



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยเทคนิคฟลูอิดไรเซชันโดยใช้ไอน้ำร้อนหยดยิ่ง

โดย นายสมเกียรติ ปรัชญารากร

มิถุนายน ปี 2547

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การอบแห้งถั่วเหลืองด้วยเทคนิคฟลูอิดไชเบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

นายสมเกียรติ ปรัชญารากร
สังกัดมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นส่วนของวิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ ที่ปรึกษาและชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่าง ๆ สำหรับโครงการวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเงินทุนสำหรับโครงการนี้

ABSTRACT

Project Code: TRG 4580102

Project Title : Superheated-steam fluidised-bed drying of soybeans

Investigator: นายสมเกียรติ ปรัชญาวรรการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail Address: somkiat.pra@kmutt.ac.th

Project Period: 2 ปี

This research is a study of soybean-fluidized bed drying using hot air and superheated steam. The effective diffusion coefficient, kinetics of color change and urease inactivation, protein solubility and lysine content of soybean were investigated under drying conditions as follows: drying medium temperatures of 120, 135, and 150°C and the material initial moisture contents of 13.5, 19.5, and 36 dry basis percent. The experimental results showed that at the initial stage of superheated steam drying, condensation temporarily occurred on the material surface and the interior of the material was rapidly heated. In contrast, no condensation occurred for the hot air drying, resulting in a slow increasing rate of material temperature. Over the temperature range studied, the effective diffusion coefficient obtained by the hot air was higher than that obtained by superheated steam. The diffusion coefficient increased with increasing bed temperature and initial moisture content of the material. Considering kinetics of urease inactivation in dried soybean, it followed a modified first-order reaction. Superheated steam drying led to the higher inactivation rate of urease than hot air drying, especially at the drying temperature of 120°C. Concerning the kinetics of material color changes during drying, a zero order kinetic model was applied to L and ΔE changes and the logistic equation was used to describe the kinetics of Δa . Changes of L, a and ΔE of the soybean dried by superheated steam were higher than those of soybean dried by hot air. Temperature and initial moisture content affected the qualities of soybean; the higher drying temperature resulted in the higher urease degradation rate, and the greater L, a and ΔE changes. The higher initial moisture content of the material led to the higher urease degradation rate but the smaller L, a and ΔE changes. The inactivation of urease enzyme, along with maintaining protein solubility and lysine content to be in standard range, was succeeded as soybeans were treated a temperature between 135 and 150°C for the hot air and the treatment temperature could be reduced lower than 135°C by using superheated steam.

Keywords: Fluidization / Soybean / Superheated Steam / Trypsin Inhibitor / Urease

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: TRG 4580102

โครงการ : การอบแห้งถั่วเหลืองด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ชื่อนักวิจัย: นายสมเกียรติ ปรัชญาวารการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail Address: somkiat.pra@kmutt.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดระหว่างการใช้อากาศร้อนกับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสี จลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส ค่าการละลายของโปรตีน และกรดอะมิโนไลซีนของถั่วเหลืองภายใต้สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิของอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120 135 และ 150°C และความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองร้อยละ 13.5 19.5 และ 36 มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลองพบว่าในช่วงต้นของการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกิดการควบแน่นของน้ำที่ผิวและเกิดการดูดซับของน้ำเข้าไปในเมล็ดถั่วเหลือง ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเบตของถั่วเหลืองสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับในการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยอากาศร้อน ตลอดช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าน้อยกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน นอกจากตัวกลางแล้วยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิภายในเบตและความชื้นของถั่วมีค่าสูงขึ้น จลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบปรับปรุงโดยการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งให้อัตราการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120°C สำหรับจลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า L และ ΔE สามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ส่วนการเปลี่ยนแปลงของค่า a อธิบายการเปลี่ยนแปลงด้วยสมการ Logistic จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า L a และ ΔE ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองที่มีต่อคุณภาพของถั่วเหลืองด้านต่างๆ พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูง อัตราการเสื่อมสลายของเอนไซม์และการเปลี่ยนแปลงค่า L a และ ΔE มีค่าสูง และสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นสูงพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสี L a และ ΔE มีค่าต่ำ ในขณะที่อัตราการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสเร็วขึ้น เทคนิคการให้ความร้อนด้วยฟลูอิดไรซ์แบบใช้ไอน้ำร้อนหรืออากาศร้อนสามารถกำจัดเอนไซม์ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้พร้อมกับคุณภาพการละลายของโปรตีนและปริมาณไลซีนอยู่ในเกณฑ์ดี เมื่อใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 135 และ 150°C และใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 135°C สำหรับไอน้ำร้อน

คำสำคัญ: ฟลูอิดไรซ์เบด / ถั่วเหลือง / ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง / สารยับยั้งทริปซิน / เอนไซม์ยูรีเอส

สารบัญ

	หน้า
1. ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา	7
2. วัตถุประสงค์	8
3 วิธีการทดลอง	8
4 ผลการทดลองและวิจารณ์	17
4.1 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นเมล็ดถั่วเหลืองและอุณหภูมิภายในเบต ขณะอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	17
4.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลขณะอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Effective diffusion coefficient)	19
4.3 จลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสขณะอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	21
4.4 จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีขณะอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	23
4.5 ร้อยละของการแตกและร้าวของถั่วเหลืองขณะอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	29
4.6 ค่าการละลายของโปรตีนของถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความร้อน ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Protein solubility)	31
4.7 กรดอะมิโนไลซีนของถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	33
4.8 การเปรียบเทียบการอบแห้งถั่วเหลืองโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อน	33
4.8.1 อุณหภูมิภายในเบตของถั่วเหลือง	33
4.8.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้น	34
4.8.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล	37
4.8.4 จลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส ขณะอบแห้งด้วยอากาศร้อน	37
4.8.5 จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสี	41
4.8.6 ร้อยละของการแตกและร้าว	50
4.8.7 ค่าการละลายของโปรตีน และกรดอะมิโนไลซีน	50
5 สรุปผลการทดลอง	55
6 ข้อเสนอแนะ	57
7 เอกสารอ้างอิง	58
Outputs	59
ภาคผนวก ก	60
ภาคผนวก ข	93
ภาคผนวก ค	120

1. ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา

.....ถั่วเหลืองเป็นพืชตระกูลถั่วชนิดหนึ่งที่นิยมมาใช้ในการสกัดน้ำมันเพื่อการบริโภค และกากถั่วเหลืองที่เหลือจะเป็นผลพลอยได้ที่จะนำมาทำเป็นอาหารสัตว์ อย่างไรก็ตามในระยะหลังนี้เริ่มมีการนำเมล็ดถั่วเหลืองที่ยังไม่ได้สกัดน้ำมันออกหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งเป็นถั่วเหลืองที่มีไขมันเต็มมาใช้ทำเป็นอาหารสัตว์กันมากขึ้นทั้งนี้เพราะเมล็ดถั่วเหลืองที่ไม่ได้สกัดไขมันออกมีไขมันซึ่งเป็นประโยชน์แก่สัตว์ในปริมาณสูง นอกเหนือจากปริมาณของโปรตีนที่มีอยู่แล้ว เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเมล็ดถั่วเหลืองดิบประกอบสารขัดขวางทางโภชนาการหลายชนิด เช่น สารยับยั้งทริปซิน (Trypsin Inhibitor) ฮีมากลูตินิน (Hemagglutinins) เป็นต้น สารเหล่านี้สามารถสลายได้ด้วยความร้อนหรือการทำให้เมล็ดถั่วเหลืองสุก แต่การให้ความร้อนมากเกินไปอาจทำให้ถั่วเหลืองไหม้และโปรตีนในถั่วเหลืองลดลง

กระบวนการให้ความร้อนแก่ถั่วเหลืองมีด้วยกันหลายวิธี [2] เช่น การต้มหรือึ่งด้วยไอน้ำ (Cooking/ Autoclaving) การคั่ว (Roasting) การไมโครไนซ์ (Micronization) และการอัดรีด (Extrusion) เป็นต้น อุณหภูมิที่ใช้ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 170 °C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของกระบวนการ จากรายงานการวิจัยของ White et al. [14] และ Faber and Zimmerman [4] พบว่าถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวเมื่อนำมาให้เป็นอาหารสัตว์ทำให้น้ำหนักตัว ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และค่าการย่อยได้ของไขมันในสัตว์ มีค่าสูงกว่าการใช้อาหารผสมกากถั่วเหลืองกับน้ำมันถั่วเหลือง โดยถั่วเหลืองที่ผ่านการอัดรีดจะให้น้ำหนักตัวสูงสุด นอกจากความร้อนที่มีผลต่อการลดลงของสารขัดขวางทางโภชนาการ จากรายงานการวิจัยของ McNaughton et al. [5] พบว่าความชื้นยังเป็นปัจจัยอีกอันหนึ่งที่ส่งผลเช่นกันโดยถั่วเหลืองที่มีความชื้นสูงเมื่อได้รับความร้อนถั่วเหลืองจะสุกเร็ว และมีปริมาณของทริปซิน และ Urease ต่ำกว่าในกรณีที่มีถั่วมีความชื้นต่ำ

ปัจจุบันในประเทศไทยได้ใช้เทคนิคของการไมโครไนซ์ และการอัดรีดมาใช้ในการกำจัดสารขัดขวางทางโภชนาการ เทคนิคดังกล่าวนี้ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอยู่ในเกณฑ์ดีโดยมีปริมาณ Trypsin อยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่ามาตรฐาน อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวนี้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง นอกเหนือจากมูลค่าของเครื่องสูง เพื่อลดค่าใช้จ่ายดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาหาเทคนิคใหม่ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก และให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาร Trypsin อยู่ในเกณฑ์ดีจากเหตุที่สารขัดขวางทางโภชนาการสามารถสลายด้วยความร้อน การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงน่าจะเป็นทางเลือกอันหนึ่งที่น่าสนใจศึกษาเนื่องจากเครื่องอบแห้งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ และราคาต้นทุนไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับเครื่องอัดรีด และเครื่องไมโครไนซ์เซอร์

สำหรับในโครงการวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นการศึกษาคุณภาพของถั่วเหลืองและอัตราการอบแห้งที่ได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งยวดโดยเปรียบเทียบกับการใช้ลมร้อน ทั้งนี้เป็นเพราะการอบแห้งด้วยไอน้ำนี้จะให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิผกผัน (Inversion Temperature) [8, 10] ทั้งนี้เพราะจากค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของไอน้ำมีค่าสูงกว่ากรณีของอากาศร้อน นอกจากนี้ จากรายงานวิจัยต่างๆ [1, 3, 6, 9, 12-13] ชี้ให้เห็นว่าการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำมีลักษณะเด่นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนดังต่อไปนี้ ความร้อนของไอน้ำที่เหลือทิ้งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ในกรณีที่เป็นระบบปิดปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์สามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการอื่น ๆ เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงขึ้น นอกจากนี้ภายในระบบมีปริมาณของออกซิเจนน้อยทำให้ช่วยลดการออกซิเดชันของอาหารซึ่งมักเกิดขึ้นสำหรับในกรณีของการใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง นอกจากปัจจัยเด่นดังได้กล่าวมาแล้ว การที่ไอน้ำร้อนชนิดยิ่งยวดมีการกลั่นตัวในช่วงแรกของการอบแห้งน่าจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัด trypsin ในถั่วเหลืองดีขึ้น เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากความชื้นภายในเมล็ดถั่วสูงขึ้นและปริมาณของความร้อนที่คลายออกมามีค่าสูงในช่วงของการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคส่งผลให้อุณหภูมิของถั่วเหลืองที่อบแห้งด้วยไอน้ำมีค่าสูงอย่างรวดเร็ว

ปัญหาที่สำคัญอีกอันหนึ่งสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองคือการแตกร้าวของเมล็ดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง [7, 11, 15] ซึ่งค่อนข้างเป็นปัญหาที่สำคัญอันหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อถั่วเหลือง นอกจากนี้ยังเป็นสาเหตุให้มีการติดเชื้อจุลินทรีย์และเกิดการสร้างสารพิษขึ้น (mycotoxins) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญเช่นเดียวกัน จากงานวิจัยที่ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ทางกลุ่มงานวิจัยพบว่าในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคไอน้ำร้อนยวดยิ่งนี้ให้การแตกร้าวของข้าวเปลือกให้น้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะเงื่อนไขของการอบแห้งที่เหมือนกันซึ่งแสดงผลในเชิงบวกของการอบแห้งโดยเทคนิคนี้

2. วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวลภายใต้การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อน ยวดยิ่งและลมร้อน
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของถั่วเหลืองที่ได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำ และลมร้อน
3. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการอบแห้งภายในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดแบบใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

3 วิธี ก า ร ท ด ล อ ง

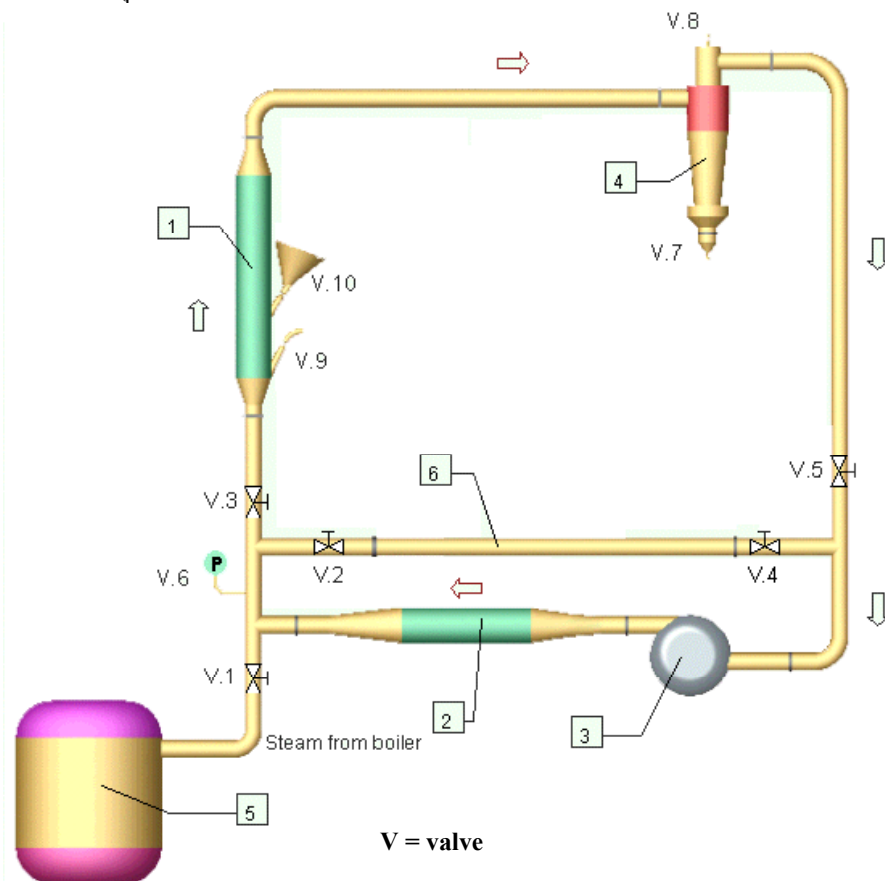
3.1 การเตรียมตัวอย่าง

ถั่วเหลืองที่นำมาใช้ในการอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 13.5 มาตรฐานแห้ง ในการเตรียมเมล็ดถั่วเหลืองที่ความชื้นร้อยละ 19.5 และ 36 มาตรฐานแห้ง ทำโดยคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไปในการปรับความชื้นถั่วเหลือง จากนั้นทำการพรมน้ำทั้งหมดลงในเมล็ดถั่วเหลือง จากนั้นนำไปเก็บไว้ในถังที่ปิดสนิท เก็บไว้ที่ห้องเย็นที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 4°C ในช่วงประมาณ 3-4 วันแรก นำถั่วเหลืองออกมาคลุกให้ความชื้นกระจายตัว แล้วนำกลับไปเก็บดังเดิมจนครบ 7 วัน และก่อนทำการอบแห้งต้องปล่อยให้ถั่วเหลืองมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม

3.2 อุปกรณ์การทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ซึ่งเครื่องอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเป็นเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดแบบวงวด แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งออกแบบให้สามารถใช้ได้ทั้งอากาศและไอน้ำร้อน ในการดำเนินการทดลองสำหรับการใช้ไอน้ำร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งนั้นเริ่มแรกอุณหภูมิด้วยใช้อากาศร้อน โดยตั้งอุณหภูมิตามที่ต้องการใช้ในการอบแห้ง เพื่อป้องกันการกลั่นตัวของไอน้ำเมื่อเข้าสู่ระบบ จากนั้นปล่อยไอน้ำอิ่มตัวจากเครื่องกำเนิดไอน้ำไหลผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อนที่มีขนาด 13.5 kW ไอน้ำอิ่มตัวจะเปลี่ยนสภาพเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งซึ่งจะไหลผ่านระบบเข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยความเร็วของตัวกลางไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการอบแห้งกำหนดที่ 3.2 m/s ความเร็วของไอน้ำร้อนที่เข้าห้องอบแห้งควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของพัดลม ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งวัดโดยเครื่องมือวัดความเร็ว Pitot tube ตลอดระยะเวลาในการอบแห้งจะควบคุมความดันภายในระบบให้คงที่ประมาณ 106 kPa สำหรับการทำงานของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดแบบอากาศร้อนมีลักษณะคล้ายคลึงกับไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพียงแต่ว่าในกรณีนี้อากาศร้อนที่ผ่านห้องอบแห้งจะถูกทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมบางส่วน ซึ่งตั้งความเร็วของตัวกลางอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งไว้ที่ 2.6 m/s (เป็นการทดลองเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยกำหนดสภาวะในการทดลองที่ Reynolds number เดียวกัน) โดยวัดความเร็วลมของอากาศโดยเครื่องมือ Hot-wire anemometer จากนั้นปรับอุณหภูมิไปที่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

สำหรับขั้นตอนการอบแห้งทำโดยโดยป้อนถั่วเหลืองที่เตรียมไว้ปริมาณ 1.3 กิโลกรัมลงในห้องอบแห้ง โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 120 135 และ 150°C ในระหว่างการอบแห้งจะมีการเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในชั้นเบของถั่วเหลืองจากการต่อสายเทอร์โมคัปเปิลในชั้นเบของห้องอบแห้งเข้ากับ data logger ที่แสดงผลอุณหภูมิโดยมีค่าความถูกต้อง ± 1 °C เมื่อทำการอบแห้งถั่วเหลืองจนครบระยะเวลาที่กำหนด จะนำถั่วเหลืองออกจากห้องอบแห้งเพื่อวัดปริมาณความชื้น โดยนำถั่วเหลืองไปอบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง สำหรับถั่วเหลืองที่นำมาวิเคราะห์คุณภาพ จะเก็บตัวอย่างหลังจากปล่อยถั่วเหลืองทิ้งไว้ให้เย็น และทำการเป่าลมจนกระทั่งความชื้นในถั่วเหลืองเข้าสู่สมดุล จากนั้นนำถั่วเหลืองมาบดให้ละเอียดให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 cm



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมเครื่องอบแห้งฟลูอิดเบดแบบไอน้ำร้อนขดขึง และอากาศร้อน

- (1) เครื่องอบแห้งฟลูอิดเบด, (2) อุปกรณ์ให้ความร้อน, (3) พัดลม, (4) ไซโคลน
(5) หม้อต้มไอน้ำ, (6) กระแสป้อนข้าม)

3.3 คุณภาพถั่วเหลือง

3.3.1 ค่าการละลายของโปรตีน (Protein solubility)

ค่าการละลายของโปรตีน (Protein solubility) คือ ร้อยละของปริมาณโปรตีนในถั่วเหลืองที่ละลายในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 0.2 ต่อปริมาณโปรตีนที่มีอยู่ในถั่วเหลืองทั้งหมด สามารถทำการทดลองได้ดังนี้

1. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยการละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 กรัมลงในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร
2. ชั่งตัวอย่างถั่วเหลืองบดละเอียด 0.5 กรัม (เทคนิค 4 ตำแหน่ง) ใส่ลงในขวดชมพู

3. เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลงไป 75 มิลลิลิตร
4. นำไปปั่นด้วยความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที
5. กรองเก็บส่วนที่เป็นสารละลายใสด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4
6. ปิเปตสารละลายใส 15 มิลลิลิตร (คือน้ำหนักตัวอย่างในการคำนวณหาปริมาณโปรตีนเป็น 1 ใน 5 ของน้ำหนักที่ชั่งได้ในข้อที่ 2) ใส่ลงในขวด Kjeldahl ที่แห้ง
7. ชั่งถั่วเหลืองประมาณ 0.2 กรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ใส่ลงในขวด Kjeldahl ที่แห้ง
8. เติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) 10 กรัม คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) 1 กรัม และกรดซัลฟูริกเข้มข้น 7 มิลลิลิตรลงในสารข้อ 6 และ 7
9. ติดตั้งขวด Kjeldahl ในชุดที่ให้ความร้อนและเปิดตู้ดูดควันให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $385^\circ C$ จนกระทั่งได้สารละลายสีสีเขียว จากนั้นรอให้สารเย็นตัว
10. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่มากเกินไปลงในสารข้อ 9
11. ทำการกลั่นสารในข้อ 10 ลงในสารละลายกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยเติมอินดิเคเตอร์ผสมระหว่าง Methyl red และ Methylene blue โดยจะเกิดการเปลี่ยนสีของสารจากสีม่วงเป็นสีเขียว
12. นำสารละลายที่ได้ไปไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน
13. ทำเบลนค์ โดยทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 8 ถึง 12 โดยไม่ใช้สารตัวอย่าง

การหาปริมาณโปรตีนสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ค่าการละลายของโปรตีน} = \frac{8 \times B \times (x - y)}{A}$$

- เมื่อ
- A คือ น้ำหนักของถั่วเหลืองตัวอย่าง (กรัม)
 - B คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรต (โมลต่อลิตร)
 - x คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 - y คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตเบลนค์ (มิลลิลิตร)

3.3.2 เอนไซม์ยูรีเอส

ในการวิเคราะห์หา enzymatic activity ในงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์ด้วยกัน 2 แบบคือ แสดงผลอยู่ในรูปของความแตกต่างของ ΔpH ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสัตว์ และวิธีที่ 2 เป็นการวัดแอกติวิตีของเอนไซม์โดยตรง

3.3.2.1 Urease Activity (ΔpH)

วิธีแรกนี้เป็นการนำถั่วเหลืองมาทำปฏิกิริยากับสารละลายบัฟเฟอร์ยูเรีย (มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7) ซึ่งทำให้เกิดแอมโมเนีย ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดต่าง (ΔpH) โดยแอมโมเนียที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสที่มีในถั่วเหลือง วิธีการทดลองสามารถทำได้ดังนี้

1. เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร โดยการชั่งสารไดโพแทสเซียมไฮโดรฟอสเฟต (K_2HPO_4) 4.355 กรัม และโพแทสเซียมไดไฮโดรฟอสเฟต (KH_2PO_4) 3.403 กรัม นำสารแต่ละส่วนละลายในน้ำกลั่น จากนั้นผสมสารละลายทั้งสองแล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ก่อนใช้งานให้ปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เป็น 7

2. เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ยูเรีย โดยละลายยูเรีย 15 กรัมลงในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร เพื่อป้องกันสารละลายไม่ให้เสียสภาพ และปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เป็น 7 ก่อนนำมาใช้งาน
3. ชั่งถั่วเหลืองบดละเอียด 0.2 กรัมลงในหลอดทดลอง แล้วเติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นหลอด ความคุมอุณหภูมิไว้ที่ 30°C โดยใช้ water bath
4. ทำแบลงค์โดยการทดลองซ้ำในข้อที่ 3. แต่เปลี่ยนจากสารละลายบัฟเฟอร์ยูเรียเป็นสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต
5. เติมน้ำกลั่นหลอดทั้งสองทุกๆ 5 นาที จนครบ 30 นาที
6. วัดค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายโดยใช้ pH meter โดยค่า Urease Activity คือ ค่าความแตกต่างของค่าความเป็นกรดต่างระหว่างสารตัวอย่างกับแบลงค์

