



กลไกการเปลี่ยนแปลงความชื้นในข้าวพันธุ์ กข31 ระหว่างการแช่น้ำในกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง Water Absorption of RD31 Paddy during Soaking in Parboiling Process

ณัฐวุฒิ เนียมสอน¹, เชาว์ อินทร์ประสิทธิ์², อนุปันท์ เทอดวงศ์วรกุล^{1*}

Natawut Neamsorn¹, Chouw Inprasit¹, Anupun Terdwongworakul^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

²ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

²Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

*Corresponding author: Tel: +66-34-351-896, Fax: +66-34-351-896, E-mail: fengant@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ถูกแช่น้ำที่ระดับอุณหภูมิต่างกันเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในเมล็ดและสร้างสมการทำนายความชื้นระหว่างการแช่ ผลการศึกษาพบว่าความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการแช่ จาก 12.39-13.42% มาตรฐานแห้ง เป็น 24.95-35.63% มาตรฐานแห้ง และอัตราการเพิ่มขึ้นของความชื้นในเมล็ดข้าวจะลดลงเมื่อระยะเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิการแช่ต่ำกว่า gelatinization temperature ข้าวใหม่จะสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าข้าวเก่า ที่อุณหภูมิการแช่สูงกว่า gelatinization temperature ข้าวเก่าจะสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าข้าวใหม่ สมการสำหรับทำนายค่าความชื้นสร้างขึ้นจากตัวแบบของ Becker และ Peleg สามารถใช้ในการทำนายค่าความชื้นของเมล็ดข้าวโดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.925-0.990 แต่สมการทำนายของ Becker มีค่า RMSE ต่ำกว่าสมการทำนายของ Peleg สำหรับการแช่ที่อุณหภูมิ 80°C ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการทำนายทั้งสองสมการให้ผลที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ได้จากการทดลอง

คำสำคัญ: ข้าวเปลือกพันธุ์ กข31, แช่น้ำ, ข้าวหนึ่ง

Abstract

RD31 rough rice was soaked in water at several temperature levels and a change in moisture content of rice during soaking was examined. Moisture content of rice rapidly increased from 12.39%-13.42% (dry basis) to 24.95-35.63% (dry basis) at initial of soaking but increasing rate of moisture content decreased with soaking time. Water absorption of newly-harvested rice was higher than aged rice at soaking temperature which was lower than gelatinization temperature (GT). However, for soaking temperature above GT, water absorption of the aged rice was higher than the newly-harvested rice. Either Becker's model or Peleg's model could be used for predict moisture content of rough rice during soaking, except at soaking temperature which was higher than GT, RMSE of the Becker's prediction model was lower than the Peleg's model. Model's parameters of both prediction models were coincident with the hydration characteristics of rice in the experiment.

Keywords: RD31 paddy, Soaking, Parboiled rice

1 บทนำ

กระบวนการผลิตข้าวหนึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การแช่ข้าวเปลือกในน้ำ การให้ความร้อนเพื่อให้ข้าวเปลือกสุก และการทำแห้งข้าวเปลือกที่สุกแล้ว สำหรับในขั้นตอนแรกคือการแช่ข้าวหนึ่งมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความชื้นในเมล็ดข้าวให้เพียงพอต่อการบวนการทำให้ข้าวสุก (gelatinization) ใน

ขั้นตอนถัดไป (Gariboldi, 1975) โดยทั่วไปแล้วความชื้นที่เพียงพอต่อการ gelatinization จะอยู่ที่ประมาณ 30% w.b (Bhattacharya, 2011) การแช่ข้าวที่มีประสิทธิภาพนั้นจะต้องกระทำอย่างรวดเร็วและให้น้ำแพร่กระจายเข้าไปในเมล็ดข้าวอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ (Gariboldi, 1975; Luh, 1991) ซึ่งหากขั้นตอนการแช่ใช้เวลานานเกินไปนอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองแล้วยังทำให้ข้าวมีสีและกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์อันเกิด

จากกระบวนการหมักอีกด้วย (Luh, 1991) การแช่ข้าวเพื่อการผลิตข้าวหนึ่งในอุตสาหกรรมจึงนิยมแช่ข้าวหนึ่งในน้ำอุ่นเพื่อลดเวลาในการแช่ให้น้อยที่สุด ทั้งนี้อุณหภูมิของน้ำและเวลาที่ใช้ในการแช่ต่างก็ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของข้าวหนึ่งที่เกิดขึ้น ดังนั้นความเข้าใจในกลไกการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวเปลือกระหว่างการแช่จึงเป็นหนึ่งในความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการผลิตข้าวหนึ่งให้เป็นไปอย่างถูกต้องและเหมาะสม มีงานวิจัยที่ศึกษากลไกการดูดซับน้ำทั้งในข้าวและเมล็ดธัญพืชอื่น และได้มีการพัฒนาสมการเพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในเมล็ดระหว่างการแช่น้ำที่อุณหภูมิต่างๆ (Bandyopadhyay and Roy, 1978; Jideani and Mpotokwana, 2009; Lu et al., 1994; Turhan et al., 2002; Vasudeva et al., 2010) โดยที่การแพร่ของน้ำเข้าไปยังเมล็ดข้าวเปลือกจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างได้แก่ โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าว อุณหภูมิของน้ำที่แช่เวลาในการแช่ ซึ่งข้าวต่างสายพันธุ์กันก็จะมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน ดังนั้นการดูดซับน้ำจะต่างกันไปตามลักษณะประจำพันธุ์ของข้าว (Wimberly, 1983) นอกจากนี้ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวก็มีอิทธิพลต่อการดูดซับน้ำของข้าวเปลือก เนื่องจากข้าวเก่าหรือข้าวที่เก็บไว้นานจะมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีที่แตกต่างไปจากข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ (Bhattacharya, 2011) ดังนั้นการศึกษาการดูดซับน้ำของข้าวเปลือกพันธุ์ต่างๆ ทั้งข้าวใหม่และข้าวเก่าจึงยังมีความสำคัญต่อการพัฒนากระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง

ข้าวพันธุ์ กข31 เป็นข้าวไม่ไวแสง จัดเป็นข้าวอมิโลสสูงมีปริมาณอมิโลสระหว่าง 27.3-29.8% (กรมการข้าว, 2550) และปลูกได้ทั่วไปในเขตที่ราบลุ่มภาคกลาง (กรมการข้าว, 2556) แต่เนื่องจากเป็นพันธุ์ข้าวค่อนข้างใหม่ได้รับการรับรองพันธุ์และสนับสนุนให้เกษตรกรปลูกเมื่อปีพ.ศ. 2550 องค์ความรู้เกี่ยวกับกลไกการดูดซับน้ำของข้าวพันธุ์ กข31 จึงยังมีอยู่อย่างจำกัด งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ระหว่างการแช่น้ำและสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ระหว่างการแช่น้ำเพื่อการผลิตข้าวหนึ่งทั้งในข้าวใหม่และข้าวเก่า

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วิธีการทดลอง

ข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ของฤดูกาลเก็บเกี่ยวปีพ.ศ.2557 ซึ่งเป็นข้าวเก่าอายุการเก็บรักษา 1 ปี และข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ซึ่งเป็นข้าวใหม่ของฤดูกาลเก็บเกี่ยวปีพ.ศ. 2558 ได้รับจากโรงสีเอกชนในจังหวัดนครสวรรค์ ถูกนำมาทำความสะอาด คัดแยกสิ่งเจือปนและเมล็ดลีบ การวัดความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกวัดโดยวิธีตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (ASAE Standards, 1998) จากนั้นบรรจุตัวอย่างข้าวเปลือก

จำนวน 20 กรัม ในถุงผ้าที่ให้น้ำผ่านได้แล้วจึงแช่ในน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 60 70 และ 80°C ทุกชั่วโมงข้าวเปลือกจะถูกนำขึ้นมาจากน้ำและชั่งด้วยกระดาษชั่งที่เพื่อกำจัดน้ำส่วนเกินออกจากข้าวเปลือก (Lu et al., 1994; Oli et al., 2014) แล้วจึงวัดความชื้นด้วยวิธีตู้อบลมร้อน จนครบ 7 ชั่วโมง ทำซ้ำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

2.2 สมการทำนายการดูดซับน้ำ

ตัวแบบที่ใช้อธิบายการดูดซับน้ำเข้าไปในเมล็ดธัญพืชมีหลายสมการซึ่งแต่ละสมการมีความเหมาะสมกับการใช้งานที่ภาวะการแช่และชนิดธัญพืชต่างๆ กัน การวิเคราะห์และสร้างสมการทำนายในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวแบบสองสมการได้แก่ Becker's model และ Peleg's model

2.2.1 สมการทำนายของ Becker

ในปี 1960 Becker สร้างสมการการแพร่ของน้ำในเมล็ดข้าวสาลิโดยอาศัยพื้นฐานจากสมการ Fick's Law โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$M_t = M_0 + \alpha t^{0.5} \quad (1)$$

โดยที่ M_t เป็นความชื้นเฉลี่ยของธัญพืชที่เวลา t ($g\ g^{-1}$, dry basis) M_0 เป็นความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของธัญพืช ($g\ g^{-1}$, dry basis) t เป็นเวลาในการดูดซับน้ำ (s) และ α เป็นค่าคงที่ในสมการ หรือ lump parameter

เนื่องจากในช่วงแรกที่เมล็ดข้าวสัมผัสกับน้ำ น้ำจะเคลื่อนที่เข้าไปยังเมล็ดด้วยแรง capillary ผ่านรูพรุนของกลีบ ค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกมีค่าสูงจึงมีการปรับปรุงรูปแบบสมการทำนายให้เป็นดังสมการ (2)

$$M_t = M_0 + M_1 + \alpha t^{0.5} \quad (2)$$

โดยที่ M_1 เป็นค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการแช่และเมื่อสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง $(M_t - M_0)$ และ $t^{0.5}$ จะสามารถหาค่า M_1 และค่า α ได้จากค่าจุดตัดแกน y และความชันของกราฟเส้นตรงที่สร้างจากสมการ (2) และค่า α ยังสามารถแสดงในรูปสมการดังนี้

$$\alpha = \left(\frac{2}{\pi^{0.5}}\right) (M_s - M_0) \left(\frac{S}{V}\right) D_m^{0.5} \quad (3)$$

