเนินตามวิธีการของ AACCC (1995) Method 61-02^c โดยการนำตัวอย่างแป้งข้าวที่ผ่านการบดละเอียดด้วยเครื่อง Ultra centrifugal mill ตะแกรงขนาด ๐.๒๕ มิลลิเมตร ใช้แป้งในการทดสอบจำนวน 3 ± 0.0001 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 25 ± 0.1 มิลลิลิตร ก่อนนำไปเข้าทดสอบใช้ใบพายคนแป้งกับน้ำให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำตัวอย่างที่เตรียมได้เข้าเครื่อง RVA ความเร็วรอบของใบกวน ๑๐ วินาทีแรกเท่ากับ ๙๖๐ รอบต่อนาที หลังจากนั้นลดความเร็วรอบเท่ากับ ๑๖๐ รอบต่อนาที จนถึงสิ้นสุดการทดสอบ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องทดสอบจะเริ่มจาก ๕๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๑ นาที ต่อจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มเป็น ๙๕ องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา ๑๒ องศาเซลเซียสต่อนาที และคงไว้ที่อุณหภูมิ ๙๕ องศาเซลเซียสเป็นเวลา ๒.๕ นาที จากนั้นทำให้เย็นลงกลับมาที่อุณหภูมิ ๕๐ องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการทำให้เย็น ๑๒ องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วรักษาอุณหภูมิไว้ที่ ๕๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๒ นาที การทดสอบแต่ละตัวอย่างจะใช้เวลา ๑๒ นาที ๓๐ วินาที โดยจะทดสอบแต่ละตัวอย่างซ้ำ ๒ ครั้ง สมบัติ pasting ต่าง ๆ ถูก plot เทียบกับเวลา ค่าที่ได้จากกราฟ pasting properties ได้แก่ ค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาคีโนเซชัน (pasting temperature) ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่าความคงทน

ต่อการกวน (trough) และค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

๒.๕ ปริมาณการดูดซับน้ำ (water absorption)

กระบวนการทดสอบค่าการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวใช้วิธีการของ Sabularse และคณะ^b โดยนำข้าวสาร ๑๐ กรัม ใส่ในน้ำ 20 ± 0.01 มิลลิลิตร ในหลอดทดลองแล้วต้มใน water bath ที่อุณหภูมิ ๙๕ องศาเซลเซียส เป็นเวลาเท่ากับเวลาของ cooking time หลังจากนั้นคำนวณปริมาณของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล มีค่าความละเอียด ± 0.001 กรัม

๒.๖ การหาค่าความแข็ง (hardness)

วัดค่าความแข็งโดยเครื่องมือที่เรียกว่า texture analyzer ซึ่งในการวัดค่าความแข็งนั้นต้องใช้ข้าวที่ผ่านการหุงสุกแล้ว และข้าวแต่ละชนิดจะใช้ปริมาณในการหุงที่แตกต่างกัน วิธีการหุงข้าวในงานวิจัยนี้ใช้ของ Banjong^d

๓. ผลการทดลองและวิจารณ์ (results and discussion)

การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องดันแบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไธซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น ๒ ส่วน คือ ทดลองที่เงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้ง และทดลองร่วมกับโรงสีข้าวหนึ่งที่ผลิตในเชิงพาณิชย์เพื่อเปรียบเทียบกับระบบการผลิตข้าวหนึ่ง

แบบเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยตรวจสอบคุณภาพข้าวหลังการอบแห้งในรูปของร้อยละต้นข้าว ความขาว ร้อยละข้าวท้องไข ความหนืดของแป้ง และโครงสร้างระดับจุลภาค ผลการทดลองมีรายละเอียด ดังนี้

๓.๑ หลักการทำงานและลักษณะการเกิดฟลูอิดไธซ์

ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องดันแบบฟลูอิดไธซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ก่อนเริ่มอบแห้งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ต้องอุ่นอุปกรณ์ในระบบด้วยอากาศร้อนเพื่อให้อุณหภูมิของอุปกรณ์สูงกว่าอุณหภูมิที่เกิดการควบแน่นของไอน้ำ (มากกว่า ๑๐๐ องศาเซลเซียส) เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำเมื่อถูกปล่อยเข้ามาในระบบอบแห้ง ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องอบแห้ง แล้วจึงเปิดวาล์วเพื่อปล่อยไอน้ำจากเครื่องกำเนิดไอน้ำเข้ามาแทนที่อากาศร้อนที่อยู่ภายในระบบอบแห้ง โดยที่ไอน้ำอิมพัลส์จะไหลผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อน (superheater) กลายเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ไหลผ่านพัดลม (blower) ห้องอบแห้ง (drying chamber) เครื่องแยกฝุ่น (cyclone) ส่วนอากาศจะถูกระบายออกทางช่องระบายอากาศทิ้งเพื่อระบบจะถูกแทนที่ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งทั้งหมด โดยสังเกตได้จากควันที่ระบายออกจากท่อระบายอากาศและกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะลดลง จะปิดช่องระบายอากาศ เพื่อให้ภายในระบบมีเฉพาะไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพียงอย่างเดียว เมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งใน



ระบบเท่ากับอุณหภูมิอบแห้งที่ตั้งไว้ตามเงื่อนไขการอบแห้ง ข้าวเปลือกจะถูกปล่อยจากถังพักเข้ามาในห้องอบแห้ง ในช่วงแรกของการอบแห้งเกิดการควบแน่นของไอน้ำขึ้นในเบตข้าวเปลือก เบตข้าวเปลือกในช่วงนี้จะมีน้ำ และเริ่มเกิด channeling ตามมาเมื่อไอน้ำที่ควบแน่นระเหยกลายเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งหมดแล้ว เมล็ดข้าวเปลือกในเบตจะเริ่มเปลี่ยนเป็น bubbling bed และจะเริ่มลอยตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเบตในเวลาต่อมา การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ในงานวิจัยนี้ควบคุมให้เมล็ดข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในห้องอบแห้ง (residence time) ประมาณ ๔-๕ นาที เพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ ๑๘ มาตรฐานแห้ง ข้าวเปลือกที่ความชื้นนี้เมื่อนำไปทดสอบการสีจะได้ร้อยละต้นข้าวสูง^๖ ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้งสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมอัตราการป้อนข้าวเปลือกเข้าสู่เครื่องอบแห้ง ในการทดลองแต่ละครั้งจะใช้เวลาทั้งหมด ๒-๓ ชั่วโมง

๓.๒ การเปลี่ยนแปลงความชื้นและคุณภาพทางด้านกายภาพของข้าวที่อบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบตด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณบุรี ๑ ที่เพิ่มความชื้นโดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิเริ่มต้น ๘๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๓ ชั่วโมง (ตารางที่ ๑) ข้าวเปลือกหลังการแช่มีความชื้นร้อยละ ๒๔.๗ ± ๐.๖ มาตรฐาน

เปียก เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ ๑๒๘, ๑๔๗ และ ๑๖๔ องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา ๔.๕-๕.๘ นาที พบว่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกจะลดลงตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความชื้นร้อยละ ๑๘.๘ ± ๐.๖, ๑๗.๕ ± ๐.๗ และ ๑๕ ± ๐.๖ มาตรฐานเปียก ตามลำดับ เมล็ดข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะได้ร้อยละต้นข้าวสูงกว่าเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกก่อนอบแห้ง (ร้อยละ ๕๓.๗) เพราะที่แบ่งภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกิดเจลลาทีโนเซชันได้อย่างเหมาะสม^๗ เมื่อนำไปสี จึงทำให้ได้ร้อยละต้นข้าวที่สูง ที่อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย ๑๒๘ และ ๑๔๗ องศาเซลเซียส ร้อยละต้นข้าวมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก (ร้อยละ ๖๕.๕ ± ๑.๐ และ ๖๖.๘ ± ๐.๖ ตามลำดับ) เมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิ ๑๖๔ องศาเซลเซียส ร้อยละต้นข้าวจะลดลง (ร้อยละ ๕๕ ± ๒.๕) เนื่องจากความชื้นข้าวเปลือกหลังการอบแห้งต่ำมาก จึงทำให้เมล็ดข้าวเปลือกเกิดความแตกต่างของความชื้นระหว่างภายนอกกับภายในเมล็ดข้าวเปลือก ทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Taechapiroj และคณะ^๘ ที่พบว่าถ้าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำกว่า ๑๕.๓ มาตรฐานเปียก จะทำให้ร้อยละต้นข้าวลดลง

ความขาวของข้าวสารที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะลดลงเมื่อ

เทียบกับข้าวอ้างอิง (๔๒.๒ ± ๐.๖ จุด) โดยมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนตามอุณหภูมิของการอบแห้ง ๑๒๘, ๑๔๗ และ ๑๖๔ องศาเซลเซียส คือ ๓๖.๑ ± ๐.๓, ๓๓.๘ ± ๐.๗ และ ๒๙.๘ ± ๐.๘ ตามลำดับ ทั้งนี้ เพราะช่วงแรกของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่บริเวณผิว ทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มขึ้นมา อาจจะมีผลทำให้สีของเปลือกข้าวและสีของรำบางส่วนแพร่เข้าสู่ภายในเนื้อเมล็ดข้าวเปลือก จึงมีผลทำให้ความขาวของข้าวสารลดลง เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกที่สูงนี้จะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (browning reaction) แบบเมลลาร์ด ซึ่งมีผลทำให้ข้าวสารที่ได้จากข้าวเปลือกที่อบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีสีเข้มกว่าข้าวสารที่ได้จากข้าวเปลือกที่อบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า

ร้อยละข้าวท้องไข้ของข้าวเปลือกก่อนการอบแห้งเท่ากับร้อยละ ๕.๔ ± ๐.๖ เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ร้อยละข้าวท้องไข้จะลดลงทุก ๆ เงื่อนไขการทดลอง (ร้อยละ ๑.๗ ± ๐.๖, ๑.๘ ± ๐.๖ และ ๑.๔ ± ๐.๖) ซึ่งอุณหภูมิอบแห้งของไอน้ำร้อนยวดยิ่งไม่มีอิทธิพลต่อการลดลงของร้อยละข้าวท้องไข้ เมื่อนำข้าวที่หุงสุกแล้วไปทดสอบความแข็ง (hardness) พบว่าข้าวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง โดยข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิเฉลี่ย ๑๒๘ และ ๑๔๗ องศา



เซลเซียส มีความแข็งแรงไม่แตกต่างกัน (44.2 ± 0.7 N และ 44.2 ± 0.7 N) ส่วนข้าวเปลือกที่อบแห้งที่อุณหภูมิเฉลี่ย 16.4 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (44.9 ± 0.2 N) ขณะที่การดูดซับน้ำ (water absorption) ของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะลดลงเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกอ้างอิง (3.3 ± 0.03) จากการทดลองนี้พบว่าอุณหภูมิอบแห้งของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สูงขึ้นไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับน้ำ (2.4 ± 0.03 , 2.4 ± 0.1 และ 2.3 ± 0.1)

ผลการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่จากโรงสีข้าวหนึ่งที่ผลิตเชิงพาณิชย์ แสดงในตารางที่ 1 และ 2 โดยข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่มีความชื้นร้อยละ 30.3 ± 0.4 มาตรฐานเปียก เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 16.4 องศาเซลเซียส เป็นเวลาในการอบแห้ง 4.7 นาที ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 22.4 ± 0.4 มาตรฐานเปียก ถ้าอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ 14.4 องศาเซลเซียส เป็นเวลาในการอบแห้ง 4.4 นาที ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 18.7 ± 0.3 มาตรฐานเปียก และที่อุณหภูมิอบแห้ง 16.0 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการอบแห้ง 4.1 นาที ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 17.9 ± 0.3 มาตรฐานเปียก เมื่อนำข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ไปผ่านกระบวนการสี พบว่าข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีร้อยละต้นข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวเปลือก

อ้างอิง หรือข้าวเปลือกที่ไม่ผ่านการอบแห้ง (ร้อยละ 56.6 ± 0.1) โดยข้าวเปลือกที่อบแห้งที่อุณหภูมิเฉลี่ย 16.4 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละต้นข้าว (ร้อยละ 63.4 ± 0.6) ต่ำกว่าข้าวเปลือกที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 14.4 และ 16.0 องศาเซลเซียส (ร้อยละ 66.4 ± 0.6 และ 67.4 ± 0.6) ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะว่าการเกิดเจลาทีนซ์ของแป้งภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิต่ำเฉลี่ย 16.4 องศาเซลเซียส ยังไม่สมบูรณ์พอ

ความขาวของข้าวสารที่ได้จากข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่จากโรงสีข้าวหนึ่งมีค่าลดลง เมื่ออบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง (34 ± 0.2 จุด) ข้าวเปลือกที่อบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ 14.4 และ 16.0 องศาเซลเซียส มีความขาวไม่แตกต่างกัน (29.4 ± 0.5 และ 28 ± 0.6 จุด) เพราะข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีความชื้นสุดท้ายไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งอาจมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบเมลลาร์ดใกล้เคียงกัน แต่ความขาวข้าวสารที่ได้จากข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ 16.4 องศาเซลเซียส (32.2 ± 0.4 จุด) มีค่าสูงที่สุดเพราะว่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกต่ำ ดังนั้น การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลจึงน้อยกว่า

ข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่จากโรงสีข้าวหนึ่งที่มีข้าวท้องไขเริ่มต้นร้อยละ 4.7 ± 0.6 เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแล้วไม่ปรากฏข้าวท้องไขเหลืออยู่เลย แสดงว่าแป้งภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วย

ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกิดเจลาทีนซ์ได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากระยะเวลาการแช่ข้าวเปลือกที่นานกว่าทำให้น้ำสามารถแพร่เข้าสู่ภายในเมล็ดข้าวเปลือกได้มากกว่ากรณีที่แช่ 3 ชั่วโมง ทำให้การเกิดเจลาทีนซ์ของแป้ง ซึ่งเกิดได้ดีในช่วงอุณหภูมิและความชื้นสูง มีสภาวะที่เหมาะสมมากกว่า ความแข็งแรงของข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่จากโรงสีข้าวหนึ่งที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง และความแข็งแรงของข้าวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิต่ำที่สูงขึ้นซึ่งตรงข้ามกับค่าการดูดซับน้ำของข้าวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะลดลงและลดลงตามอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น

3.3 สมบัติความหนืดของแป้ง (pasting properties)

เมื่อนำข้าวเปลือกหลังการแช่ (ข้าวอ้างอิง) และข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องต้นแบบฟลูอิดิซเบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ไปทดสอบสมบัติความหนืดของแป้ง ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 พบว่า ข้าวที่ผ่านการแช่ 3 ชั่วโมง และผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ให้ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ต่ำกว่าข้าวอ้างอิง และมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นและเมื่อเทียบข้าวหนึ่งที่อบแห้งด้วยเครื่องต้นแบบฟลูอิดิซเบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับข้าวหนึ่งที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ (parboiled rice) พบว่า ข้าวหนึ่งที่ผลิตในเชิงพาณิชย์



มีค่า peak viscosity สูงกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องต้นแบบ ทุกเงื่อนไขการอบแห้ง แสดงว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องต้นแบบมีการเกิดเจลลิตินซ์มากกว่าข้าวที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ น้ำฝน ศีตะจิตต์ และอรอนงค์ นัยวิกุล^๕ โดยการเกิดเจลลิตินซ์ในเชิงพาณิชย์ได้จากค่าของความหนืดสูงสุด (peak viscosity) กล่าวคือ ข้าวอ้างอิงมีค่า peak viscosity สูง เพราะว่ามีเม็ดแป้งมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ปริมาณมากกว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวมากขึ้น เป็นผลทำให้แป้งมีค่าความหนืดสูง ส่วนข้าวผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเมื่อได้รับความร้อนเม็ดแป้งที่ถูกน้ำจะพองตัวและถูกทำให้สุก และทำให้โปรตีนแตกตัวและแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดแป้ง ซึ่งมีผลทำให้ข้าวมีการเกาะตัวกันแน่นและมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อนำไปวัดค่าความหนืด จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของเม็ดแป้งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดซับน้ำลดลงในตารางที่ ๑ และ ๒ นั้นแสดงว่าข้าวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้ผ่านการเกิดเจลลิตินซ์มาแล้ว ซึ่งทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้น้อยลงด้วย และค่า peak viscosity จะลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น สำหรับค่า final viscosity แสดงถึงสมบัติความแข็งแรงกระด้างของข้าวสุก กล่าวคือข้าวที่มีค่า final viscosity ต่ำจะมีความแข็งแรงกระด้างมากขึ้น จากผล

การทดลองพบว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงให้ค่า final viscosity ต่ำกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำและที่ไม่ผ่านการอบแห้ง ตามลำดับ ดังนั้น แสดงว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีความแข็งแรงกระด้างมากกว่าข้าวอ้างอิง และข้าวหนึ่งที่ผลิตในเชิงพาณิชย์

๓.๔ โครงสร้างระดับจุลภาค (micro-structure)

ลักษณะโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวที่ดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของข้าวอ้างอิงยังมีเม็ดแป้งเป็นส่วนใหญ่ จะสังเกตเห็นผลึกของเม็ดแป้งเหลืออยู่จำนวนมาก (รูปที่ ๕ ก) เมื่อข้าวเปลือกผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิเฉลี่ย ๑๒๘, ๑๔๗ และ ๑๖๔ องศาเซลเซียส (รูปที่ ๕ ข, ๕ ค และ ๕ ง) เม็ดแป้งจะเกิดการเจลลิตินซ์ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นเจล ผลึกที่เคยมองเห็นจากข้าวอ้างอิงจึงกลายเป็นพื้นผิวเรียบ ซึ่งผลของการเกิดเจลลิตินซ์เป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของร้อยละต้นข้าวและการลดลงของร้อยละข้าวท้องไข้ได้เมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของข้าวอ้างอิงที่ผ่านการแช่จากโรงสีข้าวหนึ่งที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ (รูปที่ ๕ ก) พบว่าโครงสร้างของข้าวเม็ดแป้งเหลือน้อย แสดงว่าเม็ดแป้งภายในเมล็ดข้าวเปลือกส่วนใหญ่ได้เกิดการเจลลิตินซ์จากการแช่ เมื่อนำข้าวเปลือกดังกล่าวไปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ๑๒๘, ๑๔๕ และ

๑๖๐ องศาเซลเซียส (รูปที่ ๕ ข, ๕ ค และ ๕ ง) จึงไม่ปรากฏโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งเหลืออยู่ ซึ่งสอดคล้องกับผลของร้อยละข้าวท้องไข้ที่ไม่พบเลย เมื่อนำข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่จากโรงสีข้าวหนึ่งที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ไปอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นแสดงว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่จากโรงสีข้าวหนึ่ง (ที่อุณหภูมิน้ำเฉลี่ย ๗๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๗-๘ ชั่วโมง) มีการเกิดเจลลิตินซ์มากกว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่ที่อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ๘๐ องศาเซลเซียส ระยะเวลา ๓ ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างข้าวหนึ่งที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องต้นแบบฟลูอิดไรส์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับข้าวหนึ่งที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ ๒ โรง (ดังรูปที่ ๖ ก และ ๖ ข) พบว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องต้นแบบนี้มีลักษณะคล้ายข้าวหนึ่งที่ผลิตในเชิงพาณิชย์

๓.๕ ระบบการผลิตข้าวหนึ่งที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

จากการพิจารณาระบบการผลิตข้าวหนึ่งที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในปัจจุบัน ขนาดกำลังผลิต ๒๐๐ ตันต่อวัน (ดูรูปที่ ๗ ประกอบ) ซึ่งมีขั้นตอนการทำงาน คือขั้นตอนการแช่ (soaking) นำข้าวเปลือกนามีพันธุ์พลาแยงาม ความชื้นร้อยละ ๑๗.๘ มาตรฐานเปียก แช่น้ำเริ่มต้นที่อุณหภูมิ ๗๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ ๗-๘ ชั่วโมง แล้วจึงระบายน้ำที่แช่ออก หลังจากนั้นปล่อยให้แห้ง (tempering) ประมาณ ๑ ชั่วโมง พบว่าความชื้น



ข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ ๓๒.๖ มาตรฐานเปียก ก่อนจะลำเลียงเข้าสู่ ขั้นตอนการนึ่ง (steaming) ซึ่งใช้ไอน้ำ อิ่มตัวเป็นตัวกลางในการให้ความร้อน (แบบต่อเนื่อง) เป็นเวลาประมาณ ๑๕ นาที ข้าวเปลือกที่ผ่านขั้นตอนการนึ่ง มามีบางส่วนเกิดการปริแตกเนื่องจากการพองและขยายตัวของเม็ดแป้งมากเกินไป ดังนั้น ก่อนการอบแห้งจึงต้อง เป่าด้วยลมธรรมชาติเพื่อหุบเปลือก ก่อน เพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นละอองหรือ ลมร้อนที่ไม่สะอาดเข้าไปสัมผัสกับ เนื้อข้าวสารโดยตรง หลังจากนั้นข้าว เปลือกจะเข้าสู่ขั้นตอนการอบแห้ง (drying) ด้วยเครื่องอบแห้งแบบ ฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้อากาศร้อนที่ อุณหภูมิ ๑๓๕ องศาเซลเซียส เพื่อ ลดความชื้นข้าวเปลือกลงเหลือร้อยละ ๒๘.๕ มาตรฐานเปียก ก่อนนำไปเก็บ ในที่อับอากาศและเป่าด้วยลมธรรมชาติ ให้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ ๒๔.๒ มาตรฐานเปียก แล้วจึงนำข้าวเปลือกไป อบแห้งต่อด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์-เบดตัวที่ ๒ ที่อุณหภูมิอบแห้ง ๑๑๘ องศาเซลเซียส เพื่อลดความชื้นลง เหลือร้อยละ ๒๑.๔ มาตรฐานเปียก หลังจากนั้นนำข้าวเปลือกไปเก็บในที่ อับอากาศและเป่าด้วยลมธรรมชาติอีก ครั้งหนึ่งให้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ ๑๘.๔ มาตรฐานเปียก แล้วจึงนำไปอบ แห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ LSU ที่ อุณหภูมิอบแห้ง ๑๒๐ องศาเซลเซียส ให้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ ๑๒.๔ มาตรฐานเปียก แล้วจึงนำไปเก็บไว้เพื่อ รอการสีต่อไป

จะเห็นได้ว่าการผลิตข้าว นึ่งมีหลายขั้นตอนและใช้เครื่องจักร จำนวนมาก ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการ ผลิตนาน ส่งผลต่อต้นทุนที่ใช้ในการ ผลิตข้าวหนึ่งสูงตามไปด้วย ขณะที่การ อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ ฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (แบบต่อเนื่อง) สามารถรวมการนึ่ง และอบแห้งข้าวเปลือกไว้ในขั้นตอน เดียวกันได้ โดยที่เครื่องอบแห้งแบบ ใหม่นี้สามารถลดความชื้นจากร้อยละ ๓๑-๓๒ มาตรฐานเปียก เหลือความชื้น ร้อยละ ๑๘-๑๙ มาตรฐานเปียก ขณะที่ คุณภาพข้าวสารอยู่ในเกณฑ์ดีมาก เมื่อเทียบกับข้าวหนึ่งที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ ดังนั้น การนำเครื่องต้นแบบนี้มาปรับ ใช้กับระบบการผลิตข้าวหนึ่งที่ผลิตใน เชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน จะสามารถลด ขั้นตอนการผลิตข้าวหนึ่งและเครื่องจักร ลง (ในกรอบเส้นประในรูปที่ ๗) คือ ขั้นตอนการนึ่ง การหุบเปลือก การอบ แห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไคซ์เบด การเก็บ ในที่อับอากาศและการเป่าด้วยอากาศ แหวดล้อม และลดเครื่องอบแห้งแบบ ฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้อากาศร้อนได้ ๒ เครื่อง เตาเผาแลกเปลี่ยนไซโคลน ๑ เครื่อง จะเห็นได้ว่าสามารถลดต้นทุน ในการผลิตข้าวหนึ่งลงได้มาก รวมทั้ง สามารถลดเวลาในการผลิตข้าวหนึ่งลง ได้อย่างน้อย ๓-๔ ชั่วโมง ระบบการ ผลิตข้าวหนึ่งแบบใหม่ใช้เครื่องอบแห้ง ฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (รูปที่ ๘) มีขั้นตอนการผลิตข้าวหนึ่ง แบบใหม่ คือ การแช่ การอบแห้งแบบ ฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

การเก็บในที่อับอากาศและเป่าด้วยลม ธรรมชาติ และการอบแห้งด้วยเครื่อง อบแห้งแบบ LSU ซึ่งข้าวเปลือกที่ผ่าน การอบแห้งในขั้นตอนสุดท้ายนี้จะมี ความชื้นเหมาะสมแก่การแปรรูปและ เก็บรักษาพอดี

๕. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก โดยใช้เครื่องอบแห้งต้นแบบฟลูอิดไคซ์เบด ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ขนาดกำลังผลิต ๑๐๐ กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยใช้ข้าว เปลือกที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิเริ่มต้น ๘๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๓ ชั่วโมง และข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่ในโรงสี ข้าวหนึ่ง ซึ่งใช้อุณหภูมิในการแช่ต่ำกว่า (ประมาณ ๗๐ องศาเซลเซียส) แต่ใช้ เวลาในการแช่นาน (ประมาณ ๗-๘ ชั่วโมง) พบว่า โครงสร้างของเม็ดแป้ง ภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่ น้ำอุ่น ๓ ชั่วโมง เกิดการเจลาไทไนซ์ได้ น้อยกว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่จาก โรงสีข้าวหนึ่ง และเมื่อนำไปอบแห้งด้วย ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิเฉลี่ย ๑๒๘-๑๖๔ องศาเซลเซียส และความสูงของ เบดข้าวเปลือก ๘ เซนติเมตร ความเร็ว ของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ๓.๘ เมตรต่อ วินาที เวลาในการอบแห้ง (residence time) ๔.๑-๔.๙ นาที พบว่าความชื้น ของข้าวเปลือกจะลดลงตามอุณหภูมิ อบแห้งที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับข้าว อ่างอิงร้อยละต้นข้าวจะเพิ่มขึ้น และจะ มีร้อยละต้นข้าวลดลงเมื่อความชื้น สุดท้ายต่ำกว่าร้อยละ ๑๗ มาตรฐาน เปียก ความขาวของข้าวสารจะลดลง



ตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติความหนืดของแป้ง มีค่า peak viscosity และค่า final viscosity ลดต่ำลง เมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง และมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น เพราะว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกิดการเจลาทิไนซ์มาแล้ว การอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจากร้อยละ ๓๑.๓ มาตรฐานเปียก เหลือร้อยละ ๑๗.๕ มาตรฐานเปียก ในขั้นตอนการอบแห้งนั้นนอกจากจะลดความชื้นข้าวเปลือกลงได้แล้ว ยังทำให้แป้งในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดการเจลาทิไนซ์ได้ด้วย ดังนั้น จึงสามารถรวมการนึ่งและอบแห้งให้อยู่ในขั้นตอนเดียวกันได้ การรวมขั้นตอนดังกล่าวนี้มีผลทำให้ลดต้นทุนและระยะเวลาในการผลิตข้าวหนึ่งลงได้มาก เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการผลิตข้าวหนึ่งในเชิงพาณิชย์จะสามารถลดขั้นตอนในระบบการผลิตข้าวหนึ่งลงได้หลายขั้นตอน คือ การนึ่ง การหุงเปลือก เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้อากาศร้อน ๒ เครื่อง การเก็บในที่อับอากาศและการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม และเตาเผาแกลบแบบไซโคลน คาดว่าระบบใหม่ที่ใช้เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่นำเสนอจะสามารถลดต้นทุนในการผลิตข้าวหนึ่งลงได้มาก และลดเวลาในการผลิตข้าวหนึ่งลงได้อย่างต่ำ ๓-๔ ชั่วโมง

๕. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลคลองหกให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบความแข็ง (hardness) ของข้าว ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานีให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบความขาว บริษัทไรซ์ เอ็นจิเนียริง ซัพพลาย จำกัด ให้ความช่วยเหลือเรื่องค่าใช้จ่ายและอำนวยความสะดวกในการสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งต้นแบบ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร และศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวัดความหนืด (RVA) กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โรงสีข้าวเตี้ยใจสูง โรงสีข้าวนครหลวง และโรงสีข้าวทองอนันต์ ให้ความช่วยเหลือในด้านข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่แล้ว และให้ความรู้และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ยิ่งเกี่ยวกับการผลิตข้าวหนึ่งตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการติดตั้งเครื่องอบแห้งต้นแบบอบแห้งข้าวหนึ่งแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

1. Tawecrattanapanish A, Soponronnarit S, Weichacama S, Kongseri N, Wongpiyachon S. Effect of Drying on Rice Yield Using Fluidization Technique. *Drying Technology*, 1999; 17 (1&2) : 345-353.