3.2.2.2 Urease Inactivation

วิธีการวิเคราะห์แอกติวิตีของเอนไซม์ยูเรียสวิธีนี้เป็นของ Rasmussen หลักการในการหาค่า Urease Inactivation คล้ายกับวิธีแรก คืออาศัยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยูเรียกับเอนไซม์ยูเรียสที่มีในถั่วเหลือง ทำให้เกิดก๊าซแอมโมเนียขึ้น แล้วทำการกลั่นสารละลายเพื่อให้ก๊าซแอมโมเนียระเหยไปทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดที่รองรับ จากนั้นหาปริมาณกรดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยไทเทรตกับเบส โดยปริมาณกรดที่ใช้จะสมมูลกับปริมาณก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้น วิธีการทดลองสามารถทำได้ดังนี้

1. ชั่งถั่วเหลืองบดละเอียด 1 กรัม (เทคนิค 4 ตำแหน่ง) ใส่ลงในขวดกลั่น
2. เติมน้ำกลั่น 0.2 กรัม และน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร ปิดฝาขวดทันทีด้วยพาราฟินหรือจุก
3. เติมน้ำกลั่น โดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์
4. เมื่อครบ 1 ชั่วโมง เติมน้ำกลั่นแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ลงไป 2 กรัม
5. ทำการกลั่นสารข้อ 4 ลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน 30 มิลลิลิตร โดยให้ข้อต่อของขวดกลั่นจุ่มลงในสารละลายกรด เพื่อป้องกันการหายไปของก๊าซแอมโมเนีย กลั่นจนได้สารละลายจำนวน 250 มิลลิลิตร
6. นำสารละลายในข้อ 5 ไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จะสามารถหาปริมาณกรดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซแอมโมเนียได้

จากผลการทดลองสามารถแสดงออกมาในรูป Milliequivalent ของก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างยูเรียกับเอนไซม์ยูเรียสในถั่วเหลือง โดยสามารถหาได้จากการคำนวณดังนี้

$$\text{Milliequivalent ของก๊าซแอมโมเนีย} = \frac{\text{ความเข้มข้นของกรด} \times \text{ปริมาณกรดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา}}{\text{Urease Inactivation} = \frac{(\text{Milliequivalent ของก๊าซแอมโมเนียก่อนอบแห้ง} - \text{หลังอบแห้ง}) \times 100}{\text{Milliequivalent ของก๊าซแอมโมเนียก่อนอบแห้ง}}}$$

$$\text{Residual urease activity} = 100 - \text{Urease inactivation}$$

3.3.3 สี

ค่าสีของถั่วเหลืองวัดด้วยเครื่องวัดสีแบบ Hunter โดยใช้เครื่องรุ่น Minolta CR300 วัดสีออกมาเป็นค่า L a และ b โดยค่า L หรือความสว่าง (Lightness) มีค่าในช่วง 0-100 แสดงถึงความมืดถึงความสว่าง ค่า a หรือความแดง (Redness) มีค่าในช่วง -60 ถึง +60 แสดงถึงโทนสีเขียวถึงสีแดง และค่า b หรือค่าความเหลือง (Yellowness) มีค่าในช่วง -60 ถึง +60 แสดงถึงโทนสีน้ำเงินถึงสีเหลือง ซึ่งจะศึกษาการเปลี่ยนสีของถั่วเหลืองที่เวลาที่ใช้ในการอบแห้งต่างๆ วิธีการทดลองสามารถทำได้ดังนี้

1. เปิดเครื่อง โดยกด Switch on
2. ทำการปรับเทียบเครื่องวัดโดยใช้แผ่นปรับเทียบ (Calibrate plate) โดยอ่านค่าที่ปรับเทียบได้เท่ากับ $L = 96.98$ $a = 0.03$ และ $b = 1.84$
3. นำถั่วเหลืองบดละเอียดใส่ภาชนะ โดยแผ่เมล็ดถั่วเหลืองให้เต็มภาชนะ (ไม่ให้เห็นก้นภาชนะ)
4. ทำการวัดค่าสีโดยกดปุ่มสแกนไปที่เมล็ดถั่วเหลือง เครื่องจะส่งผ่านคลื่นแสงไปสู่เมล็ดถั่วเหลือง โดยเครื่องจะวัดค่าสีออกมาเป็นค่า L a และ b ซึ่งถั่วเหลืองในแต่ละตัวอย่างจะทำการวัดในตำแหน่งที่ต่างกัน 10 ตำแหน่ง โดยแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ย

3.3.4 ความชื้น

การหาความชื้นของเมล็ดถั่วโดยมาตรฐานของ ASAE สามารถทำการทดลองได้ดังนี้

1. ชั่งภาชนะที่จะนำมาบรรจุถั่วเหลืองพร้อมฝาปิด ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน
2. นำตัวอย่างถั่วเหลืองประมาณ 15 กรัม ใส่ลงในภาชนะในข้อที่ 1 และนำไปชั่งน้ำหนัก
3. นำเข้าตู้อบโดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 103°C ทำการอบเป็นเวลา 72 ชั่วโมง
4. ชั่งน้ำหนักของถั่วเหลืองพร้อมภาชนะในข้อที่ 3 จะได้ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในถั่วเหลือง ซึ่งทั่วไปจะแสดงอยู่ในรูปร้อยละของมาตรฐานแห้ง โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละมาตรฐานแห้ง} = \frac{(\text{น้ำหนักถั่วเหลืองก่อนอบ} - \text{น้ำหนักถั่วเหลืองหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักถั่วเหลืองหลังอบ}}$$

3.3.5 ร้อยละของการแตกและการร้าว

ถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งแล้วสามารถนำมาหาร้อยละของการแตกและการร้าวได้ดังนี้

1. ชั่งตัวอย่างถั่วเหลืองให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน
 2. นำถั่วเหลืองมาพิจารณาการแตกและการร้าวโดยการส่องดูด้วยแสงจากหลอดไฟ ทำการแยกคัดเมล็ดแตก เมล็ดร้าว และเมล็ดสมบูรณ์ออกจากกัน
 3. นำเมล็ดถั่วเหลืองที่แตก และร้าวไปชั่งน้ำหนักให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน
- นำค่าที่ได้จากข้อที่ 3 มาคำนวณร้อยละของการแตกและการร้าว จากสูตร

$$\text{ร้อยละของการแตก} = \frac{\text{น้ำหนักเมล็ดแตก} \times 100}{\text{น้ำหนักเมล็ดตัวอย่าง}}$$

$$\text{ร้อยละของการรั่ว} = \frac{\text{น้ำหนักเมล็ดข้าว} \times 100}{\text{น้ำหนักเมล็ดตัวอย่าง}}$$

3.3.6 ปริมาณกรดอะมิโนไลซีน (Lysine content)

กรดอะมิโนไลซีนในถั่วเหลืองสามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค High performance liquid chromatography ที่ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์แบบฟลูออเรสเซนซ์ สำหรับวิธีในการเตรียมสารและวิเคราะห์มีดังนี้

1. การเตรียมสารตัวอย่าง

- 1.1 นำตัวอย่างถั่วเหลืองมาบดละเอียดให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร
- 1.2 ชั่งน้ำหนักถั่วเหลืองบดประมาณ 100 มิลลิกรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
- 1.3 นำถั่วเหลืองมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 6 นอร์มอล ปริมาณ 5 มิลลิลิตร
- 1.4 นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง
- 1.5 เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำสารที่ได้มาเติม Internal standard และปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน
- 1.6 นำสารที่เตรียมได้มาผ่านกระบวนการ Derivatization ด้วยการเติมสารละลายบัฟเฟอร์ 6-aminoquinolyl-N-hydroxysuccinimidyl carbamate (AccQ[•] reagent)
- 1.7 นำตัวอย่างไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 10 นาที

2. การวิเคราะห์ปริมาณกรดอะมิโน

- 2.1 นำตัวอย่างที่ได้ปริมาณ 5 ไมโครลิตร ฉีดลงในเครื่อง High performance liquid chromatograph (HPLC) โดยเครื่องมีระบบให้ความร้อนชนิด WATER Alliance 2675 และคอลัมน์ชนิด AccQ[•] Tag มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.9 มิลลิเมตร ความยาวของคอลัมน์ 150 มิลลิเมตร ในการวิเคราะห์ใช้ Eluent ชนิด AccQ[•] Tag Eluent A และตัวพาสาร (Carrier) เป็นสารละลาย Acetonitrile ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยปริมาตร
- 2.2 การวิเคราะห์ผลของเครื่อง HPLC เป็นลักษณะ Pre-column สารที่ออกจากเครื่องจะเข้าสู่หน่วยวิเคราะห์ ซึ่งเป็นเครื่องฟลูออเรสเซนซ์รุ่น 2475 Scanning Fluorescence Detector โดยตั้งความยาวคลื่นแสงขาเข้าและขาออก เท่ากับ 250 และ 395 นาโนเมตร

3.4 การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

โดยทั่วไปการแพร่ความเข้มข้นของวัสดุที่นำมาอบแห้งจะหาออกมาในรูปสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective diffusion coefficient) จากกฎของ Fick เมื่อพิจารณารูปทรงถั่วเหลืองเป็นทรงกลม และการแพร่ความเข้มข้นในถั่วเหลืองเกิดในแนวรัศมี จะได้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \left(\frac{2}{r} \right) \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (1)$$

โดยมี Initial condition และ Boundary condition คือ

$$\begin{aligned} M(r, 0) &= M_{\text{in}} & \text{for } r < R \\ M(r_0, t) &= M_{\text{eq}} & \text{for } t > 0 \end{aligned}$$

สำหรับคำตอบของสมการที่ 1 ที่สอดคล้องกับ Initial condition และ Boundary condition

$$\frac{M(t)}{M_{in}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (2)$$

เมื่อ $M(t)$ คือปริมาณความชื้นที่เวลา t (มาตรฐานแห้ง) M_{in} คือปริมาณความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลือง (มาตรฐานแห้ง) D_{eff} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (m^2/s) t คือเวลาในการอบแห้ง (วินาที) และ r คือรัศมีของถั่วเหลือง (เมตร) ตามลำดับ

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว สามารถนำอัตราส่วนความชื้นที่ได้ในการทดลองมาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลได้จากสมการ (2) โดยตรง แต่อย่างไรก็ตามหากความชื้นในเมล็ดถั่วเหลืองมีผลต่อการแพร่ความชื้นด้วย จะไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของถั่วเหลืองได้จากสมการ (2) ได้โดยตรง เนื่องจากสมการ (2) ซึ่งเป็นคำตอบของสมการ (1) ได้มาจากข้อสมมติฐานที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความชื้นของวัสดุที่นำมาอบแห้ง เมื่อความชื้นในถั่วเหลืองมีผลต่อการอบแห้งจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของถั่วเหลืองจากวิธีของความชัน (Slope method) โดยการหาอนุพันธ์สมการ (2) เทียบกับเวลา

$$\frac{d(M(t)/M_{in})}{dt} = -\frac{6D_{eff}}{r^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (3)$$

จากอัตราการอบแห้งถั่วเหลืองที่ได้จากการทดลอง รัศมีของถั่วเหลือง ความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลือง และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ณ ตำแหน่งต่างๆในสมการ (3) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในการอบแห้งถั่วเหลืองได้ จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของถั่วเหลืองที่ได้มาหาค่าความสัมพันธ์กับอุณหภูมิภายในเบดและความชื้นของถั่วเหลือง โดยปกติความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิจะแสดงในรูปสมการของอาร์เรเนียส แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของถั่วเหลืองมีค่าขึ้นกับความชื้นในเมล็ดถั่วเหลืองด้วยต้องทำการทดลองหารูปแบบสมการที่ดีที่สุดโดยการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression) เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของถั่วเหลืองกับอุณหภูมิและความชื้นของถั่วเหลือง

ในการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการเอมไพริคัลที่ได้ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient of square, r^2) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่บ่งชี้ให้ทราบถึงความสอดคล้องระหว่างสมการกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยค่า r^2 มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ซึ่งหากสมการที่ใช้อธิบายผลการทดลองมีค่า r^2 เข้าใกล้ 1 แสดงถึงสมการที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลผลการทดลองมาก นอกจากนี้ยังใช้พารามิเตอร์ทางสถิติในการเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลจากการทดลองกับข้อมูลที่ได้อีกจำนวนในรูปของ Residual sum of square (RSS) ดังแสดงในสมการ (4) ซึ่งหากสมการที่ได้ให้ค่า RSS ต่ำ แสดงถึงสมการนั้นสามารถนำมาอธิบายผลการทดลองได้ดี

$$RSS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (data_{cal} - data_{exp})^2}{n - p}} \quad (4)$$

เมื่อ $data_{cal}$ คือ ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ fit ได้

$data_{exp}$ คือ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

n คือ จำนวนข้อมูล

p คือ จำนวนค่าคงที่ในสมการ

3.5 จลนศาสตร์ของการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส

ในการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างๆที่วิเคราะห์ออกมาด้วยค่าปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสที่เหลืออยู่ (Residual urease activity) จากวิธีของ Rasmussen เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองที่ใช้แสดงจลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส เมื่อเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสที่เหลืออยู่ในถั่วเหลืองที่เปลี่ยนไปกับเวลาตาม

กฎของอัตรา (rate law) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dC}{dt} = -kC^n \quad (5)$$

เมื่อ C คือร้อยละของปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสที่เหลืออยู่ในถั่วเหลือง k คือค่าคงที่ของปฏิกิริยา t คือเวลาในการอบแห้ง (นาท) และ n คืออันดับของปฏิกิริยา

จากผลการอบแห้งถั่วเหลืองพบว่า การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งมี ลักษณะการลดลงเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียลกับเวลาในการอบแห้ง โดยการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองมีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการอบแห้ง และจากนั้นมีการลดลงเพียงเล็กน้อยก่อนเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ อธิบายการลดลงของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองด้วยสมการของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบปรับปรุง (Modified first order reaction) อธิบายดังแสดงในสมการ (6)

$$\frac{(C - C_{eq})}{(C_0 - C_{eq})} = \exp(-kt) \quad (6)$$

เมื่อ C C_0 และ C_{eq} คือร้อยละของเอนไซม์ยูรีเอสที่เหลือ ณ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ตอนเริ่มต้น และที่สภาวะสมดุลตามลำดับ และ k คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาของการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส (นาท^{-1}) โดยร้อยละของเอนไซม์ยูรีเอสของถั่วเหลืองตอนเริ่มต้นเท่ากับ 100 ค่าคงที่ของ k และ C_{eq} สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ถดถอย

3.6 จลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสี

ในการศึกษาจลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งสามารถทำได้ในทำนองเดียวกันกับการศึกษาจลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลือง จากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่เปลี่ยนไปกับเวลาตามกฎของอัตรา สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า L โดยแสดงในเทอมของผลต่างได้ดังนี้

$$\frac{d\Delta L}{dt} = -k_{\Delta L} \Delta L^n \quad (7)$$

เมื่อ ΔL คือ ผลต่างของค่า L ของถั่วเหลือง ณ เวลาการอบแห้งใดๆกับค่า L ของถั่วเหลืองดิบ และ $k_{\Delta L}$ คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงค่า ΔL (นาท^{-1}) ในการทำนายอันดับของปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL จากการทดลองพบ

ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า L ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งมีแนวโน้มการลดลงมีลักษณะเป็นเส้นตรงเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL ของถั่วเหลืองสามารถอธิบายด้วยปฏิกิริยาอันดับศูนย์ดังสมการ

$$\Delta L = -k_{\Delta L} t \quad (8)$$

ค่าคงที่ของปฏิกิริยาสามารถทราบได้จากการพลอตกราฟระหว่าง ΔL กับ t

สำหรับการศึกษาจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงของค่า Δa สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกับค่า ΔL โดยการเปลี่ยนแปลงของค่า a มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยค่า a จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงต้นของการอบแห้ง จากนั้นการเพิ่มขึ้นของค่า a มีลักษณะเป็นลอการิทึม และเมื่อระยะเวลาการอบแห้งนานขึ้น ค่า a จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ลักษณะของกราฟคล้ายตัว S (S-curve) ในงานวิจัยนี้จึงนำสมการของ logistic มาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า a ดังแสดงในสมการ (9)

$$\Delta a = \frac{a_{eq}}{1 + \exp(-k_{\Delta a} (t - t_0))} \quad (9)$$

เมื่อค่า $k_{\Delta a}$ คือค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของค่า Δa (นาที่⁻¹) ค่า a_{eq} คือค่า a ของถั่วเหลืองที่สภาวะสมดุล และ t_0 คือเวลาที่ค่า a มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่า a ที่สภาวะสมดุล (นาที่)

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า Δb ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL และ Δa รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของค่า Δb มีลักษณะขึ้นลงแปรปรวน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่นำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของค่า Δb มาหาความสัมพันธ์กับเวลา

จากการศึกษาจลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของถั่วเหลืองพบว่าการเปลี่ยนแปลงสีของค่า ΔL , Δa และ Δb มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจความสัมพันธ์ของสีแต่ละค่ามากขึ้น จึงอธิบายความสัมพันธ์ของค่า ΔL , Δa และ Δb ด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของถั่วเหลือง (total color difference, ΔE) แสดงดังสมการ (10)

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2} \quad (10)$$

ซึ่งจากผลจากการคำนวณพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมส่วนใหญ่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL ดังนั้นจึงใช้สมการในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของถั่วเหลืองเหมือนค่า ΔL ด้วยปฏิกิริยาอันดับศูนย์แสดงดังสมการ (11) และ (12)

$$\frac{d\Delta E}{dt} = k_{\Delta E} \quad (11)$$

$$\Delta E = k_{\Delta E} t \quad (12)$$

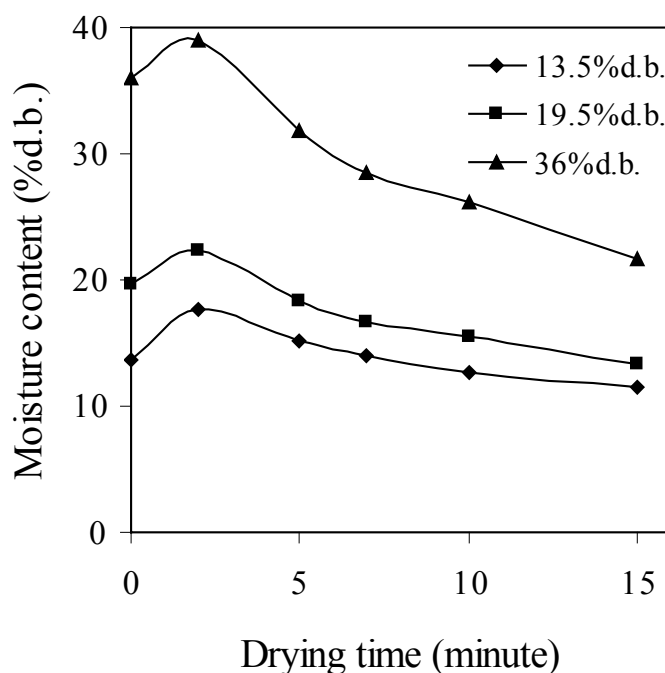
เมื่อ $k_{\Delta E}$ คือค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของถั่วเหลือง (นาที่⁻¹) ซึ่งสามารถทราบได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอย

4 ผลการทดลองและวิจารณ์

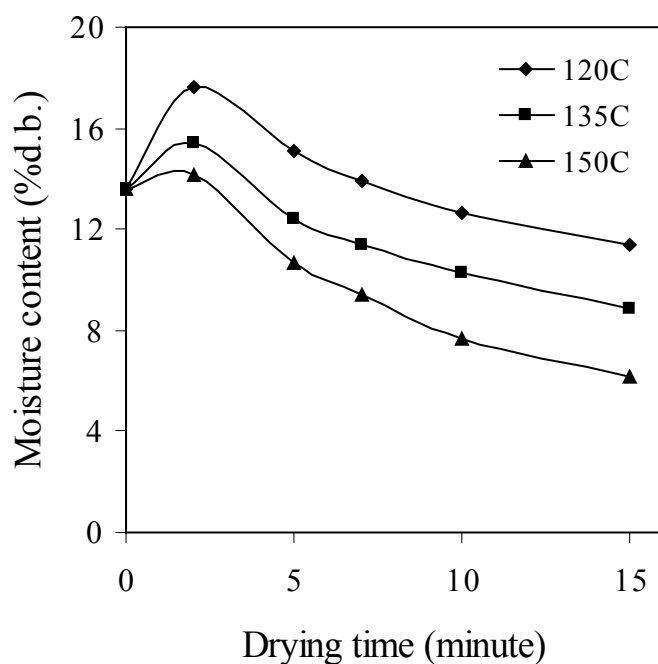
4.1 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นเมล็ดถั่วเหลืองและอุณหภูมิภายในเบตขณะอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

จากการทดลองการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดยิ่งพบว่าในช่วงต้นของการอบแห้งความชื้นของถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องจากเมื่อถั่วเหลืองสัมผัสกับไอน้ำร้อนขวดยิ่งจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของถั่วเหลือง ซึ่งน้ำบางส่วนถูกดูดซับเข้าสู่ผิวของถั่วเหลืองและเมื่ออุณหภูมิของถั่วเหลืองเพิ่มสูงถึงอุณหภูมิอิ่มตัว การควบแน่นของไอน้ำจะหยุดลง ทำให้เกิดการระเหยน้ำภายในเมล็ดถั่วเหลืองส่งผลให้ความชื้นของถั่วเหลืองลดต่ำลง จากรูปที่ 4.1 เป็นผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของถั่วเหลืองที่ความชื้นเริ่มต้นต่างๆ ที่ผ่านการ อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C พบว่าที่เวลาอบแห้ง 2 นาที ถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5 และ 36 มาตรฐานแห้งมีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น 4 และ 2.97 หน่วย ตามลำดับ จะเห็นว่าถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำจะมีการดูดซับน้ำสูงกว่าถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงซึ่งผลดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำมีช่องว่างในการดูดซับน้ำมากกว่าถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งที่มีต่อการเพิ่มความชื้นของถั่วเหลืองในช่วงการควบแน่นของไอน้ำร้อนขวดยิ่งพบว่า ถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5 มาตรฐานแห้งที่ผ่านการ อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 และ 150°C มีการเพิ่มความชื้นเท่ากับ 4 และ 0.53 หน่วยร้อยละมาตรฐานแห้ง ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าถั่วเหลืองที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะสามารถดูดซับน้ำเข้าสู่ผิวได้มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งที่อุณหภูมิสูงนั้น Degree of superheat มีค่าสูง การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ดูดซับเข้าไปมีน้อยกว่าและการลดลงของความชื้นเกิดขึ้นเร็วกว่า

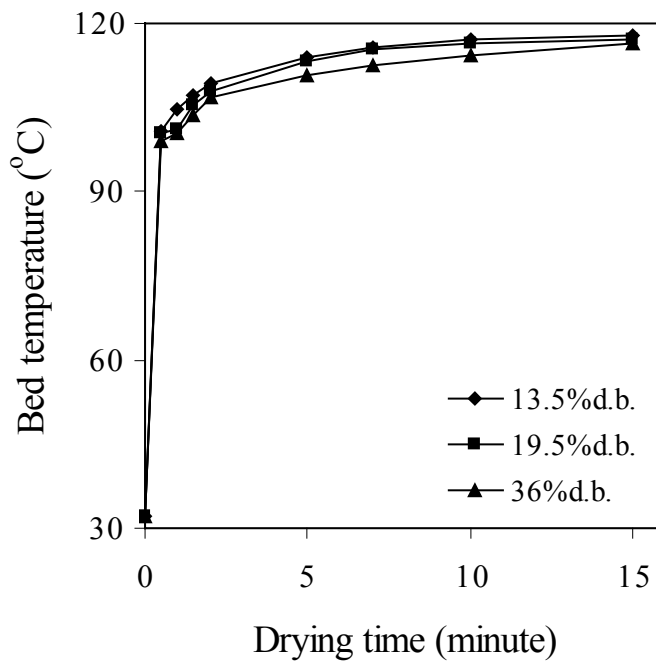


รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของถั่วเหลืองที่ความชื้นเริ่มต้นต่างๆ ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5
มาตรฐานแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยี่งที่อุณหภูมิต่างๆ