โดยที่ M_s เป็นความชื้นที่พื้นผิวของธัญพืช ($g\ g^{-1}$, dry basis) ซึ่งสำหรับการดูดซับน้ำ ค่า M_s จะมีค่าเท่ากับค่าความชื้นที่ภาวะสมดุล M_e (Singh, 1989) และสามารถประมาณได้ตามวิธีของ Bello et al. (2004) S เป็นพื้นที่ผิวของธัญพืช (m^2) และ V เป็นปริมาตรของแข็งของเมล็ดข้าว (m^3) D_m เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ ($m^2\ s^{-1}$) โดยที่ค่า D_m สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิได้จากสมการ Arrhenius ดังแสดงในสมการ

$$D_m = D_0 e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)} \quad (4)$$

เมื่อรวมสมการ (3) และสมการ (4) จะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\alpha = \left(\frac{2}{\pi^{0.5}}\right) (M_s - M_0) \left(\frac{S}{V}\right) \left[D_0 e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)}\right]^{0.5} \quad (5)$$

หรือแสดงในรูปร่างง่ายได้ดังสมการ (6)

$$\alpha = \alpha_0 \left[e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)}\right]^{0.5} \quad (6)$$

สมการ (6) สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ α_0 และ E ดังแสดงในสมการ (7)

$$\ln \alpha = \ln \alpha_0 - \frac{E}{2RT} \quad (7)$$

โดยที่ E เป็นค่าพลังงานกระตุ้นในการแพร่ของน้ำ ($J \text{ mol}^{-1}$) R เป็นค่าคงตัวของก๊าซ ($8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) และ T เป็นค่าอุณหภูมิในการแช่ (K)

สำหรับค่า S และ V หาได้จากสมการ (8) (9) และ (10) (Jain and Bal, 1997; Varnamkhasti et al., 2008)

$$V = 0.25 * \left[\frac{\pi}{6} L(W + T)^2\right] \quad (8)$$

$$S = \pi B L^2 (2L - B)^{-1} \quad (9)$$

$$B = [WT]^{0.5} \quad (10)$$

เมื่อ L W และ T เป็นความยาว ความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเริ่มต้น

เนื่องจากสมการ Becker ถูกสร้างขึ้นโดยมีพื้นฐานจากสมการการแพร่และสามารถอธิบายปรากฏการณ์การดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวได้ดี จึงมีนักวิจัยจำนวนมากที่ใช้สมการนี้ในการอธิบายการเพิ่มขึ้นของความชื้นในระหว่างการแช่ ทั้งในข้าวเปลือกและข้าวกล้อง (Lu et al., 1994; Miah et al., 2002; Sridhar and Manohar, 2003)

2.2.2 สมการทำนายของ Peleg

Peleg's model เป็นสมการทำนายการดูดซับน้ำของวัสดุเกษตรและอาหารที่นิยมใช้อีกสมการหนึ่ง โดยในปี 1988 Peleg ได้สร้างสมการทำนาย empirical โดยมีรูปแบบสมการดังนี้ (Peleg, 1988)

$$M_t = M_0 + \frac{t}{(k_1 + k_2 t)} \quad (11)$$

โดยที่ M_t เป็นความชื้นเฉลี่ยของธัญพืชที่เวลา t ($g \text{ g}^{-1}$, dry basis) M_0 เป็นความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของธัญพืช ($g \text{ g}^{-1}$, dry basis) t เป็นเวลาในการดูดซับน้ำ (s) k_1 เป็น Peleg's rate constant ($\%h^{-1}$) k_2 เป็น Peleg's capacity constant ($\%^{-1}$)

ค่าอัตราการดูดซับน้ำ (R) สามารถหาได้จากอนุพันธ์อันดับแรกของสมการ Peleg ดังสมการ (12)

$$R = \frac{dM}{dt} = \frac{k_1}{(k_1 + k_2 t)^2} \quad (12)$$

ซึ่งอัตราการดูดซับน้ำในช่วงแรกที่น้ำสัมผัสเมล็ดข้าวสามารถพิจารณาได้จากค่า R ที่เวลา $t=0$ จะได้

$$R_0 = \frac{1}{k_1} \quad (13)$$

ค่าความชื้นสุดท้ายหรือความชื้นที่ภาวะสมดุล หาได้จากค่าความชื้นที่เวลา $t \rightarrow \infty$ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (14)

$$M_{t \rightarrow \infty} = M_e = M_0 + \frac{1}{k_2} \quad (14)$$

โดยที่ค่า M_e เป็นค่าความชื้นที่ภาวะสมดุล ($g \text{ g}^{-1}$, dry basis) เมื่อจัดรูปแบบสมการ (14) ให้เป็นสมการเชิงเส้น จะได้

$$\frac{t}{M_t - M_0} = k_1 + k_2 t \quad (15)$$

การสร้างกราฟเส้นตรงจากสมการ (15) จะทำให้สามารถหาค่า k_1 และ k_2 ได้

2.3 การคำนวณทางสถิติ

งานวิจัยนี้วางแผนการทดลองแบบ Factorial in completely randomized design ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นในแต่ละสภาวะการแช่ถูกนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดย Duncan's multiple-range test (DMRT) จากนั้นข้อมูลถูกนำไปใช้ในการสร้างสมการสำหรับทำนายค่าความชื้น