2. Taechapairoj C, Dhuchakallaya I, Soponronnarit S, Weichacama S, Prachayawarakom S. Superheated Steam Fluidized Bed Paddy Drying. *Journal of Food Engineering*, 2003; 58 : 67-73.
3. Rordprapat W, Soponronnarit S, Nathakarakakule A, Tia W. Comparative Study of Fluidized Bed Paddy Drying Using Hot Air and Superheated Steam. *Proceeding of the International Conference on Innovations in Food Processing Technology and Engineering*, AIT, Bangkok Thailand, 2002: 453-466.
4. AACC. *Approved method of the American Association of Cereal Chemist 9thed.*, 1995; St. Paul, MN : AACC.
5. Rordprapat W, Nathakarakakule A, Tia W, Soponronnarit S. Effect of Soaking Time and Drying Media on Qualities of Paddy Dried by Fluidization Technique. *Proceeding of the 3rd Asia-Pacific Drying Conference*, AIT, Bangkok Thailand, 2003: 453-466.
6. Sabularse V C, Luizzo JA, Rao RM, Groder RM. Cooking Quality Brown Rice as Influenced by Gamma Irradiation, Variety and Storage. *Journal Food Science*, 1991.
7. Banjong K. A Back Extrusion Tester for Evaluation Cooked Rice Texture. *Asian Institute of Technology*. Thesis. No. AE 86-20. Bangkok Thailand, 1986.
8. Taechapairoj C, Soponronnarit S, Prachayawarakom S. Characteristics of Parboiled Rice in Superheated Steam Fluidized Bed Dryer. *Proceeding of the International Conference on Innovations in Food Processing Technology and Engineering*, AIT, Bangkok Thailand, 2002: 453-466.
9. น้ำฝน หิตะจิตต์ และอรอนงค์ นัยวิกุล. กระบวนการผลิตข้าวหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการ. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ ๕๑ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน. ๒๕๔๖: ๖๖-๘๔.



ตารางที่ ๑ คุณภาพข้าวเปลือกที่แช่ด้วยอุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ๘๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๓ ชั่วโมง และข้าวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

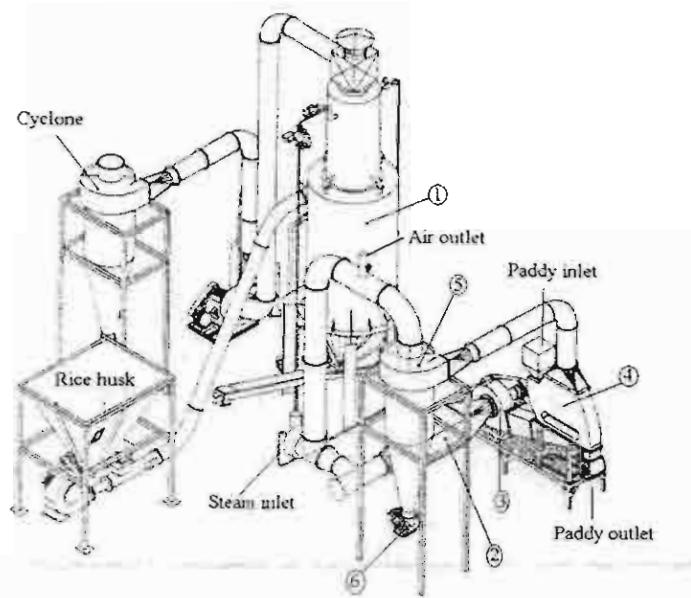
Drying Conditions	Moisture content (% w.b.)	Head rice yield (%)	Whiteness	White belly (%)	Hardness (N)	Water absorption (g water/g rice)
After soaking	28.7 ± 0.6a	53.7 ± 1.6a	42.2 ± 0.6a	5.4 ± 1.3a	36.0 ± 0.9a	3.29 ± 0.03a
128 °C	18.8 ± 0.6b	65.9 ± 1.0b	36.1 ± 0.3b	1.7 ± 0.6b	48.2 ± 0.9b	2.43 ± 0.03b
147 °C	17.9 ± 0.7b	66.8 ± 0.6b	33.8 ± 0.7c	1.8 ± 0.6b	49.2 ± 1.7b	2.35 ± 0.10b
164 °C	15.0 ± 0.6c	59.0 ± 2.5c	29.8 ± 0.8d	1.4 ± 0.6b	58.9 ± 0.2c	2.34 ± 0.05b

Note : The same letter at the same column indicated no significant difference in value at $p < 0.05$

ตารางที่ ๒ คุณภาพข้าวเปลือกที่แช่จากโรงสีข้าวหนึ่งที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ และข้าวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

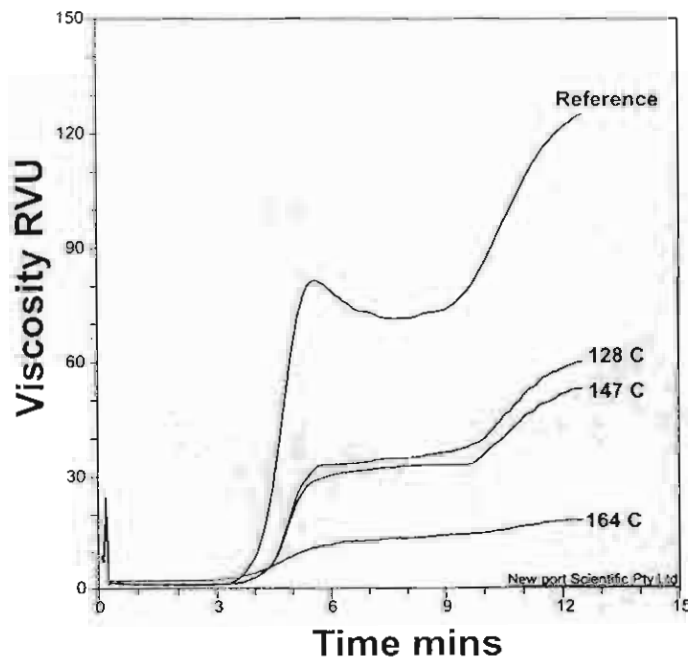
Drying Conditions	Moisture content (% w.b.)	Head rice yield (%)	Whiteness	White belly (%)	Hardness (N)	Water absorption (g water/g rice)
After soaking	31.3 ± 0.4a	56.6 ± 1.1a	39.0 ± 0.2a	5.7 ± 0.6a	37.9 ± 1.3a	3.51 ± 0.07a
128 °C	22.5 ± 0.4b	63.5 ± 0.6b	32.2 ± 0.8b	0b	48.6 ± 0.9b	2.82 ± 0.05b
144 °C	18.7 ± 0.3c	66.9 ± 0.6c	29.4 ± 0.5c	0b	51.9 ± 0.6c	2.19 ± 0.01c
160 °C	17.9 ± 0.3d	67.9 ± 0.6c	28.0 ± 0.6c	0b	55.0 ± 1.3d	1.99 ± 0.05d

Note : The same letter at the same column indicated no significant difference in value at $p < 0.05$

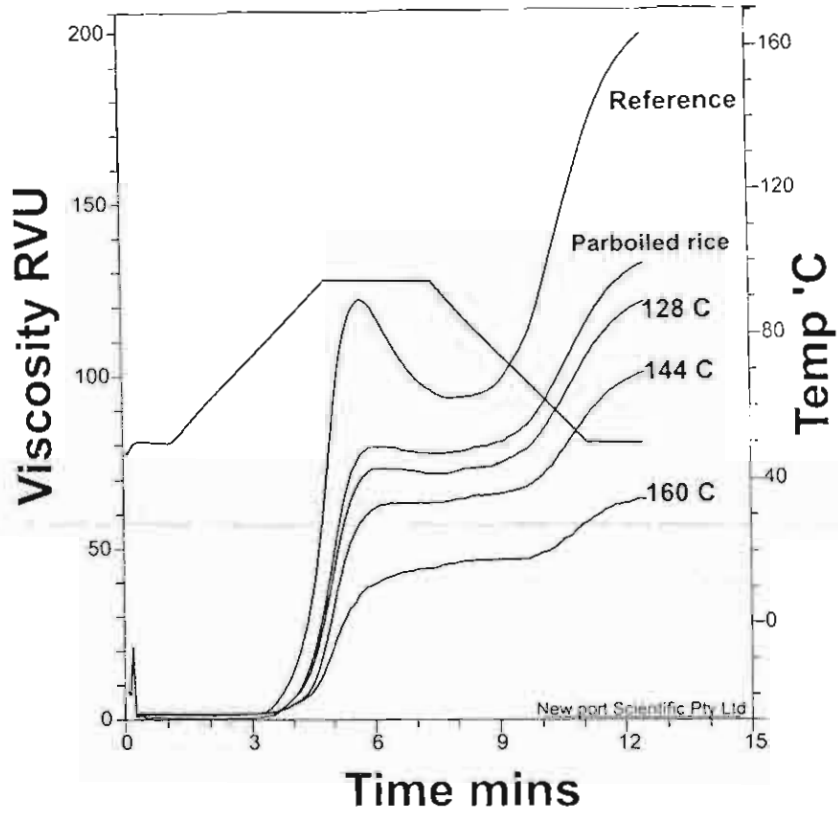


- ① Boiler ② Superheater ③ Blower ④ Drying chamber ⑤ Cyclone ⑥ Rotary valve

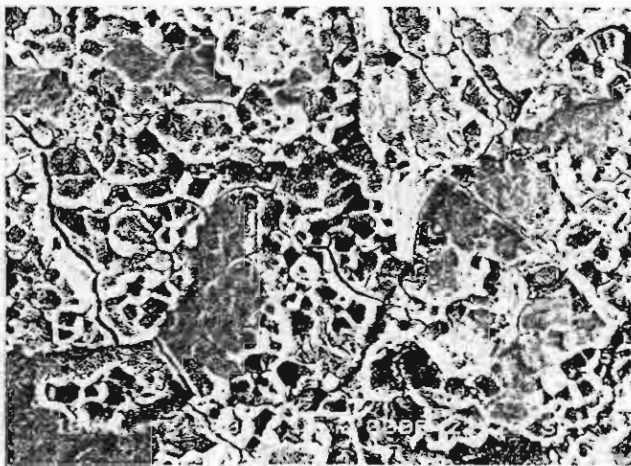
รูปที่ ๑ ส่วนประกอบของระบบอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชันโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง



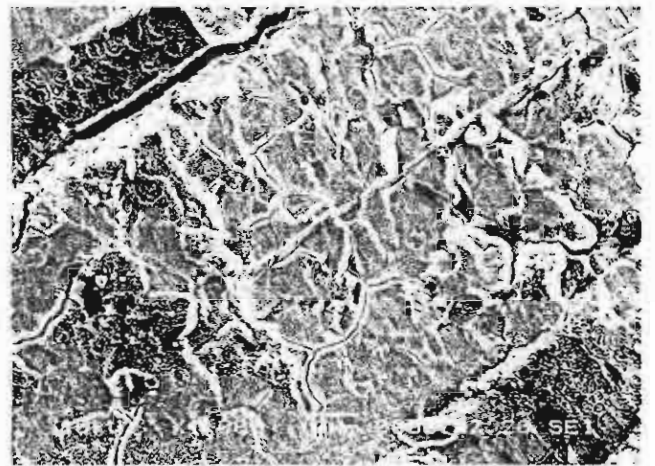
รูปที่ ๒ ความหนืดของแป้งข้าว แฉ่ที่อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ๘๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๓ ชั่วโมง และข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ



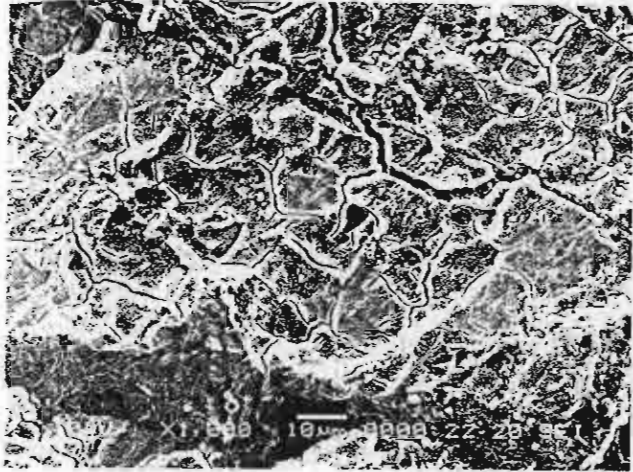
รูปที่ ๓ ความหนืดของแป้งข้าวที่แช่จากโรงสีข้าวถึงที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ และข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ



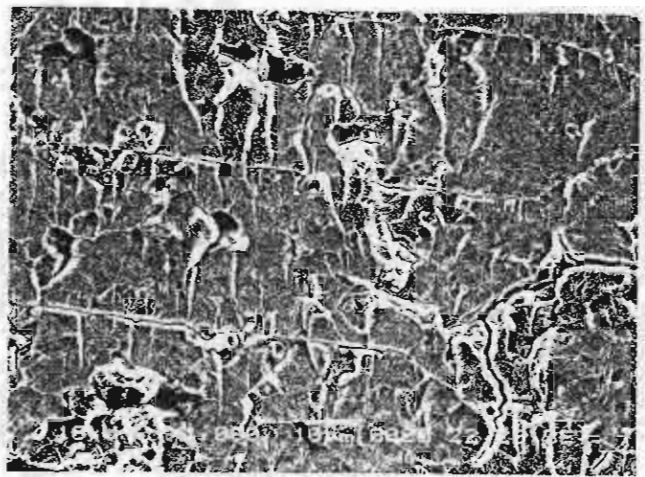
ก) ข้าวอ้างอิง (ก่อนการอบแห้ง)



ข) อุณหภูมิอบแห้ง ๑๒๘ องศาเซลเซียส

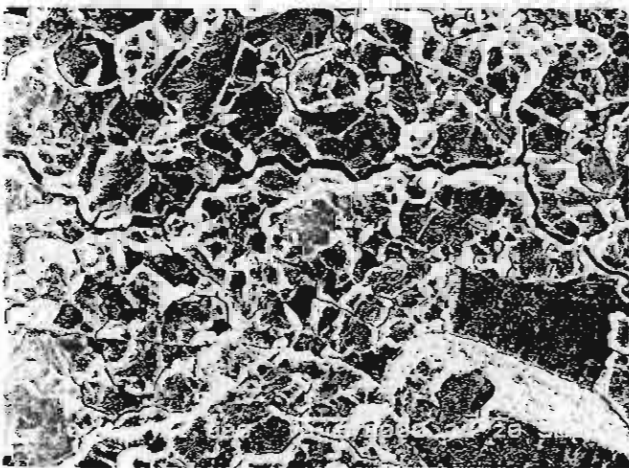


ค) อุณหภูมิอบแห้ง ๑๔๗ องศาเซลเซียส



ง) อุณหภูมิอบแห้ง ๑๖๕ องศาเซลเซียส

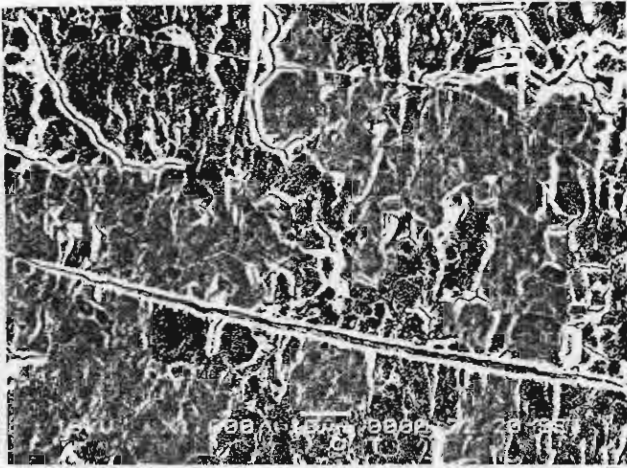
รูปที่ ๕ โครงสร้างของข้าวแฉ่งที่อุณหภูมิเริ่มตั้งแต่ ๘๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๓ ชั่วโมง และข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อน ยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ



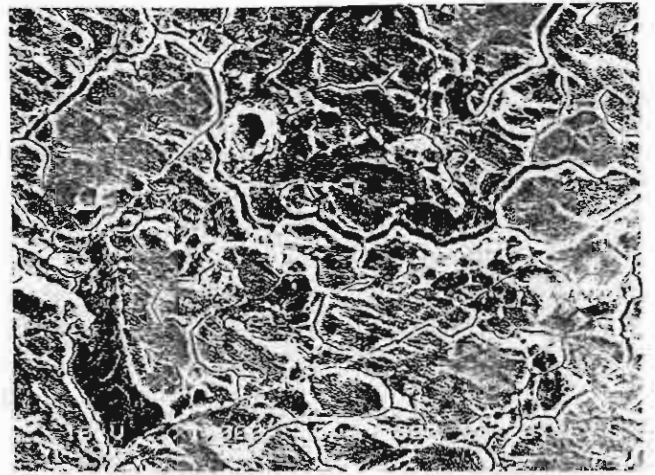
ก) ข้าวแฉ่งอิง (ก่อนการอบแห้ง)



ข) อุณหภูมิอบแห้ง ๑๒๘ องศาเซลเซียส

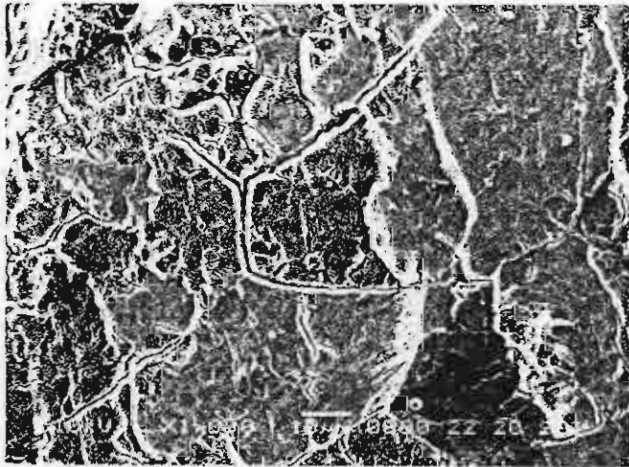


ค) อุณหภูมิอบแห้ง ๑๔๔ องศาเซลเซียส

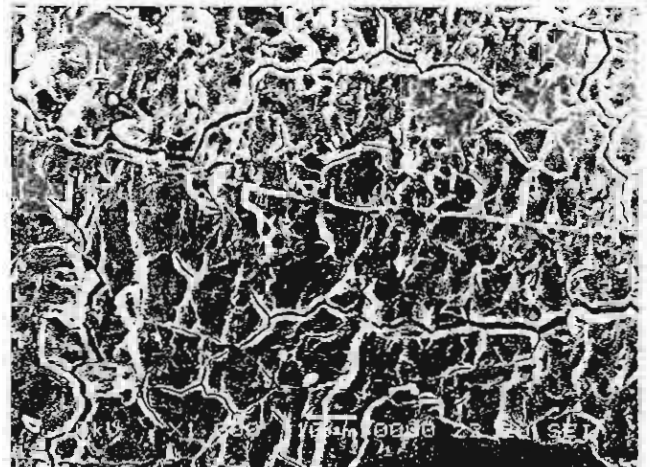


ง) อุณหภูมิอบแห้ง ๑๖๐ องศาเซลเซียส

รูปที่ ๕ โครงสร้างของข้าวที่แฉีกจากโรงสีข้าวหนึ่งทีผลิดในเชิงพาณิชย์ และข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนนวดคึ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

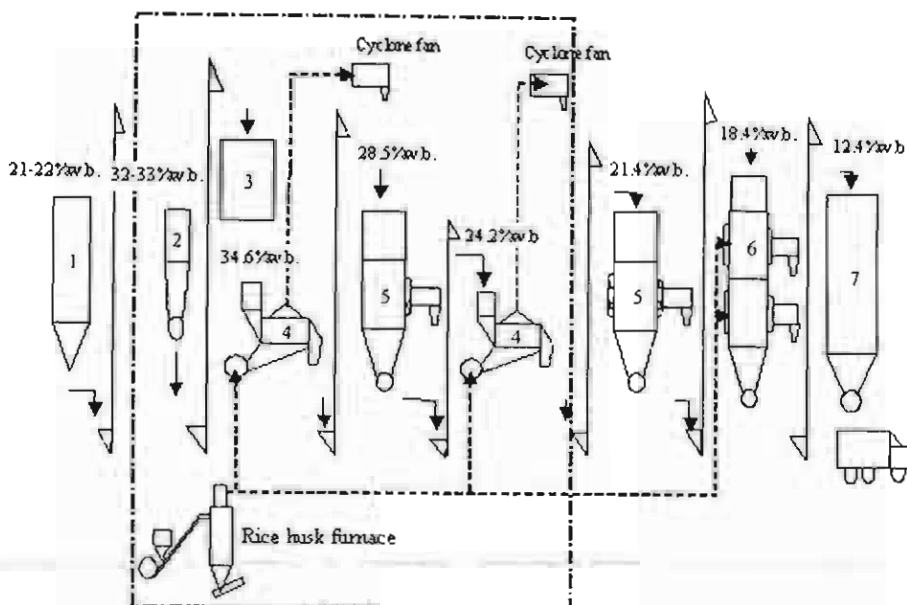


ก) ข้าวหนึ่งทีผลิดในเชิงพาณิชย์ (โรงที่ ๑)



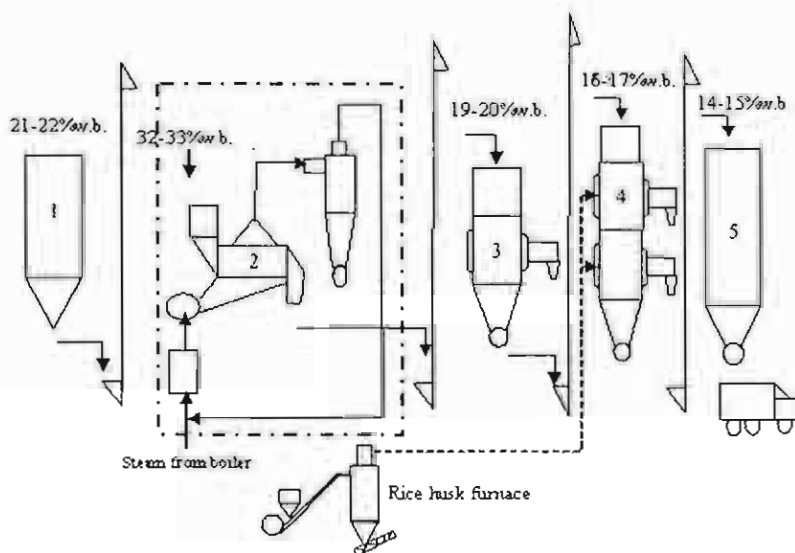
ข) ข้าวหนึ่งทีผลิดในเชิงพาณิชย์ (โรงที่ ๒)

รูปที่ ๖ โครงสร้างของข้าวหนึ่งทีผลิดในเชิงพาณิชย์ของโรงสีข้าวหนึ่ง ๒ โรง



- 1 Soaking tank 2 Steamer 3 Ambient air ventilation 4 Fluidized bed dryer
5 Tempering and air ventilation 6 LUS dryer 7 Storage bin

รูปที่ ๗ ระบบการผลิตข้าวเหนียวของโรงสีที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน



- 1 Soaking tank 2 Superheated steam fluidized bed dryer
3 Tempering and air ventilation 4 LUS dryer 5 Storage bin

รูปที่ ๘ ระบบการผลิตข้าวเหนียวแบบใหม่ที่ใช้เครื่องอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่นำเสนองาน



Abstract Development of a Superheated-steam-fluidized-bed Dryer for Parboiled Rice

Wathanyoo Rordprapat

Adisak Nathakaranakule

Warunee Tia

Somchart Soponrommarit

Fellow of the Academy of Science, The Royal Institute, Thailand

Due to possessing a large number of componential machines and long operating time, the present procedure for producing parboiled rice requires much investment and operating costs. This research is therefore aimed at developing a 100 kg/h prototype for fluidized bed paddy drying using superheated steam. The experiments were set up by pre-soaking paddy in hot water with the initial temperatures of 80 and 70°C for 3 and 4 hours to obtain the moisture contents of 28.7 and 31.7% w.b. respectively. The paddy was then dried at the temperatures in the range 128 - 164°C, with the bed height of 8 cm, the superficial velocity of 3.8 m/s, and the residence times of 4 - 5 minutes. After drying, the moisture contents were reduced to 17.9 - 22.8% w.b. and the finished rice was characterized as parboiled rice. When compared to the reference rice, the head rice yield was higher while rice whiteness was lower and decreased with increasing temperature. For pasting properties, peak and final viscosities were lower than those of the reference rice. With the above mentioned process, decreased moisture content and a gelatinized paddy starch simultaneously occurs. Consequently, steaming and drying processes can be merged into a single stage; resulting in the reduced investment cost and operating time when compared with the production system of the commercial parboiled rice.