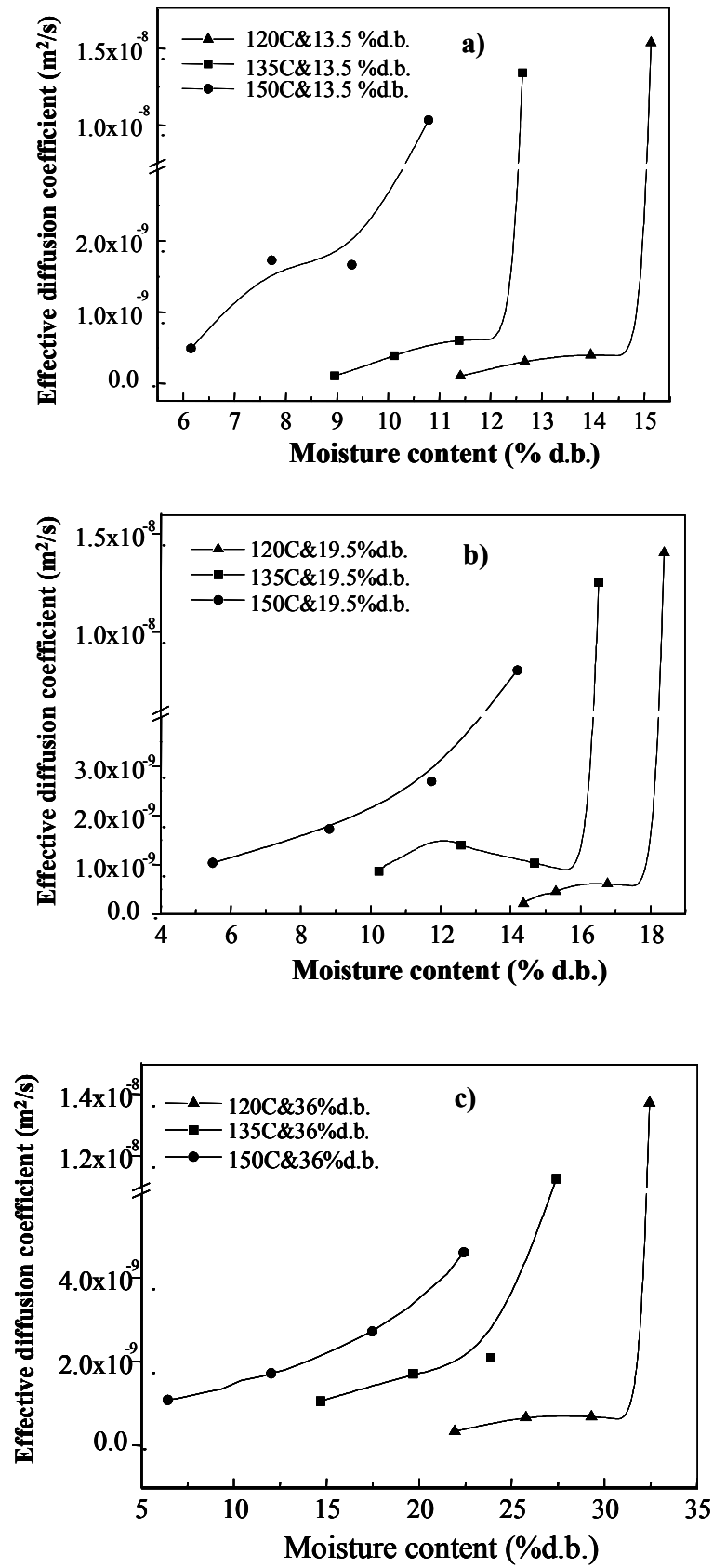
จากการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนขดยี่งจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำในช่วงต้นของการอบแห้งดังที่กล่าวถึงข้างต้น พบว่าผลของการดูดซับน้ำของถั่วเหลืองในขั้นตอนการควบแน่นส่งผลให้อุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นการแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยี่งที่อุณหภูมิ 120°C จากผลการทดลองพบว่าการอบแห้งถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเบดต่ำกว่าการอบแห้งถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำ ผลดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนที่ถั่วเหลืองได้รับส่วนหนึ่งใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับถั่วเหลือง อีกส่วนหนึ่งใช้ในการระเหยน้ำในเมล็ด ดังนั้นถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงจะใช้พลังงานความร้อนในการระเหยน้ำในเมล็ดมากกว่าถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเบดมีค่าต่ำกว่า



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองที่ความชื้นเริ่มต้นต่างๆ ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C

4.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเบดแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Effective diffusion coefficient)

ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งทำได้โดยแทนค่าอัตราการอบแห้งถั่วเหลืองที่ได้จากการทดลอง รัศมีของถั่วเหลือง ความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลือง และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ณ เวลาต่างๆลงไปนสมการที่ (3) เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของถั่วเหลืองได้ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในการอบแห้งถั่วเหลืองจะมีค่าสูงสุดในตอนเริ่มต้นเป็นผลเนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในตอนเริ่มต้นของการอบแห้งดังที่กล่าวถึงข้างต้น ทำให้ที่ที่ถูกดูดซับส่วนใหญ่จะอยู่ที่ผิวของเมล็ดถั่วเหลือง เป็นผลให้การกระจายตัวของน้ำในถั่วเหลืองไม่สม่ำเสมอ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในการอบแห้งถั่วเหลืองช่วงเริ่มต้นมีค่าสูง และจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของถั่วเหลืองมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งเป็นผลจากการลดลงของความชื้นเนื่องจากการระเหยน้ำภายในเมล็ดถั่วเหลือง นอกจากนี้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองมีค่าสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในการอบแห้งถั่วเหลืองจะมีค่าสูง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการใช้ตัวกลางในการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนหลักในการเร่งอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในถั่วเหลือง



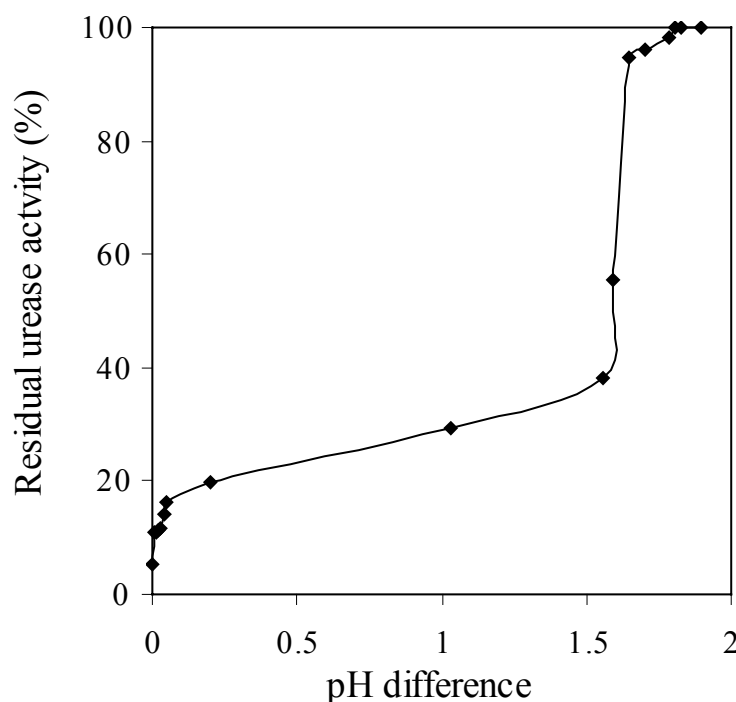
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล
ที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนชาวยังต่างๆ

และจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่แสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์กับความชื้นและอุณหภูมิภายในเบคของถั่วเหลือง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (13) โดยมีค่า $R^2 = 0.86$ และ $RSS = 3.6 \times 10^{-10}$

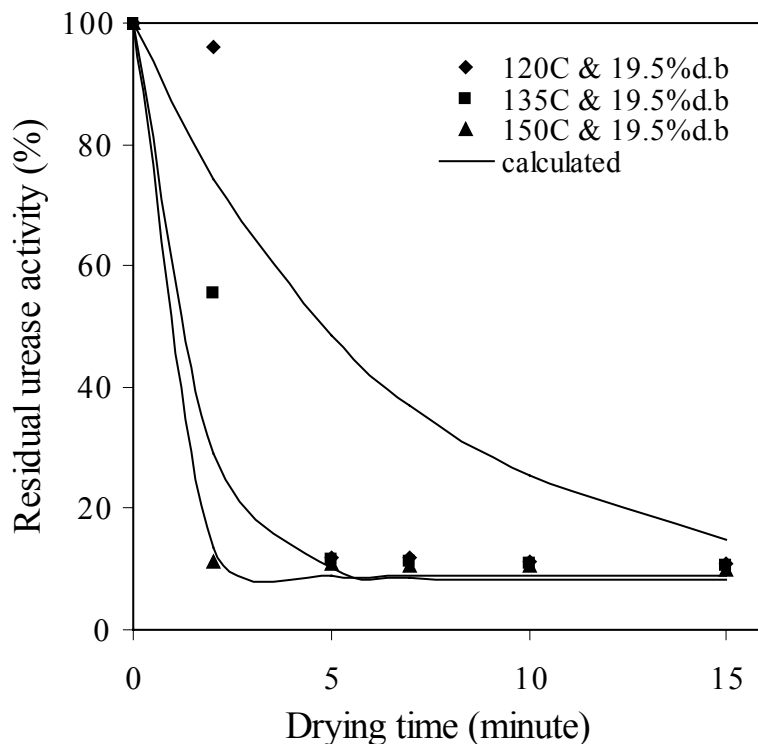
$$D_{\text{eff}} = [36 \times 10^{-26} \exp(0.09204T)] \exp[(-2313.9 + 11.753T - 0.01487T^2)M] \quad (13)$$

4.3 จลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสขณะอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

เนื่องจากการสลายตัวของสารยับยั้งทริปซินมีอัตราที่ใกล้เคียงกับเอนไซม์ยูรีเอสที่มีในถั่วเหลือง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสเป็นตัวแทนในการบอกระดับสารยับยั้งทริปซินที่มีในถั่วเหลือง โดยในงานวิจัยนี้ได้วัดปริมาณสารยับยั้งทริปซินออกมา 2 รูปแบบ ได้แก่ค่า Urease activity (ΔpH) และร้อยละของเอนไซม์ยูรีเอสที่เหลือ (Residual urease activity) โดยเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของค่า Urease activity อยู่ในช่วง 0.02-0.30 ซึ่งช่วงดังกล่าวตรงกับร้อยละการลดลงของเอนไซม์ยูรีเอสอยู่ในช่วงร้อยละ 80-90 รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของค่า Urease activity กับร้อยละของเอนไซม์ยูรีเอสที่เหลือของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าร้อยละของเอนไซม์ยูรีเอสที่เหลือในถั่วเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Urease activity มีค่าเพิ่มขึ้น โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละของเอนไซม์ยูรีเอสที่เหลือในถั่วเหลืองจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วง Urease activity ที่ต่ำ จากนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละของเอนไซม์ยูรีเอสที่เหลือในถั่วเหลืองมีลักษณะการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และที่ค่า Urease activity สูง การเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละของเอนไซม์ยูรีเอสที่เหลือในถั่วเหลืองจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์มีลักษณะคล้ายตัว S

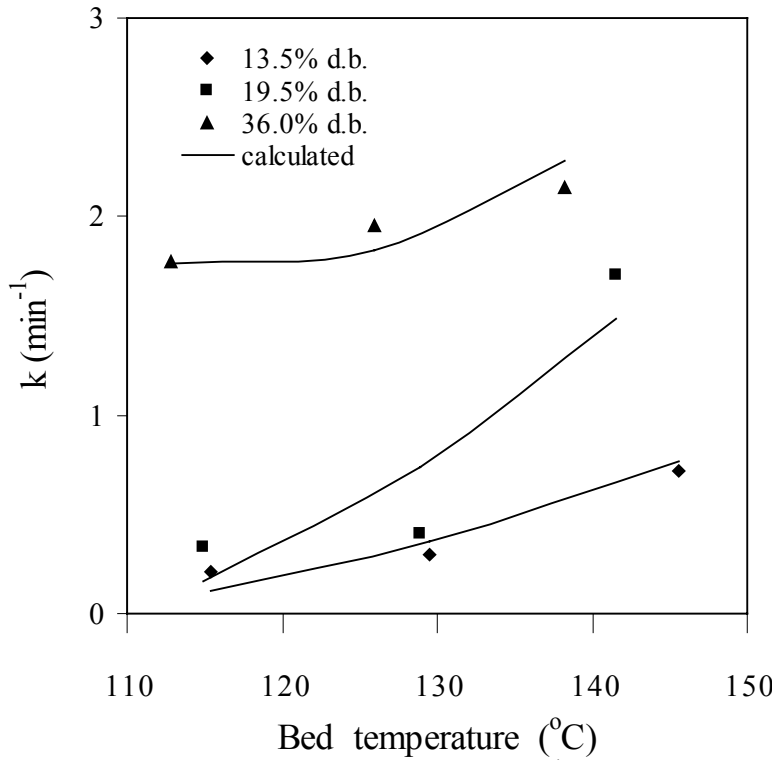


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของค่า urease activity (ΔpH) กับร้อยละของเอนไซม์ยูรีเอสที่เหลือ (Residual urease activity) ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 19.5 มาตรฐานแห้ง ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิต่างๆ

รูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 19.5 มาตรฐานแห้ง ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งสามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้อย่างรวดเร็ว โดยการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสมีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการอบแห้ง และเมื่ออบแห้งต่อไปการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสเกิดการลดลงเพียงเล็กน้อย ผลของการลดลงของเอนไซม์ยูรีเอสอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการอบแห้งเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ไอน้ำร้อนชนิดยิ่งในการอบแห้งถั่วเหลืองนั้นจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของถั่วเหลือง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำร้อนชนิดยิ่งไปสู่ถั่วเหลืองเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว จากข้อมูลของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสภายใต้สภาวะเงื่อนไขต่างๆ พบว่าสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบปรับปรุง โดยค่าคงที่ของปฏิกิริยาสามารถทราบได้จากการวิเคราะห์ถดถอย และผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของเอนไซม์ยูรีเอสได้แก่ อุณหภูมิภายในเบดและความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลือง โดยค่าคงที่ของการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองมีค่าสูง ในทำนองเดียวกันเมื่อความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองมีค่าสูง ค่าคงที่ของการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองมีค่าสูง แสดงให้เห็นว่าผลของปริมาณความชื้นภายในถั่วเหลืองเป็นปัจจัยร่วมที่ทำให้การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อนำค่าคงที่ของการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส และร้อยละของเอนไซม์ยูรีเอสที่เหลือที่สภาวะสมดุลมาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิภายในเบด และความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดถั่วเหลืองสามารถแสดงได้ดังสมการ (14) และ (15) ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิภายในเบดและความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองที่มีต่อค่าคงที่การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้ง

$$k = \left(-1.014 \times 10^4 + 0.075T^2 - 7.66 \times 10^4 M_{in} + 1.89 \times 10^4 M_{in}^2 + \frac{2.62 \times 10^7 M_{in}}{T} \right) \times \exp \left(-\frac{0.5348}{M_{in}} - \frac{1507.5}{T} \right) \quad R^2=0.95 \text{ and } RSS = 0.347 \quad (14)$$

$$C_{eq} = \left(-0.047523 + 0.071742 M_{in}^2 + 1.22 \times 10^{-4} T \right) \exp \left(-\frac{978.15 M_{in}}{T} + \frac{3227.286}{T} \right) \quad R^2=0.95 \text{ and } RSS = 1.47 \quad (15)$$

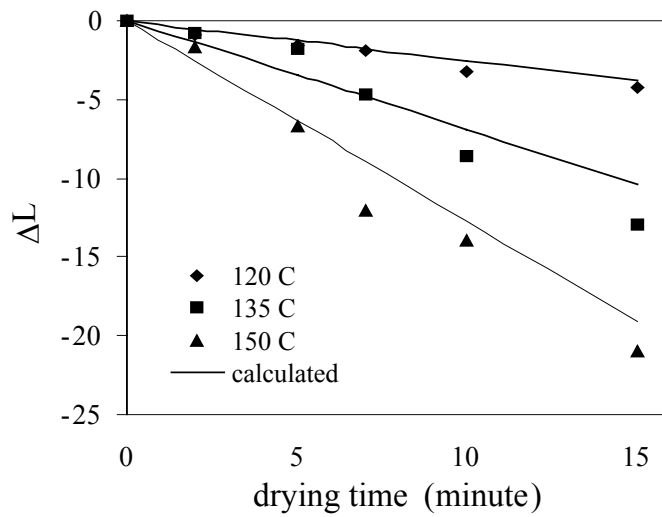
4.4 จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีขณะอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ในงานวิจัยนี้ได้นำถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งไปวิเคราะห์คุณภาพด้านสี โดยแสดงด้วยค่า L a และ b โดยค่า L มีค่าในช่วง 0 ถึง 100 แสดงค่าความมืดถึงความสว่าง ค่า a มีค่าในช่วง -60 ถึง +60 แสดงโทนสีเขียวถึงสีแดง และค่า b มีค่าในช่วง -60 ถึง +60 แสดงโทนสีน้ำเงินถึงสีเหลือง จากผลการทดลองถั่วเหลืองดิบที่ยังไม่ผ่านการอบแห้งมีค่า L a และ b เท่ากับ 85.71 0.38 และ 24.33 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าสีด้วยค่า L a และ b ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งเทียบกับถั่วเหลืองดิบโดยแสดงในรูปของผลต่าง ΔL Δa และ Δb ดังแสดงในรูปที่ 4.8 สำหรับที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 19.5 มาตรฐานแห้ง พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนานขึ้น ถั่วเหลืองมีสีคล้ำขึ้น โดยค่า ΔL มีค่าลดลง ในช่วงต้นของการอบแห้ง และเมื่อเวลาในการอบแห้งนานขึ้น แนวโน้มการเปลี่ยนของค่า Δb มีค่าเพิ่มขึ้น

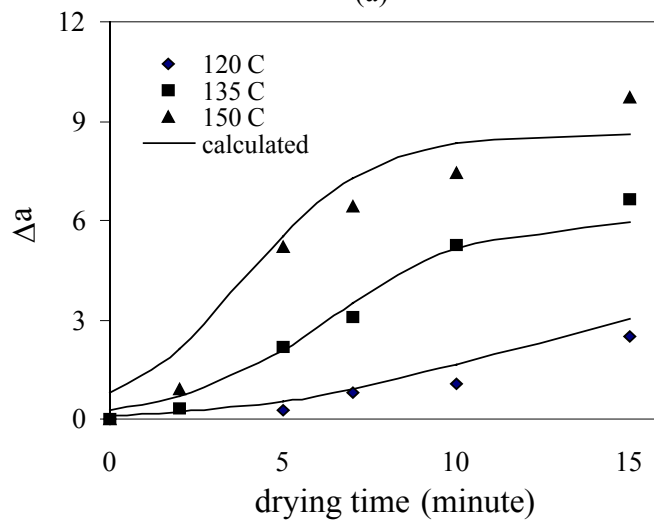
การเปลี่ยนแปลงสีของถั่วเหลืองเกิดจากการเกิดปฏิกิริยา Non-enzymatic browning reaction ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อถั่วเหลืองได้รับความร้อน อุณหภูมิที่เมล็ดถั่วเหลืองได้รับสูงขึ้น น้ำตาลโมเลกุลคู่ในถั่วเหลืองจะเกิดการแตกตัวเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Reducing sugar) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (Carbonyl group) ซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันเอมีน (Amine group) ในกรดอะมิโนเกิดเป็นสารประกอบ Schiff base จากนั้นสารประกอบ Schiff base จะทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แบบวงได้แก่ N-substituted aldoylamine หลังจากนั้นจะเกิดการจัดรูปที่เรียกว่า Amadori Rearrangement ซึ่ง N-substituted aldoylamine จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปคีโตน (Ketone form) ซึ่งเรียกผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นว่า N-substituted 1-amino-1-deoxy-2-ketose จากนั้นปฏิกิริยาจะเกิดต่อเนื่องจนเกิดสารประกอบที่มีสีน้ำตาลชื่อว่า

พอลิเมอร์เมลานอยด์ซิน (Melanoidins)

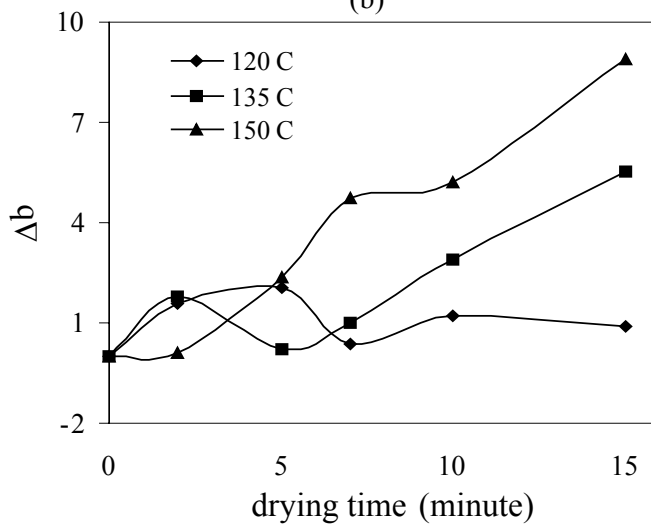
รูปที่ 4.8 และ 4.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL Δa Δb และ ΔE ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งที่ด้วยไอน้ำร้อนชื้นยิ่งที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL Δa Δb และ ΔE ของถั่วเหลืองมีค่าสูง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง การเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงสีเกิดได้ง่ายกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อพิจารณาผลของความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองพบว่า การเปลี่ยนแปลงของ ΔL Δa Δb และ ΔE มีค่าสูงสุดเมื่ออบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5 มาตรฐานแห้งดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.11 และเมื่ออบแห้งถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้นพบว่า การเปลี่ยนแปลงของ ΔL Δa Δb และ ΔE มีค่าลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสีของถั่วเหลืองเป็นผลมาจาก Non-enzymatic browning reaction ซึ่งปริมาณความชื้นในถั่วเหลืองมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา กล่าวคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องจากเมื่อวัสดุมีความชื้นสูงขึ้น ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยา Browning (น้ำตาลและกรดอะมิโน) สูงขึ้นส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ดี โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยา Browning มีค่าสูงสุดที่ Water activity เท่ากับ 0.6-0.7 เมื่อความชื้นของวัสดุสูงไปกว่าจุดนี้ อัตราการเกิดสีน้ำตาลจะมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากปริมาณน้ำในวัสดุที่สูง ทำให้ไปเจือจางสารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยา Browning ส่งผลให้เกิดการยับยั้งปฏิกิริยาซึ่งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5 มาตรฐานแห้ง มีค่า Water activity ประมาณ 0.7 ส่งผลให้การอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5 มาตรฐานแห้งมีการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL Δa และ ΔE มากกว่าการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 19.5 และ 36 มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ



(a)

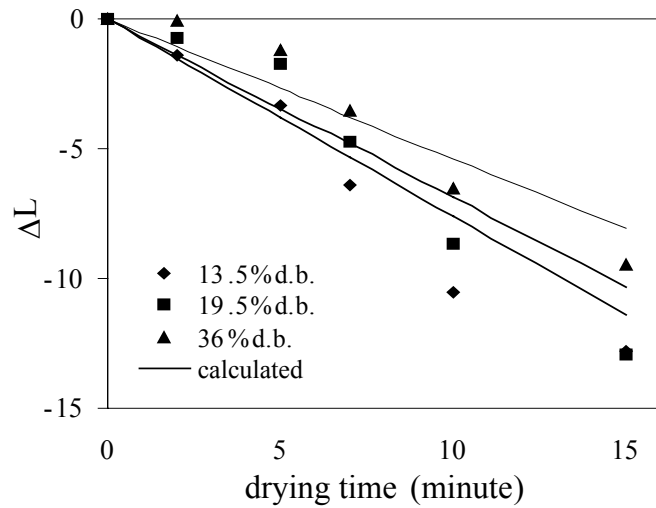


(b)