การตรวจสอบค่าความแม่นยำในการประมาณค่าความชื้นในเมล็ดข้าวของสมการทำนายทั้งสองแบบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่า Root mean square error (RMSE) (Yadav, B. K. and V. K. Jindal, 2007) ซึ่งสมการที่มีความเหมาะสมจะมีค่า R^2 สูง และค่า RMSE ต่ำ ค่า RSME คำนวณได้จากสมการ

$$RMSE = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (M - M_{est})^2 \right]^{0.5} \quad (16)$$

เมื่อ M เป็นค่าความชื้นที่ได้จากการทดลอง M_{est} เป็นค่าความชื้นที่ได้จากสมการทำนาย N เป็นจำนวนข้อมูล และ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N

3 ผลและวิจารณ์

3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก

ค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ในระหว่างการแช่น้ำที่อุณหภูมิต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 60 70 และ 80°C สำหรับข้าวใหม่และข้าวเก่าแสดงใน Figure 1 โดยในช่วงชั่วโมงแรกค่าความชื้นของข้าวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ 12.39% db. เพิ่มขึ้นเป็น 24.95 27.97 และ 35.61% db. ในข้าวเก่า และจากค่าความชื้น 13.42% db. เพิ่มขึ้นเป็น 26.75 28.48 และ 35.63% db. ในข้าวใหม่ สำหรับข้าวเปลือกที่แช่น้ำอุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในเมล็ดข้าวในระหว่างการแช่น้ำพบว่าค่าความชื้นในเมล็ดข้าวที่ถูกแช่น้ำที่ระดับอุณหภูมิทั้งสามระดับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และค่าความชื้นในระหว่างการแช่น้ำของข้าวเก่าและข้าวใหม่ก็มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เช่นกัน

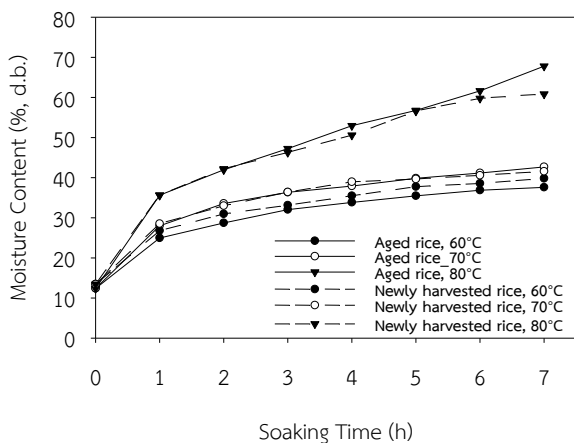


Figure 1 Change of moisture content in aged and newly harvested rice at three soaking temperatures.

จาก Figure 1 จะสังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิการแช่ 60 และ 70°C เมื่อเวลาผ่านไปจนในชั่วโมงที่ 5-7 อัตราการเพิ่มขึ้นของความชื้นจะลดลงและมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่ความชื้นสมดุลทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่ นั่นแสดงว่าทั้งอุณหภูมิของน้ำและเวลาในการแช่ต่างมีอิทธิพลกับอัตราการดูดซับน้ำของข้าวเปลือก ข้าวเปลือกที่แช่น้ำที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีการดูดซับน้ำมากกว่า ข้าวเปลือกที่แช่น้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า ในขณะที่เมื่อระยะเวลาในการแช่น้ำมากขึ้นข้าวเปลือกจะดูดซับน้ำเข้าไปมากขึ้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นไปในลักษณะเช่นเดียวกับการดูดซับน้ำในธัญพืชทั่วไป กล่าวคืออัตราการแพร่จะสูงที่สุดในช่วงแรกและจะค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่ภาวะสมดุล (Chakraverty and Singh, 2014) ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของความชื้นภายในเมล็ดข้าวในช่วงแรกของการแช่น้ำถูกอธิบายว่าเป็นผลจากการที่เมล็ดดูด

ซับน้ำเอาไว้อย่างรวดเร็วประกอบกับมีน้ำเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างกลีบและเมล็ด แต่การเพิ่มขึ้นของความชื้นของข้าวเปลือกทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ที่แช่น้ำอุณหภูมิ 80°C จะมีลักษณะที่แตกต่างออกไป โดยค่าความชื้นจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราค่อนข้างคงที่ในช่วงชั่วโมงที่ 1-7 และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงในรูปแบบนี้ถูกพิจารณาว่าเป็นลักษณะของการแช่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเจลละตินไนเซชัน (gelatinization temperature) และเป็นรูปแบบที่คล้ายกับการหุงข้าว โดยเมื่อแบ่งในเมล็ดข้าวเกิด gelatinization ก็จะมีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมาก (Bhattacharya and Ali, 2015)

ในการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60°C ข้าวเปลือกเก่าจะมีความชื้นต่ำกว่าข้าวใหม่ตลอดระยะเวลาการแช่ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Tani et al. (1969) ที่พบว่าเมื่อแช่ข้าวญี่ปุ่นในน้ำที่อุณหภูมิปกติ ความสามารถในการดูดซับน้ำของข้าวญี่ปุ่นซึ่งเป็นข้าวเก่าจะมีค่าต่ำกว่าข้าวใหม่ ส่วนที่อุณหภูมิในการแช่ที่ 70°C ค่าความชื้นของทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ไม่ต่างกันมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของความสามารถในการแพร่ของน้ำเข้าไปเมล็ดข้าวที่มีค่าสูงและส่งผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของความชื้นในเมล็ดข้าว สำหรับการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 80°C ค่าความชื้นระหว่างการแช่ของข้าวเปลือกเก่าจะมีแนวโน้มสูงกว่าข้าวเปลือกใหม่ โดยอุณหภูมิของน้ำที่ประมาณ 80°C ถูกพิจารณาว่าเป็นระดับอุณหภูมิที่ต่ำสุดที่เหมาะสมในการหุงข้าวอินเดีย (Bhattacharya, 2011) ดังนั้นการแช่น้ำที่อุณหภูมินี้น้อยจะต้องมีการสุกบางส่วนก่อนการแช่ การสุกหรือกระบวนการ gelatinization นั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแป้งในเมล็ดข้าว เม็ดแป้งจะพองตัวและมีปริมาตรสูงขึ้นอย่างมาก ทำให้มีการเคลื่อนที่ของน้ำเข้าไปยังเมล็ดข้าวได้มากกว่าเดิม ผลการทดลองข้างต้นจึงสอดคล้องกับสมบัติการดูดน้ำของข้าวเก่าที่มีอายุการเก็บรักษาระยะเวลาประมาณ 1 ปี ที่มีอัตราการดูดน้ำระหว่างการหุงสูงกว่าข้าวใหม่ (Bhattacharya, 2011; Bhattacharya and Ali, 2015)

3.2 สมการทำนาย

ค่าความชื้นที่ได้จากสมการทำนายที่สร้างขึ้นจากตัวแบบของ Becker และตัวแบบของ Peleg ทั้ง ในข้าวเก่าและข้าวใหม่เปรียบเทียบกับค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองแสดงใน Figure 2 ซึ่งพบว่าในช่วงชั่วโมงแรกของการแช่ ความชื้นจากสมการทำนาย Peleg จะให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าจากการทดลองและค่าทำนายจากสมการ Becker ส่วนในช่วงชั่วโมงที่ 2-6 ค่าความชื้นที่ได้จากสมการ Peleg กลับมีค่าสูงกว่าค่าความชื้นจากการทดลองและค่าความชื้นจากสมการ Becker และหลังจากการแช่ที่ 6 ชั่วโมง ค่าความชื้นจากสมการ Peleg จะมีค่าน้อยกว่าค่าทำนายจากสมการ Becker

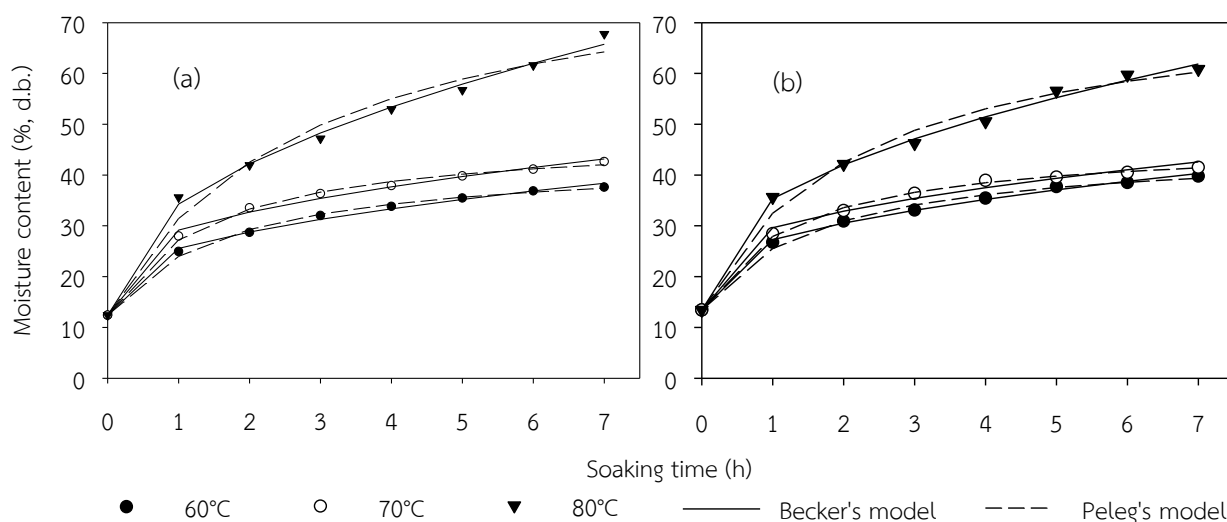


Figure 2 Comparison of moisture content predicted from models and experimental data. a) Aged rice b) Newly harvested rice.

นอกจากนี้จาก Figure 2 ยังพบว่าเส้นกราฟจากสมการทั้งสองมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยกราฟที่ได้จากสมการ Peleg จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งต่อเนื่อง ในขณะที่กราฟจากสมการ Becker จะมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องโดยเส้นกราฟจะแบ่งเป็นสองช่วงอย่างชัดเจน ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟที่ได้จากสมการทำนายทั้งสองสมการมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่

3.3 ความแม่นยำของการทำนาย

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าความคลาดเคลื่อน (RMSE) ของสมการทำนายทั้งสองสมการแสดงใน Table 1 และ Table 2 ซึ่งจากตารางจะพบว่าสมการ Becker มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.976-0.990 และค่า RMSE ระหว่าง 0.516-1.126%

ส่วนสมการ Peleg มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.925-0.999 และค่า RMSE ระหว่าง 0.479-2.583% ตลอดระยะเวลาการแช่

เมื่อพิจารณาจากค่า RSME ของสมการทำนายที่อุณหภูมิการแช่ 60 และ 70°C พบว่าสมการทำนายทั้งสองสามารถใช้ทำนายความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างการแช่ได้ดี อย่างไรก็ตามค่า RMSE ที่ได้จากสมการทำนายของ Peleg มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากสมการทำนายของ Becker ทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่ ส่วนที่อุณหภูมิการแช่ 80°C ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่า gelatinization temperature นั้น ค่า RMSE ของสมการ Peleg มีค่าสูงกว่าค่าจากสมการ Becker ทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่ และไม่เหมาะสมที่จะใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการแช่ในอุณหภูมิที่สูงกว่า gelatinization temperature

Table 1 Parameters and statistics of Becker's model.