Key words : soaking, parboiled rice, gelatinization, fluidization, physical properties, superheated steam



สถานภาพและแนวทางการวิจัย พลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย

วารุณี เตีย*

พิมพ์ แจ่มพลอย*

กังสดาล สกุลพงษ์มาลี*

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์*

ราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์

ราชบัณฑิตยสถาน

บทคัดย่อ

การพัฒนาและขยายการใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นแนวทางพัฒนาพลังงานที่ยั่งยืนสำหรับประเทศที่ต้องนำเข้าน้ำมันดังเช่นประเทศไทย ดังนั้น ในบทความนี้จะกล่าวถึง ศักยภาพ สถานภาพ และแนวทางการวิจัยด้านพลังงานหมุนเวียนของประเทศไทย ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังน้ำขนาดเล็ก พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานจากมหาสมุทร ยกเว้นมวลชีวภาพซึ่งได้นำเสนอในบทความที่ผ่านมาแล้ว ข้อจำกัดหลักของการใช้พลังงานหมุนเวียน คือ ความไม่แน่นอน ความไม่สม่ำเสมอของพลังงานหมุนเวียนที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ และระบบการเปลี่ยนรูปพลังงานมีประสิทธิภาพต่ำ ทำให้ผลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการส่วนใหญ่ไม่น่าสนใจเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ ดังนั้น จึงควรมุ่งงานวิจัยทางการเพิ่มประสิทธิภาพ และการใช้งานได้อย่างสม่ำเสมอของระบบที่ใช้พลังงานหมุนเวียน รวมทั้งการลดต้นทุน และงานวิจัยเชิงนโยบาย เช่น โครงสร้างการกำหนดราคาเชื้อเพลิงที่รวมภัยด้านสิ่งแวดล้อมด้วย

คำสำคัญ แนวทางการวิจัย, พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลม, พลังน้ำขนาดเล็ก, พลังงานความร้อนใต้พิภพ, พลังงานจากมหาสมุทร, ประเทศไทย

บทนำ

ปัจจุบันแนวโน้มของราคาน้ำมันดิบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ประเทศที่ต้องนำเข้าน้ำมันต้องประสบกับภาวะเศรษฐกิจอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ รัฐจึงมีนโยบายส่งเสริมให้มีการจัดหา และใช้พลังงานทดแทนอย่างมีประสิทธิภาพ การใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่

ภายในประเทศเพื่อมาทดแทนการนำเข้าพลังงานปิโตรเลียมจึงเป็นแนวทางการพัฒนาพลังงานที่สำคัญและยั่งยืน

นอกจากนี้ พิศุทธเกียรติวงศ์ซึ่งเริ่มมีผลบังคับใช้ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๕๔๘ ซึ่งให้เห็นว่าพลังงานหมุนเวียนจะเริ่มมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในอนาคต แม้ว่าประเทศไทยจะยังไม่มีพันธกรณี

ที่จะต้องลดปริมาณการปล่อยแก๊สเรือนกระจก แต่การใช้พลังงานหมุนเวียนน้อย และการใช้พลังงานฟอสซิลซึ่งส่วนใหญ่นำเข้า เพิ่มขึ้นมากอย่างไม่มีประสิทธิภาพ จะทำให้การปล่อยแก๊สเรือนกระจกต่อประชากรของไทยสูงกว่าค่าเฉลี่ยของโลกในปัจจุบัน (พ.ศ. ๒๕๓๓) คือ ๓.๙ ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อคน

* รองศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
* นักศึกษาปริญญาโท คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
* ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



ก่อน พ.ศ. ๒๕๕๓ ซึ่งจะทำให้เสี่ยงต่อการถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มประเทศที่มีพันธกรณี*

บทความที่แล้ว (วารุณี เตีย และคณะ ๒๕, ๓ กรกฎาคม-กันยายน ๒๕๔๗ : ๕๕๗-๕๖๗) ได้กล่าวถึงศักยภาพการใช้และแนวทางวิจัยพลังงานจากมวลชีวภาพ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูงไปแล้ว ดังนั้น เพื่อพิจารณาพลังงานหมุนเวียนให้ครบทุกแหล่ง บทความนี้จะกล่าวถึงแหล่งพลังงานหมุนเวียนอื่น ๆ ที่เหลือ ซึ่งได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังน้ำขนาดเล็ก พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานจากมหาสมุทร

วิธีดำเนินงานวิจัย

แหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กล่าวถึงในบทความนี้ ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังน้ำขนาดเล็ก พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานจาก

มหาสมุทร และพลังงานจากน้ำขึ้น-น้ำลง ยกเว้นพลังงานจากมวลชีวภาพ ซึ่งได้ยกนำเสนอเฉพาะเรื่องนี้ในบทความที่ผ่านมาแล้ว

งานวิจัยนี้ได้เก็บรวบรวมข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ ได้แก่ รายงาน และบทความวิจัยด้านพลังงานหมุนเวียนอื่น ๆ ยกเว้นพลังงานจากมวลชีวภาพ เพื่อนำมาศึกษาและเสนอแนวทางวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ก. ศึกษาศักยภาพของแหล่งพลังงานหมุนเวียนอื่น ๆ ในประเทศไทย

ข. ศึกษาสถานภาพการใช้พลังงานหมุนเวียนของประเทศไทย

ค. ศึกษาสถานภาพงานวิจัยที่ผ่านมา

ง. วิเคราะห์ข้อมูล ศักยภาพของแหล่งพลังงาน สถานภาพการใช้และงานวิจัยพลังงานที่ผ่านมา นำมาสรุปเสนอเป็นแนวทางงานวิจัยที่ควรดำเนินการต่อไป

ผลการศึกษาและวิจารณ์

๑. พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

๑.๑ ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์

พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยมีความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุด อยู่ในช่วงเดือนเมษายนและพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ช่วง ๒๐-๒๔ เมกะจูล/ตารางเมตร-วัน^๖ พื้นที่ที่ได้รับความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปี ได้แก่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลางบางส่วน ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศมีค่าเท่ากับ ๑๘.๕ เมกะจูล/ตารางเมตร-วัน ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เมื่อคิดจากพื้นที่ร้อยละ ๑ ของพื้นที่ทั้งหมด คิดเป็น ๕๕๔,๐๗๑ พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ^๗ ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่แต่ละแห่งของประเทศแสดงได้ดังตารางที่ ๑

ตารางที่ ๑ ความเข้มแสงและศักยภาพเชิงพลังงานแสงอาทิตย์ตามแหล่งภูมิศาสตร์^๖

แหล่งภูมิศาสตร์	ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปี (เมกะจูล/ตารางเมตร-วัน)	ศักยภาพเชิงพลังงาน (พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)
ทั่วประเทศ	๑๘.๕	๕๕๔,๐๗๐.๖
ภาคเหนือ	๑๘.๐	๑๒๐,๓๔๕.๒
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	๑๘.๗	๒๒๘,๐๘๓.๐
ภาคกลาง	๑๘.๗	๑๑๘,๘๑๔.๓
ภาคใต้	๑๘.๘	๘๔,๘๒๘.๑



๑.๒ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

ใน พ.ศ. ๒๕๕๖ ประเทศไทยมีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อนรวมทั้งสิ้น ๕,๗๙๙,๑๒๕ เมกะจูล และไฟฟ้า ๕,๙๑๘.๒ เมกะวัตต์ชั่วโมง

ดังรายละเอียดในตารางที่ ๒ ส่วนใหญ่ใช้ทางภาคเหนือ ในสาขาเศรษฐกิจบ้านอยู่อาศัยและธุรกิจการค้า

การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ด้านความร้อน

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นที่ยอมรับในเชิงพาณิชย์แล้ว มีใช้ในบ้านเรือน โรงแรม โรงพยาบาล มียอดจำหน่ายประมาณ ๕,๐๐๐-๑๐,๐๐๐ ตารางเมตรต่อปี รวมพื้นที่ติดตั้งตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นราบ

ตารางที่ ๒ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ตามแหล่งทางภูมิศาสตร์

แหล่งทางภูมิศาสตร์	รูปแบบพลังงานที่ใช้	
	ความร้อน (เมกะจูล)	ไฟฟ้า (เมกะวัตต์ชั่วโมง)
ทั่วประเทศ	๕,๗๙๙,๑๒๕.๒	๕,๙๑๘.๒
ภาคเหนือ	๔,๖๒๗,๖๓๒.๙	๓,๓๗๗.๗
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	-	๓๒๖.๑
ภาคกลาง	๑,๑๗๑,๔๙๒.๒	๑,๒๕๘.๔
ภาคใต้	-	๙๕๖

ประมาณ ๕๐,๐๐๐ ตารางเมตร ซึ่งมีทั้งนำเข้าจากต่างประเทศและผลิตเองในท้องถิ่น แต่จำนวนยอดจำหน่ายในแต่ละปียังเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แสดงว่าการยอมรับมีจำกัดและยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร เนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่น มีราคาสูงกว่าเครื่องทำน้ำร้อนจากไฟฟ้าและแก๊สปิโตรเลียมเหลว ความไม่สม่ำเสมอของการทำน้ำร้อนต้องใช้งานควบคู่กับพลังงานชนิดอื่น เครื่องที่ผลิตในประเทศของบางบริษัทมีคุณภาพต่ำทำให้ขาดความเชื่อถือในระยะยาว บริการหลังการขายไม่ดีรวมทั้งมาตรการสนับสนุนจากภาครัฐยังไม่เพียงพอ

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ยังไม่เป็นที่ยอมรับในเชิงพาณิชย์ใน

ประเทศไทยแต่มีการใช้งานสำหรับการอบแห้งพืชผลทางการเกษตรเป็นส่วนใหญ่ มีขนาดเล็กและการยอมรับยังอยู่ในวงจำกัด และยังไม่สามารถใช้ในเชิงอุตสาหกรรมได้ การอบแห้งผลิตภัณฑ์แต่ละครั้งทำได้ในปริมาณที่ไม่มากนัก และระยะเวลาที่ใช้ใกล้เคียงกับวิธีตากกลางแจ้งแต่มีการลงทุนสูงกว่า

สำหรับเครื่องกลั่นน้ำพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ยังไม่มีข้อมูลการนำไปใช้งาน ประสิทธิภาพยังไม่สูงเพียงพอที่จะนำไปใช้งานได้จริงและไม่คุ้มค่าในเชิงพาณิชย์ รวมถึงยังไม่มีความต้องการและความจำเป็นในการนำมาใช้งานสำหรับประเทศไทย และมีปัญหาด้านคุณภาพของน้ำกลั่นที่ผลิตได้ว่าจะ

เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ด้านใด

เครื่องทำความเย็นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยยังอยู่ในขั้นตอนของการวิจัยเพื่อศึกษาสมรรถนะเท่านั้น ยังไม่มีข้อมูลสำหรับการนำมาใช้งานจริง เนื่องจากหลักการทำงานของระบบจะค่อนข้างซับซ้อน ต้องใช้อุปกรณ์ที่ได้มาตรฐานและทันสมัย รวมถึงความก้าวหน้าของเทคโนโลยีที่ยังไม่ได้รับการพัฒนาเท่าที่ควร จึงทำให้เครื่องทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์ยังมีประสิทธิภาพต่ำ มีราคาค่อนข้างสูงกว่าเครื่องทำความเย็นในระบบเดิมอยู่มาก



การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ด้านไฟฟ้า

การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ในประเทศไทย ส่วนใหญ่นำไปใช้ในพื้นที่ยังห่างไกลที่ระบบสายส่งไปไม่ถึงเนื่องจากต้นทุนในการผลิตไฟฟ้ายังคงสูงกว่าที่ซื้อจากสายส่งอยู่มาก มีการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับงานในระบบโทรคมนาคม ระบบประจุแบตเตอรี่ หมู่บ้านห่างไกล ระบบสูบน้ำในหมู่บ้านห่างไกล ระบบสอนหนังสือทางไกล ระบบผลิตไฟฟ้าผสมผสานในพื้นที่ห่างไกล เช่น ที่จังหวัดภูเก็ตมีระบบผลิตไฟฟ้าร่วมเซลล์แสงอาทิตย์กำลังการผลิต ๑๑.๓๔ กิโลวัตต์ และกังหันลมกำลังการผลิต ๑๗๐ กิโลวัตต์^๔ ปัจจุบันโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศ คือ โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผาบ่องซึ่งมีขนาด ๒,๔๐๐ กิโลวัตต์ ผลิตไฟฟ้าจำหน่ายไฟฟ้าให้จังหวัดแม่ฮ่องสอน^๕ นอกจากนี้ ยังมีการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในงานอื่น ๆ เช่น ไฟสัญญาณ สถานีอนามัย

สำหรับเทคโนโลยีการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยนั้นมีอยู่ด้วยกัน ๓ แบบ คือ Solar Home System (SHM), Roof-top PV และ Centralised PV โดยที่ Solar Home System จะเป็นการติดตั้งที่ไม่ต่อเข้ากับระบบสายส่งของการไฟฟ้า (stand alone) ซึ่งมักจะติดตั้งในชนบทห่างไกลที่สายส่งเข้าไปไม่ถึง หรือหน่วยงานสาขิตต่าง ๆ ส่วน Roof-top PV และ Centralised PV จะเป็นการติดตั้งที่ต่อเข้ากับระบบสายส่ง โดยที่ Centralised PV จะเป็นการติดตั้ง

เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเข้าระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งจะมีขนาดใหญ่กว่า Roof-top PV ซึ่งจะติดตั้งตามหน่วยงานต่าง ๆ ที่ได้รับการคัดเลือก

รัฐได้มีนโยบายสนับสนุนให้มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์โดยได้ออกระเบียบให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนขนาดเล็กมาก ดังนั้น บ้านพักอาศัย หน่วยงาน หรือสถานประกอบการที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถขายไฟฟ้ากลับเข้าระบบสายส่งไฟฟ้าได้ ใน พ.ศ. ๒๕๔๖ มีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์รวมทั้งสิ้น ๕,๘๑๘.๒ เมกะวัตต์ชั่วโมง ประมาณร้อยละ ๕๗ ผลิตในภาคเหนือ รองลงมา คือ ภาคกลาง ภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ร้อยละ ๒๑.๓, ๑๖.๒ และ ๕.๕ ตามลำดับ^๖

๑.๓ สถานภาพงานวิจัยด้านพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย ประเทศไทยได้มีการส่งเสริมให้มีการวิจัย พัฒนาและสาธิตการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตไฟฟ้า การผลิตน้ำร้อน การอบแห้ง การกลั่น และการทำความเย็น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

งานวิจัยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อน ประเทศไทยได้มีการวิจัยและพัฒนากระบวนการนำความร้อนด้วยแสงอาทิตย์มาเป็นเวลานาน และทำงานวิจัยในหน่วยงานหลายหน่วยด้วยกัน ปัจจุบันสามารถพัฒนามาใช้งานใน

เชิงพาณิชย์ได้แล้ว งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะเป็นการพัฒนาและทดสอบสมรรถนะของตัวรับรังสี^{๗-๙} นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ การศึกษาปัญหาและอุปสรรคของระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ภายในประเทศ

ด้านการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้น งานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่นำมาทำการอบแห้ง^{๑๐-๑๒} เช่น กล้วยน้ำบัว เนื้อสัตว์ ปลา กระเทียม นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยด้านการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแหล่งพลังงานอื่นในการให้ความร้อน เช่น ไอน้ำ แก๊สปิโตรเลียมเหลว แก๊สชีวภาพ และมีงานวิจัยเกี่ยวกับตัวรับรังสีอาทิตย์ที่ใช้ร่วมกับห้องอบแห้ง และการใช้หินเป็นตัวกักเก็บความร้อน ถึงแม้จะมีงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์มากมาย แต่ยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้น ถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิห้องอบแห้งให้ได้ตามต้องการ จะต้องใช้ควบคู่กับพลังงานจากแหล่งอื่น ทำให้มีการลงทุนสูงขึ้น

ด้านการกลั่นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ มีงานวิจัยด้านสมรรถนะของเครื่องกลั่นพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบต่าง ๆ^{๑๓-๑๕} เช่น แบบผิวตั้งผาดรอปอะคริลิก แบบกระจกเอียง และใช้ผิวดูดความร้อนชนิดต่าง ๆ นอกจากนี้



ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาตัวรับรังสีอาทิตย์แบบต่าง ๆ ที่นำมาใช้ร่วมกับเครื่องกลั่นน้ำ เพื่อเพิ่มสมรรถนะของเครื่องกลั่นน้ำ^{๒๐} และมีงานวิจัยที่พัฒนาเครื่องกลั่นด้วยแสงอาทิตย์สำหรับผลิตภัณฑ์อื่น เช่น เอทานอล^{๒๑-๒๓}

ในการทำความเย็นด้วยแสงอาทิตย์ งานวิจัยด้านเครื่องทำความเย็นด้วยแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาสมรรถนะ และความเป็นไปได้ของระบบ เช่น การศึกษาเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึม การศึกษาสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดซับด้วยแสงอาทิตย์ที่ใช้ถ่านกัมมันต์-เมทานอลเป็นสารคู่ทำงาน^{๒๔-๒๖} พบว่าสามารถทำความเย็นได้อุณหภูมิต่ำถึง -๗.๖ องศาเซลเซียส แต่สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบยังมีค่าต่ำอยู่มากคือ ๐.๐๘๓๐ นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยด้านการพัฒนาและปรับปรุงเครื่องทำความเย็นที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์

ระบบทำความเย็นแบบดูดเกาะชนิดต่อเนื่อง การทำความเย็นแบบดูดซึม การพัฒนาตู้เย็นพลังงานแสงอาทิตย์ และการทำความเย็นด้วยน้ำแข็งหลายแบบ เช่น แบบ Intermittent^{๒๗}

ด้านการผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ เนื่องจากประเทศไทยไม่ใช่ผู้นำในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบกับการวิจัยในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์มีระบบที่ยุ่งยากและซับซ้อนและต้องใช้อุปกรณ์ที่ได้มาตรฐานและทันสมัยมาก จึงทำให้งานวิจัยส่วนใหญ่เน้นการศึกษาพารามิเตอร์ คุณภาพ สมรรถนะของการนำไปใช้ในงานต่าง ๆ เช่น การศึกษาพารามิเตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสานที่ประกอบด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานลม และเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อใช้งานในพื้นที่ห่างไกล^{๒๘} การศึกษาคุณภาพของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน^{๒๙} การจัดการระบบผลิตสูบน้ำด้วยเซลล์

แสงอาทิตย์^{๓๐} ศึกษาาระบบที่เชื่อมโยงกับสายส่ง^{๓๑} การประจุแบตเตอรี่^{๓๒} อย่างไรก็ตาม สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ได้รับเงินสนับสนุนให้ทำวิจัยและผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นในประเทศไทย โดยคาดว่าจะสามารถผลิตเซลล์ให้มีประสิทธิภาพได้ถึงร้อยละ ๑๐^{๓๓} โดยจะพัฒนาเซลล์แบบผลึกควมคู่กันไป

จากการศึกษาสถานภาพการใช้สถานภาพด้านงานวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ และการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องกลั่นน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์ และเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถสรุปตามสถานภาพต่าง ๆ ได้ดัง ตารางที่ ๓

ตารางที่ ๓ สรุปสถานภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

ลักษณะการใช้	สถานภาพ						
	งานวิจัยพื้นฐาน	งานวิจัยและพัฒนา	การออกแบบทางวิศวกรรมและงานสาธิต	คุณค่าทางเศรษฐศาสตร์	มีจำหน่ายแบบตามใบสั่ง	ไม่เป็นเชิงพาณิชย์	มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์
เครื่องทำน้ำร้อน		X	X	X			X
เครื่องอบแห้ง		X	X	X	X		
เครื่องกลั่นน้ำ		X		X	X		
เครื่องทำความเย็น		X				X	
เซลล์แสงอาทิตย์		X	X	X			X

หมายเหตุ : X หมายถึง มีสถานภาพตามหัวข้อในแนวดิ่ง



๑.๔ ข้อจำกัดและปัญหาการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

จากการศึกษาพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย พบว่า ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะมีศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์เพียงพอสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ แต่ยังคงมีการนำไปใช้งานไม่มากเท่าที่ควร โดยสามารถสรุปปัญหาของงานวิจัยด้านพลังงานแสงอาทิตย์มีทั้งที่เป็นภาพรวมของประเทศและตามสถานภาพการใช้งานของอุปกรณ์แต่ละอย่างได้ดังนี้

ด้านการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำความร้อนเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอและความไม่แน่นอนของแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้เกิดปัญหาในการใช้งานและข้อจำกัดต่าง ๆ ดังนี้ ไม่สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ สำหรับกรณีเครื่องอบแห้ง และเครื่องทำความเย็น ดังนั้น ถ้าจะแก้ไขปัญหาเหล่านี้จะต้องติดอุปกรณ์เพิ่มเพื่อใช้แหล่งพลังงานอื่นเสริม ซึ่งจะทำให้ระบบมีต้นทุนสูงขึ้น นอกจากนี้สมรรถนะของบางอุปกรณ์ยังต่ำอยู่มาก เช่น เครื่องกลั่นน้ำ และเครื่องทำความเย็น ทำให้ไม่แน่ใจที่จะนำมาใช้งาน

สำหรับการนำแสงอาทิตย์มาผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นั้น มีปัญหาด้านราคาแผงเซลล์และระบบที่มีค่าสูง และประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำ ประกอบกับความไม่สม่ำเสมอ

และความไม่แน่นอนของแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้ต้นทุนไฟฟ้าที่ผลิตได้ยังสูงกว่าราคาไฟฟ้าที่ซื้อจากการไฟฟ้ามาก ดังนั้น จึงทำให้เกิดข้อจำกัดของการนำไปใช้งาน ซึ่งส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในพื้นที่ที่ห่างไกลระบบสายส่งไม่ถึง จึงใช้งานได้ไม่แพร่หลาย

๑.๕ แนวทางการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

จากการศึกษาสถานภาพงานวิจัยด้านพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยได้มีความพยายามในการทำการวิจัยด้านนี้มาเป็นเวลานาน แต่ถ้าพิจารณาถึงปัญหาและข้อจำกัดของการใช้งาน ความเป็นไปได้ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์แล้ว พบว่าควรมีวิจัยด้านเพิ่มประสิทธิภาพ สมรรถนะ และหาแนวทางลดต้นทุนของระบบ/อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และควรพัฒนาวัสดุที่ผลิตได้ในประเทศมาใช้เพื่อลดต้นทุน ควรมีงานวิจัยหาแนวทางพัฒนาระบบที่จะสามารถเก็บความร้อนและไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อให้มีการใช้งานได้อย่างต่อเนื่องอย่างสม่ำเสมอ และการวิจัยที่จะหาแหล่งพลังงานอื่นที่ราคาถูกมาใช้ผสมผสานเพื่อให้การใช้งานของระบบเป็นไปได้อย่างเสถียร และควรมีงานวิจัยทั้งทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์เพื่อขยายโอกาสที่จะพัฒนาอุปกรณ์และการประยุกต์ใช้งานใหม่ ๆ ต่าง ๆ ได้เหมาะสมให้ได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะเวื่อนโซที่เหมาะสมและความคุ้มค่าของการใช้เซลล์แสงอาทิตย์

นอกจากนี้ ควรมีงานวิจัยเชิงนโยบายและมาตรการต่าง ๆ ของประเทศที่ประสบความสำเร็จในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เช่น มาตรการด้านภาษีสิ่งแวดลอมต่าง ๆ โดยเฉพาะภาษีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

๒. พลังน้ำ

๒.๑ สถานการณ์ และการใช้พลังน้ำในประเทศไทย

การผลิตไฟฟ้าจากพลังน้ำเป็นการเปลี่ยนสภาพของน้ำจากสถานะพลังงานศักย์ (potential energy) เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยความแตกต่างของระดับน้ำ การเปลี่ยนพลังน้ำให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ใช้กังหันน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ศักยภาพพลังน้ำประเมินจากเขื่อนที่ผลิตไฟฟ้าที่ดำเนินการแล้ว ในปัจจุบันมีกำลังผลิตติดตั้งรวมทั้งสิ้น ๒,๙๗๓ เมกะวัตต์^{๓๓} คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ ๑๒ ของกำลังผลิตติดตั้งโรงไฟฟ้าของภาครัฐ^{๓๔} ส่วนใหญ่กว่าร้อยละ ๘๐ อยู่ทางภาคเหนือและภาคกลางของประเทศ ใน พ.ศ. ๒๕๔๖ สามารถผลิตไฟฟ้าได้รวมทั้งสิ้น ๗,๒๕๙ ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง คิดเทียบเท่าพลังงานปรมาณูมี ๑,๖๑๖ พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ^{๓๕} ในจำนวนนี้เป็นโรงไฟฟ้าพลังน้ำที่มีขนาดเล็กกว่า ๑๒ เมกะวัตต์อยู่ ๖๔ เมกะวัตต์ สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ๑๕๐ ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง

ปัจจุบันการหาแหล่งเพื่อพัฒนาเขื่อนขนาดใหญ่ในประเทศคง



เป็นไปได้ยาก ที่มีศักยภาพมากเป็นลุ่มน้ำระหว่างประเทศ ซึ่งในการพัฒนาเพื่อผลิตไฟฟ้าจะต้องเป็นไปในลักษณะความร่วมมือและถือกรรมสิทธิ์ร่วมระหว่างประเทศ

ดังนั้น การพัฒนาแหล่งพลังน้ำขนาดเล็กในประเทศไทยเพื่อผลิตไฟฟ้าจึงเป็นการสร้างแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญอย่างหนึ่ง กังหันพลังน้ำขนาดเล็กจะใช้น้ำในลำน้ำธรรมชาติเป็นแหล่งพลังงานโดยสร้างเขื่อนปิดกั้นแม่น้ำไว้ให้มีระดับสูงจนมีปริมาณน้ำ และแรงดันเพียงพอที่จะหมุนกังหันน้ำ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ท้ายน้ำที่มีระดับต่ำกว่า วิธีนี้เหมาะสมกับพื้นที่แถบชนบทที่สายไฟฟ้าส่งเข้าไปไม่ถึง โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแบ่งตามปริมาณน้ำได้เป็น ๓ ประเภท^{๖๖} ได้แก่ โรงไฟฟ้าแบบมีน้ำไหลผ่านตลอดปี (run-of-river hydro plant) โรงไฟฟ้าแบบไม่มีอ่างเก็บน้ำ ส่วนใหญ่จะติดตั้งอยู่กับเขื่อนผันน้ำชลประทานซึ่งมีน้ำไหลผ่านตลอดปี โรงไฟฟ้าแบบมีอ่างเก็บน้ำขนาดเล็ก (regulating pond hydro plant) และโรงไฟฟ้าแบบสูบกลับ (pumped storage plant) ส่วนใหญ่โครงการไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กจะเป็นโรงไฟฟ้าแบบมีน้ำไหลผ่านตลอดปี โรงไฟฟ้าแบบนี้ไม่มีอ่างเก็บน้ำ และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย

จากการศึกษาเบื้องต้นด้วยแผนที่และการสำรวจภาคสนามในบางพื้นที่ รวมทั้งพิจารณาจากการศึกษาโครงการไฟฟ้าพลังน้ำของหน่วยงาน

อื่น ๆ ซึ่งในการศึกษาได้พิจารณาโรงไฟฟ้า ๓ รูปแบบ พบว่าทั่วประเทศมีที่ตั้งโครงการไฟฟ้าพลังน้ำที่น่าจะเป็นไปได้ ๑,๑๓๖ แห่ง^{๖๗} ปัจจุบันกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้คัดเลือกเพื่อพัฒนาโครงการโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กเพื่อที่จะสร้างในอนาคต ๒๔ โครงการ รวมกำลังการผลิตติดตั้งทั้งหมด ๖๖.๑๓ เมกะวัตต์ คาดว่าจะผลิตไฟฟ้าได้ ๒๙๑ ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง ประมาณการเงินลงทุนรวมทั้งสิ้น ๔,๒๙๓ ล้านบาท^{๖๘} ซึ่งมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ ๔

๒.๒ สถานภาพงานวิจัยด้านพลังน้ำขนาดเล็กของประเทศไทย

การวิจัยด้านพลังน้ำขนาดเล็กของประเทศไทย มีงานวิจัยเกี่ยวกับการประเมินเชิงเทคนิคของโครงการพัฒนาพลังน้ำขนาดเล็กในประเทศที่กำลังพัฒนาและในประเทศที่พัฒนาแล้วพบว่า มีแนวโน้มที่จะเพิ่มศักยภาพมากขึ้น^{๖๙} ส่วนการศึกษาทางด้านโยธามีการศึกษาในเรื่องของวัสดุที่นำมาใช้และมาตรฐาน ปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์นั้น ๆ ขึ้นอยู่กับงบประมาณการลงทุน สภาพภูมิอากาศ ความยากง่ายในการสรรหาวัสดุอุปกรณ์มาใช้ในโครงการ การขนย้ายและการติดตั้ง มีการวิจัยด้านการจัดสรรน้ำเพื่อประโยชน์สูงสุดในการจัดการอ่างเก็บน้ำ ทั้งนี้เพื่อวางแผนและจัดการน้ำที่เหมาะสมเพื่อให้มีการใช้น้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติให้มีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด^{๗๐}

๒.๓ แนวทางงานวิจัยพลังน้ำขนาดเล็กในประเทศไทย

เนื่องจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กส่วนใหญ่เป็นแบบมีน้ำไหลผ่านตลอดปี จึงควรมีการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันที่มีความสูงของหัวน้ำที่ต่ำ ส่วนด้านวัสดุ อุปกรณ์ ควรตั้งมาตรฐานของวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กเพื่อให้เหมาะสมกับความสูงของหัวน้ำที่มีความแตกต่างกันในโครงการแต่ละโครงการ ซึ่งจะทำให้ผลิตพลังงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด จากตารางที่ ๔ จะเห็นได้ว่าโครงการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำใช้เงินลงทุนสูงมาก ดังนั้น ควรมีการศึกษาวิจัยเพื่อหาแนวทางลดต้นทุน นอกจากนี้ ควรมีการวิจัยเกี่ยวกับการจัดสรรน้ำมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด และควรศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าจากเขื่อนหรือฝายน้ำขนาดเล็กที่ก่อสร้างใช้งานอยู่แล้วที่สร้างขึ้นเพื่อการชลประทานและการเกษตร ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประโยชน์การใช้ทรัพยากรให้ได้หลายวัตถุประสงค์ เช่น เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ในโครงการพระราชดำริ ที่เริ่มสร้างขึ้นเพื่อการอุปโภค การเกษตร อุตสาหกรรม คมนาคม บรรเทาอุทกภัย ปัจจุบันกำลังดำเนินการติดตั้งกังหันน้ำ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกำลังผลิตสูงสุด ๖.๗ เมกะวัตต์ และคาดว่าจะเริ่มผลิตไฟฟ้าจำหน่ายได้ใน พ.ศ. ๒๕๔๔



ตารางที่ ๔ โครงการโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก จำนวน ๒๔ โครงการ ของ พพ.^{๓๓}

ชื่อโครงการ	ที่ตั้ง (จังหวัด)	กำลังการผลิต ติดตั้ง (กิโลวัตต์)	พลังงานที่ผลิตได้ (ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง ต่อปี)	ประมาณการต้นทุน ในการก่อสร้าง (ล้านบาท)
ห้วยดองก่อ	แม่ฮ่องสอน	๕๐๐	๔	๘๗
ห้วยผาปู่	ตาก	๒,๗๔๖	๗	๑๖๕
คลองฉวาง	สุราษฎร์ธานี	๖๕๕	๓	๑๓๐
แควน้อย	พิษณุโลก	๓,๕๒๐	๑๒	๒๕๖
ห้วยน้ำร้อง	พิษณุโลก	๒,๕๗๐	๕	๑๔๓
คลองเต่าดำ	กำแพงเพชร	๗,๑๖๐	๕๐	๓๖๓
คลองกรุงชิง	นครศรีธรรมราช	๖,๐๐๐	๒๕	๒๘๔
ห้วยแดนหมี่	ตรัง	๒,๖๓๕	๑๓	๑๕๕
น้ำแม่ลาน้อย	แม่ฮ่องสอน	๒,๐๑๒	๗	๑๑๓
ห้วยคลิตี้	กาญจนบุรี	๒,๖๐๐	๑๓	๒๗๓
ห้วยแม่สิน	เชียงใหม่	๖๕๕	๔	๙๒
ห้วยของเผาะ	กาญจนบุรี	๑,๒๘๐	๗	๑๑๕
ห้วยแม่อุสุ	ตาก	๗,๕๒๖	๓๓	๓๔๔
ห้วยน้ำพาง	เพชรบูรณ์	๑,๗๐๐	๖	๙๘
คลองละอุ่น	ระนอง	๔,๐๐๐	๑๕	๒๒๑
น้ำฟ้า	น่าน	๖,๕๐๐	๑๓	๒๗๑
คลองแอ	สุราษฎร์ธานี	๑,๕๒๐	๒๑	๑๙๐
ห้วยน้ำร้อง	พิษณุโลก	๒,๕๗๐	๕	๑๔๓
น้ำแม่วาง (แม่เตียน)	เชียงใหม่	๑,๖๐๐	๘	๑๐๑
แม่เปะ	เชียงใหม่	๖๒๘	๔	๗๒
น้ำแม่สะป๊อก	เชียงใหม่	๗๘๐	๔	๗๘
น้ำแม่หลวง	เชียงใหม่	๕๓๐	๗	๒๑๕
น้ำปัว	น่าน	๔,๓๐๐	๑๓	๒๕๘
น้ำแม่หวาน	เชียงใหม่	๕๓๐	๔	๑๒๘

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน



๓. พลังงานลม

๓.๑ ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้จัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมมา ตั้งแต่ พ.ศ. ๒๕๑๘ และได้มีการจัดทำใหม่ใน พ.ศ. ๒๕๔๕^{๑๕} ซึ่งสรุปได้ว่า ประเทศไทยได้รับอิทธิพลลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดผ่านประเทศไทยจากทะเลจีนใต้ในเดือนพฤศจิกายนถึงมีนาคม และอิทธิพลลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดผ่านประเทศไทยในเดือนพฤษภาคมถึงตุลาคม พื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลทั้งลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้เป็นบริเวณเทือกเขาทอดยาวทางทิศทางลม ทำให้เป็นพื้นที่ที่มีลมพัดแรงเกือบตลอดทั้งปี ที่ยอดเขามีความเร็วลมประมาณ ๗.๐ เมตร/วินาทีขึ้นไป ได้แก่ จังหวัดสุราษฎร์ธานี พังงา กระบี่ นครศรีธรรมราช

พื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยมีทิศทางลมพัดจากทะเลเข้าสู่ฝั่งความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปี ๖.๔ เมตร/วินาที (ที่ความสูง ๕๐ เมตรจากพื้นดิน) ขึ้นไป ในพื้นที่ภาคใต้บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก ได้แก่ จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา และปัตตานี ส่วนพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ กำลังลมแรงบนยอดเขามีความเร็วลมประมาณ ๖.๔ เมตร/วินาที ขึ้นไป ได้แก่ พื้นที่บนเทือกเขาด้านทิศตะวันตกตั้งแต่จังหวัดเพชรบุรี กาญจนบุรี และจังหวัดตาก ส่วน

อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ ก็ได้รับอิทธิพลจากความกดอากาศสูงจากสาธารณรัฐประชาชนจีนและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ทำให้มีความเร็วลมประมาณ ๖.๔ เมตร/วินาทีขึ้นไป

ส่วนแหล่งที่มีศักยภาพพลังงานลมรองลงมา ได้แก่ ความเร็วลมเฉลี่ย ๔.๔ เมตร/วินาทีขึ้นไป (ที่ความสูง ๕๐ เมตรจากพื้นดิน) ซึ่งเกิดจากอิทธิพลลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือพบว่า อยู่ที่อำเภอไทยฝั่งตะวันตก ตั้งแต่จังหวัดสุราษฎร์ธานี ชุมพร ประจวบคีรีขันธ์ เพชรบุรี และบริเวณที่สูงบนยอดเขาในภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดเพชรบูรณ์ และเลย และแหล่งที่มีศักยภาพรองลงมาซึ่งได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ได้แก่ ภาคใต้ฝั่งตะวันตกตั้งแต่จังหวัดสตูล ตรัง กระบี่ ภูเก็ต พังงา และอำเภอไทยฝั่งตะวันออก จังหวัดชลบุรี และระยอง

๓.๒ การใช้พลังงานลมในประเทศไทย

เนื่องจากพลังงานลมขึ้นอยู่กับความเร็วและมวลของอากาศ ดังนั้นการนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์จะต้องเลือกพื้นที่ที่มีศักยภาพความเร็วลมสูงจึงจะได้พลังงานมาก พลังงานลมสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าได้ โดยใช้กังหันลมเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงาน ทั้งนี้ สามารถจำแนกตามลักษณะการใช้ประโยชน์ได้เป็น ๒ ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ กังหัน

ลมเพื่อการสูบน้ำ และกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า

กังหันลมเพื่อการสูบน้ำ ประเทศไทยมีการใช้กังหันลม ๓ แบบ^{๑๖} ได้แก่ กังหันลมใบเรือ กังหันลมใบพัด และกังหันลมหลายใบ กังหันลม ๒ ชนิดแรกเป็นแบบดั้งเดิมที่ใบพัดของกังหันทำด้วยเสื่อลำแพน ผ้าใบ ไม้ และสังกะสี กังหันลมชนิดใบเรือส่วนใหญ่ใช้ในนาเกลือ ส่วนกังหันลมชนิดใบพัดส่วนใหญ่ใช้ในนาข้าว กังหันลมทั้ง ๒ ชนิดนี้มีความสามารถในการยกระดับน้ำไม่เกิน ๒ เมตร สามารถสร้างเองได้ สำหรับกังหันลมชนิดหลายใบส่วนใหญ่ใช้ในการสูบน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค มีความสามารถในการยกระดับน้ำได้สูงกว่า ๒ ชนิดแรก ราคากังหันลมชนิดนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนใบกังหันลม และจะมีราคาสูงกว่ากังหันลม ๒ แบบแรก สำหรับเครื่องสูบน้ำที่ใช้คู่กับกังหันลมมีใช้อยู่ ๒ แบบ คือ แบบระทัดและแบบสูบล้อ โดยเครื่องสูบน้ำแบบระทัดจะทำจากไม้ ใช้ร่วมกับกังหันลมชนิดใบเรือและใบพัด เพื่อวิดน้ำเข้านาเกลือและนาข้าว ส่วนเครื่องสูบน้ำแบบสูบล้อทำจากโลหะใช้ร่วมกับกังหันลมชนิดหลายใบ กรรมวิธีการผลิตใช้เทคนิคค่อนข้างซับซ้อนและยุ่งยากกว่าแบบระทัด ส่วนใหญ่บริษัทจำหน่ายกังหันลมคู่กับเครื่องสูบน้ำ

กังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า ใน พ.ศ. ๒๕๔๖ ประเทศไทยมีกำลังผลิตติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น ๑๔๕.๗ กิโลวัตต์^{๑๗} ซึ่งส่วน



ใหญ่อยู่ในภาคใต้ (๑๕๒.๓ กิโลวัตต์) มีส่วนน้อยอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (๒.๕ กิโลวัตต์) และภาคใต้ (๐.๕ กิโลวัตต์) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตได้สร้างสถานีผลิตพลังงานทดแทนที่แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต ซึ่งผลิตไฟฟ้าร่วมระหว่างพลังงานลม ๑๕๒ กิโลวัตต์ กับเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด ๑๑.๓๔ กิโลวัตต์

๓.๓ สถานภาพงานวิจัยด้านพลังงานลมของประเทศไทย

จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยด้านพลังงานลมของประเทศไทย สามารถแบ่งงานวิจัยออกเป็น ๒ ประเภท ได้แก่ งานวิจัยด้านสมรรถนะของกังหันลมเพื่อการสูบน้ำ และงานวิจัยด้านสมรรถนะของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม

ด้านงานวิจัยด้านสมรรถนะของกังหันลมเพื่อการสูบน้ำ มีการทดสอบกังหันลม ๔ ใบ ศึกษาสมรรถนะกังหันลมหลายใบ การศึกษาความเค้นในใบของกังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง การศึกษาแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ของใบพัดกังหันลมแบบดาร์ริ่ง และการศึกษา Laminar Separation Bubble บนใบพัดของกังหันลม^{๑๐-๑๓} การทดสอบสมรรถนะของโรเตอร์กังหันลมที่มีอยู่ในประเทศไทย ๖ แบบ ได้แก่ กังหันลมหลายใบ กังหันลมล้อจักรยาน กังหันลมนาข้าว ๒ ใบ กังหันลมนาข้าว ๔ ใบ กังหันลมนาเกลือ ๖ ใบ และกังหันลม

ปิดคานี ๒ ใบ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุดของกังหันแต่ละแบบ จากผลการทดสอบที่ได้ทำให้สามารถเลือกใช้กังหันลมแต่ละแบบให้เหมาะสมกับศักยภาพลมของพื้นที่แต่ละแห่ง

ด้านงานวิจัยด้านสมรรถนะการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม มีการทดสอบแบบจำลองกังหันลมแบบโร-โรเตอร์ชนิดโดยตรง^{๑๔} ศึกษาสมรรถนะของกังหันลมแบบดาร์ริ่ง^{๑๕} ซึ่งเป็นกังหันลมแบบแนวตั้ง

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลม^{๑๖} เป็นการพัฒนางานวิจัยที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจากการทดสอบใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรถยนต์เนื่องจากหาง่ายและมีราคาถูก ทนทานต่อสภาพการใช้งานในภาวะต่าง ๆ นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาพารามิเตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสานที่ประกอบด้วย พลังงานลม เซลล์แสงอาทิตย์ และเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อใช้งานในพื้นที่ห่างไกล^{๑๗}

ระบบผลิตและสำรองไฟฟ้าด้วยพลังงานลม^{๑๘} งานวิจัยนี้เป็นการดัดแปลงกังหันนาเกลือแบบหมุนรับลมตามทิศทางมาใช้สำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้า ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความ

เร็วลมกับรอบการหมุนของกังหันลม

กังหันลมเป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้มานานอย่างแพร่หลายและคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับพื้นที่ที่มีศักยภาพความเร็วลมเพียงพอ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่แปลงพลังงานลมมาเป็นพลังงานกลแล้วนำพลังงานกลไปขับเคลื่อนสูบน้ำ ดังนั้น ค่าการลงทุนจึงขึ้นกับราคากังหันลมกับราคาเครื่องสูบน้ำ และไม่มีค่าเชื้อเพลิง

ประเทศไทยมีการใช้กังหันลมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยการนำเข้าจากต่างประเทศ เนื่องจากประเทศไทยยังไม่มีโรงงานผลิตกังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าภายในประเทศ ดังนั้นราคาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานลม จึงสามารถอ้างอิงราคาพลังงานของต่างประเทศได้ แต่จะมีราคาสูงกว่าเพราะต้องรวมค่าขนส่ง ค่าติดตั้ง อัตราแลกเปลี่ยนเงินตรา ภาษีนำเข้า อุปกรณ์ของประเทศไทย รวมถึงค่าอะไหล่ที่ต้องนำเข้าและการซ่อมแซมบำรุงรักษา จากข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย^{๑๙}

จากการศึกษาศักยภาพสถานภาพการใช้ สถานภาพงานวิจัยและการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของพลังงานลมที่นำมาใช้สำหรับการสูบน้ำและผลิตไฟฟ้า สามารถสรุปสถานภาพได้ตารางที่ ๕



ตารางที่ ๕ สรุปสถานภาพของพลังงานลมในประเทศไทย

ลักษณะการใช้งาน	สถานภาพ			
	ศักยภาพทางเทคนิค	มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย	โครงการสาธิต	มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์
กังหันลมเพื่อการสูบน้ำ	X	X		X
กังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า	X		X	

หมายเหตุ : X หมายถึง มีสถานภาพตามหัวข้อในแนวดิ่ง

๓.๕ แนวทางการวิจัยด้านพลังงานลมในประเทศไทย

ข้อจำกัดสำคัญของการใช้ประโยชน์จากพลังงานลม คือ ค่าความเร็วลม สำหรับการใช้พลังงานเพื่อสูบน้ำ ถึงแม้จะต้องการความเร็วลมไม่สูงมากนัก แต่ในพื้นที่ที่มีความเร็วลมต่ำมาก ก็ไม่สามารถทำได้เช่นกัน และที่สำคัญจะต้องเป็นพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางเส้นทางลมและห่างจากชุมชนพอสมควร ส่วนกังหันลมเพื่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้พื้นที่ที่มีศักยภาพความเร็วลมสูง เช่น ชายฝั่งทะเล จึงทำให้สามารถติดตั้งได้เฉพาะบางพื้นที่เท่านั้น

จากการศึกษาข้างต้นพบว่า สิ่งสำคัญของการนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน ได้แก่ ค่าความเร็วลมของพื้นที่นั้น ๆ ต้องเหมาะสมกับการใช้งาน เนื่องจากกังหันลมแต่ละชนิดแต่ละแบบจะมีค่าความเร็วเริ่มต้นของการทำงานต่างกัน ดังนั้น การติดตั้งกังหันลมในพื้นที่แต่ละแห่งจะต้องศึกษาศักยภาพความเร็วลมก่อนเป็นอันดับแรก และจากการศึกษาข้อมูล

ด้านศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย พบว่า ประเทศไทยมีการใช้กังหันลมเพื่อการสูบน้ำเพื่อการเกษตรทั้งในนาข้าวและนาเกลือมาเป็นเวลานาน กังหันลมเพื่อการสูบน้ำนี้ต้องการความเร็วลมไม่มากนักก็สามารถทำงานได้ จึงมีพื้นที่หลายแห่งของประเทศไทยที่มีการใช้กังหันลมเพื่อการสูบน้ำ การติดตั้งกังหันลมจะเหมาะสมกับงานและพื้นที่ที่มีค่าความเร็วลมตรงกับช่วงทำงานซึ่งอาจมีปัญหาในช่วงลมสงบทำให้ไม่สามารถทำงานได้ พื้นที่ที่มีการใช้กังหันส่วนใหญ่จะเป็นทุ่งกว้างมีสิ่งกีดขวางทางลมน้อย สำหรับสถานภาพของงานวิจัยด้านพลังงานลมเพื่อการสูบน้ำของประเทศไทย ส่วนใหญ่จะเน้นไปในด้านงานวิจัยเพื่อทดสอบสมรรถนะของกังหันลม เนื่องจากกังหันลมมีหลายแบบซึ่งเหมาะสมกับการทำงานแต่ละแบบไม่เหมือนกัน ดังนั้น แนวทางการวิจัยพลังงานลมเพื่อการสูบน้ำควรมุ่งงานวิจัยด้านการประยุกต์ใช้กังหันลมกับอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานกล การเก็บรวบรวมข้อมูลสถานภาพการใช้กังหันลมเพื่อการสูบน้ำ ณ ภาวะ

ปัจจุบัน เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาสถานภาพซึ่งใช้ข้อมูลจากหน่วยงานที่เคยทำการสำรวจไว้แล้ว จึงอาจจะคลาดเคลื่อนจากสภาพปัจจุบัน ข้อมูลสถานภาพการใช้งานจริงในปัจจุบันจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการกำหนดแผนพัฒนาและส่งเสริมการใช้กังหันลมเพื่อการสูบน้ำต่อไป

ควรมุ่งงานวิจัยเชิงนโยบายด้านมาตรการส่งเสริมการนำกังหันลมมาใช้ประโยชน์ให้มากขึ้นกว่าในปัจจุบัน โดยเฉพาะในพื้นที่เกษตรกรรม เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งและการนำพลังงานจากกังหันลมไปใช้ประโยชน์ และควรจะอนุรักษ์การใช้กังหันลมเพื่อการสูบน้ำในนาข้าวเดิม ให้มีการใช้งานต่อไปและเพิ่มปริมาณจำนวนกังหันลมให้มากขึ้น

แนวทางการงานวิจัยพลังงานลมเพื่อผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย จากการศึกษาการใช้กังหันลมสำหรับการผลิตไฟฟ้า พบว่า ต้องใช้ความเร็วลมสูงมากกว่า ๔ เมตร/วินาที กังหันลมจึงจะเริ่มทำงานได้ ดังนั้น การเลือกพื้นที่ที่มีความเร็วลมสูงจะมีความสำคัญ



มากสำหรับการติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า จากการศึกษาศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยพบว่า หลายจังหวัดทางภาคใต้ของประเทศไทยมีศักยภาพความเร็วลมสูงสามารถติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าได้ แต่ปัจจุบันประเทศไทยมีการติดตั้งกังหันลมผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังผลิตน้อยมาก

ดังนั้น จึงควรมีนงานวิจัยด้านการศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์สำหรับการติดตั้งกังหันลมในพื้นที่ที่มีความเร็วลมสูง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของกังหันลม เนื่องจากประเทศไทยไม่ใช่ผู้ผลิตกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าจึงต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ยังคงมีปัญหาด้านทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการนำมาใช้งาน จึงควรมีการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าภายในประเทศในอนาคต

นอกจากนี้ ควรมีนงานวิจัยเชิงนโยบายด้านมาตรการจูงใจและส่งเสริมการผลิต และติดตั้งกังหันเพื่อการสูบน้ำและเพื่อการผลิตไฟฟ้า เช่น การให้คำปรึกษาด้านเทคนิคและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับกังหันลม การลดภาษีนำเข้าวัสดุอุปกรณ์ การกำหนดพื้นที่ที่มีศักยภาพเพื่อให้มีการลงทุนของภาคเอกชนในการผลิตไฟฟ้าจำหน่ายเข้าระบบการส่งเสริมการลงทุนสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตกังหันลมเพื่อการสูบน้ำและเพื่อผลิตไฟฟ้า

๔. พลังงานความร้อนใต้พิภพ

พลังงานความร้อนใต้พิภพ หมายถึง พลังงานธรรมชาติที่เกิดจากความร้อนที่ถูกกักเก็บอยู่ภายใต้ผิวโลก สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยอุณหภูมิใต้ผิวโลกจะเพิ่มขึ้นตามความลึกตามปรกติแหล่งพลังงานนี้จะอยู่ในรูปของน้ำพุร้อน หรือน้ำร้อนจากใต้ดิน แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพที่พบในโลกแบ่งตามลักษณะการเกิดได้ ๓ ลักษณะ^๕ คือ

- แหล่งที่เป็นไอน้ำส่วนใหญ่ (steam dominated) เป็นแหล่งกักเก็บความร้อนที่ประกอบด้วยไอน้ำมากกว่าร้อยละ ๘๕ โดยทั่วไปมักเป็นแหล่งที่มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับหินหลอมเหลวร้อนที่แทรกดันขึ้นมาอยู่ในระดับตื้น ๆ โดยอุณหภูมิของไอน้ำร้อนสูงกว่า ๒๕๐ องศาเซลเซียส แหล่งที่เป็นไอน้ำส่วนใหญ่พบน้อยมาก แต่สามารถนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุด เช่น The Geyser Field ในมลรัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา และ Larderello ประเทศอิตาลี

- แหล่งที่เป็นน้ำร้อนส่วนใหญ่ (hot water dominated) เป็นแหล่งกักเก็บสะสมความร้อนที่ประกอบไปด้วยน้ำร้อนเป็นส่วนใหญ่ อุณหภูมิความร้อนจะมีตั้งแต่ ๑๐๐ องศาเซลเซียสขึ้นไป ระบบนี้จะพบมากที่สุด เช่น Cerro prieto ประเทศเม็กซิโก Hatchobaru ประเทศญี่ปุ่น และ Wairakei ในประเทศนิวซีแลนด์

- แหล่งหินร้อนแห้ง (hot dry

rock) เป็นแหล่งสะสมความร้อนที่เป็นหินเนื้อแน่น แต่ไม่มีน้ำร้อนหรือไอน้ำไหลหมุนเวียนอยู่ ดังนั้น ถ้าจะนำมาใช้จำเป็นต้องทำชั้นหินร้อนให้มีรอยแตก แล้วจึงอัดน้ำเย็นลงไปทางหลุมเจาะ ให้น้ำได้รับความร้อนจากหินร้อน โดยไหลหมุนเวียนภายในรอยแตกที่กระทำชั้น จากนั้นก็สูบน้ำนี้ขึ้นมาทางหลุมเจาะอีกหลุมหนึ่ง

๔.๑ ศักยภาพของพลังงานความร้อนใต้พิภพที่พบในประเทศไทย

แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพของประเทศไทย จัดอยู่ในแหล่งกักเก็บอุณหภูมิต่ำ คือ มีอุณหภูมิน้อยกว่า ๑๒๕ องศาเซลเซียส โดยแหล่งเก็บสะสมความร้อนจะประกอบไปด้วยน้ำร้อนเป็นส่วนใหญ่ อุณหภูมิความร้อนจะมีค่ามากกว่า ๘๐ องศาเซลเซียส ระบุผลจากการสำรวจแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพของประเทศไทย^๖ พบว่ามีแหล่งส่วนใหญ่อยู่ทางภาคเหนือและอุณหภูมิต่ำกว่า ๑๐๐ องศาเซลเซียส และประเทศไทยมีศักยภาพเชิงความร้อนรวมทั้งสิ้น ๕๒๗ พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ ๖ เกณฑ์การพิจารณาศักยภาพพลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทยที่สามารถนำมาผลิตไฟฟ้า ได้แก่