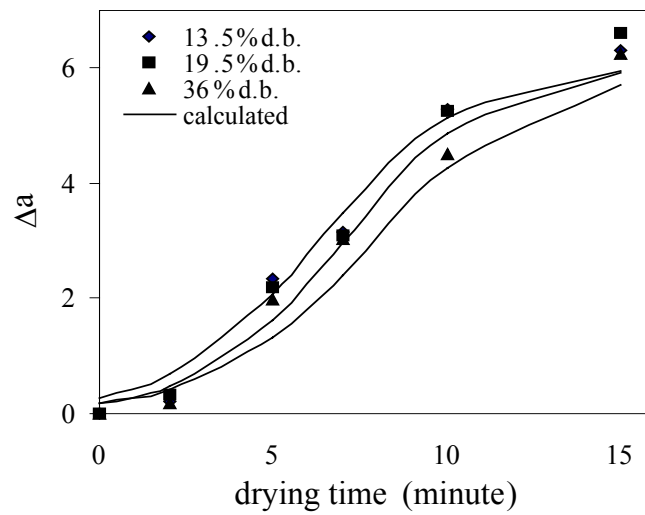


(c)

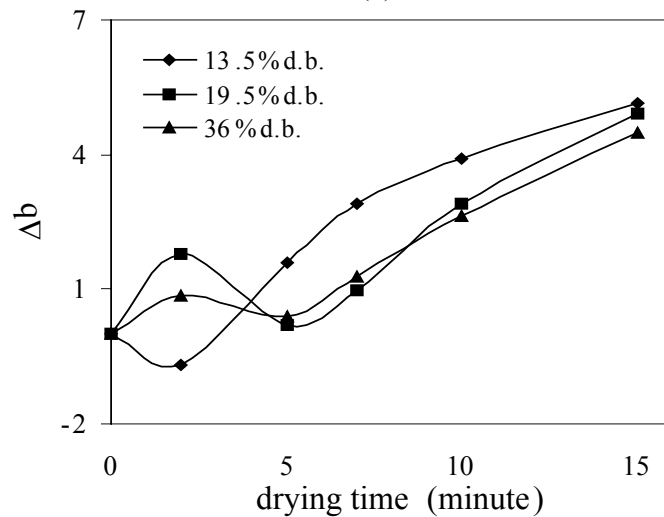
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงสีของถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 19.5 มาตรฐานแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ



(a)

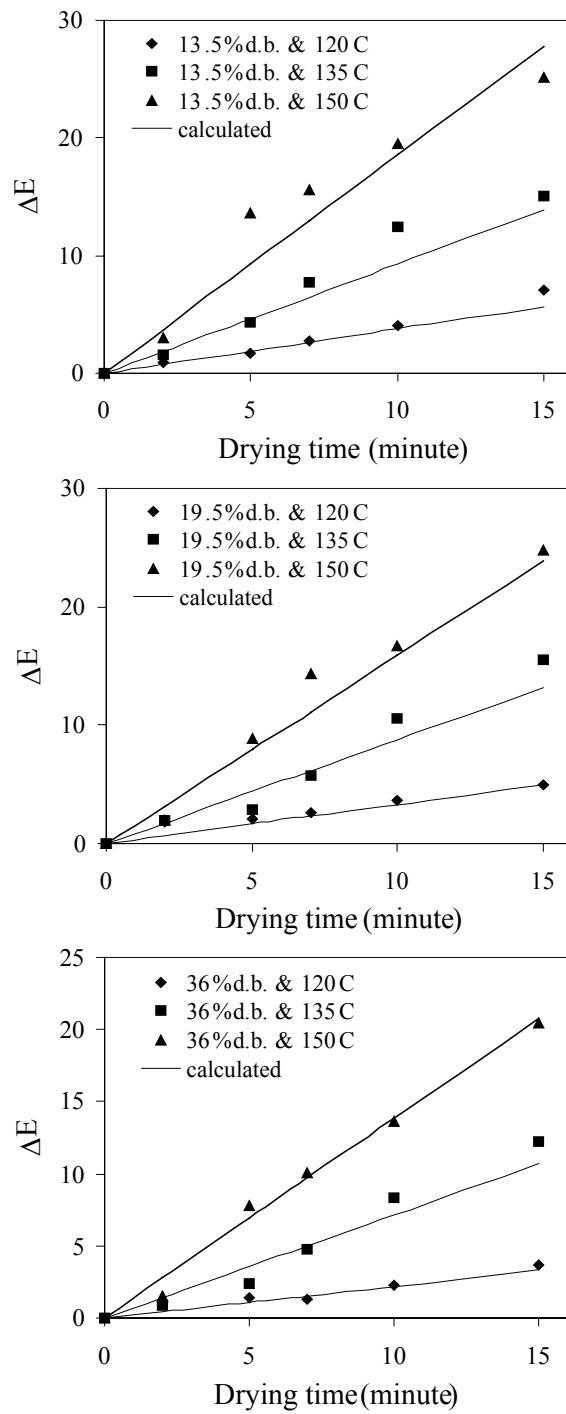


(b)

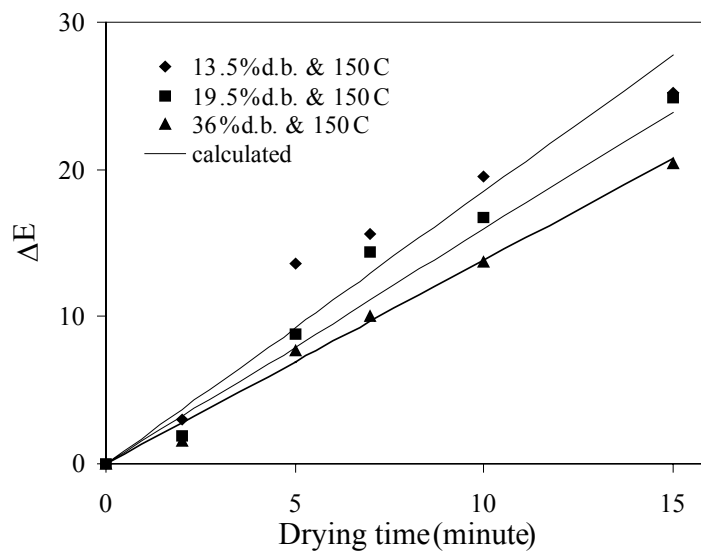
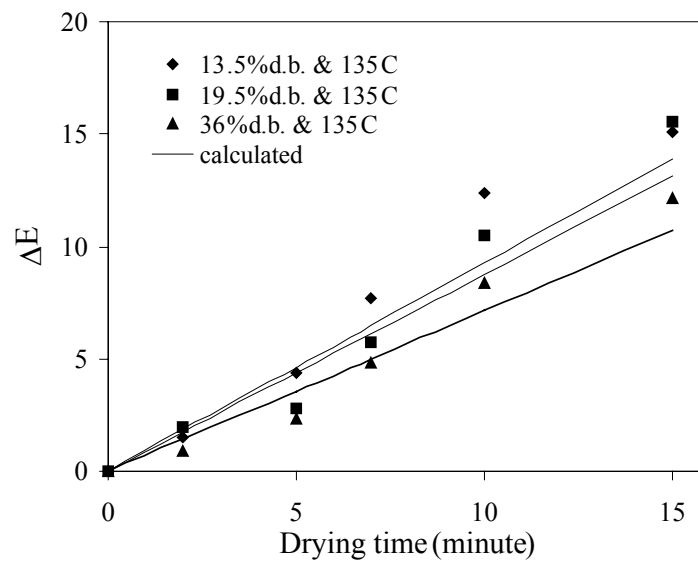
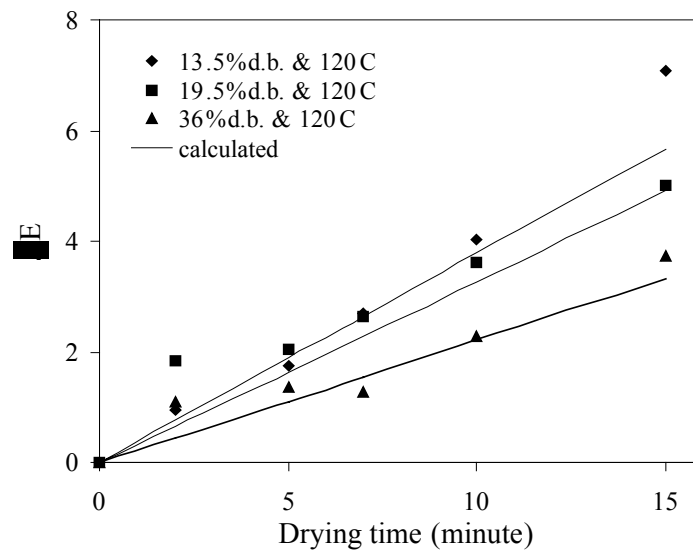


(c)

รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงสีของถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นต่างๆที่อบแห้งด้วย
ไอน้ำร้อนหวดซึ่งที่อุณหภูมิ 135°C



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (Total color difference) ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิต่างๆ

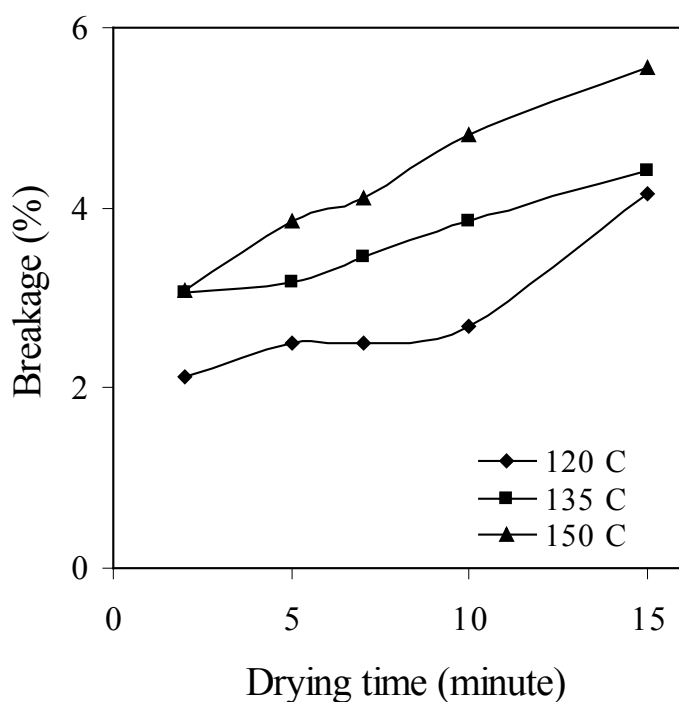


รูปที่ 4.11 ผลของความชื้นเริ่มต้นที่มีต่อค่าการเปลี่ยนแปลงโดยรวมของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

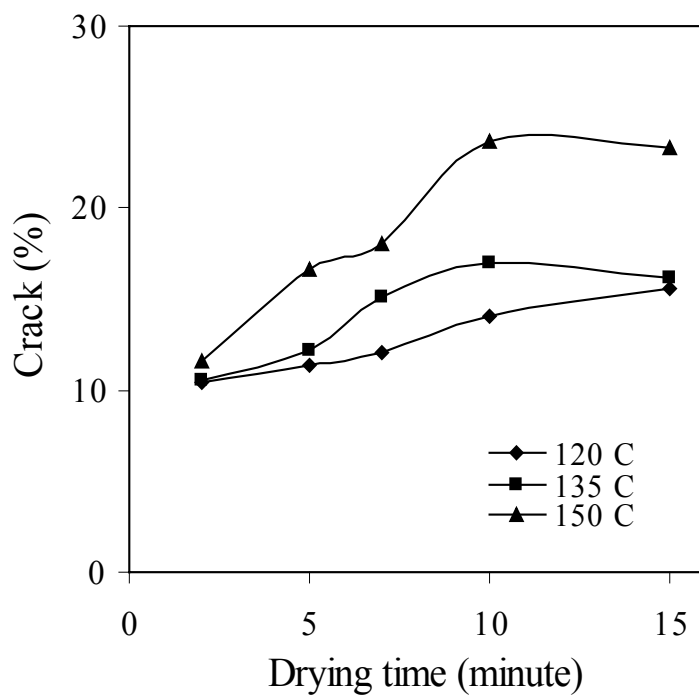
4.5 ร้อยละของการแตกและร้าวของถั่วเหลืองขณะอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงผลของอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งมีต่อร้อยละการแตกและร้าวของถั่วเหลืองพบว่า การอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง ร้อยละการแตกและร้าวของถั่วเหลืองมีค่าสูง เป็นผลเนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลเกิดขึ้นสูง ส่งผลให้ที่บริเวณผิวของเมล็ดถั่วเหลืองสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากน้ำภายในเมล็ดถั่วเหลืองเคลื่อนมาที่ผิวไม่ทัน ทำให้ผิวด้านนอกเกิดการแข็งตัวส่งผลให้เกิดความเค้นที่ผิวของถั่วเหลือง เมื่อน้ำภายในเมล็ดแพร่มายังผิวของถั่วเหลืองที่มีความเค้น ทำให้เกิดการแตกและร้าวง่ายกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

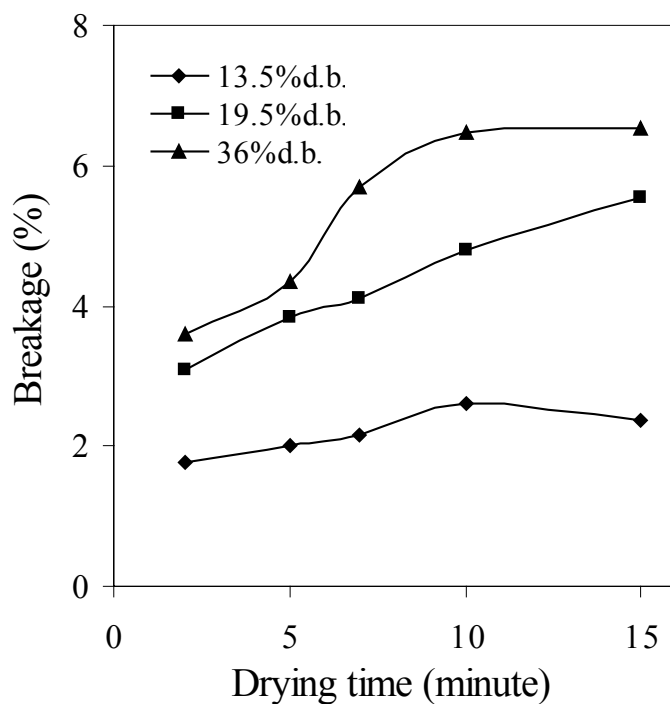
เมื่อพิจารณาผลของความชื้นเริ่มต้นที่มีต่อร้อยละการแตกและร้าวของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่าการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นสูง ร้อยละการแตกและร้าวของถั่วเหลืองมีค่าสูง ซึ่งผลดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นสูงมีปริมาณน้ำภายในเมล็ดปริมาณมากซึ่งน้ำที่แทรกตัวระหว่างช่องว่างของเมล็ดถั่วเหลืองทำให้ถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นสูงมีความนิ่มตัวกว่าถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นต่ำ ดังนั้นในการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นสูง ผลของการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดความเครียดภายในเมล็ดถั่วเหลืองโดยความเครียดที่เกิดขึ้นมีค่าค่อนข้างสูงสำหรับถั่วที่มีความชื้นสูงเนื่องจากอัตราการลดความชื้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงส่งผลให้การอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นสูงเกิดการแตกและร้าวได้ง่ายกว่าถั่วที่มีความชื้นน้อย



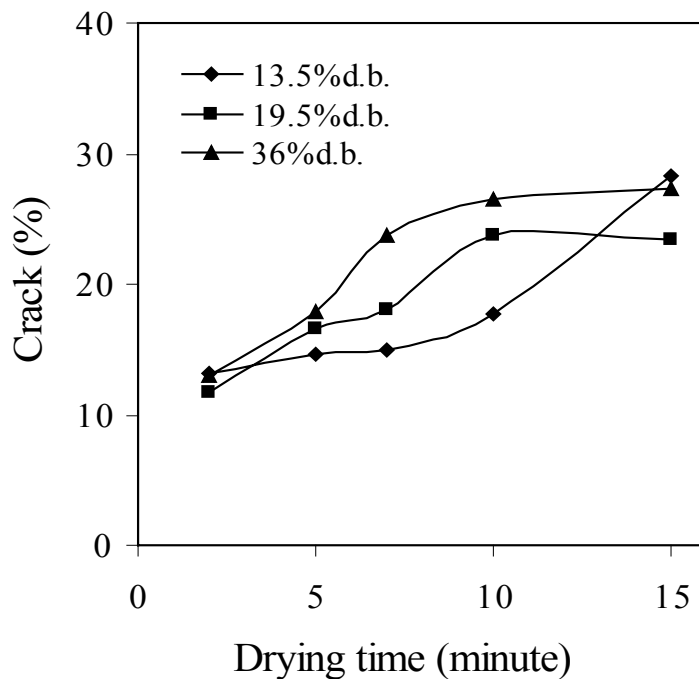
รูปที่ 4.12 ร้อยละการแตกของถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 19.5 มาตรฐานแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.13 ร้อยละการร้าวของถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 19.5มาตรฐานแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.14 ร้อยละของการแตกของถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นต่างๆที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 150°C



รูปที่ 4.15 ร้อยละของการร้าวของถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นต่างๆที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 150°C

4.6 ค่าการละลายของโปรตีนของถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่ง (Protein solubility)

จากการทดลองนำถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งที่มีปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสที่ผ่านเกณฑ์ มาวิเคราะห์การละลายของโปรตีน ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 โดยถั่วเหลืองที่มีคุณภาพดีควมมีร้อยละของการละลายของโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 73-85 จากผลการทดลองพบว่าถั่วเหลืองดิบที่ยังไม่ผ่านการอบแห้ง มีค่าการละลายของโปรตีนประมาณร้อยละ 94 สำหรับถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งพบว่ามีการละลายของโปรตีนลดลง เนื่องจากเกิดการฟอร์มตัวเป็นกลุ่มโปรตีนขนาดใหญ่ ทำให้ตกตะกอนเมื่อนำมาละลายน้ำ [ซึ่งโปรตีนลักษณะนี้ เมื่อบริโภคเข้าไปทำให้ การย่อยโปรตีนนำไปใช้ได้ยาก จากตารางที่ 4.1 พบว่าในการอบแห้งถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5 มาตรฐานแห้ง ด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C สามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้ตามเกณฑ์ในเวลา 7 นาที ซึ่งสภาวะดังกล่าวยังให้ค่าการละลายของโปรตีนสูง และนอกจากนั้นความชื้นสุดท้ายของถั่วเหลืองสามารถนำมาเก็บรักษาได้ (ความชื้นที่ใช้เก็บรักษาถั่วเหลืองควรต่ำกว่าร้อยละ 14 มาตรฐานแห้ง) แต่สำหรับถั่วเหลืองที่มีความชื้นสูง ถึงแม้ว่าสามารถลดระดับเอนไซม์ยูรีเอสได้เร็วกว่าถั่วเหลืองความชื้นต่ำและค่าการละลายของโปรตีนมีค่าสูงแต่ความชื้นสุดท้ายของถั่วเหลืองที่ได้หลังการอบแห้งไม่สามารถนำมาเก็บรักษาได้ และหากอบแห้งถั่วเหลืองจนลดความชื้นได้ตามเกณฑ์ คุณภาพด้านสีจะเกิดการไหม้ และค่าการละลายของโปรตีนถั่วเหลืองจะต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นการ อบแห้งถั่วเหลืองที่มีความชื้นสูงควรใช้การอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน โดยในช่วงแรกอาจทำการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งเพื่อลดเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองลงให้ได้ตามเกณฑ์โดยควรใช้เวลาในการ อบแห้งประมาณ 2-5 นาที หลังจากนั้นควรนำถั่วเหลืองที่ได้มาอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเพื่อลดความชื้นให้ได้ตามเกณฑ์ในการเก็บรักษา และยังคงคุณภาพของถั่วเหลืองในเกณฑ์ดี

ตารางที่ 4.1 ค่าการละลายของโปรตีนของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ

ความชื้นเริ่มต้นของ ถั่วเหลือง (%db)	อุณหภูมิของ ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (°C)	เวลาในการ อบแห้ง (นาท)	ความชื้นของถั่ว เหลืองหลังการอบ แห้ง (%db)	การละลายของ โปรตีน (%)
ถั่วเหลืองดิบ	-	-	-	94.28
13.5	120	7	13.95	85.66
	135	5	12.44	71.76
	150	5	10.67	54.94
19.5	120	5	18.34	85.20
	120	15	16.69	75.27
	135	5	16.52	82.25
	135	7	14.77	76.71
	150	2	18.94	83.84
	150	5	14.06	72.90
36	120	2	38.95	80.59
	135	2	34.14	81.38
	135	15	14.70	59.41
	150	2	31.61	75.13
	150	10	11.42	53.59

4.7 กรดอะมิโนไลซีนของถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

จากการทดลองนำถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งที่มีปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสและค่าการละลายของโปรตีนที่ผ่านเกณฑ์มาทดลองหาปริมาณกรดอะมิโนไลซีน ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณกรดอะมิโนไลซีนในถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งดังแสดงในตารางที่ 4.2 มีปริมาณลดลงเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานในการนำมาผลิตเป็นอาหารสัตว์

4.8 การเปรียบเทียบการอบแห้งถั่วเหลืองโดยการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อน

4.8.1 อุณหภูมิภายในเบตของถั่วเหลือง

รูปที่ 4.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเบตของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งพบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเบตเร็วกว่าการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยอากาศร้อน ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นผลเนื่องจากการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นในช่วงต้นของการอบแห้งเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของถั่วเหลือง ทำให้เกิดการคลายความร้อนจากไอน้ำเข้าสู่เมล็ดถั่วเหลืองเกิดขึ้นได้เร็วและมีปริมาณสูง ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบผลของความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งพบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเบตของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเหมือนกับ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

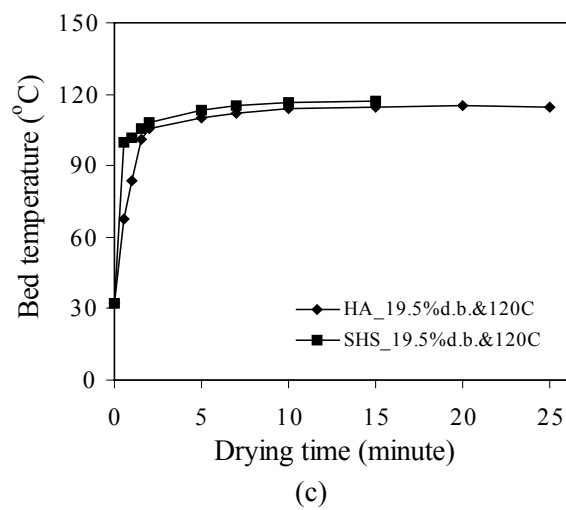
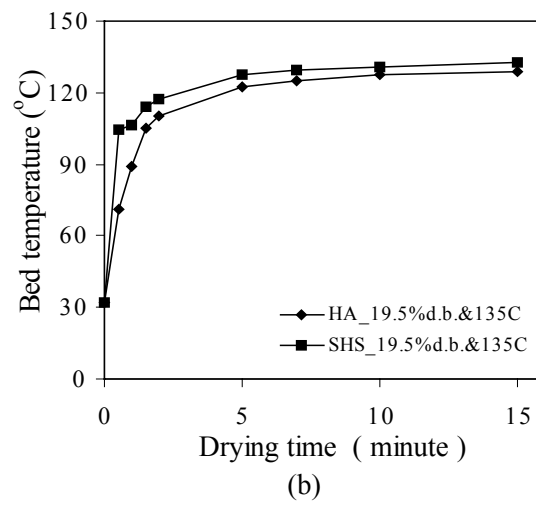
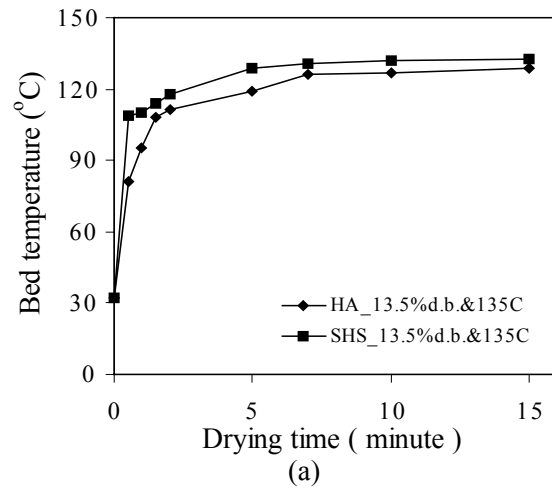
กล่าวคือ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.16a กับ 4.16b การอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นต่ำทำให้อุณหภูมิภายในเบของถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นสูงกว่าการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นสูง