	T (°C)	M_e (%)	ΔM_i (%)	α ($\times 10^{-3}$, $s^{-0.5}$)	D_m ($\times 10^{-11}$, $m^2 s^{-1}$)	α_0	E ($kJ \cdot mol^{-1}$)	R^2	RMSE (%)
AR ^a	60	38.458	5.354	1.3007	0.611	7443.53	86.87	0.985	0.516
	70	42.317	8.299	1.4163	0.724			0.976	0.713
	80	71.776	2.280	3.1844	3.662			0.988	1.126
NR ^a	60	40.610	5.918	1.3212	0.341	16741.4	68.58	0.990	0.422
	70	41.445	8.341	1.3118	0.337			0.957	0.907
	80	69.092	5.832	2.6828	1.407			0.990	0.900

^aAR = Aged rice, NR = Newly harvested rice.

Table 2 Parameters and statistics of Peleg's model.

	T (°C)	M _e (%)	R (x10 ⁻⁵)	R ₀	k ₁	k ₂	R ²	RMSE (%)
AR ^a	60	43.339	13.654	0.185	5.4044	3.2257	0.939	0.479
	70	47.967	9.7905	0.254	3.9441	2.8110	0.925	0.522
	80	85.127	29.926	0.258	3.8803	1.3749	0.997	2.583
NR ^a	60	44.415	13.860	0.195	5.1361	3.1228	0.9940	0.676
	70	45.490	8.3645	0.258	3.8800	3.0214	0.9988	0.381
	80	74.288	20.586	0.275	3.6352	1.6156	0.9781	1.887

^aAR = Aged rice, NR = Newly harvested rice.

3.4 ค่าคงที่ในสมการทำนายของสมการ Becker

ค่าคงที่ในสมการ Becker ได้แก่ ค่า ΔM_i และค่า α ที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับข้าวเก่าและข้าวใหม่แสดงใน Table 1 ซึ่งค่า ΔM_i ของข้าวใหม่จะมีค่าสูงกว่าข้าวเก่าในทุกอุณหภูมิการแช่น้ำ ซึ่งหมายความว่าข้าวใหม่จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำในช่วงแรกที่ข้าวสัมผัสน้ำมากกว่าข้าวเก่า ซึ่งอาจเกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเกลบระหว่างการเก็บรักษา และค่า ΔM_i ทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการแช่เพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 70°C และกลับลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 70 เป็น 80°C ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Bandyopadhyay and Roy (1978) ในข้าวเมล็ดยาว การเพิ่มขึ้นและลดลงของค่า ΔM_i มีความสัมพันธ์กับ gelatinization temperature ของข้าว โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงช่วง gelatinization temperature หากอุณหภูมิในการแช่ยังคงเพิ่มขึ้นต่อไป ΔM_i จะกลับมีค่าลดลง สำหรับค่า α ในข้าวเก่าและข้าวใหม่จะมีค่าใกล้เคียงกันที่การแช่ที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C แต่ค่า α ของข้าวที่แช่ในน้ำอุณหภูมิ 80°C จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่ โดยค่า α หรือ lump parameter แสดงถึงค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการแพร่ของน้ำเข้าสู่เมล็ดข้าว (Chakraverty and Singh, 2014) อีกทั้งค่า α เป็นตัวชี้วัดถึงค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองช่วงตามอุณหภูมิในการแช่ กล่าวคือช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า gelatinization temperature และช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า gelatinization temperature (Chakraverty and Singh, 2014) เนื่องจากจุดเปลี่ยนค่า α จากสมการ Becker อยู่ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 70-80°C ซึ่งสอดคล้องกับผลการเปลี่ยนความชื้นจากการทดลอง ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า gelatinization temperature ของข้าว กข31 อยู่ระหว่างช่วงอุณหภูมิดังกล่าว