- อุณหภูมิ อยู่ในช่วง ๑๐๐-๑๕๐ องศาเซลเซียส

- ขนาดของแหล่งกักเก็บ จะต้องมีความลึกไม่เกิน ๐-๒๐๐ เมตร จากพื้นดิน



- ความดันของไอน้ำ
- ลักษณะของแหล่งประกอบไปด้วยน้ำร้อนเป็นส่วนใหญ่หรือไอน้ำเป็นส่วนใหญ่

๔.๒ การนำความร้อนใต้พิภพมาใช้ประโยชน์ในประเทศไทย

ด้านการผลิตไฟฟ้า มีการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ มีอยู่เพียงที่เดียวซึ่งเป็นโครงการสาธิตของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต คือที่อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ มีกำลังการผลิตคือ ๓๐๐ กิโลวัตต์ ซึ่งเป็น

โรงไฟฟ้าระบบ ๒ วงจร^{๑๑} ที่ใช้แหล่งพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ ใช้ความร้อนจากหลุมเจาะระดับตื้นที่มีอุณหภูมิ ๑๓๐ องศาเซลเซียส ผลิตได้ประมาณปีละ ๑.๒ ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง จะถูกส่งเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพื่อจ่ายให้ผู้ใช้ไฟฟ้าต่อไป และได้นำน้ำร้อนที่ผ่านการใช้งานในระบบผลิตไฟฟ้าแล้วไปใช้ให้ความร้อนในการอบแห้งห้องเย็น กิจกรรมกายภาพบำบัด และเป็นสถานที่ท่องเที่ยว

ส่วนแหล่งพลังงานความ

ร้อนใต้พิภพอื่น ๆ ที่มีศักยภาพ เช่นที่สันกำแพงนั้น ได้มีการเจาะสำรวจแต่ยังไม่มีการติดตั้งกำลังการผลิต ส่วนแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพที่อำเภอป่าเป้าและเทพพนม ยังพบปัญหาหลายอย่างคือ อยู่ในเขตอุทยานแห่งชาติ ดังนั้น การพัฒนาแหล่งความร้อนใต้พิภพจะเป็นไปได้ยาก ส่วนที่อำเภอแม่จันนั้น อยู่ในพื้นที่ที่มีการจ่ายไฟฟ้าถึงอยู่แล้ว ต้นทุนของการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนใต้พิภพจะสูงกว่า ดังนั้นจึงยังไม่มีการพัฒนา

ตารางที่ ๖ ศักยภาพเชิงพลังงานความร้อนใต้พิภพ ตามแหล่งทางภูมิศาสตร์

แหล่งทางภูมิศาสตร์	ศักยภาพเชิงพลังงาน (พินตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)
ทั่วประเทศ	๕๒๗.๐
ภาคเหนือ	๕๐๖.๓
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	-
ภาคกลาง	๓.๑
ภาคใต้	๑๗.๖

ด้านความร้อน แหล่งความร้อนใต้พิภพในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นแหล่งกักเก็บที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นควรพิจารณานำมาใช้ประโยชน์ เป็นแหล่งให้ความร้อนโดยตรง ความร้อนที่ใช้ในช่วงประมาณไม่เกิน ๑๕๐ องศาเซลเซียส^{๑๒} สามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ได้ เช่น สามารถนำไปใช้ในการอบแห้ง และเป็นแหล่งให้พลังงานแก่ห้องเย็นสำหรับเก็บรักษาพืชผลทางการเกษตรได้ นำไปใช้ในกิจการเพื่อ

กายบำบัด

ปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการใช้งานคือ น้ำพุร้อนที่ไหลขึ้นมาให้เห็นตามผิวดิน อาจไม่ได้อยู่เหนือแหล่งที่กำเนิดและกักเก็บพลังงาน ดังนั้น จึงไม่สามารถประเมินถึงศักยภาพของแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพได้อย่างแน่ชัดว่ามีปริมาณเท่าไร และจะหมดเมื่อไร จึงอยากที่จะประเมินว่าเหมาะสม คู่คุณค่าที่จะนำมาใช้หรือไม่

๔.๓ แนวทางวิจัยพลังงาน

ความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย

ข้อจำกัดของการใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพ คือ จะมีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และมีเทน และในน้ำแร่ร้อนยังประกอบด้วยสารละลายซิลิกา โลหะหนัก (heavy metal) โซเดียมและโพแทสเซียมคลอไรด์ บางครั้งอาจมีคาร์บอนेटด้วย ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และอาจมีการทรุดตัวของพื้นดินในแหล่งพลังงานความร้อนใต้



พิภพที่มีน้ำเป็นส่วนใหญ่ จากศักยภาพ แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย จะเห็นได้ว่า เป็นแหล่งกักเก็บที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้น ควรมีแนวทางวิจัยในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความร้อนจากน้ำร้อน ไปใช้ประโยชน์โดยตรงแทน โดยพัฒนาแหล่งพลังงานและศึกษาผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมด้วย

๕. พลังงานจากมหาสมุทร

มหาสมุทรสามารถผลิตพลังงานได้ ๒ รูปแบบ คือ พลังงานความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์ และพลังงานกลที่ได้จากน้ำขึ้นน้ำลง และคลื่น

๕.๑ ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนจากมหาสมุทรในประเทศไทย (OTEC)^{๕๓}

พื้นผิวโลกกว่าร้อยละ ๗๐ เป็นมหาสมุทร ดังนั้น มหาสมุทรจึงเป็นเสมือนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (solar collector) ขนาดใหญ่ การผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนจากมหาสมุทร จะอาศัยความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำทะเลส่วนบนที่มีความลึกไม่เกิน ๕๐ เมตร ซึ่งเป็นส่วนที่สะสมพลังงานจากแสงอาทิตย์มีอุณหภูมิประมาณ ๒๕-๓๐ องศาเซลเซียส กับอุณหภูมิของน้ำทะเลส่วนล่างที่มีความลึกประมาณ ๑,๐๐๐ เมตร มีอุณหภูมิต่ำกว่า ๕ องศาเซลเซียส

บริเวณที่เหมาะสม ในการพัฒนาระบบ OTEC^{๕๔} ได้แก่

๑. ชายฝั่งที่มีความลาดชันสูง

๒. ท้องมหาสมุทรลึกมากกว่า ๑,๐๐๐ เมตร และอยู่ใกล้ชายฝั่ง

๓. ระยะห่างจากที่ตั้งชายฝั่งถึงที่ตั้งโรงไฟฟ้าแบบลอยน้ำ ไม่ควรเกิน ๕๐ กิโลเมตร

นอกจากนี้ กระแสลมและกระแสน้ำก็มีอิทธิพลต่อการพัฒนาด้วย กล่าวคือ กระแสน้ำที่มีความเร็วมากกว่า ๑.๘๒ กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือบริเวณที่มีกระแสลมที่มีความเร็วสูงกว่า ๔๖.๔ กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะไม่เหมาะสมต่อการติดตั้งโรงไฟฟ้า OTEC

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากมหาสมุทร (OTEC) มีวัฏจักรการทำงาน แบ่งออกได้เป็น ๓ ระบบ คือ^{๕๕} ระบบวัฏจักรเปิด (open cycle) ระบบวัฏจักรปิด (closed cycle) และแบบลูกผสม (hybrid system) ซึ่ง

ทั้ง ๓ ระบบจะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ ๓ ส่วน คือ เครื่องระเหย (evaporator) เครื่องควบแน่น (condenser) กังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (turbine and generator)

การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนจากมหาสมุทร (OTEC) จะคล้ายคลึงกับโรงไฟฟ้าทั่วไป แต่ต่างกันที่ไม่มีเผาไหม้เชื้อเพลิง เนื่องจากใช้ความร้อนจากน้ำมหาสมุทรส่วนบนเป็นต้นกำเนิดพลังงาน จึงไม่มีต้นทุนของค่าเชื้อเพลิง โรงไฟฟ้าแบบนี้จะใช้ผลิตไฟฟ้าในช่วงภาระฐาน (base load) แต่ประสิทธิภาพของระบบการผลิตจะต่ำ ประมาณร้อยละ ๖.๘-๘.๐ ซึ่งขึ้นกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในระบบ ปัจจุบันการออกแบบโรงไฟฟ้ามี ๒ ลักษณะ คือ แบบที่ตั้งบนชายฝั่ง (shore base type) และแบบลอยน้ำ (floating type of ship type)

จากข้อมูลของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ในด้านของอุณหภูมิของน้ำทะเลที่ระดับผิวน้ำ และที่ความลึกในระดับต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ ๗

ตารางที่ ๗ อุณหภูมิของน้ำทะเลในบริเวณอ่าวไทย

ช่วงเวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	ผิว	ลึก ๓๐ ม.	ลึก ๕๐ ม.
มีนาคม - เมษายน	๒๕.๐๐	๒๘.๑๗	๒๗.๘๔
พฤษภาคม - กันยายน	๓๐.๐๔	๒๕.๔๘	๒๘.๕๔
พฤศจิกายน - กุมภาพันธ์	๒๕.๓๕	๒๘.๒๔	๒๗.๘๖

ที่มา : โครงการศึกษาเบื้องต้นศักยภาพและความเหมาะสมในการพัฒนาพลังงานจากทะเล^{๕๔}



พื้นที่ท้องทะเลอ่าวไทยมีลักษณะคล้ายแอ่งน้ำ ส่วนที่ลึกสุดอยู่ตรงกลาง และมีความลึกประมาณ ๘๓ เมตร เมื่อน้ำลงต่ำสุด ความลึกเฉลี่ยของอ่าวตอนกลางและตอนล่าง ประมาณ ๕๐ เมตร บริเวณปากอ่าวไทยที่ต่อกับทะเลจีนใต้ ลึกประมาณ ๔๐ เมตร^{๕๖} และด้านฝั่งทะเลอันดามัน พบว่าในระดับความลึก ๑,๐๐๐ เมตร อยู่ห่างชายฝั่ง ๒๒๐-๓๒๐ กิโลเมตร ซึ่งอยู่ในเขตน่านน้ำสากล และอยู่ห่างจากชายฝั่งมาก

เมื่อพิจารณาข้อมูลด้านพลังงานความร้อนจากมหาสมุทรดังแสดงในตารางที่ ๗ จะพบว่าประเทศไทยไม่มีศักยภาพเพียงพอในการพัฒนาระบบพลังงานความร้อนจากมหาสมุทร ทั้งในด้านความเหมาะสมของอุณหภูมิระหว่างผิวน้ำ และอุณหภูมิใต้ผิวน้ำที่ ความลึกของท้องมหาสมุทร รวมถึงลักษณะชายฝั่งของประเทศไทยที่ไม่มี ความลาดชันที่เพียงพอที่จะทำให้ท้อง

มหาสมุทรมีความลึกในระดับที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้

๕.๒ พลังงานจากน้ำขึ้น-น้ำลง (Tidal Energy)

น้ำขึ้น-น้ำลง (tides) เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่งของโลก ซึ่งการเกิดจากการเพิ่มขึ้นและลดลงของระดับน้ำ^{๕๗} เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโดยแรงดึงดูด (gravitational force) และแรงจลน์ (kinetic force) ของดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์และโลกเปลี่ยนไปเมื่อโคจรมาอยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ กัน โดยเมื่อดวงอาทิตย์และดวงจันทร์เข้าใกล้โลกและโคจรอยู่ในแนวเดียวกันจะทำให้เกิดน้ำขึ้น และเมื่อแรงดึงดูดของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ทำมุม ๙๐ องศา เมื่อเปรียบเทียบกับโลก จะทำให้เกิดน้ำลง

การประเมินค่าพลังงานที่ได้จากพลังงานน้ำขึ้น-น้ำลง

การผลิตไฟฟ้าจากความสูงของระดับน้ำที่แตกต่างกันโดยอาศัยลักษณะธรรมชาติของชายฝั่ง พบว่าบริเวณที่เหมาะสมในการพัฒนาระบบพลังงานน้ำขึ้น-น้ำลง^{๕๘} คือ

- ลักษณะของภูมิประเทศที่เหมาะสมกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการขึ้นและลงของน้ำทะเลนั้น จะอยู่ที่แนวเส้นรุ้งที่ ๕๐-๖๐ องศา
- ลักษณะของชายฝั่งทะเลบริเวณปากอ่าว ควรมีความลาดชันสูงเพื่อสามารถสร้างเป็นอ่างเก็บน้ำได้
- ความแตกต่างของระดับน้ำขึ้น-น้ำลง มีค่า ๕-๑๑ เมตร
- พื้นที่ของอ่างเก็บน้ำประมาณ ๒๕ ตารางเมตร

จากข้อมูลของกรมอุทกศาสตร์ ใน พ.ศ. ๒๕๒๕-๒๕๓๖ สามารถสรุปเป็นข้อมูลของระดับน้ำขึ้น-น้ำลงสูงสุด และข้อมูลของระดับน้ำขึ้น-ลงต่ำสุดได้ดังตารางที่ ๘

ตารางที่ ๘ ความแตกต่างของระดับน้ำขึ้น-น้ำลงของทะเล

ช่วงเวลา	ความแตกต่างของระดับน้ำขึ้น-น้ำลง สูงสุด		ความแตกต่างของระดับน้ำขึ้น-น้ำลง ต่ำสุด	
	สถานที่	ความแตกต่าง (เมตร)	สถานที่	ความแตกต่าง (เมตร)
อ่าวไทย	มีนาคม - เมษายน	มหาชัย ๒.๕๘	สงขลา	๐.๘๔
	พฤษภาคม - กันยายน	มหาชัย ๒.๗๖	สงขลา	๐.๘๕
	พฤศจิกายน- กุมภาพันธ์	หัวหิน ๒.๗๔	สงขลา	๑.๐๒
ทะเลอันดามัน	มีนาคม - เมษายน	เกาะตะพานน้อย ๒.๙๗	ทับละมุ	๒.๗๗
	พฤษภาคม - กันยายน	เกาะตะรุเตา ๒.๙๑	ทับละมุ	๒.๖๕
	พฤศจิกายน- กุมภาพันธ์	เกาะตะรุเตา ๒.๙๓	เกาะตะพานน้อย	๒.๔๑

ที่มา : โครงการศึกษาเบื้องต้นศักยภาพและความเหมาะสมในการพัฒนาพลังงานจากทะเล^{๕๙}



เมื่อพิจารณาข้อมูลระดับน้ำขึ้น-น้ำลง จะเห็นได้ว่าค่าความแตกต่างของระดับน้ำขึ้น-น้ำลง ยังไม่อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยค่าของความแตกต่างของระดับน้ำขึ้น-น้ำลง ทั้งในบริเวณอ่าวไทย และฝั่งทะเลอันดามันนั้นอยู่ในเกณฑ์ต่ำและสภาพภูมิประเทศของไทย ในบริเวณปากแม่น้ำจะมีลักษณะราบเรียบ ไม่เอื้ออำนวยในการสร้างอ่างเก็บน้ำได้ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าประเทศไทยไม่มีศักยภาพเพียงพอในการพัฒนาระบบพลังงานน้ำขึ้น-น้ำลง

๕.๓ พลังงานจากคลื่น

คลื่น เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติในทะเลที่เกิดขึ้นตลอดเวลา โดยคลื่นเกิดจากลมที่พัดผ่านผิวมหาสมุทรและทะเล ขนาดของคลื่นจะใหญ่หรือเล็ก จะขึ้นอยู่กับความเร็วลม และระยะทางของลมที่พัดผ่านเหนือผิวน้ำ

การประเมินค่าพลังงานที่ได้จากพลังงานคลื่นทะเล

เทคโนโลยีการแปลงพลังงานจากคลื่นทะเลเพื่อผลิตพลังงานนั้น ใช้หลักการแปลงพลังงานจลน์ (kinetic energy) ของคลื่นทะเลเพื่อผลิตพลังงาน^{๔๔}

พลังงานที่อยู่ในคลื่นทะเลจะประกอบไปด้วยพลังงาน ๒ ส่วน ได้แก่ พลังงานศักย์ และพลังงานจลน์ พลังงานศักย์จะเป็นพลังงานเกี่ยวข้องกับรูปแบบของคลื่น หรือความสูงของคลื่น ส่วนพลังงานจลน์จะเป็นพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของคลื่น หรือความเร็วของน้ำทะเลที่ประกอบกันเป็นคลื่น

จากข้อมูลของกรมอุทกศาสตร์ใน พ.ศ. ๒๕๒๕-๒๕๓๖ สามารถสรุปเป็นข้อมูลของระดับความสูงของคลื่น และคาบคลื่นของฝั่งอ่าวไทย และฝั่งทะเลอันดามันได้ดังตารางที่ ๔

ตารางที่ ๔ ระดับความสูงของคลื่นและคาบคลื่น

ช่วงเวลา	ความสูงคลื่น (เมตร)	คาบคลื่น (วินาที)
อ่าวไทย		
มีนาคม - เมษายน	๐.๑ - ๐.๗	๒-๔
พฤษภาคม - กันยายน	๐.๑ - ๑.๒	๒-๖
พฤศจิกายน - กุมภาพันธ์	๐.๑ - ๑.๗	๒-๖
ทะเลอันดามัน		
พฤษภาคม - กันยายน	๐.๑ - ๐.๓	๒-๕
พฤศจิกายน - กุมภาพันธ์	๐.๕ - ๔.๕	๔-๗

ที่มา : โครงการศึกษาเบื้องต้นศักยภาพและความเหมาะสมในการพัฒนาพลังงานจากทะเล^{๔๕}

จากการพิจารณาความสูงของคลื่นและคาบคลื่น รวมถึงเทคโนโลยีที่จะนำมาผลิตพลังงานจากคลื่น โดยฝั่งอ่าวไทยมีความสูงของคลื่นไม่เกิน ๒ เมตร และฝั่งทะเลอันดามันมีความสูงของคลื่นไม่เกิน ๕ เมตร ซึ่งไม่เพียงพอแก่การนำมาใช้ประโยชน์ และจากสภาพของเทคโนโลยีในการนำพลังงานคลื่นมาผลิตเป็นไฟฟ้า ยังไม่มีเทคโนโลยี

ที่รองรับการผลิตพลังงานจากความสูงคลื่นเพียง ๒-๕ เมตร

สรุป

ด้านพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่ามีการทำงานวิจัยด้านนี้มาเป็นเวลานาน แต่มีข้อจำกัดของการใช้งาน เนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำและความไม่แน่นอน ความไม่สม่ำเสมอของพลังงานหมุนเวียน

ที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้น ควรมีวิจัยด้านเพิ่มประสิทธิภาพ สมรรถนะการใช้งานได้อย่างสม่ำเสมอและหาแนวทางลดต้นทุนของระบบ/อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ควรมีงานวิจัยทั้งทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ เพื่อขยายโอกาสที่จะพัฒนาอุปกรณ์และการประยุกต์ใช้งานใหม่ ๆ ต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสมให้ได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น



โดยเฉพาะเงื่อนไขที่เหมาะสมและความคุ้มค่าของการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้ ควรมีงานวิจัยเชิงนโยบายและมาตรการต่าง ๆ ของประเทศที่ประสบความสำเร็จในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เช่น มาตรการภาษีสิ่งแวดล้อมด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะภาษีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ด้านไฟฟ้าพลังน้ำ พบว่า การสร้างเขื่อนขนาดใหญ่เป็นไปได้ยาก ควรเน้นพลังน้ำขนาดเล็ก นอกจากนี้ ควรมีงานวิจัยเชิงนโยบายในความร่วมมือกับประเทศเพื่อนบ้าน

ด้านพลังงานลม พบว่า ข้อมูลด้านความเร็วลมที่ระดับความสูงมากกว่า ๕๐ เมตรจากพื้นดินยังไม่มี ดังนั้น จึงควรสนับสนุนให้มีการศึกษาที่ระดับความสูงนี้ รวมถึงการศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ สำหรับการติดตั้งกังหันลมในพื้นที่ที่มีความเร็วลมสูง รวมทั้งหาแนวทางลดต้นทุนของระบบ/อุปกรณ์ นอกจากนี้ ควรมีงานวิจัยเชิงนโยบายด้านมาตรการจูงใจและส่งเสริมการผลิตและติดตั้งกังหันเพื่อการสูบน้ำและเพื่อการผลิตไฟฟ้า

พลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทยมีศักยภาพต่ำ ส่วนพลังงานจากมหาสมุทรไม่น่าจะมีศักยภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

๑. นිරนาม ๒๕๔๑ สถานภาพปัจจุบันและข้อเสนอสู่ออนาคต ด้านเชื้อเพลิงและเทคโนโลยีเชื้อเพลิง หน้า ๔.
๒. เสริม จันทร์ถาย และจรงค์แสง ลักษณะปัญหาแผนที่ยกยอภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลความเทียบสำหรับประเทศไทย, กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานร่วมกับภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, หน้า ๘๒-๘๕.
๓. รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย ๒๕๔๖, กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
๔. <http://www.nepo.go.th/vrs/VRS44-07-Solar.html>, 2001
๕. <http://www.egat.or.th/rdo/energy/phuket.html>, 2005.
๖. <http://www.egat.co.th/information/powerplant/solarcell.htm>, 2005.
๗. คณะทำงานพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบร้อน, ๒๕๔๐, รายงานการประชุมคณะทำงานพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบร้อน, คณะอนุกรรมการประสานงานการวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, หน้า ๒-๔.
๘. สุรสิทธิ์ ประสารปราน, ๒๕๓๐, ระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ที่มีตัวรับรังสีแบบฮีทไปป์-เรซอร์มัลโคโคด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
๙. สุกนธ์ อางฤทธิ์, ๒๕๒๔, ด้วรับแสงอาทิตย์แผ่นราบแบบพื้นผิวโค้งสะท้อนแสง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๕๓ หน้า.
๑๐. ประวิทย์ ถัดแก้ว, ๒๕๒๕, สมรรถภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ที่ใช้ชุดรับรังสีแผ่นราบกระจง ๒ ชั้น, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๑๐๔ หน้า.
๑๑. สมนึก บุญยาศาสตร์พันธ์ุ, ๒๕๒๗, ระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิสูงด้วยตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ, วิทยานิพนธ์ปริญญา

๑๒. สุขฤดี สุขใจ, ๒๕๓๕, สมรรถนะของเครื่องอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยแสงอาทิตย์แบบหมุนเวียนและแบบต่อเนื่อง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๑๕๔ หน้า.
๑๓. วรวิทย์ รุ่งจิรวรรณ, ๒๕๓๘, การศึกษาระบบอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยแสงอาทิตย์ขนาดอุตสาหกรรม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๑๕๔ หน้า.
๑๔. ด้วรูณี คุญฎี, ๒๕๓๔, การพัฒนาระบบอบแห้งผลไม้โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานเสริม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๑๐๗ หน้า.
๑๕. พงมา วงษ์ศิริ, ๒๕๒๘, การอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารโดยใช้เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบมีตัวรับรังสี, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๑๑๖ หน้า.
๑๖. อานนท์ โพธิ์หอม, ๒๕๒๐, เครื่องกลั่นน้ำด้วยแสงอาทิตย์, โครงการปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๕๘ หน้า.
๑๗. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, ๒๕๒๓, การศึกษาเครื่องกลั่นน้ำแสงอาทิตย์แบบบริเวณเมรภี, วารสารวิจัยและพัฒนา สจร., ฉบับที่ ๔, เล่มที่ ๒, หน้า ๑-๘.
๑๘. ศิริชัย เทพ, ๒๕๒๒, เครื่องกลั่นน้ำผิวดังฝากรอบอคริลิก, วารสารวิจัยและพัฒนา สจร., ฉบับที่ ๑๒, เล่มที่ ๑, หน้า ๑๖-๓๕.
๑๙. อานนท์ โพธิ์หอม, ๒๕๒๑, เครื่องกลั่นน้ำด้วยแสงอาทิตย์แบบขุ่ยถัษี, Seminar on Solar Energy and Applications, Technological Promotion Association (Thai-Japan) and King Mongkui's Institute of Technology, Thailand, หน้า ๑.