ตารางที่ 4.2 กรดอะมิโนไลซีนในถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่สภาวะต่างๆ

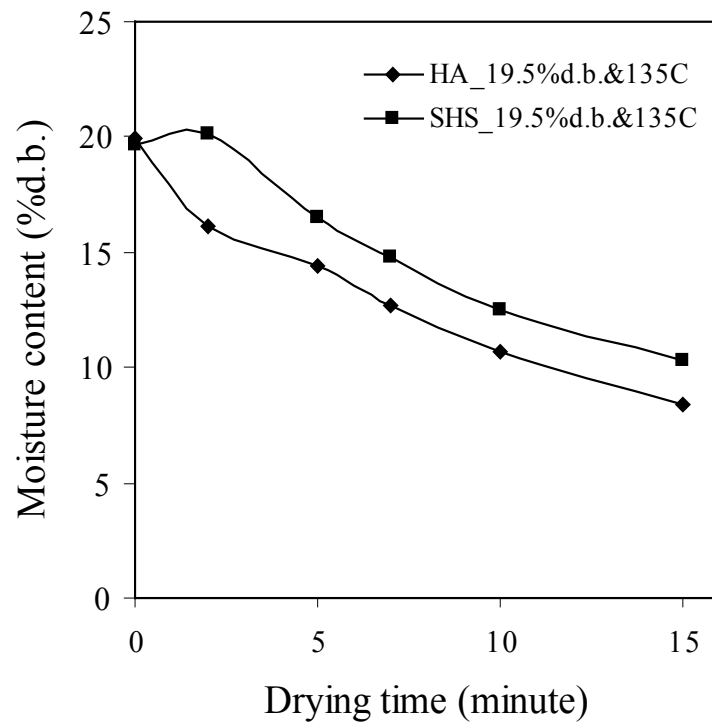
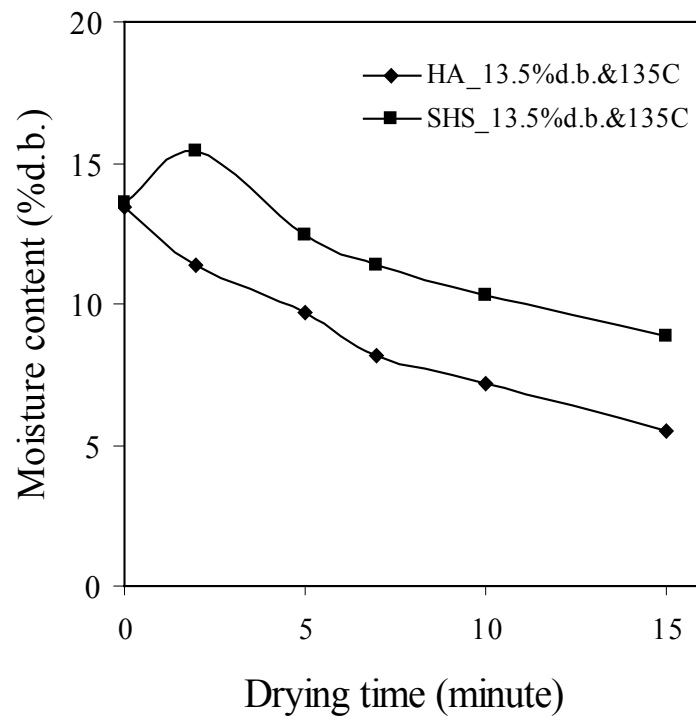
สภาวะที่ใช้ในการอบแห้ง			ปริมาณกรดอะมิโน ไลซีน (มิลลิกรัม/กรัมของถั่วเหลือง)	ความชื้นสุดท้ายของถั่วเหลือง (% มาตรฐานแห้ง)
อุณหภูมิของไอน้ำร้อนชนิดยิ่ง (°C)	ความชื้นเริ่มต้น (% มาตรฐานแห้ง)	เวลา (นาที)		
120	13.5	7	2.80	13.95
135	13.5	5	2.76	12.44
120	19.5	5	2.67	18.34
135	19.5	5	2.71	16.52
150	19.5	5	2.82	14.06
ถั่วเหลืองดิบ			2.85	13.59
มาตรฐาน			> 2.40	< 14

4.8.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้น

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความชื้นของถั่วเหลืองในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งแตกต่างจากอากาศร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยในการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยอากาศร้อน ความชื้นของถั่วเหลืองลดลงตลอดช่วงเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ในขณะที่การอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งนั้น ในช่วงต้นของการอบแห้งพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นในเมล็ดของถั่วเหลือง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความชื้นนั้นทำให้ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น จากนั้นเมื่ออุณหภูมิของเมล็ดถั่วเหลืองเพิ่มถึงอุณหภูมิอิ่มตัว (Saturation temperature) การควบแน่นของไอน้ำจะสิ้นสุดและจะเกิดกระบวนการระเหยน้ำภายในเมล็ดถั่วเหลืองเป็นผลให้ความชื้นลดลง และเมื่อพิจารณาผลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งพบว่า การอบแห้งถั่วเหลืองด้วยอากาศร้อนให้อัตราการอบแห้งเร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งซึ่งสามารถสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟการอบแห้งสำหรับการอบแห้งที่ 135°C สำหรับในช่วงของการลดความชื้นนั้นจากผลการทดลองที่ได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งและอากาศร้อน แสดงผลสอดคล้องกันว่าการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุถูกควบคุมด้วยความต้านทานภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งความต้านทานตัวนี้เป็นตัวความต้านทานหลักต่อการเคลื่อนที่ของน้ำ ดังนั้นการเพิ่มความเร็เพื่อเร่งอัตราการอบแห้งดูเหมือนจะไม่เห็นผลชัดเจนเท่าที่ควร



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งยวดที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นภายในเมล็ดถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 135°C

4.8.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

รูปที่ 4.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลตามความชื้นสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีการเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของถั่วเหลืองซึ่งมีค่าสูงขึ้น เป็นผลให้การแพร่ของเกิดขึ้นได้เร็ว จากนั้นเมื่ออุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองเริ่มคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีค่าลดลง เนื่องจากความชื้นภายในถั่วเหลืองลดลงและความชื้นส่วนใหญ่อยู่บริเวณภายในเมล็ด ดังนั้นการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในเมล็ดออกสู่ภายนอกช้ากว่าการระเหยน้ำจากผิววัสดุ ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่คำนวณจากอัตราการอบแห้งมีค่าลดลงเมื่อความชื้นของถั่วเหลืองลดลง และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งพบว่าการอบแห้งถั่วเหลืองที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีค่าสูง

เมื่อนำข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ช่วงอุณหภูมิภายในเบดคงที่ทั้งกรณีของอากาศร้อนและไอน้ำร้อนมาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าในการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนยิ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีค่าต่ำกว่ากรณีที่ใช้อากาศร้อน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากผลของการเกิด Gelation ซึ่งเป็นการเสียสภาพของโปรตีนน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้โมเลกุลของน้ำยึดติดอยู่กับ site ของโปรตีนได้ง่ายขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำเป็นไปได้ยาก โดยปกติอุณหภูมิที่เกิด Gelation อยู่ในช่วงระหว่าง 70 ถึง 90°C ด้วยปรากฏการณ์ของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งที่มีการควบแน่นของไอน้ำในช่วงแรก ทำให้เมล็ดพืชมีอุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิด gelation ได้เร็วกว่ากรณีใช้อากาศร้อนซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดเป็นไปอย่างช้า ๆ นอกจากนี้ปัจจัยดังกล่าวแล้วอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนมีค่าน้อยสำหรับไอน้ำร้อนยิ่ง ทั้งนี้เป็นเพราะผลต่างของอุณหภูมิจากไอน้ำร้อนยิ่งกับเมล็ดพืชมีค่าน้อยกว่ากรณีใช้อากาศร้อน อย่างไรก็ตามเมื่อผลต่างของอุณหภูมิลดลง เรามักจะพบว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งจะมีค่าสูงกว่ากรณีของอากาศร้อน ทั้งนี้เป็นเพราะค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไอน้ำร้อนยิ่งมีค่าสูงกว่ากรณีของอากาศ

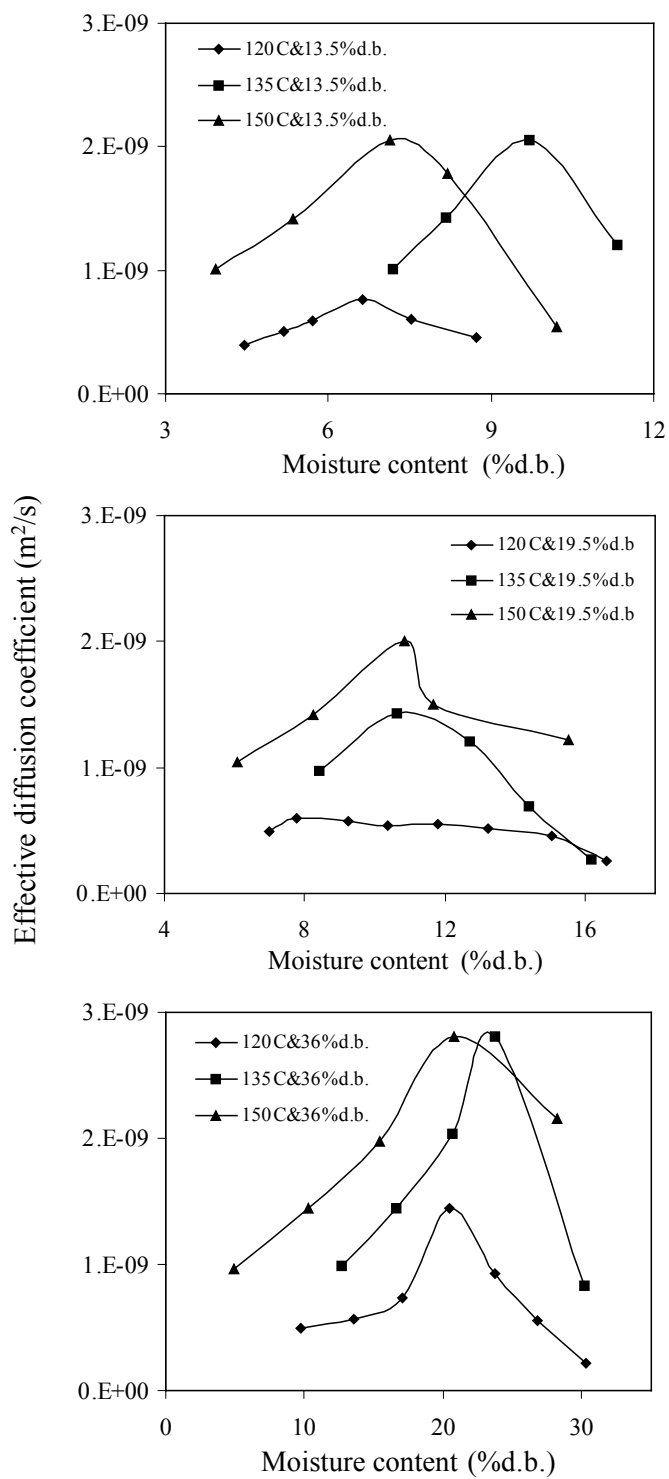
จากข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการทดลองเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิภายในเบดและความชื้นของถั่วเหลืองสามารถแสดงได้ด้วยสมการ (16)

$$D_{\text{eff}} = (-8.47 \times 10^{-8} + 4.17 \times 10^{-10}T - 5.1 \times 10^{-13}T^2) \exp(1.49M \exp(0.003T)) \quad (16)$$

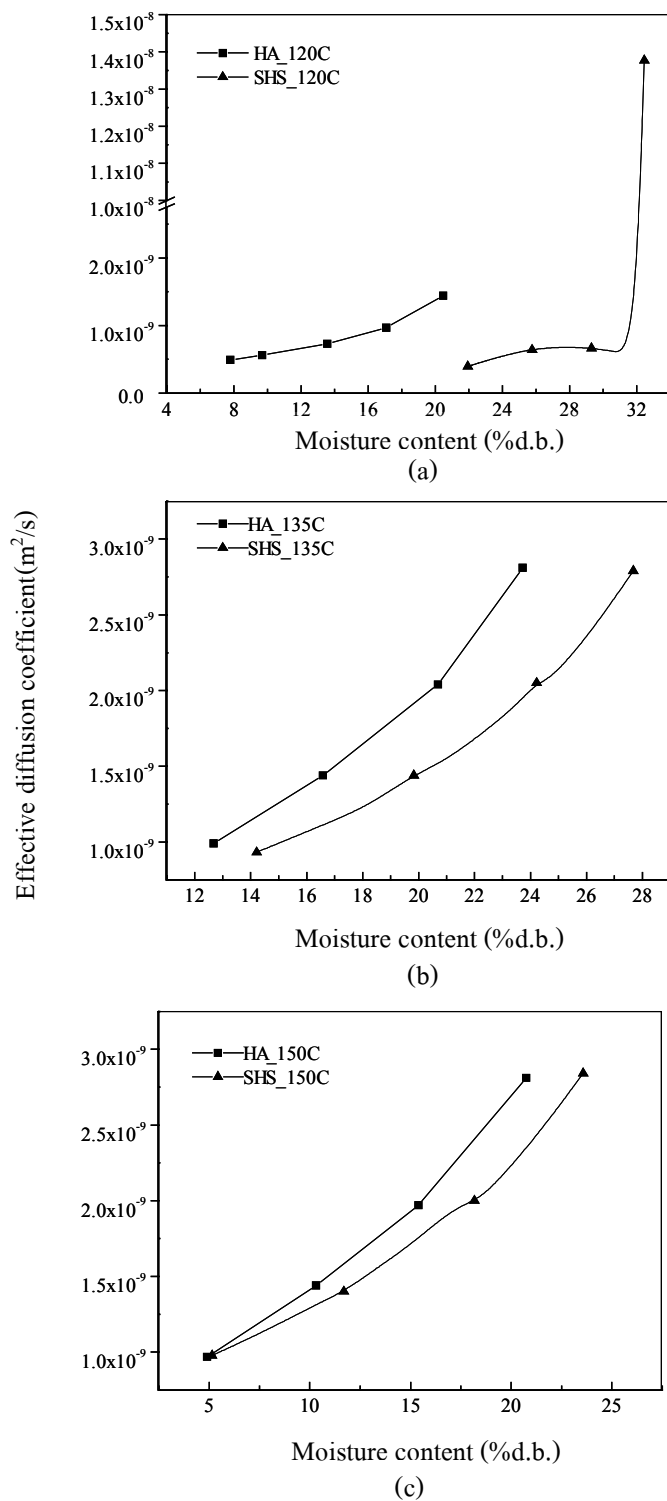
โดยมีค่า $R^2 = 0.8$ และ $\text{RSS} = 3.1 \times 10^{-10}$

4.8.4 จลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสของอบแห้งด้วยอากาศร้อน

การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C แสดงดังในรูปที่ 4.20 พบว่าการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5มาตรฐานแห้ง ด้วยไอน้ำร้อนยิ่งสามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้ตามเกณฑ์ได้ภายในเวลา 7นาทีก่อนที่การอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5มาตรฐานแห้งด้วยอากาศร้อนไม่สามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้ตามเกณฑ์ไม่ว่าจะอบแห้งด้วยระยะเวลาเท่าใด ถั่วเหลืองที่ดีควรมีปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสเหลืออยู่ต่ำกว่าร้อยละ 20 สำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองที่ความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้น พบว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C สามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้ตามเกณฑ์ในเวลา 30นาทีก่อนที่การอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 19.5 และ 36 มาตรฐานแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเป็นเวลา 30 นาทีก่อนที่ร้อยละ 70.98 และ 63.28 ตามลำดับ) ขณะที่การอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นสูงด้วยไอน้ำร้อนยิ่งสามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้ตามเกณฑ์ภายในเวลา 5นาทีก่อนที่การอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 19.5 และ 36 มาตรฐานแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเป็นเวลา 30 นาทีก่อนที่ร้อยละ 70.98 และ 63.28 ตามลำดับ)



รูปที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิผลของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.19 ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิผลของถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 36
มาตรฐานแห้ง ที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยัง
ที่อุณหภูมิ

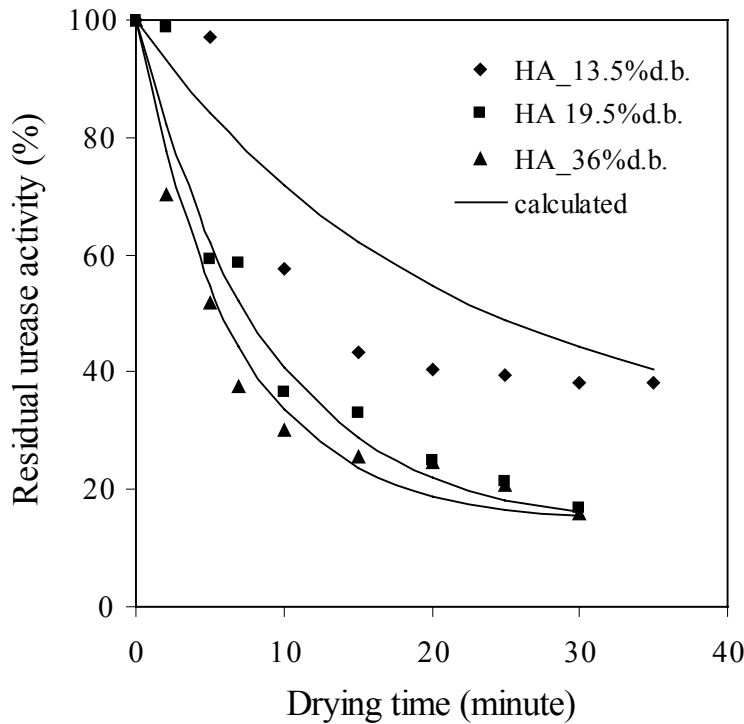
จากการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส ได้แก่ (1) อุณหภูมิที่ถั่วเหลืองได้รับ และ (2) ปริมาณความชื้นของถั่วเหลือง นอกจากปัจจัยดังกล่าวแล้วตัวกลางที่ใช้ในการให้ความร้อนก็มีผลต่อการกำจัด

เอนไซม์ยูรีเอสด้วยเช่นกัน โดยการใช้ไอน้ำร้อนขุดยิ่งจะทำให้การกำจัดเอนไซม์ที่เร็วกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขุดยังมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเบคเร็วกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ประกอบกับมีช่วงของการเพิ่มความชื้นภายในวัสดุ ดังนั้นจึงทำให้ความว่องไวของเอนไซม์ดังกล่าวถูกทดลองอย่างรวดเร็ว ซึ่งผลดังกล่าวสามารถเห็นได้อย่างเด่นชัดในกรณีที่อบแห้งด้วยเกลือที่มีความชื้นร้อยละ 13.5 มาตรฐานแห้ง โดยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C ไม่สามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้ตามเกณฑ์ เนื่องจากผลของการอบแห้งส่งผลให้ปริมาณความชื้นภายในเมล็ดถั่วเหลืองลดลง โดยปริมาณความชื้นที่เหลือต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่เอนไซม์ว่องไวในเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสลายได้ ขณะที่การกำจัดยูรีเอสสามารถกระทำได้ที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อใช้ไอน้ำร้อน อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 120°C การอบแห้งด้วยเกลือด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขุดยังสามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้อย่างรวดเร็วในทุกความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งด้วยเกลือเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการลดลงของเอนไซม์ยูรีเอส จากข้อมูลของจลนพลศาสตร์ของการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสด้วยอากาศร้อนสามารถหาค่าคงที่ของการเสื่อมสลายของเอนไซม์ด้วยวิธีการถดถอยดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และเมื่อนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับที่คำนวณได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขุดยิ่งดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าค่าคงที่ของการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขุดยิ่งสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนตลอดช่วงของอุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นที่ศึกษา

จากค่าของที่ของสารเสื่อมสลายของเอนไซม์โดยใช้อากาศร้อนเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเบคและความชื้นเริ่มต้นสามารถอธิบายด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$k = (-7.92 \times 10^9 + 3.54 \times 10^8 M_{in} + 2.086 \times 10^7 T - \frac{1.224 \times 10^8 M_{in}}{T}) \times \exp(-\frac{0.5526}{M_{in}} - \frac{6697.61}{T} - \frac{2392.2 M_{in}}{T}) \quad R^2 = 0.99 \text{ and } RSS = 0.079 \quad (17)$$

$$C_{eq} = 6.67 \times 10^{-8} + 5.0 \times 10^{-6} M_{in}^2 + 1.80 \times 10^{-11} T - 2.69 \times 10^{-11} M_{in} T \times \exp(\frac{0.740}{M_{in}} + \frac{5960.5}{T}) \quad R^2 = 0.85 \text{ and } RSS = 10.4 \quad (18)$$



รูปที่ 4.20 การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C

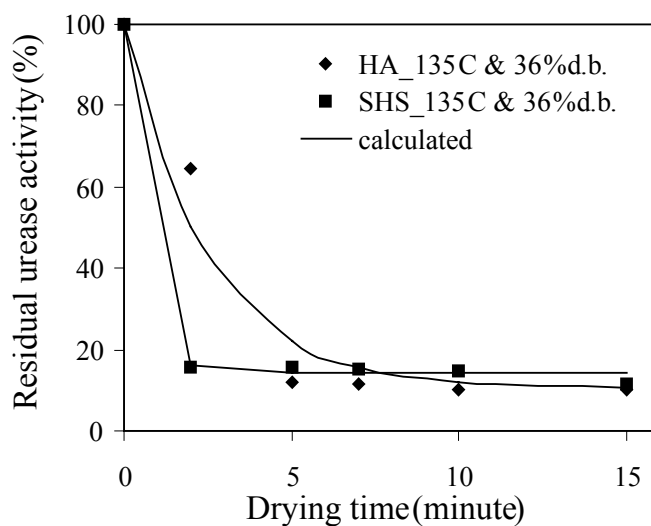
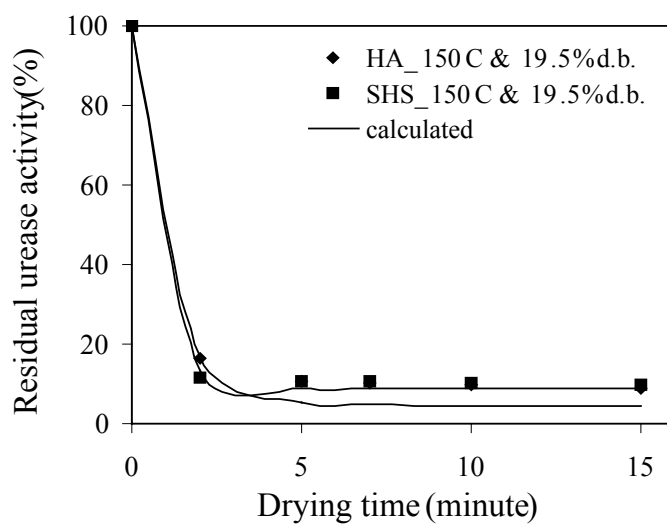
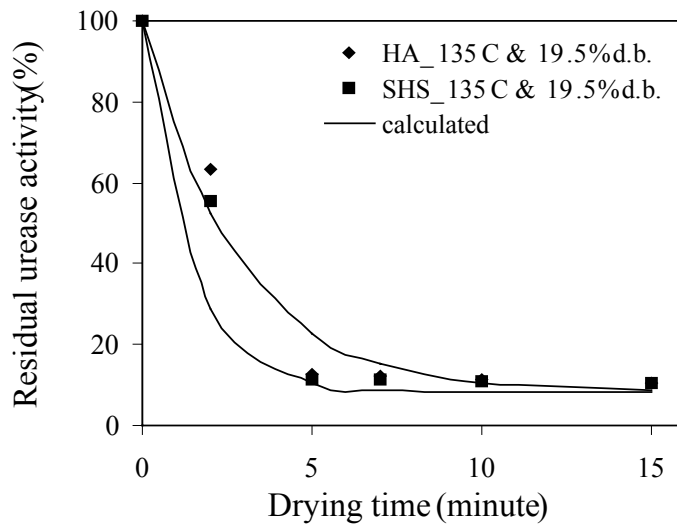
4.8.5 จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสี

จากการวิเคราะห์คุณภาพด้านสีของถั่วเหลืองที่ผ่านอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่ง ซึ่งแสดงผลด้วยค่า L a และ b เนื่องจากค่า L a และ b ของถั่วเหลืองดิบที่ใช้ในการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งไม่เท่ากัน ดังนั้นในการเปรียบเทียบสีของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งจึงแสดงด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเทียบกับสีถั่วเหลืองเริ่มต้น (ΔL , Δa และ Δb) โดยเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งถั่วเหลืองมีการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL มากกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน โดยเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL ของถั่วเหลืองพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า L ทั้งในกรณีไอน้ำและอากาศร้อนมีแนวโน้มการลดลงในลักษณะเชิงเส้นตรงกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นจึงอธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL ด้วยปฏิกิริยาอันดับศูนย์ดังแสดงในสมการ (8) โดยความสัมพันธ์ของค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL กับอุณหภูมิภายในเบดและความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งแสดงดังสมการ (19)

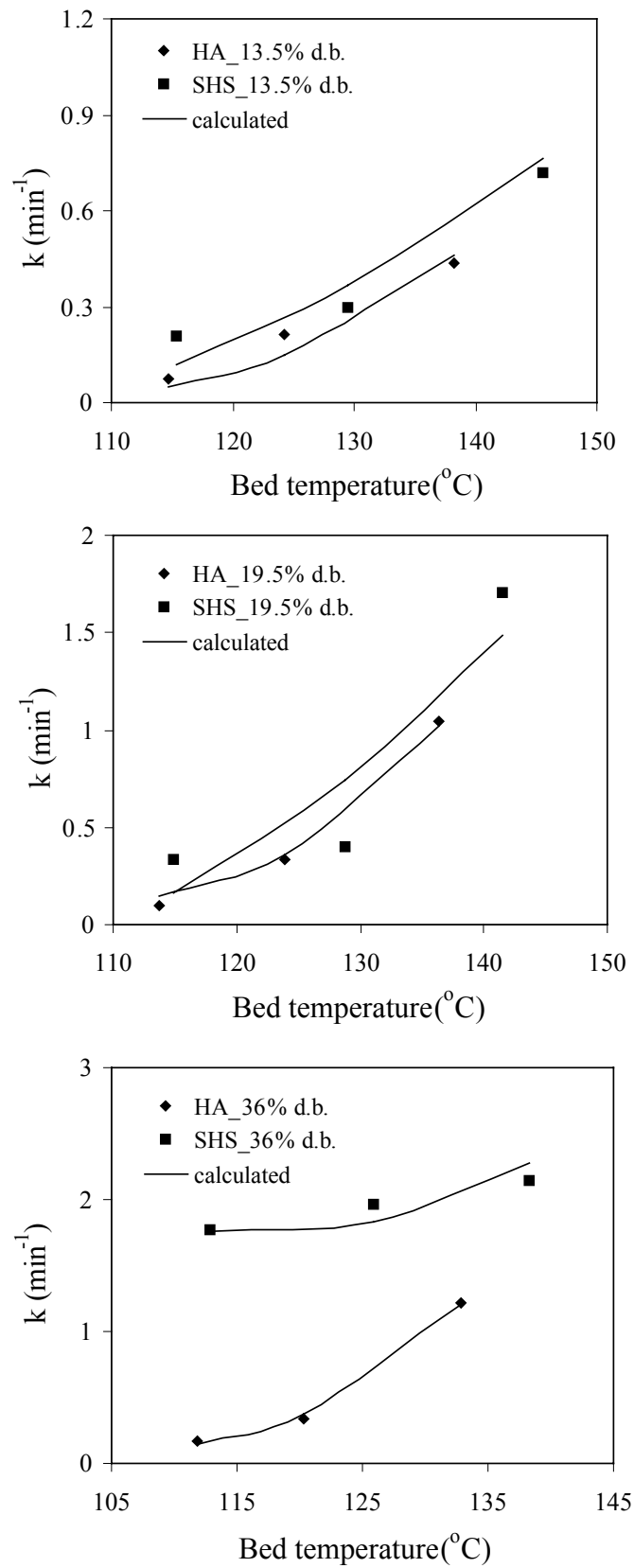
$$k_{\Delta L} = (-18501.53 + 48.8786T + \frac{35.70404}{M_{in}}) * \exp(\frac{-3038.12}{T})$$

$$r^2=0.95, RSS=0.111$$

(19)



รูปที่ 4.21 การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิ 135°C และ 150°C



รูปที่ 4.22 ค่าคงที่การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขดยั้งที่ความชื้นเริ่มต้นต่างๆ

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า Δa ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขวดยังคงแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยังคงมีการเปลี่ยนแปลงของค่า Δa มากกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งเกิดขึ้นในทำนองเดียวกันกับกรณีของค่า L ค่าคงที่ของการเปลี่ยนแปลงของค่า a ($k_{\Delta a}$) ค่าของ a ที่สภาวะสมดุล (a_{eq}) และเวลาที่ค่าของ a เปลี่ยนแปลงไปครึ่งหนึ่ง (t_0) กับอุณหภูมิ และความชื้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$k_{\Delta a} = (-0.01906 + 0.0000509T + \frac{0.0000224}{M_{in}}) * \quad (20)$$

$$\exp(\frac{2299.51}{T} + 0.124727M_{in}) , r^2 = 0.98 , RSS = 0.0186$$

$$a_{eq} = (-25737.8 + 79.3113T + 2880.07M_{in}) * \exp(-\frac{2816.43}{T}) \quad (21)$$

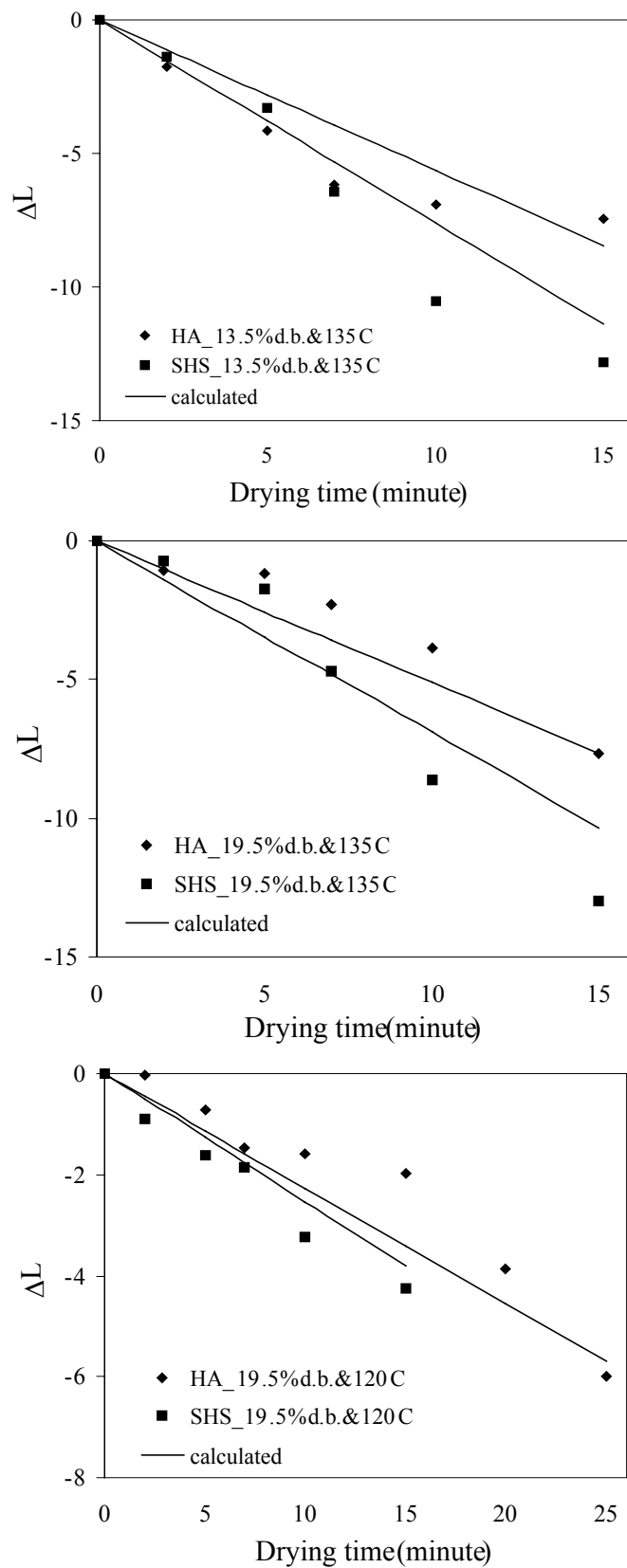
$$r^2 = 0.85, RSS = 0.887$$

$$t_0 = (1.9906 * 10^{-7} - \frac{7.31 * 10^{-5}}{T} - 4.2966M_{in}) * \quad (22)$$

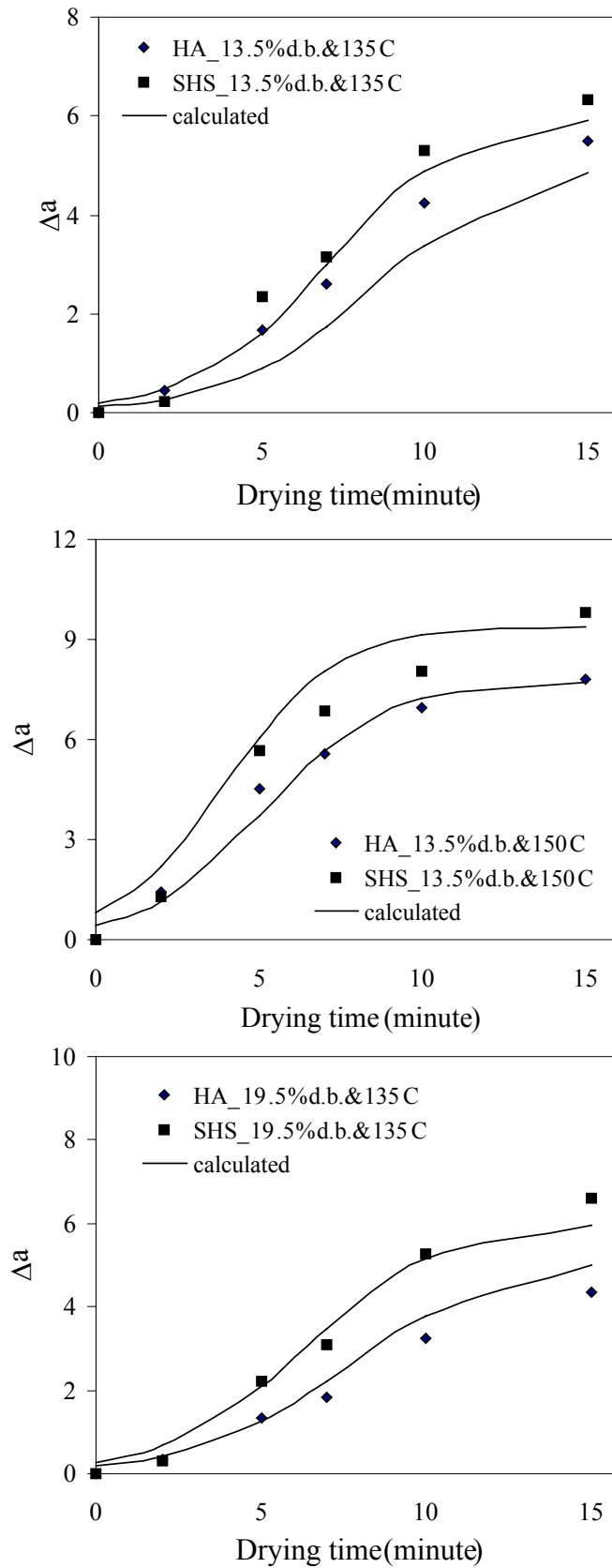
$$\exp(\frac{6836.81}{T} + \frac{0.184543}{M_{in}}) , r^2=0.78, RSS = 1.807$$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่า b ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขวดยังคงแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าเมื่อพิจารณาโดยรวมการเปลี่ยนแปลงของค่า Δb ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยังคงมีการเปลี่ยนแปลงสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน โดยค่า Δb ของถั่วเหลืองมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงแปรปรวนในช่วงต้นของการอบแห้งและเมื่อเวลาในการอบแห้งนานขึ้น แนวโน้มการเปลี่ยนของค่า Δb มีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองที่ได้สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่า Δb มีลักษณะค่อนข้างแปรปรวนในช่วงแรกของการอบแห้ง และการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL และ Δa ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่นำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของค่า b มาหาความสัมพันธ์กับเวลา

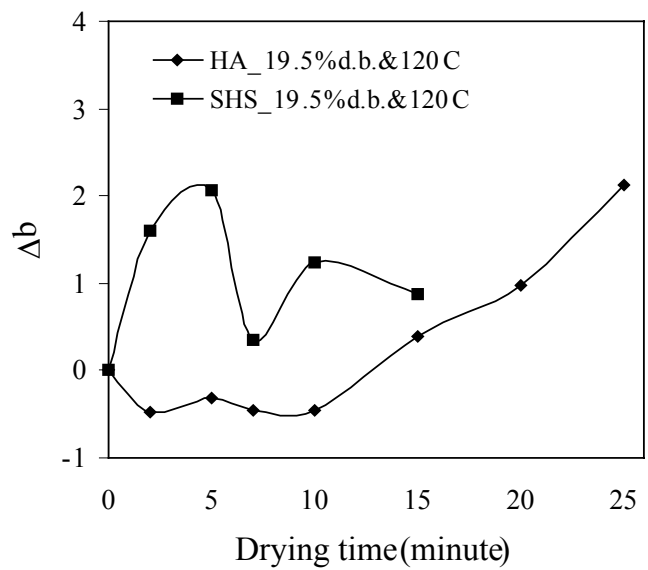
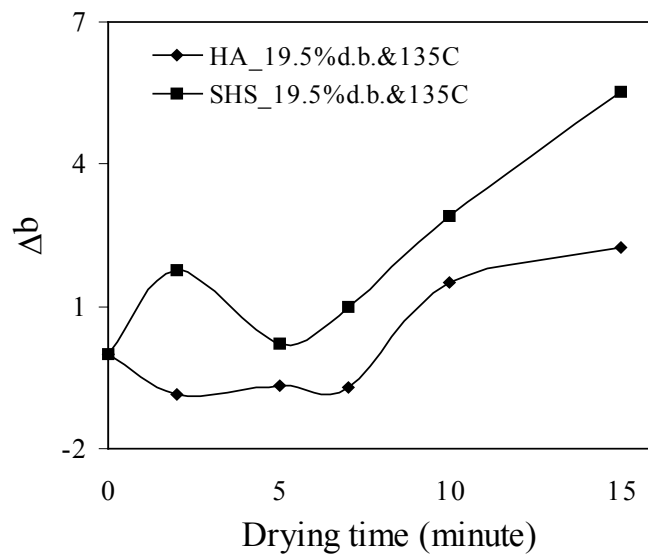
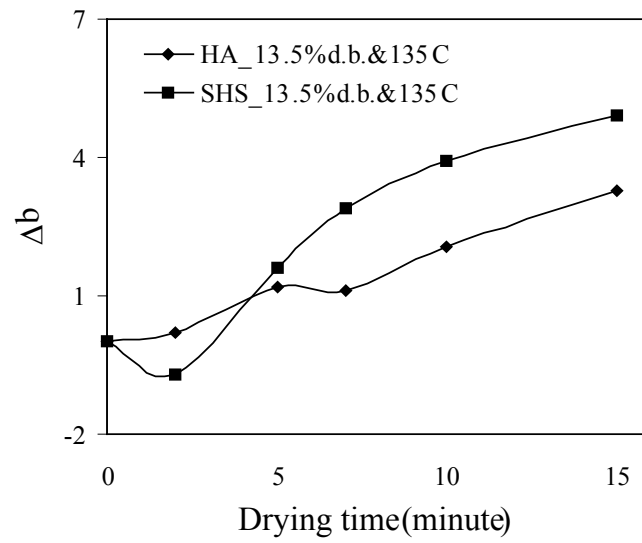
เมื่อพิจารณาสีของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (Total color difference, ΔE) ดังแสดงไว้ในสมการ (10) โดยเมื่อนำค่า ΔL Δa และ Δb ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ มาหาค่า ΔE พบว่าถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยังคงมีการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.26 ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่งนั้นอุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองมีการเพิ่มขึ้นรวดเร็วและมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน จากผลการเปลี่ยนแปลงที่ได้แสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมของถั่วเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้ง



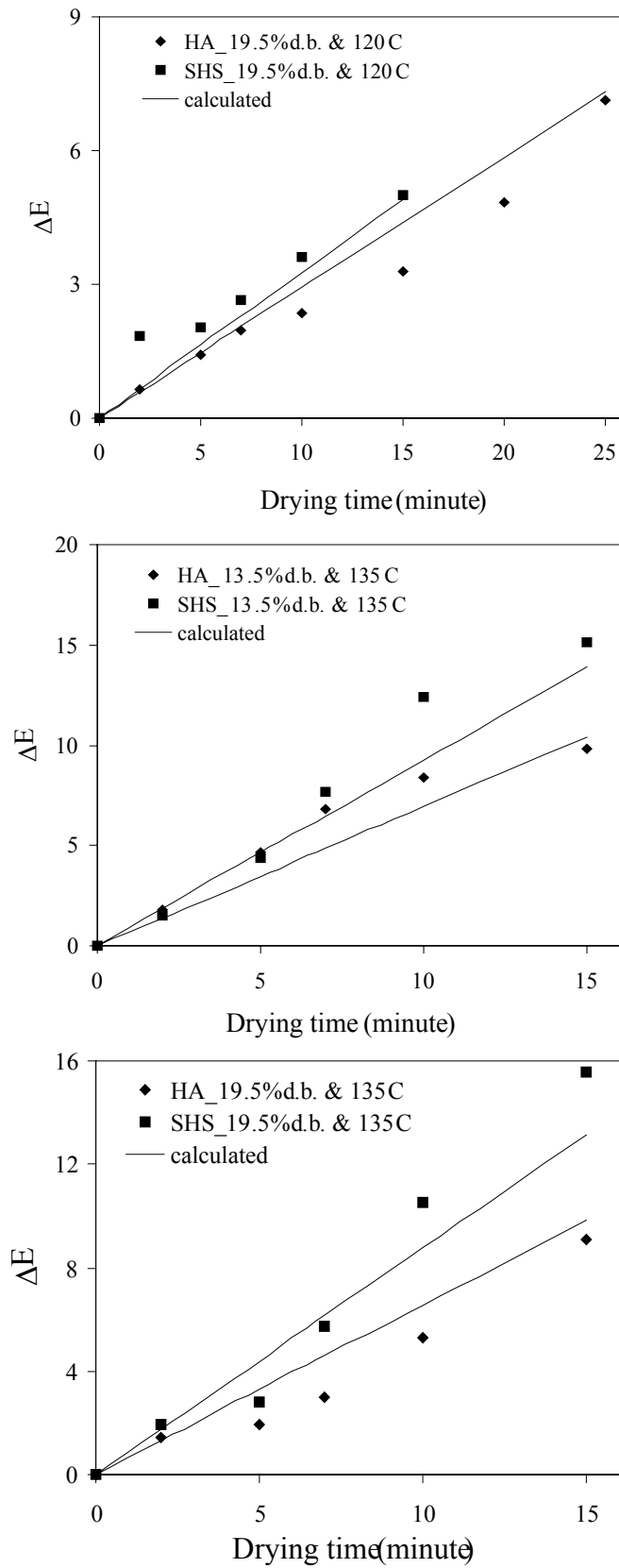
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงค่า ΔL ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งยวดที่สภาวะต่างๆ



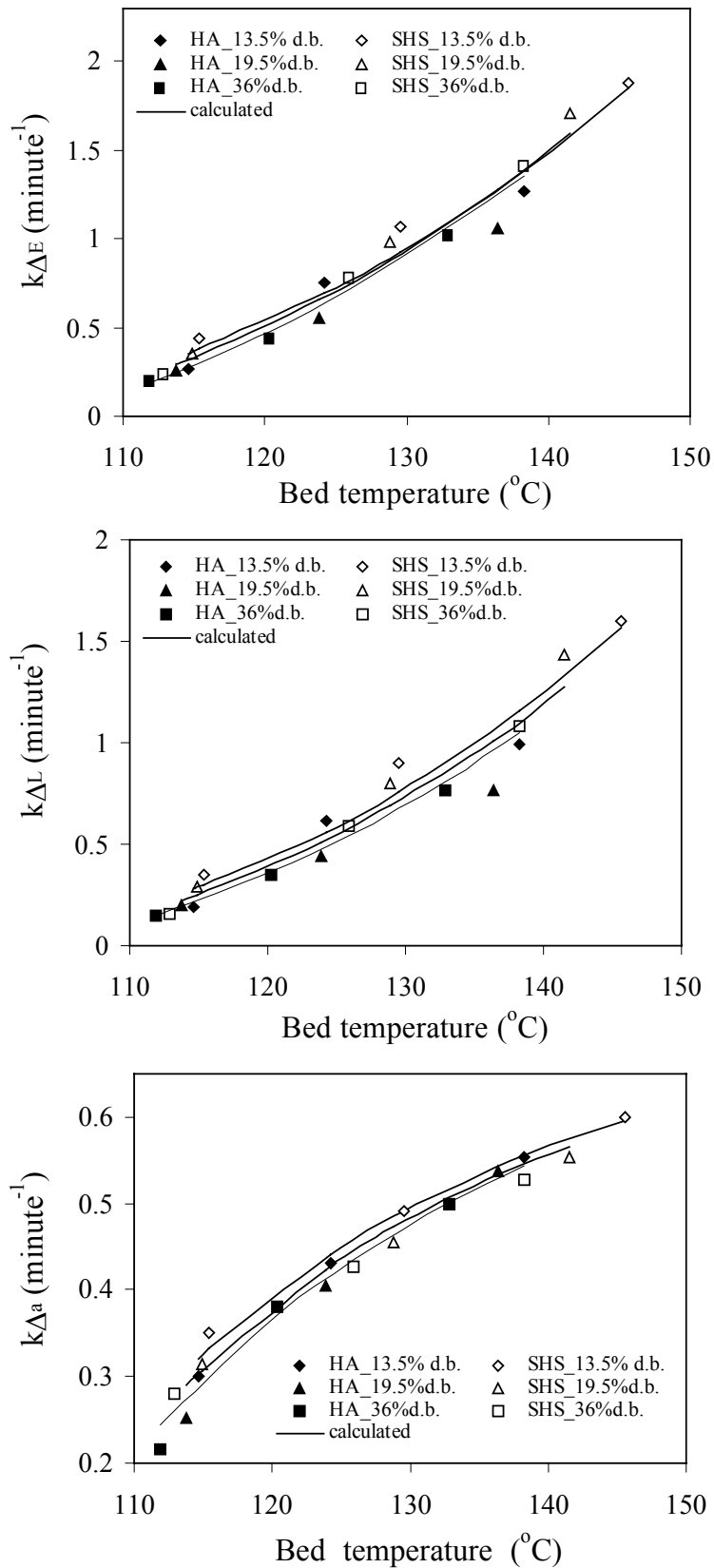
รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงค่า Δa ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงค่า Δb ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.26 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีรวมของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งยวดที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.27 ผลของอุณหภูมิภายในเบดและอุณหภูมิเริ่มต้นของถั่วเหลืองที่มีต่อค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงค่า ΔL Δa และ ΔE ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนชนิดยิ่งยวด

จากการพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวมของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งพบว่าเทอมที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดได้แก่การเปลี่ยนแปลงของค่า L ส่งผลให้อันดับของปฏิกิริยาที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวมของถั่วเหลืองสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่า L ที่อธิบายด้วยปฏิกิริยาอันดับศูนย์ โดยเมื่อนำค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวมมาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิภายในเบดและความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยังคงสามารถแสดงได้ดังสมการ (23)

$$k_{\Delta E} = (-13647.2 + \frac{36.05456}{M_{in}} + 35.88944T) \cdot \exp\left(-\frac{0.02797}{M_{in}} - \frac{2754.224}{T}\right) \quad (23)$$

$$r^2 = 0.97, \text{RSS} = 0.109$$

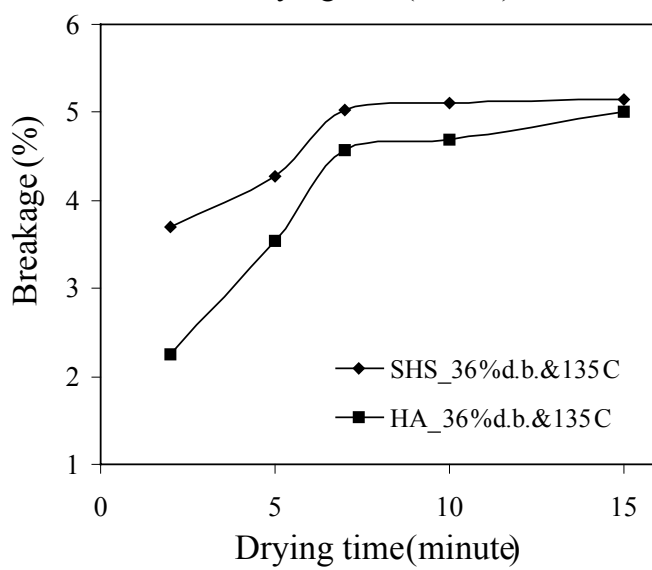
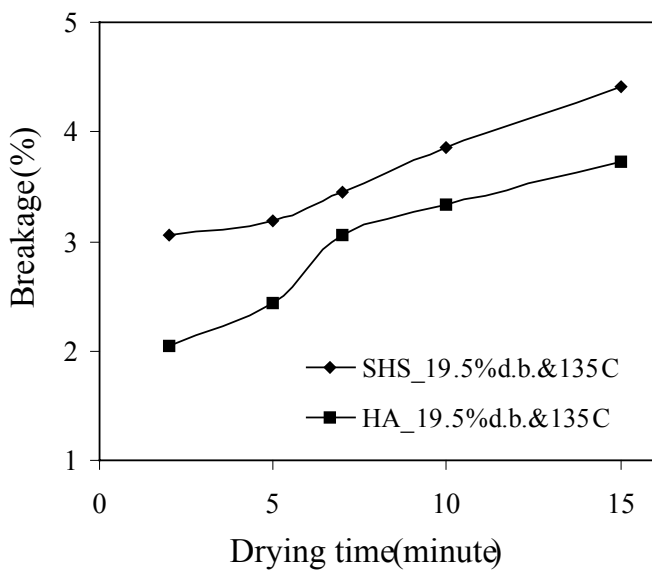
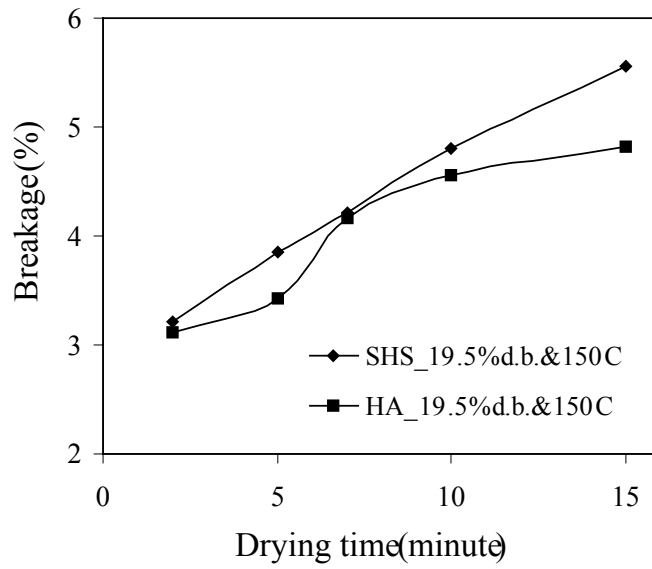
เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิภายในเบดและความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองที่มีต่อค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL , Δa และ ΔE ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงแสดงในรูปที่ 4.27 กล่าวคือการอบแห้งด้วยอากาศร้อน เมื่ออุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองสูงขึ้น ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL , Δa และ ΔE มีค่าสูง และเมื่อพิจารณาผลของความชื้นเริ่มต้นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL , Δa และ ΔE มีค่าสูงสุดเมื่ออบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5 มาตรฐานแห้ง และเมื่ออบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้นพบว่าค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของ ΔL , Δa และ ΔE มีค่าลดลง ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงสีของการอบแห้งถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงที่กล่าวถึงในหัวข้อ 4.2.5

4.8.6 ร้อยละของการแตกและร้าว

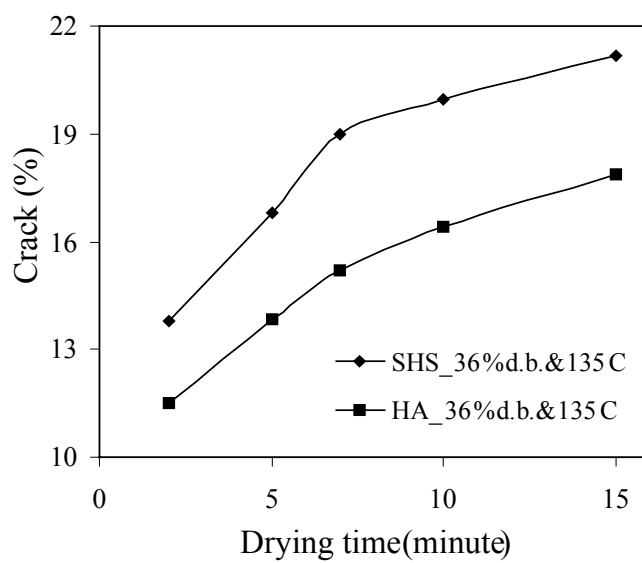
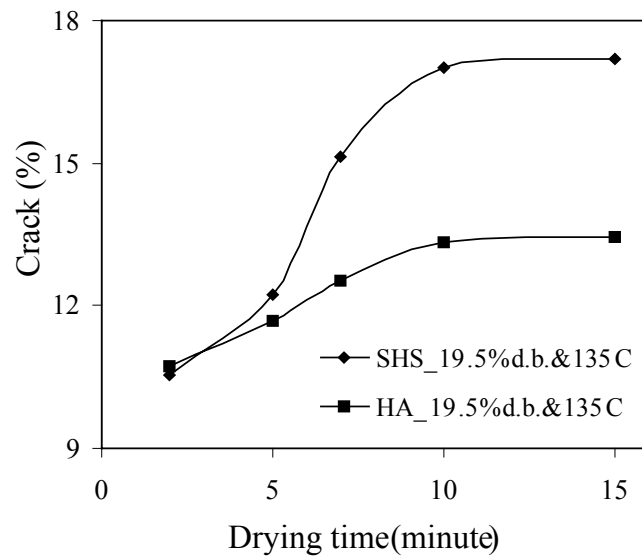
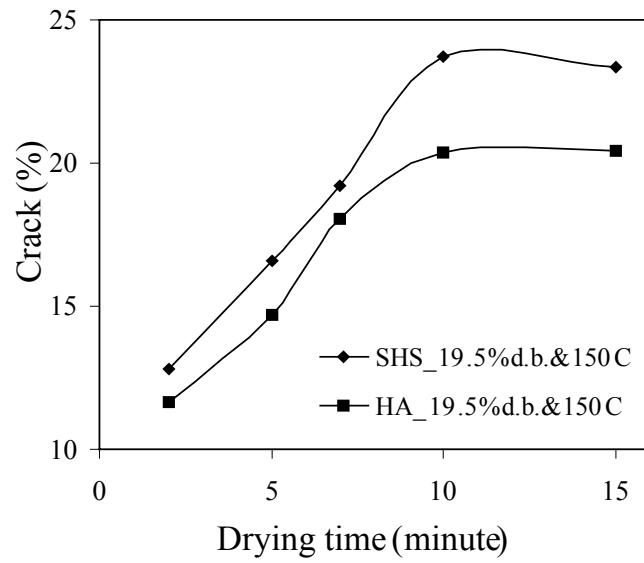
ร้อยละการแตกและร้าวของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงมีปริมาณสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.28 และ 4.29 ผลดังกล่าวเกิดเนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำและในขณะเดียวกันเมล็ดก็ดูดซับน้ำเข้าไปที่ผิวของถั่วเหลือง ส่งผลให้อุณหภูมิภายในของเมล็ดสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ประกอบกับความชื้นที่สูงขึ้น จากปัจจัยดังกล่าวทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นภายในเมล็ดถั่วเหลือง จากความแตกต่างดังกล่าวเป็นสาเหตุให้เกิดความเครียดขึ้นภายในเมล็ดค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งที่อุณหภูมิของเมล็ดเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ สำหรับปัจจัยของอุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองที่มีต่อร้อยละการแตกและร้าวของถั่วเหลืองด้วยอากาศร้อน พบว่าผลที่ได้มีลักษณะในทำนองเดียวกับที่ใช้ไอน้ำร้อนยังคงกล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิภายในเบดและความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองมีค่าสูง ร้อยละการแตกและร้าวของถั่วเหลืองมีค่าสูง

4.8.7 ค่าการละลายของโปรตีน และกรดอะมิโนไลซีน

ค่าการละลายของโปรตีนของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยังคงแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อทำการอบแห้งถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 120°C พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ทำให้เอนไซม์ยูรีเอสผ่านเกณฑ์เป็นตัวควบคุมค่าการละลายของโปรตีนที่เหลืออยู่ในถั่วเหลือง กล่าวคือ การอบแห้งถั่วเหลืองด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C ใช้เวลานานในการลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสลงมาให้ได้ตามเกณฑ์ โดยการอบแห้งความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 19.5 และ 36 มาตรฐานแห้งพบว่าต้องใช้เวลานาน 30 นาที ซึ่งส่งผลให้ค่าการละลายของโปรตีนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 135°C พบว่าใช้เวลาใน



รูปที่ 4.28 ร้อยละการแตกของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและ
ไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นต่างๆ



รูปที่ 4.29 ร้อยละการร้าวของถ้วยเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและ
ไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่อุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นต่างๆ

การอบแห้งเพื่อลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้ภายในระยะเวลาวันที่ ซึ่งค่าการละลายของโปรตีนของถั่วเหลืองยังอยู่ในเกณฑ์ดี ขณะที่การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งพบว่า การอบแห้งถั่วเหลืองที่ความชื้นเริ่มต้นต่างๆด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C ใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนเพื่อลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้ภายในเวลา 2-7 นาที เนื่องด้วยใช้เวลาในการอบแห้งสั้นทำให้ค่าการละลายของโปรตีนในถั่วเหลืองยังมีปริมาณสูง เมื่อเปรียบเทียบโดยรวมจะเห็นว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120°C ไอน้ำร้อนขดยังสามารถนำมาใช้ในการอบแห้งถั่วเหลืองได้ ในขณะที่การอบแห้งด้วยอากาศร้อนต้องใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงกว่า 120°C

เมื่อพิจารณาผลของค่าการละลายของโปรตีนของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งกับอากาศร้อนที่สถานะเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่นการอบแห้งถั่วเหลืองที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 19.5 มาตรฐานแห้งที่อุณหภูมิ 135°C นาน 5 นาที พบว่าถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งมีค่าการละลายของโปรตีนต่ำกว่าถั่วเหลืองที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่ง อุณหภูมิภายใน เบดของถั่วเหลืองมีการเพิ่มขึ้นสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ส่งผลให้การเสียหายของโปรตีนเกิดขึ้นมากกว่า สำหรับผลการอบแห้งถั่วเหลืองที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 36 มาตรฐานแห้งดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าถึงแม้ว่าทั้งการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งและอากาศร้อนจะสามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองได้อย่างรวดเร็ว (2-5 นาที) และค่าการละลายของโปรตีนยังเหลือในปริมาณที่สูง แต่ความชื้นสุดท้ายของถั่วเหลืองไม่สามารถนำมาเก็บรักษาได้ ซึ่งเมื่อทำการอบแห้งจนได้ความชื้นในการเก็บรักษา (ต่ำกว่าร้อยละ 14 มาตรฐานแห้ง) ค่าการละลายของโปรตีนของถั่วเหลืองมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด จะเห็นว่าทั้งการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขดยิ่งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นสูงควรประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน กล่าวคือ ในช่วงแรกควรทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเพื่อลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอส (ใช้เวลา 2-5 นาที) จากนั้นควรอบแห้งถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่ำเพื่อลดปริมาณความชื้นในถั่วเหลืองให้ลงตามเกณฑ์ในการเก็บรักษาและยังได้คุณภาพของถั่วเหลืองในเกณฑ์ดี

เมื่อนำถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขดยิ่งที่มีปริมาณเอนไซม์ยูรีเอส ค่าการละลายของโปรตีนและความชื้นหลังการอบแห้งที่ผ่านเกณฑ์มาหาปริมาณกรดอะมิโนไลซีนเหลืออยู่หลังการอบแห้ง พบว่าปริมาณกรดอะมิโนไลซีนลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณกรดอะมิโนไลซีนในถั่วเหลืองดิบที่ยังไม่ผ่านการอบแห้งโดยมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานยอมรับ ในการนำมาผลิตอาหารสัตว์ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยปริมาณกรดอะมิโนไลซีนของถั่วเหลืองดิบที่นำมาอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งและอากาศร้อนมีปริมาณต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ 2.85 และ 3.13 มิลลิกรัม/กรัมของถั่วเหลืองตามลำดับ ดังนั้นจึงเปรียบเทียบกับค่าร้อยละของการเสียหายของกรดอะมิโนไลซีนดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยเมื่อพิจารณาการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขดยิ่งที่อุณหภูมิ ความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลือง และเวลาในการอบแห้งที่สถานะเดียวกัน พบว่าถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งมีร้อยละของการเสียหายของกรดอะมิโนไลซีนสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่ง อุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองมีการเพิ่มขึ้นสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

ตารางที่ 4.2 ค่าการละลายของโปรตีนของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขวดขี้

อุณหภูมิในการ อบแห้ง (°C)		ความชื้นเริ่มต้น (%d.b.)	เวลาอบแห้ง (นาที)	ความชื้นหลังอบแห้ง (%d.b.)	ΔpH	ค่าการละลายของโปรตีน (%)
ถั่วเหลืองดิบ					1.91	94.28
อากาศร้อน	120	13.5	50	3.93	1.14	71.10
		19.5	30	6.98	0.29	70.98
		36	30	10.06	0.26	63.28
	135	13.5	5	9.72	0.16	78.68
		19.5	5	14.42	0.12	84.33
		36	5	23.72	0.11	85.19
			15	12.68	0	66.64
	150	13.5	5	8.21	0.01	74.17
		19.5	2	15.52	0.23	87.86
		36	5	20.74	0.01	76.83
			10	10.32	0	57.90
	ไอน้ำร้อนขวดขี้	120	13.5	7	13.95	0.20
19.5			5	18.34	0.04	85.20
36			2	38.95	0.05	80.59
135		13.5	5	12.44	0.035	71.76
		19.5	5	16.52	0.01	82.25
		36	2	34.14	0.05	81.38
			15	14.70	0	59.41
150		13.5	5	10.67	0.04	54.94
		19.5	2	18.94	0.02	83.84
			5	14.06	0.015	72.90
			36	2	31.61	0.02
		10		11.41	0	53.59
	มาตรฐาน				< 14	< 0.30

ตารางที่ 4.3 กรดอะมิโนไลซีนในถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขวดยิ่งที่
สภาวะต่างๆ

สภาวะที่ใช้ในการอบแห้ง				ปริมาณกรด	ร้อยละของการเสีย
อุณหภูมิ ในการอบแห้ง (°C)		ความชื้น เริ่มต้น (% d.b.)	เวลาในการ อบ แ ห้ ง (นาที)	อะ มิ โ น ไล ซึ น (มิลลิกรัม/กรัมของถั่ว เหลือง)	สภาพของกรด อะมิโนไลซีน
ไอน้ำร้อน ขวดยี่ง	120	13.5	7	2.80	1.75
	135	13.5	5	2.76	3.16
	120	19.5	5	2.67	6.32
	135	19.5	5	2.71	4.91
	150	19.5	5	2.82	1.05
อากาศร้อน	120	19.5	30	3.00	4.15
	135	13.5	5	3.04	2.88
	150	13.5	5	2.83	9.59
	135	19.5	5	3.12	0.32
ถั่วเหลืองดิบ				2.85-3.13	0
มาตรฐาน				> 2.40	-

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขวดยิ่ง ซึ่งศึกษาปัจจัยที่มี
ผลต่อคุณภาพของถั่วเหลืองหลังการอบแห้งดังนี้ อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้ง 120 135 และ 150 °C ความชื้นเริ่มต้น
ของถั่วเหลืองร้อยละ 13.5 19.5 และ 36 มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลองสรุปได้ว่า

1) ในการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นของถั่วเหลืองแบ่งเป็น 2 ช่วง โดย
ในช่วงต้นของการอบแห้งไอน้ำจะเกิดการควบแน่นที่ผิว ซึ่งทำให้เกิดการดูดซับน้ำเข้าไปในเมล็ดถั่วเหลือง ส่งผลให้
ความชื้นของเมล็ดเพิ่มสูงขึ้น จากนั้นเมื่ออุณหภูมิของเมล็ดถั่วเหลืองสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิอิ่มตัว จะเกิดการระเหยน้ำส่งผล
ให้ความชื้นภายในเมล็ดถั่วเหลืองลดลง ในขณะที่การอบแห้งด้วยอากาศร้อน การระเหยน้ำในเมล็ดส่งผลให้ความชื้นของถั่ว
เหลืองลดลงตลอดช่วงของการอบแห้ง โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของถั่วเหลืองมีค่าสูง เมื่ออุณหภูมิภายในเบด
และความชื้นของถั่วเหลืองมีค่าสูง เมื่อพิจารณาการแพร่ความชื้นของถั่วเหลืองพบว่าการ อบแห้งถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 120°C
การอบแห้งด้วยอากาศร้อนให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสูงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่ง และเมื่ออุณหภูมิ
ในการอบแห้งสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดยิ่งมีการเพิ่มขึ้น
สูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

2) เมื่อพิจารณาจลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขดขึงพบว่าการลดลงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียลกับเวลาในงานวิจัยนี้จึงอธิบายการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบปรับปรุง โดยการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนขดขึงให้อัตราการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสเร็วกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาการอบแห้งถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 120°C โดยการอบแห้งถั่วเหลืองที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5มาตรฐานแห้ง ไม่สามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้ไม่ว่าจะใช้เวลาในการให้ความร้อนนานเท่าใด และสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 19.5-36มาตรฐานแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C ต้องใช้ระยะเวลานานถึง 30 นาทีในการลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสให้ได้ตามเกณฑ์ ในขณะที่การอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นต่างๆด้วยไอน้ำร้อนขดขึงที่อุณหภูมิ 120°C สามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้อย่างรวดเร็วโดยใช้เวลา 2-7 นาที สำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ $135-150^{\circ}\text{C}$ พบว่าการอบแห้งด้วยตัวกลางทั้งสองสามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้อย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 2-5 นาที โดยค่าคงที่การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสมีค่าสูง เมื่ออุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองในการอบแห้งมีค่าสูง

3) การเปลี่ยนแปลงสีของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งวัดด้วยค่า L a และ b พบว่าถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL ลดลงซึ่งมีลักษณะแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงด้วยปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ส่วนค่า Δa มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยมีลักษณะเป็น S-curve จึงอธิบายการเปลี่ยนแปลงด้วยสมการ Logistic สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่า Δb มีลักษณะแปรผกผันขึ้นลง และมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับค่า ΔL และ Δa ในงานวิจัยนี้จึงไม่พิจารณาจลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงของค่า Δb สำหรับค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) ของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า ΔE มีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับศูนย์ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสีของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยตัวกลางทั้งสองพบว่าถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดขึงมีการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL Δa และ ΔE สูงกว่าการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยอากาศร้อน เมื่อพิจารณาค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงสีแต่ละค่าพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูง ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL Δa และ ΔE มีค่าสูง และเมื่อพิจารณาผลของความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองพบว่า ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL Δa และ ΔE ในการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5 มาตรฐานแห้งมีค่าสูงสุด และเมื่ออบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้นกลับพบว่าค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของค่า ΔL Δa และ ΔE มีค่าลดลง

4) ถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดขึงมีร้อยละการแตกและร้าวสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน โดยร้อยละการแตกและร้าวของถั่วเหลืองมีค่าสูง เมื่อใช้อุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองสูงในการอบแห้ง

5) ถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งมีค่าการละลายของโปรตีนลดลง โดยเมื่อพิจารณาค่าการละลายของโปรตีนของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขดขึงที่อุณหภูมิและเวลาเท่ากัน พบว่าถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดขึงมีค่าการละลายของโปรตีนต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งที่มีปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสผ่านเกณฑ์มาพิจารณาค่าการละลายของโปรตีน พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเพื่อลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสให้ผ่านเกณฑ์เป็นตัวกำหนดค่าการละลายของโปรตีนที่เหลืออยู่ในถั่วเหลือง กล่าวคือในการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C พบว่าใช้เวลาในการให้ความร้อนนานเพื่อลดเอนไซม์ยูรีเอส ส่งผลให้ค่าการละลายของโปรตีนของถั่วเหลืองต่ำกว่าเกณฑ์ ในขณะที่การอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ $135-150^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาในการให้ความร้อนเพื่อลดเอนไซม์ยูรีเอสสั้นลง ส่งผลให้ค่าการละลายของโปรตีนยังมีปริมาณสูง ในขณะที่การอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนขดขึงสามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้อย่างรวดเร็ว โดยการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดขึงที่อุณหภูมิ $120-135^{\circ}\text{C}$ ให้ค่าการละลายของโปรตีนของถั่วเหลืองในเกณฑ์ดี แต่อย่างไรก็ดีในการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 36 มาตรฐานแห้ง ถึงแม้ว่าค่าการละลายของโปรตีนยังเหลือในปริมาณสูง เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งเพื่อลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสสั้น

กว่าการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นต่ำ แต่ความชื้นของถั่วเหลืองภายหลังการอบแห้งมีปริมาณสูงกว่าเกณฑ์ในการเก็บรักษาได้ และเมื่ออบแห้งจนได้ความชื้นตามเกณฑ์พบว่าค่าการละลายของโปรตีนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานและสีถั่วเหลืองไหม้

6) เมื่อนำถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขวดซึ่งที่มีปริมาณเอนไซม์ยูรีเอส ค่าการละลายของโปรตีน และความชื้นหลังการอบแห้งผ่านเกณฑ์มาหาปริมาณกรดอะมิโน ไลซีนที่เหลืออยู่หลังการอบแห้ง พบว่าปริมาณกรดอะมิโน ไลซีนลดลงเพียงเล็กน้อยโดยมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานยอมรับในการนำมาผลิตอาหารสัตว์

7) การใช้ไอน้ำร้อนขวดซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 120-135°C สามารถนำมาอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5-19.5 มาตรฐานแห้งได้ดี แต่สำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5-19.5 มาตรฐานแห้งด้วยอากาศร้อนต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 120°C สำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 36 มาตรฐานแห้ง ควรประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนโดยการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิสูงควรมานำมาใช้ในช่วงต้น (2-5 นาที) และจากนั้นควรอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำเพื่อลดความชื้นให้ได้ตามเกณฑ์ในการเก็บรักษาและได้ค่าการละลายโปรตีนและสีของถั่วเหลืองในเกณฑ์ดี