3.5 ค่าคงที่ในสมการทำนายของสมการ Peleg

ค่าคงที่ k_1 และ k_2 สำหรับสมการ Peleg แสดงใน Table 2 ซึ่งค่า k_1 และ k_2 จะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการแช่เพิ่มสูงขึ้นทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่ ซึ่ง k_1 จะสัมพันธ์กับการถ่ายเทมวลในการแพร่ซึ่งถ้ามีค่าต่ำจะทำให้อัตราการแพร่ในช่วงแรกมีค่ามาก ส่วน

k_2 เป็นตัวชี้วัดปริมาณน้ำสูงสุดที่เมล็ดข้าวสามารถดูดซับไว้ได้ซึ่งถ้ามีค่าต่ำแล้วจะทำให้ปริมาณน้ำที่ดูดซับไว้ได้สูงขึ้น ซึ่งการลดลงของค่าคงที่ดังกล่าวสะท้อนผลของอุณหภูมิที่มีต่อความชื้นของเมล็ดข้าวระหว่างการแช่ กล่าวคือเมื่อแช่ข้าวที่อุณหภูมิสูง ค่าความชื้นในช่วงแรกของการแช่น้ำก็จะสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และเมล็ดข้าวจะสามารถดูดซับน้ำไว้ได้ปริมาณมากกว่าภายใต้ขอบเขตของเวลาที่จำกัด ที่อุณหภูมิการแช่เดียวกันค่า k_1 ของข้าวเก่าจะมีค่าสูงกว่าข้าวใหม่เล็กน้อย นั่นคือข้าวใหม่จะมีอัตราการแพร่ของน้ำในช่วงแรกเข้าไปยังเมล็ดสูงกว่าข้าวเก่า ซึ่งอาจเป็นผลของโครงสร้างของเกลบและช่องว่างในเมล็ดข้าว ส่วนค่า k_2 ในข้าวใหม่มีแนวโน้มที่จะสูงกว่าข้าวเก่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงว่าข้าวเก่ามีแนวโน้มที่จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำไว้ได้มากกว่าข้าวใหม่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทั้งลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการแช่ของข้าวและผลการวิเคราะห์จากสมการ Becker

3.6 ค่าความชื้นที่ภาวะสมดุล

ค่าความชื้นที่ภาวะสมดุล (M_e) ที่ประมาณจากวิธีของ (Bello et al. 2004) ทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการแช่ที่สูงขึ้นและมีค่าสอดคล้องกันทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า M_e ที่ประมาณจากวิธีนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 80°C ทั้งนี้อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเมล็ดข้าวเมื่ออุณหภูมิการแช่สูงเกิน gelatinization temperature

สำหรับค่าความชื้นที่ภาวะสมดุล (M_e) ที่ได้จากสมการ Peleg ก็มีลักษณะคล้ายกับที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีของ Bello กล่าวคือมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการแช่สูงขึ้น และมีค่าสูงขึ้นอย่างมากเมื่ออุณหภูมิในการแช่เพิ่มขึ้นจาก 70 เป็น 80°C เนื่องจากค่า M_e ที่ได้จากสมการ Peleg นี้คำนวณจากส่วนกลับของค่าคงที่ k_2 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่า M_e สำหรับสมการ Peleg จึงแปรผกผันกับค่าคงที่ k_2 และเป็นที่น่าสนใจที่ค่า M_e ที่ได้จากสมการ Peleg จะมีค่าสูงกว่าค่า M_e ที่คำนวณได้จากวิธีของ (Bello et al. 2004) ในทุกช่วงอุณหภูมิ

3.7 ค่าพลังงานกระตุ้น

พลังงานกระตุ้น (E) ในการดูดซับน้ำในข้าวเก่าที่คำนวณจากสมการ Becker สำหรับข้าวเก่าเท่ากับ 86.87 kJ/mol และใน

ข้าวใหม่มีค่าเท่ากับ 68.58 kJ/mol ค่า E ของข้าวพันธุ์ กข31 ที่ได้ในงานวิจัยนี้มีค่าสูงเมื่อเทียบกับค่า E ของข้าวพันธุ์ IR-20 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 20.51 kJ/mol (Sridhar and Manohar, 2003) และในข้าวกล้องพันธุ์หอมมะลิ 105 เท่ากับ 30.46 kJ/mol (Cheevitsopon and Noomhorm, 2011) ค่าพลังงานกระตุ้นในการดูดซับน้ำนี้จะสะท้อนถึงความสามารถในการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าว กล่าวคือถ้าค่า E มีค่าต่ำ อัตราการเพิ่มขึ้นของการดูดซับน้ำเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็จะมีค่าน้อยตามไปด้วย (Sopade et al., 1992) นั่นคือสำหรับการแช่น้ำที่อุณหภูมิสูงแล้วข้าวเก่าจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำมากกว่าข้าวใหม่

3.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_m) ของทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ที่สามารถคำนวณได้จากสมการ Becker จะมีค่าระหว่าง 0.337×10^{-11} – $0.724 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ เมื่อแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C ดังแสดงใน Table 1 ส่วนที่อุณหภูมิ 80°C ค่า D_m มีค่า $1.407 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ในข้าวใหม่ และ $3.662 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ในข้าวเก่า จะพบว่าค่า D_m ของข้าวเก่าจะมีค่ามากกว่าค่า D_m ของข้าวใหม่ในทุกอุณหภูมิการแช่

3.9 ค่าอัตราการดูดซับน้ำ

ค่าอัตราการดูดซับน้ำ (R) และค่าอัตราการดูดซับน้ำในช่วงแรก (R_0) ที่คำนวณจากสมการ Peleg แสดงใน Table 2 สำหรับค่า R_0 ซึ่งคำนวณได้จากส่วนกลับของค่าคงที่ k_1 ก็จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับค่า k_1 ส่วนค่า R ซึ่งเป็นค่าอัตราการดูดซับน้ำระหว่างการแช่น้ำจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่ กล่าวคือค่า R ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 70°C และกลับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการแช่เพิ่มสูงขึ้นเป็น 80°C .