๒๐. สมชาย โสภณศิริกุล, ๒๕๔๑. การปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องกลั่นน้ำ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๑๐๘ หน้า.
๒๑. มานะ กงคีจันทร์, ๒๕๓๔. การกลั่นเอธานอลจากวัตถุดิบการเกษตรโดยพลังงานแสงอาทิตย์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๑๑๐ หน้า.
๒๒. จีรศักดิ์ จิระวาริ และวีระชัย แก่นทรัพย์, ๒๕๒๓. การกลั่นแอลกอฮอล์ด้วยตัวรับรังสีแผ่นราบ, โครงการปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๔๔ หน้า.
๒๓. อนุรักษ์, ๒๕๔๔. การศึกษาความเป็นไปได้ในการกลั่นเอธานอลด้วยพลังงานแสงอาทิตย์, เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องศักยภาพของประเทศไทยในการผลิตเอธานอลเพื่อทดแทนการนำเข้า, กลุ่มงานเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร กองโครงการและประสานงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, หน้า E-1-E-6.
๒๔. ทวีศักดิ์ ศรีภูสิตโต และคณะ, ๒๕๓๑. Solar Adsorption Refrigeration, โครงการปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๑๕ หน้า.
๒๕. พิทยา กิ่งชม และคณะ, ๒๕๓๒. การศึกษาเครื่องทำความเย็นแบบดูดกลืน, โครงการปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๖๖ หน้า.
๒๖. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, ๒๕๓๕. การศึกษาสมรรถนะของระบบทำความเย็นแสงอาทิตย์ที่ใช้ถ่านกัมมันต์-เมธานอลเป็นสารทำงาน, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ฉบับที่ ๓, เล่มที่ ๑, หน้า ๖๑-๖๕.
๒๗. Boonbumroong, U., et al., Suwannakum, T., Pongchawee, D., Pengma, S., Kitikara, K., and Sripadungtum, P., 2004. Parametric Study of a PV/Wind/Diesel Hybrid System for Kohjikh Island, 14th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 26-30 January, Chulalongkorn University, Bangkok, pp.841, 842.
๒๘. Somsak, T., Boonbumroong, U., Tanchareon, S., Jeenkaokam, N., and Jivacate, C., 2004. PV-Diesel Stand Alone Hybrid System at Royal Project Research Station : Observations on Power Quality, 14th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 26-30 January, Chulalongkorn University, Bangkok, pp.843, 846.
๒๙. Thianphu, A., 2004, Management of PV Water Pumping system, 14th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 26-30 January, Chulalongkorn University, Bangkok, pp.889, 890.
๓๐. Sangpanich, U., Thongpron, J., Kitikara, K., and Jivacate, C., 2004, Power Quality of Four Rooftop Grid-Connected Photovoltaic System in Thailand, 14th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 26-30 January, Chulalongkorn University, Bangkok, pp.139, 140.
๓๑. Buranasajja, S. and Seingsanor, S., 2004, Photovoltaic Battery Charging System in Thailand : a Case Study of Ban Bon Khao Kangriang, 14th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 26-30 January, Chulalongkorn University, Bangkok, pp.945, 946.
๓๒. คณะอนุกรรมการส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน, ๒๕๔๔. เอกสารประกอบการประชุม เรื่องแผนพัฒนาพลังงานหมุนเวียนในช่วงปี ๒๕๔๕-๒๕๔๙. สำนักงานคณะกรรมการนโยบายแห่งชาติ.
๓๓. รายงานไฟฟ้าของประเทศไทย ๒๕๔๖. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
๓๔. รายงานการใช้พลังงานของประเทศไทย ๒๕๔๖. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
๓๕. แผนปฏิบัติการเทคโนโลยีไฟฟ้าพลังงานขนาดเล็ก ๕ ปี (๒๕๔๕-๒๕๔๙) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
๓๖. ทวีป ชัยสมภพ และจักริ คุปต์อักษรปัญญา, ๒๕๔๖. "การประเมินเชิงเทคโนโลยีของโครงการพัฒนาพลังงานขนาดเล็กในประเทศที่กำลังพัฒนาและในประเทศที่พัฒนาแล้ว". การสัมมนาเผยแพร่ผลงานวิจัยด้านพลังงานทดแทน, วันที่ ๒๕ กันยายน ๒๕๔๖, โรงแรมรามการ์เด้นส์, หน้า ๑๓๘-๑๔๗.
๓๗. ณะ บุญญศิริกุล, ๒๕๔๔. "การออกแบบนโยบายจัดสรรน้ำเพื่อประโยชน์สูงสุดในการจัดการอ่างเก็บน้ำ", การประชุมสัมมนาวิชาการและนิทรรศการด้านพลังงาน, ครั้งที่ ๑, วันที่ ๖-๗ กุมภาพันธ์ ๒๕๔๔, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, หน้า ๓-๑๓, ๓-๑๕.
๓๘. กรมพัฒนาส่งเสริมพลังงาน, ๒๕๔๔. เอกสารโครงการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย.
๓๙. คณะทำงานพลังงานลม, ๒๕๔๑. นโยบายแผนและแนวทางการวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน : พลังงานลม, คณะอนุกรรมการประสานงานการวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ๑๕ หน้า.
๔๐. อองอาจ คงฤทธิ์ และคณะ, ๒๕๒๕. การนำอุโมงค์มาทดสอบกังหันลม ๘ ใบ, โครงการปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๔๒ หน้า.
๔๑. ประจัญ เพชรไวคุณฐ์, ๒๕๓๐. การศึกษาความเค้นในใบของกังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๑๓๕ หน้า.
๔๒. สมชาย ชูชีพกุล, ๒๕๓๑. แบบจำลองไฟไนท์เอลเมนต์ของใบพัดกังหันลมแบบคาร์เรียส, "วารสารวิจัยและพัฒนา สจร.", ฉบับที่ ๑๓, เล่มที่ ๒, หน้า ๑-๑๖.
๔๓. สุกฤษณ์ โรจนวิไลกุล สุทธิชัย ศิริพรอดุลศิลป์ และเอกภพ จันทร์ศุภมงคล, ๒๕๔๒. การศึกษา Laminar Separation Bubble บนใบพัดของกังหันลม, โครงการปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๑๕๑ หน้า.
๔๔. เกียรติศักดิ์ ชุนไชย, ๒๕๒๗. ระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมแบบโจโร-โรเตอร์ (ระยะ ๒), วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบัน



- เทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี, ๑๕๒ หน้า.
๔๕. มนชัย เหลืองวัฒนวิไล และคณะ, ๒๕๓๔. กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าแบบดาร์เรียม. โครงการปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ๕๔ หน้า.
๔๖. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ และประภาย ไพธูวรรณ, ๒๕๓๕. การพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานลม. พลังงานลม เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า ไฟฟ้ารถยนต์ Electric generators, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๒๐ เล่ม ๓, หน้า ๓๘๖-๓๙๑.
๔๗. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ และประภาย ไพธูวรรณ, ๒๕๔๑. "ระบบผลิตและสำรองกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานลม", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ ๑๔, ฉบับที่ ๑, หน้า ๑-๘.
๔๘. กองพัฒนาพลังงานทดแทน, สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิต, ๒๕๔๒. การผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม. "วารสารประสิทธิภาพพลังงาน", ฉบับที่ ๔๖, หน้า ๓๓-๓๔.
๔๙. กองพัฒนาพลังงานทดแทน, ๒๕๔๒. "พลังงานความร้อนใต้พิภพ", พลังงานความร้อนใต้พิภพ, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
๕๐. <http://www.dmr.go.th/HOTSPING/THAIHOTSP.htm>, 2002.
๕๑. http://www.egat.or.th/rdo/energy/gerothermal_plant.htm, 2002.
๕๒. มานพ รักษาสกุลวงศ์และศิริพร สูงปานเขา, ๒๕๔๕. "พลังงานความร้อนใต้พิภพ", ข่าวสารธรณี, ปีที่ ๔๗, ฉบับที่ ๒, หน้า ๔๑-๔๕.
๕๓. http://www.nrel.gov/clean_energy/ocean.html, 2005
๕๔. สุรัชย์ ประเสริฐวิทย์, ๒๕๔๐. "พลังงานความร้อนจากมหาสมุทร...สำคัญที่ผลพลอยได้", วารสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิต, ปีที่ ๖, เล่มที่ ๓, หน้า ๓๘-๔๔.
๕๕. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ๒๕๔๑. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาเบื้องต้น ศักยภาพและความเหมาะสมในการพัฒนาพลังงานจากทะเล, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ๖๒ หน้า.
๕๖. มนุวดี หังสพฤกษ์, ๒๕๔๓. "สมุทรศาสตร์กายภาพของอ่าวไทย", วารสารราชบัณฑิตยสถาน, ปีที่ ๒๕, หน้า ๑๖๘-๑๗๕.
๕๗. ประวิทย์ นิตะแก้ว, ๒๕๒๒. "พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง", พลังงาน, หน้า ๒๕๓-๒๖๑.

Abstract

Status and Research Trends on Renewable Energy in Thailand
 Warunee Tia
 Pimporn Jangploy
 Kangsadan Sakumpongmalee
 Somchart Soponronmarit
 Fellow of the Academy of Science, The Royal Institute, Thailand

The development and expansion of the utilization on renewable energy are the sustainable way of energy development of oil imported country as Thailand. Thus this paper presents the potential status and research trends on renewable energy in Thailand, namely solar, wind, small hydro, geothermal, and ocean energy, except biomass which had already been reported in our previous publication. The main limitations of using renewable energy were unreliable of resource and inefficient conversion. These appeared to be perceived poor economics of renewable energy compared to commercial energy. The research on system-efficiency and reliability improvement, cost reduction, and policy research such as pricing structure of fuel with environmental taxes should be conducted.

Key words : research trend, solar energy, wind energy, small-hydro power, geothermal energy, ocean energy, Thailand



อิทธิพลของชนิดตัวกลางในการ อบแห้งที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการ ลดความชื้นและคุณภาพของเนื้อวัว

ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์^๑
ศิริวัฒน์ ตันประเสริฐ^๒
สมเกียรติ ปรัชญาวารการ^๓
สมชาติ โสภณวรรณฤทธิ์^๔
ราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์
ราชบัณฑิตยสถาน

บทคัดย่อ

วิธีการอบแห้งมีผลกระทบต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งและคุณภาพของอาหาร เพื่อให้ได้คุณภาพเนื้ออบแห้งตามที่ต้องการสำหรับเป็นของกินเล่น จึงได้มีการศึกษาการอบแห้งขั้นตอนเดียวด้วยไอน้ำร้อน ชวดิ่งและอากาศร้อน และการอบแห้ง ๒ ขั้นตอน เพื่อศึกษาผลของวิธีการอบแห้งดังกล่าวที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งและคุณภาพของเนื้อวัวแผ่นที่มีการหั่นชิ้นตัวอย่างแบบตัดขวางและตัดตามเส้นใยกล้ามเนื้อ เจื่อนโซการทดลองมีดังนี้ ๑) อบแห้งเนื้อวัวที่มีความชื้นเริ่มต้น ๒๔๔-๒๕๕% dry basis (d.b.) จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเท่ากับ ๑๑% d.b. อุณหภูมิของไอน้ำร้อนชวดิ่งและอากาศร้อนที่ใช้อยู่ในช่วง ๑๓๐-๑๕๐ องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง สามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ขณะที่คุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงของตัวแปร L, a และ b การหดตัว การคินตัว และความแข็ง มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อพิจารณาชนิดของตัวกลางในการอบแห้ง พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชวดิ่งจะมีค่าสูงกว่ากรณีอบแห้งด้วยอากาศร้อน และสีของเนื้อวัวหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชวดิ่งมีความสม่ำเสมอกว่า การหดตัวมากกว่า ส่วนการคินตัวและความแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อพิจารณาการเรียงของเส้นใยกล้ามเนื้อ พบว่าไม่มีผลต่ออัตราการแพร่ของน้ำไม่ว่าจะอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชวดิ่งหรืออากาศร้อน และเมื่อเปรียบเทียบคุณภาพด้านต่างๆ พบว่าการเรียงของเส้นใยกล้ามเนื้อให้คุณภาพด้านสีแตกต่างกันเล็กน้อย เนื้อวัวแบบตัดขวางเส้นใยมีความแข็งมากกว่าและหดตัวน้อยกว่าแบบตัดตามเส้นใยอยู่เล็กน้อย เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียว คุณภาพของเนื้อวัวที่ผ่านการอบแห้งแบบ ๒ ขั้นตอนให้คุณภาพสีของเนื้อวัวหลังการอบแห้งมีสีน้ำตาลอ่อนกว่า การคินตัวสูงขึ้น และความแข็งลดลง

คำสำคัญ : ความแข็ง, คุณภาพ, การหดตัว, ไอน้ำร้อนชวดิ่ง, เส้นใยกล้ามเนื้อ, เนื้อวัวแบบตัดขวางเส้นใย

- ^๑ อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สยามจันทร์ นครปฐม
- ^๒ นิสิตปริญญาโท คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ
- ^๓ รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ
- ^๔ ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ



๑. บทนำ

การถนอมอาหารโดยวิธีการทำให้อุณหภูมิเย็นหรือแช่แข็งเป็นวิธีที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถรักษาคุณภาพอาหารได้เป็นเวลานาน การอบแห้งมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน เช่น วิธีการอบแห้งโดยวิธีตากแห้งเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดพลังงาน แต่ใช้เวลาในการอบแห้งนาน การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทำได้ยากเนื่องจากขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติ สำหรับการอบแห้งโดยการเป่าอากาศผ่านวัสดุขึ้น ซึ่งในกรณีนี้พื้นที่ในการอบแห้งอยู่ในขอบเขตจำกัด การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์สามารถทำได้ง่ายและให้คุณภาพในด้านความสะอาดมากกว่า

เนื้อวัวเป็นเนื้อสัตว์ชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาบริโภคกันอย่างกว้างขวาง และเป็นแหล่งอาหารที่มีปริมาณโปรตีนสูง การแปรรูปเนื้อสัตว์เพื่อให้สามารถเก็บรักษาคุณค่าทางอาหารไว้ได้นาน และการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ก็ได้หลายวิธี เช่น การตากแห้งโดยใช้แสงแดดซึ่งต้องใช้ระยะเวลาค่อนข้างมาก เนื่องจากการระเหยของน้ำจากเนื้อเยื่อของสัตว์ทำได้ยากกว่าระเหยน้ำจากเซลล์พืช และยังมีปัญหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากฝุ่นและแมลง การแปรรูปอาหารจึงมักจะใช้เครื่องอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งสามารถทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง แต่เมื่อใช้อุณหภูมิของอากาศร้อนสูงเกินไป จะทำให้คุณภาพและคุณค่าทางอาหาร

ของเนื้อสัตว์สูญเสียไป เช่น สีของเนื้อสัตว์อาจเปลี่ยนแปลงจนไม่น่ารับประทาน การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง ซึ่งสามารถจะอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว ข้อดีของการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการอบแห้งคือ ลดปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชัน เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีดีขึ้น อัตราการอบแห้งสูง รวมถึงเป็นกระบวนการทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารปลอดภัยจากจุลินทรีย์ต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษได้ อย่างไรก็ตาม การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งก็ยังมีข้อจำกัดบางประการเนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงจึงมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ทนต่อความร้อนเกิดการเสียหายได้

ในช่วงระยะทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งกันอย่างมากมาย ซึ่งจากการศึกษาทางด้านจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งให้ผลที่ได้คล้ายคลึงกัน^{๑, ๒, ๓} ในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้จากตัวกลางของการอบแห้งทั้งสอง โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ เช่น มันฝรั่ง การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีการหดตัว ความหนาแน่นสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน แต่ให้ความเป็นรูปทรงลดต่ำลง หรือกล่าวอีกนัยคือ เนื้อผิวของผลิตภัณฑ์มีความเรียบสม่ำเสมอว่าการอบด้วยลมร้อน ซึ่งเป็นผลอันเนื่องจากการเกิดเจลาทีไนซ์ของสตาร์ช^{๒, ๔, ๕} ในการอบแห้งข้าวเปลือก

พบว่า ปริมาณต้นข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง สาเหตุจากกระบวนการเจลาทีไนเซชันในเมล็ดข้าวทำให้ข้าวเกิดความแข็งเพิ่มขึ้น ทนต่อการขัดสี จึงทำให้ปริมาณต้นข้าวสูงกว่าการอบด้วยลมร้อน^๖ ส่วนในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ ทำให้คุณภาพการหดตัวน้อยลงและมีสีของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น^๔ เมื่อใช้การอบแห้งด้วยไอน้ำแทนลมร้อน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการใช้ตัวกลางในการอบแห้งที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน อีกทั้งศึกษาผลของลักษณะการหันเนื้อวัวที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง และคุณภาพของเนื้อวัวหลังการอบแห้ง ที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยนี้ ได้แก่ สี การหดตัว การคืนตัว และความแข็ง

๒. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

๒.๑ การเตรียมวัสดุ

นำเนื้อสันนอก (sirloin) ของเนื้อวัวมาหั่นเป็นแผ่นที่มีขนาด ๓ x ๓ ตารางเซนติเมตร และหนา ๐.๓ เซนติเมตร ลักษณะการหันเนื้อวัวเป็นแบบตัดขวาง (transverse section) และตัดตามเส้นใยกล้ามเนื้อ (longitudinal section) จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปคลุกเกลือในอัตราส่วนร้อยละ ๒ โดยมวล ต่อมานำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ ๔ องศาเซลเซียส และนำตัวอย่างออกมาคลุกใหม่ทุก ๆ ๕ นาที เพื่อให้เกลือแทรกซึมเข้าไปในเนื้อวัวอย่างสม่ำเสมอ จนครบ ๒๐ นาที หลังจากคลุกเกลือ เนื้อ



วามีค่าความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงระหว่าง ๒๔.๕-๒๕.๕% d.b. ความชื้นของตัวอย่างหาได้โดยการอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ ๑๐๓ องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา ๗๒ ชั่วโมง

๒.๒ เครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งแบบถาดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางแสดงดังรูปที่ ๑ ประกอบด้วยห้องอบแห้งขนาด ๓๐×๓๐×๑๐ ลูกบาศก์เซนติเมตร อุปกรณ์ให้ความร้อนขนาด ๑๓.๕ กิโลวัตต์ โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID มีความถูกต้อง ± ๑ องศาเซลเซียส พัดลมเป็น

แบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง มีมอเตอร์ขนาด ๒.๒ กิโลวัตต์ สามารถปรับความเร็วรอบของพัดลมได้ เครื่องกำเนิดไอน้ำออกแบบความดันใช้งานสูงสุด ๓.๕ บาร์ สามารถผลิตไอน้ำได้ ๓๑ กิโลกรัมต่อชั่วโมง

๒.๓ วิธีการอบแห้งเนื้อวัว

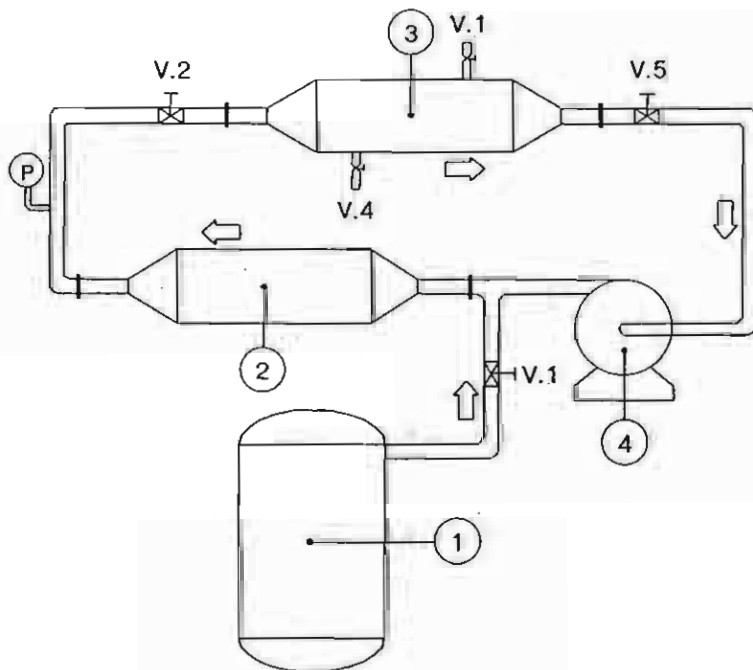
นำเนื้อวัวที่เตรียมไว้มาปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิห้องก่อนจะนำไปทดลองอบแห้ง ในการอบแห้งได้ใช้อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ ๑๓๐, ๑๔๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส และความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากับ ๒ เมตรต่อวินาที ความดันของระบบเหนือบรรยากาศเล็กน้อย ในการ

อบแห้งจะนำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง Sartorius CP-3202 ซึ่งมีค่าความถูกต้องของการอ่าน ± ๐.๐๑ กรัม ทุก ๆ ๕ นาที อบแห้งจนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ ๑๑% d.b. และเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ภาวะเดียวกัน จากนั้นนำเนื้อวัวที่ผ่านการอบแห้งมาปล่อยให้เย็นตัวลง แล้วจึงนำไปทดสอบคุณภาพต่อไป

สำหรับการอบแห้ง ๒ ขั้นตอน เริ่มจากนำเนื้อวัวที่เตรียมไว้นำมาอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือประมาณ ๔๓% d.b. จากนั้นนำมาอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ ๖๐ ที่ความเร็วลม ๐.๓ เมตรต่อวินาที จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายประมาณ ๑๑% d.b. แล้วจึงนำเนื้อวัวที่อบแห้งไปทดสอบคุณภาพต่าง ๆ ต่อไป

๒.๔ การทดสอบคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์

สีของเนื้อวัวอบแห้งวัดด้วยเครื่องวัดสีอาหาร MINOLTA รุ่น CR-400 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดซ้ำ (repeat quality) ของเครื่องวัดสีอยู่ที่ ΔE ๐.๐๗ สีของเนื้อวัววัดจากตัวแปร L, a และ b ซึ่งเป็นระบบ Hunter Lab Color Scale โดยค่า L (lightness parameter) แสดงค่าความสว่าง ส่วนค่า a (redness parameter) แสดงค่าสีแดง (+) และสีเขียว (-) และค่า b (yellowness parameter) แสดงค่าสีเหลือง (+) และสีน้ำเงิน (-) ในการทดสอบจะสุ่มตัวอย่าง ๘ ชิ้น โดย



รูปที่ ๑ ระบบเครื่องอบแห้งแบบไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน (๑) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (๒) อุปกรณ์ให้ความร้อน (๓) ห้องอบแห้ง (๔) พัดลม, V = วาล์ว, P = เกจวัดความดัน



ในแต่ละตัวอย่างจะทำการวัดซ้ำ ๓ ครั้ง
๒.๕ การทดสอบคุณภาพด้าน
การหดตัวของผลิตภัณฑ์

การหดตัวของเนื้อวุ้นหลัง
 การอบแห้งสามารถทราบได้โดยการ
 แทนที่ปริมาตรของเนื้อวุ้นในของเหลว

n-heptane [CH₃(CH₂)₅CH₃] การ
 หดตัวคำนวณจากสมการ(๑)**

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \quad (๑)$$

โดยที่ V₀, V คือ ปริมาตรของเนื้อวุ้นก่อนและหลังการอบแห้งตามลำดับ (ม^๓)

๒.๖ การทดสอบคุณภาพด้าน
การคืนตัวของผลิตภัณฑ์
 ค่าการคืนตัวของเนื้อวุ้นหลัง
 การอบแห้งเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปร
 หนึ่งที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิต-

ภัณฑ์หลังการอบแห้ง ถ้าค่าการคืนตัว
 ของผลิตภัณฑ์มีค่าสูง แสดงว่าคุณภาพ
 ของชิ้นตัวอย่างมีความเสียหายเนื่อง
 จากกระบวนการอบแห้งน้อย ในงาน
 วิจัยนี้การคืนตัวของเนื้อวุ้นอบแห้ง

สามารถทราบได้โดยการนำเนื้อวุ้นหลัง
 การอบแห้งไปแช่ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ
 ๙๐ ± ๑ องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา
 ๑๕ นาที จากนั้นนำมาคำนวณหาการ
 คืนตัวของเนื้อวุ้นได้ดังสมการที่ (๒)**

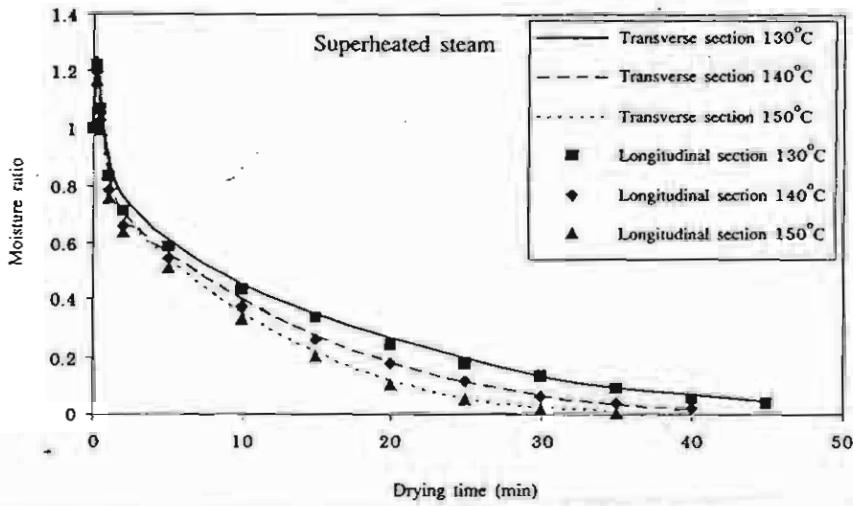
$$\% \text{ rehydration} = \frac{W_i - W_d}{W_d} \times 100 \quad (๒)$$

โดยที่ W_d, W_i คือ น้ำหนักของเนื้อวุ้นที่ทำการคืนตัวก่อนและหลังแช่น้ำร้อน ตามลำดับ, kg

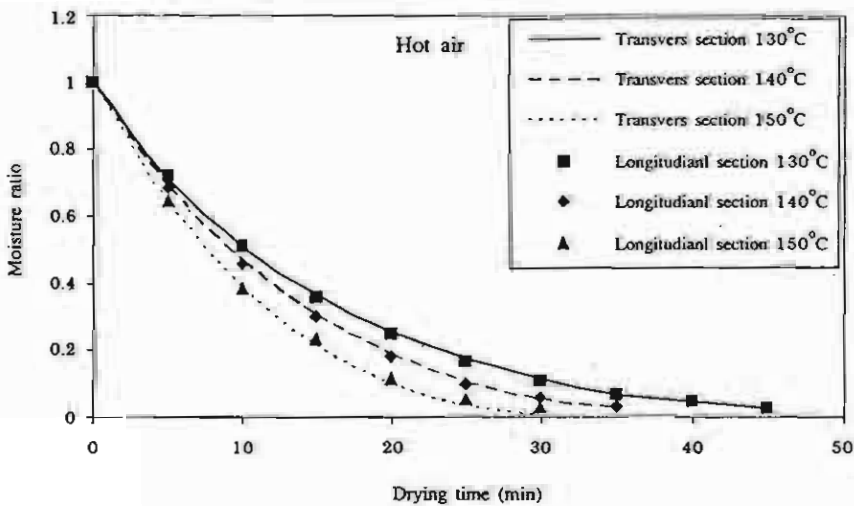
๒.๗ การทดสอบคุณภาพด้าน
เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์
 คุณภาพทางเนื้อสัมผัสของ
 เนื้อวุ้นหลังการอบแห้งสามารถทดสอบ
 ด้วยเครื่อง Texture Analyser รุ่น
 TA-XT ๒ โดยการนำชิ้นตัวอย่างมา
 ทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด
 หัวกดที่ใช้ทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ๒ มิลลิเมตร และความเร็วในการ
 กด ๑ มิลลิเมตรต่อวินาที โดยกดจน
 กระทั่งเนื้อวุ้นแตกออกจากกันแล้วจึง
 อ่านค่าสูงสุดซึ่งเป็นค่าความแข็งของ
 เนื้อวุ้น ในการทดสอบจะสุ่มตัวอย่างใน
 การกดตัวอย่างจำนวน ๙ ชิ้น

๓. ผลการทดลองและวิจารณ์
๓.๑ ผลของอุณหภูมิตัวกลาง
ต่ออัตราการลดความชื้น
 ผลการทดลองการอบแห้ง
 เนื้อวุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ
 ๑๓๐, ๑๔๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส
 มีแสดงในรูปที่ ๒ ซึ่งแสดงความชื้น
 ของเนื้อวุ้นในรูปของความชื้นไร้หน่วย
 จากกราฟพบว่าในช่วงแรกของการ
 อบแห้งเนื้อวุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
 จะเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่บริเวณ
 ผิวของเนื้อวุ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้
 จากช่วงที่ความชื้นของตัวอย่างเพิ่มขึ้น
 การเพิ่มขึ้นของความชื้นในผลิตภัณฑ์

ในทางปฏิบัติไม่เป็นที่ต้องการในกระ-
 บวนการอบแห้ง เพราะว่าจะเป็นการ
 เพิ่มระยะเวลาในการอบแห้งให้นานขึ้น
 สิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม
 การควบแน่นของไอน้ำมิใช่จะ
 ส่งผลในเชิงลบเพียงอย่างเดียว จาก
 รายงานการวิจัยต่าง ๆ พบว่าปรากฏ-
 การณ์ควบแน่นของไอน้ำในช่วงต้น
 ของการอบแห้งกลับมีผลดีต่อผลิต-
 ภัณฑ์บางประเภท เช่น ข้าว นั่นคือข้าว
 ที่ผ่านการกระบวนการอบแห้งด้วยวิธี
 นี้ให้ปริมาณข้าวตันที่สูงกว่าการอบ
 แห้งด้วยลมร้อนซึ่งเกิดจากเจลาตินใน-
 เซชัน**



รูปที่ ๒ เปรียบเทียบผลของการหันเนื้อวัวแบบตัดขวางเส้นใยกับตัดตามเส้นใยที่มีผลต่ออัตราการลดความชื้นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ ๓ เปรียบเทียบผลของการหันเนื้อวัวแบบตัดขวางเส้นใยกับตัดตามเส้นใยที่มีผลต่ออัตราการลดความชื้นของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปจะเห็นว่าในช่วงของการควบแน่น ความชื้นของชิ้นตัวอย่างเพิ่มขึ้นจาก ๑ เป็น ๑.๒ ความชื้นไร้หน่วย ช่วงของการเพิ่มความชื้นนั้นเป็นช่วงระยะเวลาสั้น ๆ จากนั้นจะเป็นช่วงของการลดความชื้นของชิ้นตัวอย่าง จากผลการทดลองที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งค่าต่าง ๆ พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของเนื้อวัวได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิตั้งระหว่างไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับผลิตภัณฑ์มีค่ามากกว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิต่ำในการอบแห้ง ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำไปยังผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่า ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ ๑๕๐ องศาเซลเซียสจะสั้นกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ ๑๓๐ และ ๑๔๐ องศาเซลเซียส สำหรับผลการอบแห้งด้วยอากาศร้อนดังแสดงในรูปที่ ๓ ให้ผลในทำนองเดียวกับกรณีการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง กล่าวคือ การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ สิ่งหนึ่งที่แตกต่างกันชัดเจนระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนคือในกรณีที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนไม่ปรากฏช่วงการเพิ่มขึ้นของความชื้น



๓.๒ ผลของลักษณะการหันเนื้อวัวต่ออัตราการอบแห้ง

นอกจากปัจจัยของอุณหภูมิ รูปที่ ๒ และรูปที่ ๓ ยังแสดงถึงผลของลักษณะของการหันเนื้อวัวระหว่างตัดขวาง กับตัดตามเส้นใยกล้ามเนื้อ โดยในกรณีตัดตามเส้นใยแสดงด้วยสัญลักษณ์ต่าง ๆ และตัดขวางแสดงด้วยรูปแบบเส้น จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าอัตราการลดความชื้นของเนื้อวัวที่หันแบบตัดขวางเส้นใยกับตัดตามเส้นใยนั้น มีค่าใกล้เคียงกันมาก จนเกือบจะทับเป็นเส้นเดียวกัน เนื่องจากเมื่อเนื้อวัวได้รับความร้อนทำให้เนื้อวัวเกิดการสูญเสียความสามารถในการจับน้ำ (water holding capacity, WHC) ทำให้น้ำอิสระ (free water) ซึ่งเป็นน้ำที่ถูกดึงดูดไว้ด้วยแรงดึงผิวถูกปลดปล่อยออกมาจากโปรตีนทั้งหลาย ไม่ว่าจะเป็นไมโอไฟบริลลาโปรตีน (myofibrillar protein) หรือจะเป็นโปรตีนเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue protein) ซึ่งในการเคลื่อนที่ของน้ำอิสระที่อยู่ตามโปรตีนต่าง ๆ จะถูกปลดปล่อยออกมาแล้วสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทุกทิศทางทุกทาง ไม่ว่าจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามยาวของเส้นใยกล้ามเนื้อ หรือจะเคลื่อนที่ออกตามแนวรัศมีของเส้นใยกล้ามเนื้อ ตามปกติแล้วซาร์โคเลมมา (sarcolemma) ซึ่งเป็นผนังของเส้นใยกล้ามเนื้อจะทำหน้าที่ในการปิดกั้นน้ำที่จะออกมาจากเส้นใยกล้ามเนื้อ แต่เมื่อถูกความร้อนซาร์โคเลมมาก็จะสูญเสียสถานภาพไป^{๑๔} ทำให้น้ำออกมาจากเส้นใยกล้ามเนื้อได้ทุกทิศทาง

ทาง ด้วยเหตุดังกล่าวจึงทำให้อัตราการอบแห้งของลักษณะการหันเนื้อวัวแบบตัดขวางเส้นใยกับตัดตามเส้นใยนั้นมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ จากข้อมูลการทดลองที่ได้พบว่าระยะเวลาในการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จนกระทั่งเนื้อวัวมีความชื้นประมาณ ๑๑% d.b. มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการอบแห้งเนื้อวัวที่หันแบบตัดขวางกับแบบตัดตามเส้นใย การอบแห้งที่อุณหภูมิ ๑๓๐, ๑๔๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งประมาณ ๔๓-๔๔, ๓๓-๓๔ และ ๒๕-๒๖ นาที ตามลำดับ

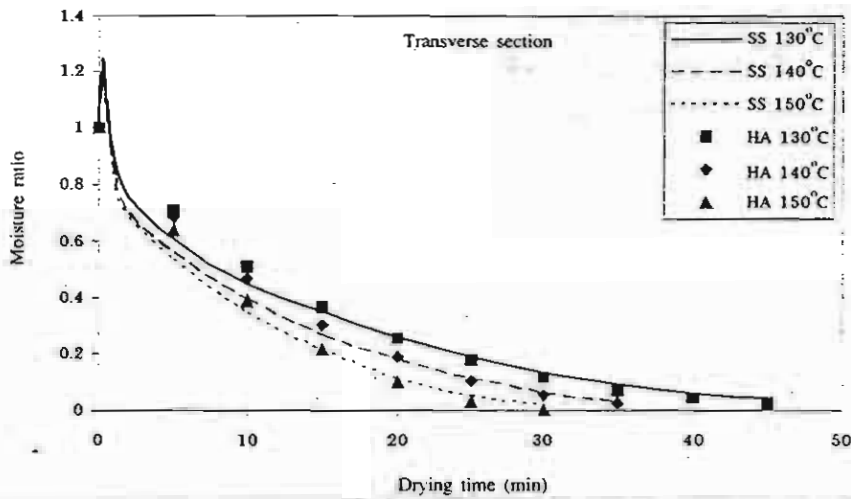
๓.๓ ผลของชนิดตัวกลางที่มีต่ออัตราการลดความชื้น

รูปที่ ๔ และรูปที่ ๕ แสดงถึงชนิดของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งที่มีต่ออัตราการลดความชื้น โดยกำหนดให้ผลการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำแสดงด้วยเส้นชนิดต่าง ๆ และการอบแห้งด้วยอากาศแสดงด้วยรูปสัญลักษณ์ จากผลการทดลองพบว่าในช่วง ๒-๓ นาทีแรกของการอบแห้ง ไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ทั้งในกรณีตัดตามและตัดขวางเส้นใยกล้ามเนื้อได้เร็วกว่าในกรณีของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนอย่างเห็นได้ชัด แต่หลังจากนั้นการอบแห้งด้วยอากาศร้อนสามารถลดความชื้นผลิตภัณฑ์ได้ค่อนข้างเร็วกว่าเล็กน้อย การที่ไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถลดความชื้นได้เร็วในช่วงแรกนี้อาจเนื่องมาจากสาเหตุที่อุณหภูมิของเนื้อวัวสูงขึ้น

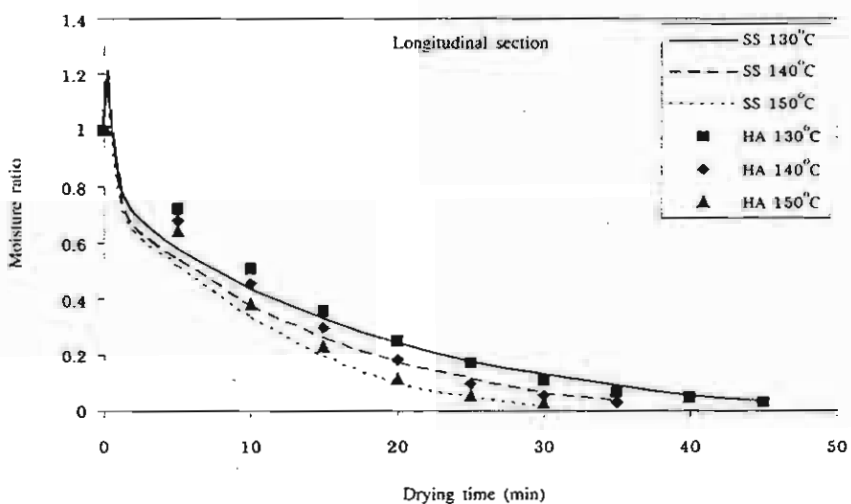
อย่างรวดเร็ว (ดังแสดงในรูปที่ ๖) เป็นผลให้การแพร่ของความชื้นเกิดขึ้นได้เร็วกว่าในกรณีของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้นตัวอย่างอบแห้งเกิดขึ้นช้ากว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตลอดช่วงของการอบแห้งกลับพบว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ตามที่ต้องการเร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งประมาณ ๒-๓ นาที ภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งที่เหมือนกัน ซึ่งในกรณีนี้อาจกล่าวได้ว่าระยะเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยไอน้ำร้อนและอากาศร้อนไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

๓.๔ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเนื้อวัวระหว่างการอบแห้ง

รูปที่ ๖ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการอบแห้งกับอุณหภูมิของเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ ๑๓๐, ๑๔๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส พบว่า ในช่วงแรกของการอบแห้ง ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการควบแน่นของไอน้ำนั้น อุณหภูมิของเนื้อวัวจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิประมาณ ๑๐๐ องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ ส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นในช่วงแรกของการอบแห้งนี้ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ ๔ และรูปที่ ๕ ตามลำดับ ต่อจากนั้นอุณหภูมิของเนื้อวัวจะคงตัวที่อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำช่วงระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นอุณหภูมิของเนื้อวัวจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้ง จนกระทั่ง



รูปที่ ๔ เปรียบเทียบผลของตัวกลางที่มีผลต่ออัตราการลดความชื้นของเนื้อวัวแบบตัดขวาง เส้นใยที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ ๕ เปรียบเทียบผลของตัวกลางที่มีผลต่ออัตราการลดความชื้นของเนื้อวัวแบบตัดตามเส้นใยที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิในเนื้อวัวมีอุณหภูมิเท่ากับ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการอบแห้ง ส่วนผลการทดลองการอบแห้งเนื้อวัวด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ

๑๓๐, ๑๔๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ ๗ พบว่า ในช่วงแรกของการอบแห้งนั้น อุณหภูมิของเนื้อวัวจะเพิ่มสูงขึ้นแต่ด้วยอัตราที่ช้ากว่า

การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ความแตกต่างดังกล่าวเป็นผลเนื่องจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่นของไอน้ำมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาของอากาศมาก จึงทำให้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเร็วกว่าในกรณีของไอน้ำร้อน อย่างไรก็ตาม ในตอนท้ายของการอบแห้งอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ของการอบแห้งด้วยตัวกลางทั้งสองไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

๓.๕ อัตราการอบแห้ง

จากผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ดังแสดงในรูปที่ ๒ และรูปที่ ๓ ตามลำดับ สามารถนำมาคำนวณหาอัตราการอบแห้งของเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ ๑๓๐, ๑๔๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ได้โดยนำค่าความชื้นที่ระยะเวลาอบแห้งต่าง ๆ มาฟิต (fit) กับสมการถดถอยที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นหาอนุพันธ์ของสมการดังกล่าวเทียบกับเวลา ก็จะสามารถทราบอัตราการอบแห้ง ณ ขณะใดขณะหนึ่งได้ ในการคำนวณหาอัตราการอบแห้งเริ่มจากจุดที่มีความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงสุดซึ่งเป็นจุดที่การควบแน่นของไอน้ำสิ้นสุดลง"

จากอัตราการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ ๑๓๐, ๑๔๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส ทั้งแบบตัดขวางเส้นใยและตัดตามเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ ๔ และรูปที่ ๕ ตามลำดับ พบว่า การอบแห้ง

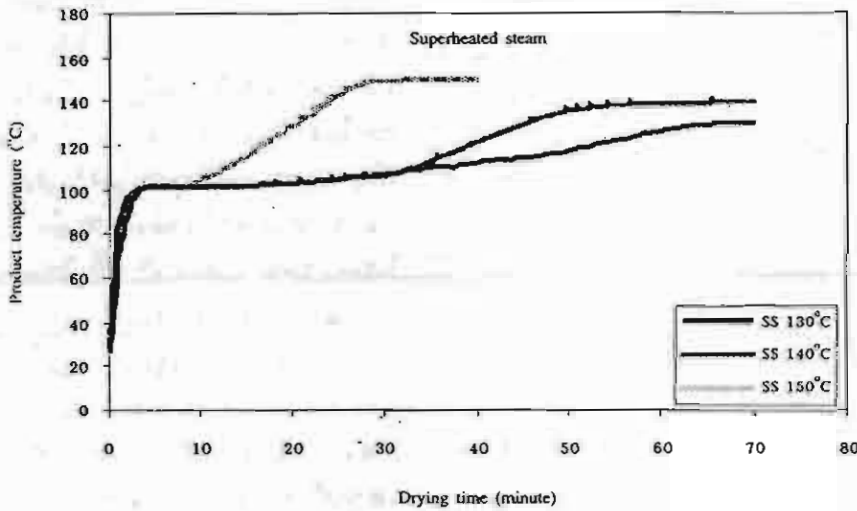


เนื้อวัวอยู่ในช่วงของการอบแห้งลดลงเพียงอย่างเดียว และการอบแห้งที่อุณหภูมิ ๑๕๐ องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณห-

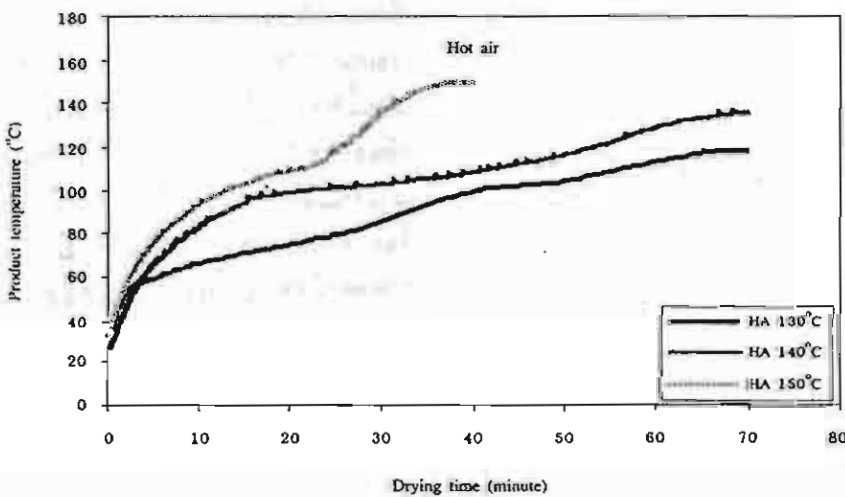
ภูมิ ๑๓๐ และ ๑๔๐ องศาเซลเซียสในทุก ๆ ช่วงของความชื้น อัตราการอบแห้งลดลงในลักษณะเชิงเส้นตรงตามปริมาณความชื้นของ

วัสดุที่ลดลงเกือบตลอดช่วงของการอบแห้ง ยกเว้นในช่วงต้นของการอบแห้งด้วยไอน้ำ ซึ่งตรงกับช่วงความชื้นที่สูงกว่า ๑๖๐ (%d.b.) การเปลี่ยนแปลงของอัตราการอบแห้งในช่วงความชื้นสูงดังกล่าวค่อนข้างไวต่อความชื้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากช่วงความชื้นดังกล่าวเป็นช่วงของระเหยความชื้นที่เกิดจากชั้นตัวอย่างดูดซับน้ำจากการควบแน่นของไอน้ำร้อนอย่างรวดเร็ว ปริมาณน้ำที่ดูดซับโดยวัสดุนั้นส่วนใหญ่อยู่บริเวณผิวของวัสดุซึ่งกำจัดได้ง่าย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของอัตราการอบแห้งกับความชื้นในช่วงดังกล่าวจึงไม่เป็นเชิงเส้นตรง

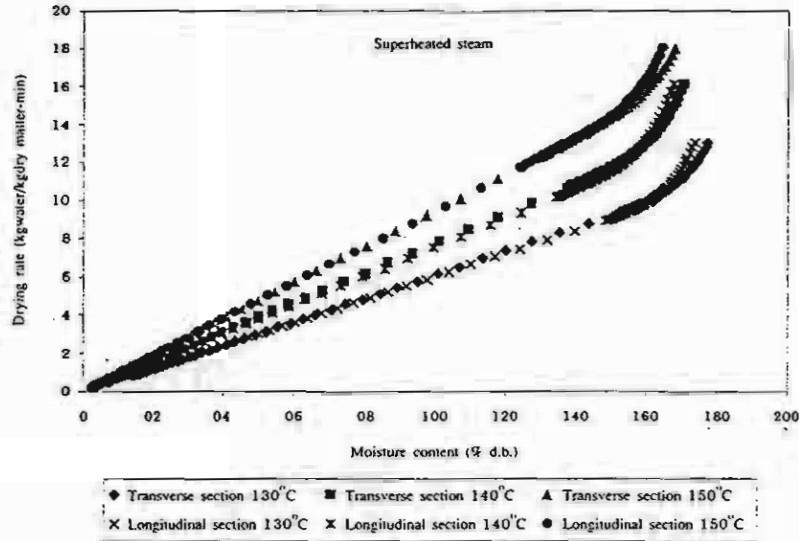
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของเส้นอัตราการอบแห้งกับความชื้นที่ได้จากการอบแห้งด้วยตัวกลางอบแห้งทั้งสองพบว่าลักษณะของเส้นกราฟของอัตราการอบแห้งสำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนอย่างรวดเร็วโดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายกัน ยกเว้นเฉพาะในช่วงแรกของการอบแห้ง ในกรณีของอากาศร้อนนั้นอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นในขณะที่มีการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ ช่วงที่เกิดขึ้นนี้สามารถเห็นได้ทั่วไปสำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของการอุ่นวัสดุให้ร้อนขึ้นและใช้เวลาประมาณ ๑ นาทีเศษ ดังนั้น อัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นนั้น เป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิของวัสดุที่สูงขึ้น นอกจากปัจจัยดังกล่าวแล้ว ในช่วงดังกล่าวความชื้นส่วนใหญ่อยู่ใกล้ผิวของวัสดุซึ่งกำจัดได้ง่ายสำหรับในกรณีของไอน้ำร้อนปรากฏว่า



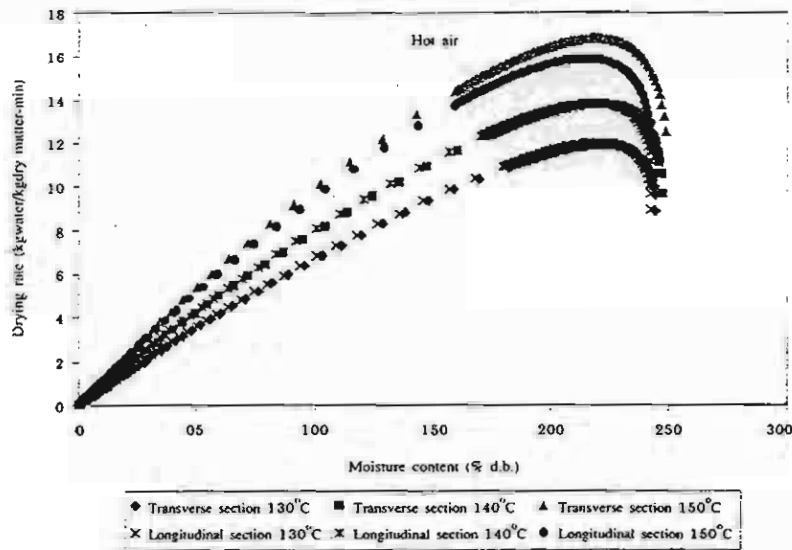
รูปที่ ๖ เปรียบเทียบระยะเวลาในการอบแห้งกับอุณหภูมิของเนื้อวัวที่ทำการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ ๗ เปรียบเทียบระยะเวลาในการอบแห้งกับอุณหภูมิของเนื้อวัวที่ทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ ๘ เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแบบตัดขวางเส้นใยกับตัดตามเส้นใยที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ไม่รวมช่วงที่เกิดการควบแน่น)



รูปที่ ๙ เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเนื้อวัวด้วยอากาศร้อนแบบตัดขวางเส้นใยกับตัดตามเส้นใยที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ไม่พบช่วงของการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากช่วงของการอุ่นวัสดุนั้นสั้นมาก ทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นถึงจุดเดือดอย่างรวดเร็ว

รวดเร็ว

๓.๖ สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

ผลการเปลี่ยนแปลงความ

ชื้นตามเวลาทั้งในกรณีของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ดังแสดงในรูปที่ ๒ และรูปที่ ๓ ตามลำดับ และอัตราการอบแห้งของเนื้อวัว



ที่ความชันต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ ๘ และ ๙ แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งอยู่ในช่วงของการอบแห้งลดลงเพียงอย่างเดียวและการอบแห้งในช่วงดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้ด้วยกฎข้อที่ ๒ ของ

ฟิค ในกรณีของการอบแห้งเนื้อวัวที่หันเป็นชั้นบาง ๆ นั้น การเคลื่อนที่ของความชื้นส่วนใหญ่เคลื่อนที่ตามความหนาของชั้นวัสดุ ดังนั้น เราสามารถประมาณได้ว่าการแพร่ของความชื้น

เกิดขึ้นในทิศทางเดียว สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความชื้นในกรณีนี้แสดงได้ด้วยสมการที่ (๓)^{๑๖}

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{1}{(2m+1)^2} \exp \left[-(2m+1)^2 \pi^2 \frac{Dt}{L^2} \right] \right) \quad (๓)$$

จากสมการดังกล่าว เราสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลได้เมื่อทราบอัตราส่วนความชื้นไว้หน่วยที่เวลาต่าง ๆ ภายใต้

เงื่อนไขของการอบแห้งที่อุณหภูมิคงที่อันหนึ่ง จากผลการทดลองที่ได้เป็นที่ทราบดีว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการอบแห้งก็จะเร็วขึ้น ความสัมพันธ์

ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสามารถอธิบายด้วยสมการของ Arrhenius คือ

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(\frac{-E_a}{RT} \right) \quad (๔)$$

โดยที่ค่าคงตัว D_0 และ E_a สามารถทราบได้โดยการใช้เทคนิคของสมการถดถอยแบบเชิงเส้นในการประมาณค่าคงตัวดังกล่าว ค่าคงตัวต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองในกรณีต่าง ๆ แสดงในตารางที่ ๑ การที่ค่าของ R^2 เข้าใกล้หนึ่งและ SSE มีค่าน้อยแสดงให้เห็นว่าสมการของ Arrhenius สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัม-

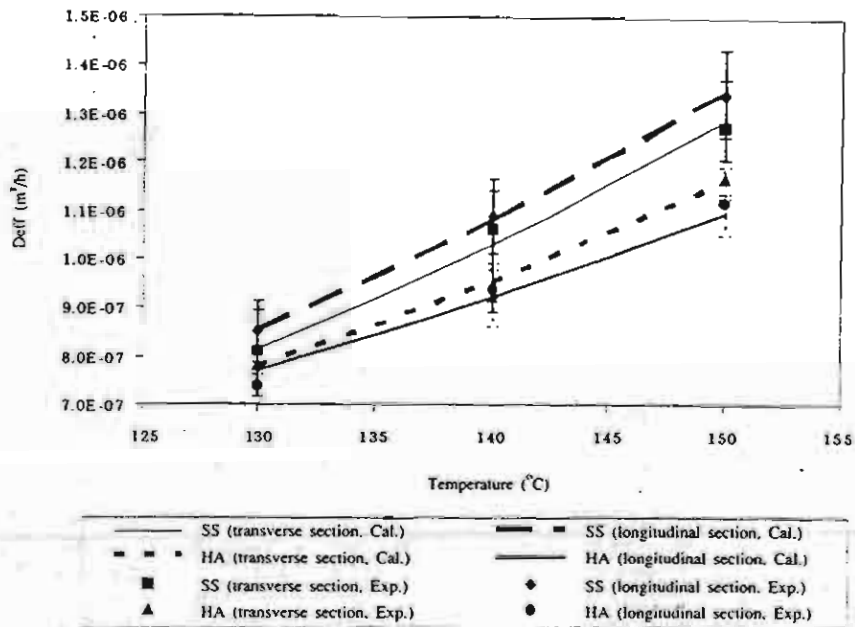
ประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิได้สอดคล้องกัน อนึ่งการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นภายในเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนี้ จะไม่รวมช่วงที่เกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของเนื้อวัว

รูปที่ ๑๐ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิในการอบแห้ง พบ

ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของความชื้นของเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสูงกว่าที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนตลอดช่วงของอุณหภูมิการอบแห้งที่ศึกษา แม้ว่าเวลาในการอบแห้งด้วยอากาศร้อนโดยรวมจะน้อยกว่าเวลาในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะช่วงแรกของการระเหยความชื้นของชิ้นตัวอย่างที่

ตารางที่ ๑ ค่าคงที่ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน

ควักกลางอบแห้ง	ลักษณะการหัน	D_0 ($\times 10^{-3}$ m ² /h)	E_a (kJ/kmol)	R^2 (%)	SSE
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	ตัดขวางเส้นโย	13.74	32613.15	99.59	0.01
	ตัดตามเส้นโย	12.96	32260.58	99.69	0.0076
อากาศร้อน	ตัดขวางเส้นโย	3.78	28446.75	97.54	0.0634
	ตัดตามเส้นโย	1.38	25104.82	97.72	0.0584



รูปที่ ๑๐ เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้น จึงมีผลกระทบต่อข้างสูงต่อการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

๓.๗ คุณภาพด้านสี

จากการทดสอบคุณภาพด้านสี โดยสีเนื้อวัวเริ่มต้นก่อนการอบแห้งมีค่า L, a และ b คือ ๓๔.๔๓, ๙.๕๕ และ ๗.๘๗ ตามลำดับ สีของเนื้อวัวเริ่มต้นมีสีแดงสด เนื่องจากเม็ดสีที่อยู่ในกล้ามเนื้อคือ ไมโอโกลบิน (myoglobin) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกักเก็บโมเลกุลออกซิเจนในเซลล์กล้ามเนื้อเพื่อใช้งานต่อไปตามกระบวนการเมแทบอลิซึม ไมโอโกลบินเป็นโปรตีนประเภท conjugated ประกอบไปด้วย ironporphyrin compound และฮีม (heme) อยู่ร่วมกันกับโปรตีนโกลบิน