4 สรุป

สมการสำหรับทำนายค่าความชื้นของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข31 ที่สร้างจากตัวแบบของ Peleg จะให้ความผิดพลาดในการทำนายน้อยกว่าสมการทำนายที่สร้างจากตัวแบบของ Becker เมื่อแช่เมล็ดข้าวที่อุณหภูมิต่ำกว่า gelatinization temperature และการเพิ่มขึ้นของความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 สามารถอธิบายได้จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทั้งจากสมการของ Becker และ Peleg ทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่

เมื่อพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการทำนายทั้งสองได้ผลสอดคล้องกัน กล่าวคือเมื่อแช่น้ำที่อุณหภูมิ $60-70^\circ\text{C}$ ข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ที่เป็นข้าวใหม่จะมีความสามารถในการแพร่ผ่านของน้ำและมีความสามารถในการดูดซับน้ำไว้ได้สูงกว่าในข้าวเก่า ส่วนการแช่น้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า gelatinization temperature ของข้าวเปลือกพันธุ์ กข31 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $70-80^\circ\text{C}$ นั้น ข้าวเก่าจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากกว่าในข้าวใหม่

5 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่สนับสนุนทุนการวิจัย

6 เอกสารอ้างอิง

- กรมการข้าว. 2550. พันธุ์ข้าวเฉลิมพระเกียรติ. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพมหานคร.
- กรมการข้าว. 2556. แนะนำพันธุ์ข้าวรายตำบล ฤดูนาปรัง. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพมหานคร.
- ASABE Standards, 1998. S352.2: Moisture measurements-unground grain seeds, ASAE, St. Joseph, MI.
- Bandyopadhyay, S., Roy, N. 1978. A semi-empirical correlation for prediction of hydration characteristics of paddy during parboiling. International Journal of Food Science & Technology 13, 91-98.
- Bello, M., Tolaba, M.P., Suarez, C. 2004. Factors affecting water uptake of rice grain during soaking. Lwt - Food Science and Technology 37, 811-816.
- Bhattacharya, K.R., 2011. Rice quality: A guide to rice properties and analysis, (1st ed.), Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.
- Bhattacharya, K.R., Ali, S.Z., 2015. An introduction to rice-grain technology, WPI India.
- Chakraverty, A., Singh, R.P., 2014. Postharvest Technology and Food Process Engineering, CRC Press.
- Cheevitsopon, E., Noomhorm, A. 2011. Kinetics of hydration and dimensional changes of brown rice. Journal of Food Processing and Preservation 35, 840-849.
- Gariboldi, F., 1975. Rice parboiling, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Jain, R., Bal, S. 1997. Properties of pearl millet. Journal of Agricultural Engineering Research 66, 85-91.
- Jideani, V.A., Mpotokwana, S. 2009. Modeling of water absorption of Botswana Bambara varieties using peleg's equation. Journal of Food Engineering 92, 182-188.
- Lu, R., Siebenmorgen, T.J., Archer, T.R. 1994. Absorption of water in long-grain rice rough during soaking. Journal of Food Process Engineering 17, 141-154.

- Luh, B.S., 1991. Rice, volume 2: Utilization, (2nd ed.), Springer Science & Business Media, NY.
- Miah, M.A.K., Haque, A., Douglass, M.P., Clarke, B. 2002. Parboiling of rice. Part i: Effect of hot soaking time on quality of milled rice. *International Journal of Food Science and Technology* 37, 527-537.
- Oli, P., Ward, R., Adhikari, B., Torley, P. 2014. The diffusion of moisture in paddy during hydration and dehydration processes. *Drying technology* 32, 1423-1434.
- Peleg, M. 1988. An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science* 53, 1216-1217.
- Singh, B. 1989. Model for absorption of liquid water by grains. *Transactions of the ASAE* 32, 2067-2079.
- Sopade, P., Ajisegiri, E., Badau, M. 1992. The use of peleg's equation to model water absorption in some cereal grains during soaking. *Journal of Food Engineering* 15, 269-283.
- Sridhar, B.S., Manohar, B. 2003. Hydration kinetics and energy analysis of parboiling indica paddy. *Biosystems engineering* 85, 173-183.
- Tani, T., Chikubu, S., Horiuchi, H. 1969. Physicochemical quality of rice *Journal of the Japanese society of Starch Science* 17, 139-153.
- Turhan, M., Sayar, S., Gunasekaran, S. 2002. Application of peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. *Journal of Food Engineering* 53, 153-159.
- Varnamkhasti, M.G., Mobli, H., Jafari, A., Keyhani, A.R., Soltanabadi, M.H., Rafiee, S., Kheiralipour, K. 2008. Some physical properties of rough rice (*oryza sativa* L.) grain. *Journal of Cereal Science* 47, 496-501.
- Vasudeva, S., Vishwanathan, K., Aswathanarayana, K., Swamy, Y.I. 2010. Hydration behaviour of food grains and modelling their moisture pick up as per peleg's equation: Part I. Cereals. *Journal of food science and technology* 47, 34-41.
- Wimberly, J.E., 1983. Technical handbook for the paddy rice postharvest industry in developing countries, International Rice Research Institute.
- Yadav, B.K., Jindal, V.K. 2007. Dimensional changes in milled rice (*oryza sativa* L.) kernel during cooking in relation to its physicochemical properties by image analysis. *Journal of Food Engineering* 81, 710-720.