โดยฮีมจะทำหน้าที่ในการยึดเกาะออกซิเจนในขณะที่โปรตีนโกลบินทำหน้าที่ห่อหุ้มและปกป้องฮีมไว้ แต่เมื่ออบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งหรืออากาศร้อนนั้น เนื้อวัวจะได้รับความร้อนจากตัวกลางดังกล่าว และความร้อนนี้เองจะทำให้โครงสร้างทางเคมีของเนื้อวัวเปลี่ยน Oxy myoglobin ซึ่งมี Fe²⁺ ในสีเนื้อมีสีแดงไปเป็น met-myoglobin ซึ่งมี Fe³⁺ ส่งผลให้สีของเนื้อวัวหลังการอบแห้งมีความสว่างลดต่ำลงและมีสีเนื้อเป็นสีน้ำตาล ดังแสดงในตารางที่ ๒ จากข้อมูลที่แสดงในตารางพบว่าไม่ว่าจะอบแห้งเนื้อวัวด้วยวิธีใด สีของเนื้อวัวหลังการอบแห้งมีสีใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะอบแห้งที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำ โดยที่ค่าการเปลี่ยนแปลงคือ ΔL, Δa และ Δb ที่อุณหภูมิ

ต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน พบว่าค่า Δb ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสีเหลืองต่างกัน โดยการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะมีค่า Δb สูงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอยู่เล็กน้อย ขณะที่ค่า ΔL และค่า Δa ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจากการสังเกตด้วยสายตา พบว่าการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะได้เนื้อวัวหลังการอบแห้งที่มีสีสม่ำเสมอว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการแสดงค่าของ L ที่ให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า L ในกรณีของไอน้ำร้อนน้อยกว่าในกรณีของอากาศร้อน



ตารางที่ ๒ การทดสอบคุณภาพด้านสีของเนื้อวัวหลังการอบแห้งที่เงื่อนไขต่าง ๆ

ค่าสีเริ่มต้นของเนื้อวัวก่อนการอบแห้ง $L = 34.43 \pm 0.85$, $a = 9.55 \pm 1.08$ และ $b = 7.97 \pm 0.56$

	Color		
	ΔL	Δa	Δb
SS 130°C ตัดขวางเส้นใย	10.51 ± 0.92^b	5.33 ± 0.68^{bcd}	1.97 ± 0.59^{ab}
SS 140°C ตัดขวางเส้นใย	11.52 ± 0.76^{cd}	5.03 ± 0.83^{abc}	1.99 ± 0.74^{ab}
SS 150°C ตัดขวางเส้นใย	11.56 ± 0.67^{cd}	5.05 ± 0.65^{abc}	1.67 ± 0.48^a
SS 130°C ตัดตามเส้นใย	10.36 ± 0.94^b	5.55 ± 0.47^d	1.98 ± 0.51^{ab}
SS 140°C ตัดตามเส้นใย	11.12 ± 1.01^{bcd}	5.41 ± 0.41^{cd}	2.08 ± 0.44^{bc}
SS 150°C ตัดตามเส้นใย	11.22 ± 0.66^{bcd}	5.42 ± 0.39^{cd}	1.95 ± 0.49^{ab}
HA 130°C ตัดขวางเส้นใย	10.50 ± 1.43^b	4.87 ± 0.66^a	2.77 ± 0.60^{de}
HA 140°C ตัดขวางเส้นใย	10.74 ± 1.23^{bc}	5.14 ± 0.48^{abc}	2.82 ± 0.66^{def}
HA 150°C ตัดขวางเส้นใย	10.89 ± 1.02^{bc}	4.95 ± 0.42^{ab}	2.63 ± 0.51^{de}
HA 130°C ตัดตามเส้นใย	10.40 ± 2.11^b	5.19 ± 0.59^{abcd}	2.43 ± 0.78^{cd}
HA 140°C ตัดตามเส้นใย	11.14 ± 2.12^{bcd}	5.09 ± 0.73^{abc}	2.75 ± 0.68^{de}
HA 150°C ตัดตามเส้นใย	11.82 ± 0.77^d	5.56 ± 0.49^d	3.18 ± 0.78^f
SS 140°C (43% d.b.) + HA 60°C ตัดขวางเส้นใย	9.41 ± 1.37^a	7.21 ± 0.86^e	2.97 ± 0.70^{ef}
SS 140°C (43% d.b.) + HA 60°C ตัดตามเส้นใย	9.37 ± 1.23^a	7.60 ± 0.38^f	3.54 ± 0.37^g

อักษรเหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

เมื่อทำการอบแห้งเนื้อวัวแบบ ๒ ขั้นตอน แล้วนำเนื้อวัวหลังการอบแห้งไปเปรียบเทียบกับการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งหรืออากาศร้อนเพียงอย่างเดียว จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ พบว่าการอบแห้งแบบ ๒ ขั้นตอนให้คุณภาพทางด้านสีของเนื้อวัวหลังการอบแห้งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งหรืออากาศร้อนเพียงอย่างเดียว ($p < 0.05$) เนื่องจากในการอบแห้ง

แบบ ๒ ขั้นตอนนั้นปฏิกิริยา sugar-amine browning ที่อุณหภูมิสูงยังเกิดขึ้นได้ไม่นาน และเมื่อนำเนื้อวัวไปอบแห้งต่อในขั้นตอนที่ ๒ ซึ่งเป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นวิธีการอบแห้งเนื้อวัวแบบ ๒ ขั้นตอน ให้เนื้อวัวหลังการอบแห้งมีสีน้ำตาลอ่อนกว่าสีของเนื้อวัวหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว

๓.๘ การทดสอบคุณภาพด้านการหัดตัว

จากผลการทดสอบคุณภาพด้านการหัดตัวของเนื้อวัวหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ดังแสดงในตารางที่ ๓ ทำให้พบว่าผลของอุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งมีผลต่อการหัดตัวเล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งสูงกว่ามีแนวโน้มว่าเนื้อวัวจะหัดตัวมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ



เนื่องจากการอบแห้งเนื้อวัวที่อุณหภูมิสูงจะทำให้โปรตีนเส้นใยย่อย (myofibrillar protein) คือโปรตีนแอกทินและไมโอซินเกิดการจับตัวกันแน่นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ค่าทางสถิติแล้วปรากฏว่าอุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งไม่มีผลต่อการหดตัวอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบการหดตัวของเนื้อวัวหลังการอบแห้งระหว่างลักษณะการหั่นแบบตัดขวางเส้นใยกับตัดตามเส้นใยสามารถแบ่งได้เป็น ๒ อย่าง คือในกรณีอบแห้งด้วยอากาศร้อน การหั่นเนื้อวัวแบบตัดตามเส้นใยหดตัวมากกว่าการหั่นแบบตัดขวางเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งกลับพบว่าการหดตัวของชิ้นตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันระหว่างกันหั่นตามกับหั่นขวางเส้นใยกล้ามเนื้อ และเมื่อเปรียบเทียบการหด

ตัวของเนื้อวัวหลังการอบแห้งระหว่างการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับการอบแห้งเนื้อวัวด้วยอากาศร้อนภายใต้อุณหภูมิที่เดียวกัน พบว่าการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีการหดตัวมากกว่าการอบแห้งเนื้อวัวด้วยอากาศร้อน เนื่องจากการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเกิดการแปรสภาพของคอลลาเจน (collagen) เป็นเจลาติน (gelatin) ในช่วงแรกของการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีลักษณะเป็นความร้อนเปียก (moist heat) อีกทั้งอุณหภูมิของเนื้อวัวยังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความชื้นที่อยู่ในเนื้อวัวก็ยังมีเหลืออยู่มาก ภาวะดังกล่าวมีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการละลายของคอลลาเจนและแปรสภาพเป็นเจลาติน โดยปรกติคอลลาเจนเริ่มเปลี่ยนสภาพที่อุณหภูมิของเนื้อวัวประมาณ ๖๐-๗๐ องศาเซลเซียส

ดังนั้น ในการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งคาดว่าเหลือคอลลาเจนที่อยู่ในเนื้อวัวหลังจากการอบแห้งน้อยมาก ซึ่งต่างกับการอบแห้งเนื้อวัวด้วยอากาศร้อนที่เป็นความร้อนแห้ง (dry heat) จึงทำให้คอลลาเจนแปรสภาพเป็นเจลาตินได้ยาก จึงเป็นเหตุให้เนื้อวัวที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนเหลือคอลลาเจนอยู่ในเนื้อวัวเป็นจำนวนมาก

เมื่อทำการอบแห้งเนื้อวัวแบบ ๒ ขั้นตอน แล้วนำเนื้อวัวหลังการอบแห้งไปเปรียบเทียบกับการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว พบว่า ชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแบบ ๒ ขั้นตอนเกิดการหดตัวน้อยกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพียงอย่างเดียว แต่เกิดการหดตัวมากกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ ๓ การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของเนื้อวัวหลังการอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ

Drying process	% Shrinkage
SS 130 °C ตัดขวางเส้นใย	0.80 ± 0.42 ^{de}
SS 140 °C ตัดขวางเส้นใย	70.62 ± 0.19 ^d
SS 150 °C ตัดขวางเส้นใย	72.10 ± 1.06 ^{ef}
SS 130 °C ตัดตามเส้นใย	71.76 ± 0.99 ^{de}
SS 140 °C ตัดตามเส้นใย	71.96 ± 0.71 ^{de}
SS 150 °C ตัดตามเส้นใย	73.38 ± 0.65 ^f
HA 130 °C ตัดขวางเส้นใย	63.58 ± 1.51 ^a
HA 140 °C ตัดขวางเส้นใย	64.07 ± 2.08 ^a
HA 150 °C ตัดขวางเส้นใย	64.32 ± 1.57 ^a



ตารางที่ ๓ การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของเนื้อวัวหลังการอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ

Drying process	% Shrinkage
HA 130 °C ตัดตามเส้นใย	66.20 ± 1.43 ^b
HA 140 °C ตัดตามเส้นใย	66.39 ± 0.57 ^b
HA 150 °C ตัดตามเส้นใย	66.78 ± 0.36 ^b
SS 140 °C (43% d.b.) + HA 60 °C ตัดขวางเส้นใย	68.64 ± 1.25 ^c
SS 140 °C (43% d.b.) + HA 60 °C ตัดตามเส้นใย	70.61 ± 1.40 ^d

อักษรเหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

๓.๔ การทดสอบคุณภาพด้านการคินตัว

ตารางที่ ๔ แสดงผลการทดสอบคุณภาพด้านการคินตัวของเนื้อวัวหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน จากการทดลองพบว่าผลของอุณหภูมิตัวกลางในการอบแห้งมีผลต่อค่าการคินตัวของเนื้อวัวเพียงเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ ที่อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งต่ำ ขึ้นตัวอย่างสามารถคินตัวได้มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเปรียบเทียบค่าการคินตัวของเนื้อวัวหลังการอบแห้งระหว่างลักษณะการหันแบบตัดขวางเส้นใยกับตัดตามเส้นใย พบว่าเนื้อวัวที่มีการหันแบบตัดขวางเส้นใยและผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าการคินตัวมากกว่าการหันแบบตัดตามเส้นใย ในทางตรงกันข้าม ขึ้นเนื้อวัวที่ตัดขวางเส้นใยและอบแห้งด้วยอากาศร้อนสามารถคินตัวได้มากกว่าแบบตัดตามเส้นใยในทุก ๆ อุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม

เมื่อนำค่าการคินตัวที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าลักษณะการหันเนื้อวัวของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนไม่มีความแตกต่างของค่าการคินตัวอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าการคินตัวของเนื้อวัวหลังการอบแห้งระหว่างการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับการอบแห้งเนื้อวัวด้วยอากาศร้อนภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าการคินตัวใกล้เคียงกันกับการอบแห้งเนื้อวัวด้วยอากาศร้อน

เมื่อทำการอบแห้งเนื้อวัวแบบ ๒ ขั้นตอน แล้วนำเนื้อวัวหลังการอบแห้งไปทดสอบค่าการคินตัวโดยเปรียบเทียบกับค่าการคินตัวของเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว พบว่าขึ้นเนื้อวัวที่ผ่านการอบแห้งแบบ ๒ ขั้นตอน มีค่าการคินตัวสูงกว่าค่าการคินตัวของเนื้อ

วัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจเนื่องจากการอบแห้งเนื้อวัวแบบ ๒ ขั้นตอนนั้น โปรตีนต่าง ๆ จะเสียสภาน้อยกว่า จึงอาจจะทำให้โปรตีนสามารถดึงโมเลกุลของน้ำกลับเข้าไปในเนื้อวัวได้มากขึ้น ซึ่งต่างกับเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว ที่โปรตีนต่าง ๆ เสียสสภาพไปมาก เนื่องจากอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน

๓.๑๐ การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

จากผลการทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อวัวหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ดังแสดงในตารางที่ ๕ พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงหรืออุณหภูมิต่ำจะให้เนื้อวัวหลังการอบแห้งจะมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อวิเคราะห์ค่าทางสถิติแล้วปรากฏว่า อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งนั้น ไม่ทำให้ค่าความแข็งของเนื้อวัวหลังการอบแห้งมี



ตารางที่ ๔ การทดสอบการคืนตัวของเนื้อวัว ที่ผ่านการอบแห้งเงื่อนไขต่าง ๆ

Drying process	% Rehydration
SS 130°C ตัดขวางเส้นใย	59.11 ± 1.96 ^b
SS 140°C ตัดขวางเส้นใย	58.09 ± 2.82 ^{efg}
SS 150°C ตัดขวางเส้นใย	55.56 ± 0.71 ^{cdef}
SS 130°C ตัดตามเส้นใย	51.71 ± 0.23 ^{abc}
SS 140°C ตัดตามเส้นใย	51.15 ± 0.71 ^{ab}
SS 150°C ตัดตามเส้นใย	47.78 ± 0.67 ^a
HA 130°C ตัดขวางเส้นใย	60.70 ± 2.85 ^g
HA 140°C ตัดขวางเส้นใย	56.56 ± 3.22 ^{def}
HA 150°C ตัดขวางเส้นใย	53.76 ± 1.71 ^{bcd}
HA 130°C ตัดตามเส้นใย	54.10 ± 2.85 ^{bcd}
HA 140°C ตัดตามเส้นใย	52.75 ± 2.08 ^{bcd}
HA 150°C ตัดตามเส้นใย	51.52 ± 0.52 ^{abc}
SS 140°C (43% d.b.) + HA 60°C ตัดขวางเส้นใย	73.17 ± 1.07 ⁱ
SS 140°C (43% d.b.) + HA 60°C ตัดตามเส้นใย	65.56 ± 0.96 ^b

อักษรเหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของเนื้อวัวหลังการอบแห้งระหว่างการหั่นแบบตัดขวางเส้นใยกับตัดตามเส้นใย พบว่าการหั่นแบบตัดตามเส้นใยมีค่าความแข็งน้อยกว่าการหั่นแบบตัดขวางเส้นใยอย่างอย่างมาก เนื่องจากเมื่อหักกดจากเครื่องทดสอบกดลงบนเนื้อวัวหลังการอบแห้งแบบตัดตามเส้นใย ชิ้นเนื้อวัวจะแตกออกจากกันเป็น ๒ ชิ้นส่วนตามแนวยาวของเส้นใยกล้ามเนื้อ ซึ่งเป็นจุดที่แตกง่าย เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างน้อย จึงทำให้ค่าความ

แข็งที่ได้มีค่าน้อยกว่าเนื้อวัวหลังการอบแห้งแบบตัดขวางเส้นใย เนื้อวัวแบบตัดขวางเส้นใยนี้ จะแตกออกจากกันได้เพราะความเค้นอัด (compressive stress) และแตกออกในลักษณะส้อม จึงทำให้ค่าความแข็งที่ได้มีค่ามาก และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของเนื้อวัวหลังการอบแห้งระหว่างเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับที่อบด้วยอากาศร้อน พบว่าเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าความแข็งมากกว่าเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน เนื่องจากการอบแห้งด้วย

ไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นอุณหภูมิของเนื้อวัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งในขณะนั้นความชื้นที่อยู่ในเนื้อวัวก็ยิ่งเหลืออยู่มาก ภาวะดังกล่าวเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการละลายของคอลลาเจนและแปรสภาพเป็นเจลาติน ดังนั้น ในการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งคาดว่าเหลือคอลลาเจนที่อยู่ในเนื้อวัวหลังจากการอบแห้งน้อยมาก ซึ่งต่างกับการอบแห้งเนื้อวัวด้วยอากาศร้อนที่เป็นความร้อนแห้ง จึงทำให้คอลลาเจนแปรสภาพเป็นเจลาตินได้ยาก และเป็นเหตุให้เนื้อวัวที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน



เหลือคอลลาเจนอยู่ในเนื้อวัวเป็นจำนวนมาก ทำให้เนื้อวัวมีค่าความแข็งมากกว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อนำค่าความแข็งที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อทำการอบแห้งเนื้อวัวแบบ ๒ ขั้นตอน แล้วนำเนื้อวัวหลังการอบแห้งไปทดสอบค่าความแข็งเปรียบเทียบกับการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพียงอย่างเดียว พบว่าเนื้อวัวที่อบแห้งแบบ ๒ ขั้นตอนจะมีค่าความแข็งน้อยกว่าเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพียงอย่างเดียว

๔. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ ๑๓๐, ๑๔๐ และ ๑๕๐ องศาเซลเซียส พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ขณะที่คุณภาพด้านสีโดยวัดการเปลี่ยนแปลงสีของตัวแปร L, a และ b การหดตัว และความแข็ง มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนแบบชนิดของตัวกลางในการอบแห้ง พบว่าสัมประ-

สิทธิ์การแพร่ของเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีค่าสูงกว่ากรณีอบแห้งด้วยอากาศร้อน และสีของเนื้อวัวหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีความสม่ำเสมอกว่า การหดตัวมากกว่า ส่วนการคืนตัวและความแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อพิจารณาการเรียงของเส้นใยกล้ามเนื้อ พบว่าไม่มีผลต่ออัตราการแพร่ของน้ำ ไม่ว่าจะอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งหรืออากาศร้อน และเมื่อเปรียบเทียบคุณภาพด้านต่าง ๆ พบว่าการเรียงของเส้นใยกล้ามเนื้อให้คุณภาพ

ตารางที่ ๕ การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อวัวหลังการอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ

Drying process	Hardness (N)
SS 130 °C ตัดขวางเส้นใย	59.62 ± 17.24 ^{cd}
SS 140 °C ตัดขวางเส้นใย	59.57 ± 14.90 ^{cd}
SS 150 °C ตัดขวางเส้นใย	67.65 ± 12.82 ^d
SS 130 °C ตัดตามเส้นใย	27.09 ± 5.96 ^a
SS 140 °C ตัดตามเส้นใย	31.54 ± 9.96 ^a
SS 150 °C ตัดตามเส้นใย	36.45 ± 10.53 ^{ab}
HA 130 °C ตัดขวางเส้นใย	47.85 ± 12.15 ^{bc}
HA 140 °C ตัดขวางเส้นใย	48.67 ± 14.12 ^{bc}
HA 150 °C ตัดขวางเส้นใย	47.82 ± 9.72 ^{bc}
HA 130 °C ตัดตามเส้นใย	37.94 ± 14.58 ^{ab}
HA 140 °C ตัดตามเส้นใย	38.41 ± 18.27 ^{ab}
HA 150 °C ตัดตามเส้นใย	45.71 ± 14.96 ^b
SS 140 °C (43% d.b.) + HA 60 °C ตัดขวางเส้นใย	31.53 ± 13.17 ^a
SS 140 °C (43% d.b.) + HA 60 °C ตัดตามเส้นใย	25.74 ± 5.44 ^a

อักษรเหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)



สีแตกต่างกันเล็กน้อย เนื้อวุ้นแบบตัดขวางเส้นใยมีความแข็งแรงมากกว่าและหดตัวน้อยกว่าแบบตัดตามเส้นใยอยู่เล็กน้อย เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียว การอบแห้งแบบ ๒ ขั้นตอน ทำให้สีที่ได้ของเนื้อวุ้นแห้งเป็นสีน้ำตาลอ่อนกว่า การคืนตัวสูงขึ้น ขณะที่ความแข็งของชิ้นเนื้อลดลง

๕. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

๑. Mujumdar, AS. Superheated steam drying, Handbook of Industrial Drying; Pub. Marcel Dekker Inc., New York, 1995.
๒. Li, YB, Seyed-Yagoobi, J, Moreira, RG, Yamsaengsung, R. Superheated steam impingement drying of tortilla chips. Drying Technology, 1999; 17(1&2): 191-213.
๓. Tang, Z, Cenkowski, S. Dehydration dynamics of potatoes in superheated steam and hot air. Canadian Agricultural Engineering, 2000; 42(1): 6.1-6.13.
๔. Moreira, RG. Impingement drying of foods using hot air and superheated steam. Journal of Food Engineering, 2001; 49(4): 291-295.
๕. Iyota, N, Nishimura, N, Onuma, T, Nomura, T. Drying of sliced raw potatoes in superheated steam and hot air. Drying Technology, 2001; 19(7): 1411-1424.
๖. Caixeta, AT, Moreira, R, Castell-Perez, ME. Impingement drying of potato chips. Journal of Food Process Engineering, 2002; 25: 63-90.
๗. Rordprapat, W, Nathakaranakule, A, Tia, W, Soponronnarit, S. Comparative study of fluidized bed paddy drying using hot air and superheated steam, Journal of Food Engineering, 2005; 71(1): 28-36.
๘. Prachayawarakorn, S, Soponronnarit, S, Wetchakama, S, Jaisut, D. Desorption isotherms and drying characteristics of shrimp in superheated steam and hot air. Drying Technology, 2002; 20(3): 669-684.
๙. Uengkimbuan, N, Soponronnarit, S, Prachayawarakorn, S, Nathakaranakule, A. Drying kinetic and physical properties of dried pork using two-stage techniques, Proceedings of the 2nd International Conference on Innovations in Food Processing Technology and Engineering, Jan 11-13, 2005; Bangkok, Thailand: 320-328.
๑๐. Maskan, M. Drying, Shrinkage and Rehydration Characteristics of Kiwifruits during Hot Air and Microwave Drying, Journal of Food Engineering, 2001; 48: 177-182.
๑๑. Taechapairoj, C, Dhuchakallaya, I, Soponronnarit, S, Watchama, S, Prachayawarakorn, S. Superheated Steam Fluidised Bed Paddy Drying, Journal of Food Engineering, 2003; 58: 67-73.
๑๒. Taechapairoj, C, Prachayawarakorn, S, Soponronnarit, S. Characteristic of Rice Dried in Superheated-Steam Fluidized-Bed, Drying Technology, 2004; 22(4): 719-743.
๑๓. สมชาติ ไสภมรณฤทธิ์, อธิคม จิรจินดาเกศ, อติศักดิ์ นาดกรณกุล, ชัยณรงค์ เศรษฐไพโรจน์, การผลิตข้าวกล้องนึ่งด้วยเทคนิค ฟลูอิดิเซชันโดยใช้ไอน้ำร้อนขนาดยิ่ง, วารสารราชบัณฑิตยสถาน, ๒๕๔๘: ๓๐(๑): ๗๖-๘๑.
๑๔. Faustman, C. Postmortem Changes in Muscle Foods, In: Muscle Foods Meat Poultry and Seafood Technology, Kinsman, DM, Kotula, AW, Breidenstein, BC, eds., Chapman & Hall, New York, USA, 1994: 63-78.
๑๕. Tang, Z, Cenkowski, S, Izydorczyk, M. Thin-layer Drying of Spent Grains in Superheated Steam, Journal of Food Engineering, 2004; 67: 457-465.
๑๖. Crank, J. The Mathematics of Diffusion, 2nd ed., J. W. Arrowsmith LTD, Bristol, England, 1975: 44-68.



Abstract Effects of drying medium on drying kinetics and beef quality

Chaiyong Taechapairoj

Siriwat Sinprasert

Somkiat Prachayawarakorn

Somchart Soponronnarit

Fellow of the Academy of Science, The Royal Institute, Thailand

Drying method greatly affects drying kinetics and food quality. To obtain desired quality of meat products for serving as snack food, single-stage drying using superheated steam and hot air as well as two-stage drying were selected to investigate their effects on drying kinetics and quality attributes of beef sliced along the longitudinal and transverse directions of muscle fiber. The experiments were set up at drying temperatures of 130-150°C. The samples with the initial moisture contents of 245-255% d.b. were dried until the moisture content of 11% d.b. was reached. The experimental results showed that an increase in drying temperature significantly reduced drying time. However, qualities in terms of color (L, a, b-values), shrinkage, rehydration and hardness were not significantly different amongst drying temperatures ($p > 0.05$). The effective diffusion coefficient of the meat dried by superheated steam was higher than that dried by hot air. The final product obtained from superheated steam drying had more uniform-color and higher degree of shrinkage than that obtained from hot air drying. The muscle fibre orientation had little effect on drying rate and product color. The meat sliced in the transverse direction had lower degree of shrinkage but higher degree of hardness than longitudinal one. The two-stage drying provided the meat product with a light brown color, a higher rehydration capacity, but a lower value of hardness as compared to single drying stage.

Key words : hardness, quality, shrinkage, superheated steam, texture, transverse

Cataloging in Publication Data

Lectures and workshop exercises on drying of agricultural and marine products: Regional Workshops on Drying Technology. A project activity of the ASEAN Subcommittee on Non-Conventional Energy Research. -- Jakarta: Indonesian Institute of Sciences Press 2003.

251 pp.; 21 cm.

Include index

ISBN 979-98014-0-0

1. Food drying. 2. Food -- Preservation

664.028 4

EDITORIAL BOARD

Dr Yeoh Bee Ghin - Malaysia - cum- Chairman, ASEAN SCNCER
Mr Abd Shawal B Yaman - Brunei Darussalam
Dr Bun Narith - Cambodia
Dr Suwanto Martosudirjo, APU - Indonesia
Mr Pho Muangnalad - Lao PDR
Prof Dr Mya Mya Oo - Myanmar
Mr Nonilo A Pena - Philippines
Assoc Prof J C Ho - Singapore
Prof Chullapong Chullabodhi - Thailand
Prof Hoang Ngoc Ha - Viet Nam

First published: October 2003

© ASEAN SCNCER 2003

Lectures And Workshop Exercises
On
Drying Of Agricultural And Marine Products

Regional Workshop
On
Drying Technology

The ASEAN Subcommittee On Non - Conventional Energy Research
A Project Activity Of

Supported by
The ASEAN Foundation



ASEAN SCNCER 2003

Index by Kamariah Tambunan, Ade Kohar, Mahmudah
Published by LIPI Press, Jln. Gondangdia Lama 39 Menteng Jakarta,
Indonesia