6. ข้อเสนอแนะ

1) เมื่อพิจารณาการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13.5มาตรฐานแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C พบว่าไม่สามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้ตามเกณฑ์ไม่ว่าจะอบแห้งถั่วเหลืองนานเท่าใด ในขณะที่การอบแห้งถั่วเหลืองที่สภาวะดังกล่าวด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่งสามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้ตามเกณฑ์ภายในเวลา 7 นาที แสดงให้เห็นว่านอกจากผลของอุณหภูมิ ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส ได้แก่ปริมาณความชื้นในถั่วเหลือง โดยที่ความชื้นสูง เอนไซม์จะมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา และเมื่อลดความชื้นลงจนถึงจุดหนึ่งเอนไซม์จะไม่มี ความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยในการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่งในช่วงต้นของการอบแห้งมีการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวและเกิดการดูดซับน้ำเข้าไปในเมล็ดส่งผลให้ความชื้นของถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น ทำให้การเสื่อมสลายของเอนไซม์ในถั่วเหลืองเกิดก่อนการลดลงของความชื้นจนถึงจุดที่เอนไซม์ไม่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ในขณะที่การอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นต่ำด้วยอากาศร้อนไม่สามารถลดเอนไซม์ยูรีเอสได้ เนื่องการผลของการอบแห้งส่งผลให้ปริมาณความชื้นภายในเมล็ดถั่วเหลืองลดลง โดยปริมาณความชื้นที่เหลือต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่เอนไซม์ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสลายได้ ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของความชื้นในถั่วเหลืองในขณะการอบแห้งที่มีต่อการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส โดยอาจทำการ อบแห้งถั่วเหลืองด้วยอากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำ (Saturated Air) ที่อุณหภูมิ 120°C ซึ่งน่าจะให้ผลที่ดี เนื่องจากถั่วเหลืองไม่สูญเสียความชื้น โดยควรทำการทดลองในระบบปิด (Close loop) จะทำให้สามารถนำอากาศที่กลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งหมด ซึ่งจะสามารถประหยัดพลังงานได้ด้วย

2) จากผลการอบแห้งถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 120°C พบว่าอัตราการอบแห้งถั่วเหลืองของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่ง แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่งพบว่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ผู้วิจัยคาดว่าน่าจะเป็นผลของการเกิด Gelation (การเสียสภาพของโปรตีนน้ำหนักโมเลกุลสูงเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 70-90°C) โดยในการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่ง มีการเพิ่มขึ้นของความชื้นในถั่วเหลืองในช่วงต้นของการอบแห้ง ซึ่งผลของปริมาณความชื้นในถั่วเหลืองที่สูงกว่าถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน น่าจะส่งผลให้โปรตีนของถั่วเหลืองที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่งน่าจะเกิด Gelation ได้ง่ายกว่าการอบ

แห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งการเกิด Gelation อาจจะมีส่วนในการยับยั้งการแพร่ของน้ำออกจากเมล็ดให้ช้าลง จึงอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้อัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งช้ากว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมความแตกต่างระหว่างการเกิด Gelation ของเมล็ดถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งอาจนำมาสนับสนุนผลการทดลองข้างต้นได้

7. เอกสารอ้างอิง

- 1) Akao, T., 1983, Applications of Pressurized Superheated Steam to Food Processing, 239-240, in S.Shimizui (Ed.) Chemical Engineering Symposium Series 1, Tokyo, Japan
- 2) Cheong, Y.L., 1997, Fullfat Soybean Meal Production and Utilisation, American Soybean Association Technical Bulletin, FT37-1997
- 3) Chen, Z., Wu, W. and Agarwal, P.K., 2000, Steam-Drying of Coal. Part 1. Modelling the Behaviour of a Single Particle, Fuel, 79, 961-973
- 4) Faber, J.L. and Zimmerman, D.R., 1973, Evaluation of Infrared-Roasted and Extruder Processed Soybeans in Baby Pig Diets, J.Animal Science, 46, 1180-1185
- 5) McNaughton, J.L., Reece, F.N. and Deaton, J.W., 1981, Relationships between Color Trypsin Inhibitor Contents and Urease Index of Soybean Meal and Effects On Broiler Performance, Poultry Science, 60, 393-400
- 6) Mujumdar, A.S., 1992, Superheated Steam Drying of Paper: Principles, Status and Potential, 208-220, in A.S. Mujumdar (Ed.) Drying Solids, International Science Publisher, New York
- 7) Overhults, D.G., White, G.M., Hamilton, H.E. and Ross, I.J., 1973, Drying Soybean with Heated Air, Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, 16, 112-113
- 8) Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S., Wetchagama, S., Jaisut, D., Desorption Isotherms and Drying Characteristics of Shrimp in Superheated Steam and Hot Air, Drying Technology, (To be published)
- 9) Salin, J.G., 1988, Steam Drying of Wood for Improved Particle Board and Lower Energy Consumption, Paper and Timber, 9, 806-810
- 10) Schwartze, J.P. and Bröcker, S., 2000, A Theoretical Explanation for The Inversion Temperature, Proceedings of the 12th International Drying Symposium, Paper No. 93, 1-10
- 11) Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Wetchacama, S. and Wutiwiwatchai, W., 2001, Fluidised Bed Drying of Soybeans, Journal of Stored Product Research, 37, 133-151
- 12) Stubbing, T.J., 1999, Airless Drying-Developments Since IDS 94, Drying Technology, 17(7&8), 1639-1651
- 13) Tarnawski, W.Z., Mitera, J., Borowski, P. and Klepaczka, A., 1996, Energy Analysis on Use of Air and Superheated Steam as Drying Media, Drying Technology, 14(7&8), 1733-1749
- 14) White, C.L., Greene, D.E., Waldroup, P.W. and Stephenson, E.L., 1967, The use of Unextracted Soybeans for Chicks, Poultry Science, 46, 1180-1185
- 15) Zeng, S.X., Ruan, R.R., Fulcher, G.R., Paul, C., 1996, Evaluation of Soybean Seed Coatcracking during Drying :Part I Using Drying Tests, Drying Technology, 14, 1575-1593

Outputs

- 1) ผลงานเรื่อง Effective diffusivity and kinetics of urease inactivation and colour change during processing of soybeans with superheated-steam fluidised bed ตีพิมพ์ในวารสาร An-International Journal of Drying Technology (ภาคผนวก ก)
- 2) ผลงานเรื่อง Kinetics of drying and urease inactivation of soybeans during heating with hot air and superheated steam under fluidisation condition ได้ส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร Journal of Food Engineering (ภาคผนวก ข)
- 3) ผลงานเรื่อง การอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการครั้งที่ 5 หัวข้อเรื่อง Innovation in Agricultural Engineering for Increasing Productivity (ภาคผนวก ค)
- 4) ผลิตบัตติระดับปริญญาโทเป็นจำนวน 2 คน คือ น.ส. ปวีณา ปรัชญาวศิน และ น.ส. รติยา ชูพาณิชยานันท์

**EFFECTIVE DIFFUSIVITY AND KINETICS OF UREASE INACTIVATION AND
COLOUR CHANGE DURING PROCESSING OF SOYBEANS WITH
SUPERHEATED-STEAM FLUIDISED BED**

Somkiat Prachayawarakorn¹, Paveena Prachayawasin¹ and Somchart Soponronnarit²

¹ Department of Chemical Engineering, ² School of Energy and Materials

King Mongkut's University of Technology Thonburi

Suksawat 48 Road, Bangkok 10140, Thailand

E-mail address: somkiat.pra@kmutt.ac.th

ABSTRACT

Influences of temperature and moisture content on diffusional transport property and kinetics of both urease inactivation and colour change during soybean treatment with superheated steam in the temperatures of 120 to 150°C were investigated. The experimental results have shown that the effective diffusivity and apparent rates of such reactions are related to temperature in a way that the rates of water transport, urease inactivation and brown pigment formation are higher with higher temperature. In addition, these rates are also enhanced by increasing moisture content, except for the browning reaction that is inhibited by this factor due to the dilution effect. The reduction in urease activity is reasonably described by modified first-order reaction and the colour change of soybeans is characterised by three Hunter parameters in which the changes of L-, a- and b-values are followed according to zero-order, modified Monod and first-order reactions, respectively. The kinetics of inactivation and colour change, along with the experimental data of protein solubility and lysine content, have been suggested that the soybean should be treated with superheated steam at the temperature

ranging from 120 to 135°C. The superheated-steam fluidised-bed technique can simultaneously be applied for both drying and inactivating such components in soybeans by a single operation when the initial moisture content falls within a suitable range, approximately lower than 20%d.b. At elevated initial moisture contents, two-stage drying technique is recommended in order to avoid excessive cooked soybeans.

Keywords: Colour, Legume, Superheated steam, Trypsin, Urease

INTRODUCTION

Legumes are valuable potential source of good-quality protein that is used as a main ingredient of animal feed and are increasingly important in human nutrition. Soybean is the most important legumes in relation to total world legume production because of its relative cheapness and high protein content. However, the utilization of nutritional value of soybean is limited due to the presence of certain antinutritional factors, such as trypsin inhibitor, hemagglutinins, saponins and urease. Trypsin inhibitor inhibits the growth rate by 30-50% and causes the pancreatic hypertrophic response in animals when raw soybean meal is fed (Rackis et al., 1986). Urease enzyme, which catalyses the urea converted into ammonia and carbon dioxide, does not affect on the physiological functions in humans, but is toxic to animals when fed with raw soybean meal. These antinutritional factors are destroyed by thermal processing methods such as roasting, cooking/autoclaving, micronisation and extrusion (Abd El-Hady and Habiba, 2003; Alonso et al., 2000; Cheong, 1997; Raghavan and Harper, 1974). In addition to elimination of such factors, the thermal treatments improve nutritional value through conversion of native protein into more digestible denaturated forms (Valle, 1981).

Roasting, one of the most frequently used techniques, involves cooking of soybeans using heated air with temperature above the normal boiling point of water. There are several roasting methods, ranging from salt bed roasting, rotary dryer similar to a common grain dryer. These methods provide non-uniform degree of cooking since the poor contact between grains and medium is encountered. The non-uniform cooking can be diminished by using fluidised-bed technique by which the hot-air stream with a sufficiently high velocity is forced through grain bed and consequently, the particles are suspended in hot air and move randomly within the bed. Besides the improvement of cooking, this technique gives rise to inactivation of the trypsin inhibitors and urease enzyme without losses of nutritional values in particular lysine (Soponronnarit et al., 2001; Osella et al., 1997). In the present work, however, superheated-steam is chosen as heating media, in stead of hot air, to eliminate the antinutritional factors. Use of superheated steam is an attractive technology that offers improved thermal efficiency, thereby gaining improvements in economy and minimising environmental impact (Salin, 1988; Heinrich et al., 1999). In addition to these advantages, the waste heat and water vapour evaporated from product can be recovered and used in other processes. The idea of using superheated steam to destroy the antinutrients originates from its unique characteristic, that is, the superheated steam is condensed when it is contacted with cold surface of material, thus releasing latent heat along with a rapid increase in particle temperature. With such peculiar phenomenon, it motivates us to quantify the effect of superheated steam in destroying antinutritive substances and simultaneously maintaining the high protein solubility.

Although treatment by thermal processes is able to reduce the levels of antinutritional factors satisfactorily, colour deterioration of the product is unavoidable since temperature is an important factor in accelerating the formation of brown pigment, thus resulting in poor product quality. In general, the soybean colour after processing should be yellow or light brown. The

kinetics of colour change is therefore a subject to be considered in the present investigation, in addition to the kinetics of urease inactivation.

MATERIALS and METHODS

Samples

Dry soybeans, with moisture content of 13.5% d.b., were purchased from the local market and then adjusted to initial moisture contents of 19.5% and 36% by adding the required calculated amount of water. The rewetted samples were kept in the cold storage room at 8-10° C for a week in order to allow water to penetrate uniformly into every part of the kernel.

Equipments

Figure 1 shows a schematic diagram of a superheated-steam fluidised-bed system. A fluidised-bed dryer has a cylindrical shape with a dimension of 15 cm diameter and 100 cm height. The saturated steam generated from a small boiler, with a capacity of 31 kg/h at the condition of 100°C and 106 kPa absolute pressure, flows through the dryer forced by a backward-curved blade centrifugal fan driven by a 2.2 kW motor. Before reaching the dryer, the saturated steam was passed through 13.5 kW electrical heaters to rise its temperature up to the desired level. This accordingly changed the saturated vapour into the superheated steam. The steam flow rate required for fluidising the solid particles was precisely controlled by a frequency inverter and the desired superficial velocity at the drying chamber inlet was fixed at 3.2 m/s, which is 1.7 times higher than the minimum fluidising velocity for soybean particle (Soponronnarit et al., 2001). The steam velocity was measured by a pitot static tube.

The designed system can be used either for hot air or steam. In the superheated steam operation, the hot air is initially used for warming up the equipments and steam ducts of the system in order to prevent water condensation. The warming up period was stopped when the temperature in every part of the system reached the desired level and the steam was replaced accordingly by opening a valve V.1. At the same time, the air was delivered to atmosphere via a valve V.8 and this valve was closed again when the experiment was started. During the drying period, the steam flowing out of the dryer is directed to a reverse flow cyclone to collect the small particles being suspended in the fluid stream. The cleaned steam was reused again.

Before starting the experiments, samples were taken out from the storage room and left in the ambient condition until the grain temperature approached the ambient temperature. Amount one kilogram of soybeans, corresponding to a bed depth of 10 cm, was then dried at temperatures of 120, 135 and 150°C. A PID controller, with an accuracy of $\pm 1^\circ\text{C}$, was used to maintain the steam temperature at the drying chamber inlet. Temperature at different positions within the drying chamber was monitored by a data logger with an accuracy of $\pm 1^\circ\text{C}$. The sample was taken from the dryer at valve V.9 to examine the moisture content, urease activity and quality. The moisture content of soybean was determined by drying in an electrical oven at 103°C for 72 hours (ASA, 1990).

Urease activity measurement

Urease test measures the activity of urease after processing. This test is an indirect method to indicate the level of trypsin inhibitor since rate of its inactivation becomes almost identical to that of trypsin inactivation (Baker and Mustakas, 1973, Osella et al., 1997). It measures the change of pH which results from the urease enzyme converting the urea to ammonia. The determination of urease activity was followed by the direction of AACC method 22-90 (AACC, 1995). The pH difference of raw soybeans throughout the experiments

was approximately 1.9. The relationship between pH difference and percent residual urease activity is given in Figure 2. This figure was achieved by taking the samples dried at various drying times to measure the pH difference and the residual urease activity. The residual urease activity determination was followed with Rasmussen's method (Rasmussen, 2002). The reaction time for urease enzyme to develop ammonia was 60 minutes. The residual urease activity is expressed as the ratio of milliequivalents of ammonia produced from urea per gram of thermally treated soybeans to that obtained from raw soybeans. In uncooked soybean, ammonia was produced with an approximate value of 5 milliequivalents/g.

As shown in Figure 2, the change in pH difference is not proportional to that of percent residual urease activity, with a steep rise in the residual urease activity at the pH difference higher than unity. From ASA standard, the adequately cooked soybeans possess the urease values in the range of 0.02 to 0.3 pH difference (ASA, 1990) and the corresponding percent residual urease activity is between 10 and 20%.

Colour measurement

A Minolta CR-300 tristimulus colorimeter was used to determine the L, a, b values of samples. In Hunter *Lab* Colour Space, the L-value presents the degree of lightness or darkness. The chromatic proportion of the colour space is based on rectangular Cartesian coordinates (a, b), with red represented by +a, green represented -a, yellow by b and blue by -b. The L-value gives a spectrum in the range from 0 to 100, with the highest value showing whiteness whereas the lowest value indicates the blackness. The a- and b-values represent the same spectrum range from -60 to 60. Before the colour measurements, the colorimeter was standardised each time with a black and a white ceramic plates. The colour was measured for soybeans thermally treated at various drying times, temperatures and initial moisture contents. Before measuring, the dried soybeans in each set were finely grounded using a mixer and then spread on a plate.

Protein solubility measurement

Protein solubility was determined according to the AOCS method BA 10-63 (AOCS, 1979). This method involves the dispersion of proteins in 0.2% KOH solution. The protein solubility is defined as the ratio between nitrogen content in the supernatant after extraction with 0.2% KOH and total nitrogen content of material. The total nitrogen content and the nitrogen content in the supernatant were performed by Kjeldahl method.

Lysine measurement

Lysine content in soybean was analysed by AccQ-Tag method (1993). The grounded soybean was hydrolysed with HCl solution at 110°C for 22 hours and was then derivatized with 6-aminoquinolyl-N-hydroxysuccinimidyl carbamate (AccQ-Flour reagent). The lysine content was eventually determined by a high performance liquid chromatography.

Moisture diffusion

In the present study, a method of slopes was applied to study the effect of moisture content on the effect diffusivity, D_{eff} (Saravaos and Raouzeos, 1986, Ramesh, 2003). Determination of effective diffusivity was written based on the Fick's second law equation, under the initial and boundary conditions that the moisture distribution inside a soybean kernel was specially uniform at the beginning; and the moisture at the exterior surface, after drying has started, rapidly vaporised reaching almost zero value since the temperature used for drying was above the normal boiling point. The solution of Fick's equation for sphere-shaped soybean is given by (Crank, 1975)

$$\frac{M(t)}{M_{\text{in}}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{r^2}\right) \quad (1)$$

where, $M(t)$ is the moisture content at time t (dry basis, kg H₂O/kg dry matter), and M_{in} is the initial moisture content, D_{eff} is the effective diffusivity (m²/s), t is the drying time (s) and r is the sphere radius (m). To determine the effective diffusivity along the change in moisture content with drying time, it can be accomplished by differentiating eq.(1) with respect to t , yielding

$$\frac{d(M(t)/M_{in})}{dt} = -\frac{6D_{eff}}{r^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (2)$$

The slope of experimental drying curve was known at every time and used as input parameter on the left hand side of eq.(2) and the effective diffusivity was then estimated. The main assumptions of eq.(2) were that the moisture transport occurred only in the radial direction and the sample was homogeneous, without shrinkage during drying.

Kinetics of urease inactivation

Inactivation of urease enzyme during thermal treatment by superheated steam was assumed to follow the modified first-order kinetics expressed as

$$C = (C_o - C_{eq}) \exp(-kt) + C_{eq} \quad (3)$$

where, C_o is the activity of urease enzyme at the beginning (dimensionless), k is the apparent rate constant (min⁻¹). C_{eq} is the equilibrium activity and can be determined by a linear regression.

Kinetics of colour change

The colour change of thermally treated soybean is caused by the non-enzymatic browning reaction, where the interaction between carbonyl compounds (sugars and carbohydrates) and amine compounds (amino acids and proteins) has occurred. In addition, it is possibly produced by the structural deformation of pigments. There have been numerous

research studies on the kinetics of colour changes during storage and processing (Rapusas and Driscoll, 1995; Krokida et al., 1998; Avila and Silva, 1999). Generally, the apparent rate change of colour is presented by the zero- or first-order kinetics. As observed from the experiments, the change of individual colour parameters, representing by L-,a- and b-values, with time appears to be clearly different and hence, different kinetic models are used to describe their changes. A zero-order reaction is chosen to describe the change of L-value and it is expressed by

$$L=L_o+(-k_L t) \quad (4)$$

where, k_L is the rate constant for the L-value, min^{-1} , L is the L-value at time t and L_o is the initial L-value. For the b-value, a first-order reaction is adopted and it is given by

$$b=b_o \exp(-k_b t) \quad (5)$$

where, k_b is the rate constant for the b-value, min^{-1} , b is the b-value at time t and b_o is the initial b-value. A modified Monod equation is accounted for the change of a-value and it is written as

$$a=\frac{a_o c \exp(k_a t)}{c+a_o \exp(k_a t)} \quad (6)$$

where, k_a is the rate constant for the a-value, a_o is the initial a-value and c is the constant value related to the equilibrium a-value. If $c \gg a_o \exp(k_a t)$, equation (6) then approaches equation (5).

Adequacy of model

Several criteria for adequacy of fit such as coefficient of determination (r^2) and residual sum of squares (RSS) were used to choose the appropriate models for the effective diffusivity, urease enzyme and colour changes. The RSS can be calculated by the following equation:

$$RSS = \sum_{i=1}^n (Z_{\text{exp},i} - Z_{\text{cal},i})^2 \quad (7)$$

where, Z_{exp} is the experimental value of the dependent variable, Z_{cal} is the calculated value from the model and n is the total number of experimental data. The best model describing the transport property and quality change was selected as the one with the highest coefficient of correlation and the least value of RSS.

RESULTS and DISCUSSION

Change of Moisture Content

Figure 3 shows the change of moisture content at three initial moisture contents of 13.5%, 19.5% and 36% d.b., all of which were dried at a temperature of 120°C. The characteristic curve of moisture content during superheated steam drying is different to that found with the conventional hot air drying. Two phenomena are observed in the superheated steam drying, which are the moisture uptake period followed by the evaporation period whereas only latter period is found with the hot air.

In the first period, the steam is in close contact with the bed of particles having a lower temperature which causes the steam to be condensed. The amount of moisture uptake is related to the initial moisture content and superheated steam temperature. The first period can be seen in Figure 3, which shows the condensation period in the first two minutes of drying time and the amount of moisture content increased from the beginning to the highest point is approximately 4% d.b. for an initial moisture content of 14% d.b. and less than 3% d.b. for the higher initial moisture contents. The lowering of moisture uptake at higher moisture content is probably due to the higher occupancy of water in the void spaces of the kernel, so that the less condensed water can penetrate into the kernel. In addition to this effect of high moisture content, the lower quantity of moisture uptake is obvious with higher inlet superheated steam

as shown in Figure 4: the moisture uptake into the samples in the superheated steam temperatures at 120, 135 and 150°C are 4.0, 1.8 and 0.6% d.b., respectively. The possible explanation of these results is due to the higher degree of superheat, resulting in a smaller amount of condensed steam.

When the evaporation period starts, transport of moisture is in the diffusion controlled region, as indicated by the exponential decay of moisture characteristic curve. The drying rate in this region is dependent on moisture content and temperature. An increase in initial moisture content or inlet steam temperature increases the soybean drying rate, as shown by the slopes of the characteristic curves in Figures 3 and 4, respectively.

Change of bed temperature

Figure 5 illustrates the change in bed temperature for the samples at different initial moisture contents using the inlet steam temperature of 120°C. The bed temperature is strikingly increased for a short period and then rises gradually for the remaining drying time, corresponding to the evaporation period. The rapid rise in temperature is attributed to the release of latent heat from the condensing steam, thus fast heating the kernels. As illustrated in Figure 5, the bed temperatures during condensation period are in the range of 98 and 100°C, the lowest temperature corresponding to the initial moisture content of 36% d.b. The condensed steam did not take seriously the operational problem in this case but it produced the desirable result of soybean product quality, with the rapid inactivation of urease enzyme. For a few minutes of drying, the residual urease activity fell off by 100% to the range of 10 to 96%, depending upon the inlet temperature and initial moisture content. The details will be given in the section of urease inactivation.

Moisture Diffusivity

Data from a particular evaporation period of the drying experiment were analysed for calculating the effective diffusion coefficient. Figure 6 shows the relationship between the effective diffusion coefficient and moisture content at various temperatures. Values vary considerably from 1.8×10^{-11} to 1.5×10^{-8} m²/s. D_{eff} have high values in the early stages of evaporation period, where the moisture content is high, and then becomes monotonically decreasing in the later stages, where the moisture content appears to be lower. The decrease of D_{eff} at lower moisture content may be due to the complex structure of the kernel restricting the transport of water from the interiors to the exteriors. In addition to moisture effect, the effective diffusion coefficient also varies with temperature by a way that the diffusivity increases with increase in temperature.

It is noted that for some dying conditions, viz., at temperatures of 120 or 135°C and initial moisture content of 13.5 or 19.5% d.b., the effective diffusion coefficient is very high particularly at the beginning of evaporation period. This high value corresponds to the reduction in moisture content from the peak to the next data point, suggesting that the condensed steam only penetrates into the kernel around the outer layer during this short period of condensation. Accordingly, when the evaporation period starts, the moisture is removed easily without the interference of soybean structure and leads to extremely high drying rates.

In order to obtain the representative model for the effective diffusivity, the values of D_{eff} were fitted with an empirical equation treating D_{eff} as the dependent variable with temperature and moisture content as the independent variables. The analysis of the data using a non-linear regression technique suggests the following form:

$$D_{\text{eff}} = \left[5.4364 \times 10^{-20} + 5.111 \times 10^{-18} M^2 \right] \exp(0.057318T) \quad (8)$$

where, D_{eff} is the effective diffusion coefficient, m²/s, T is the bed temperature, K. The values of R^2 and RSS for equation (3) are 0.8 and 1×10^{-18} , respectively.

Urease activity

Figure 7 depicts some illustrative residual urease activity curves of soybeans at initial moisture content of 19.5% d.b. and inlet steam temperatures of 120-150°C. This enzyme is progressively destroyed by heat, whereby a sharp decline in urease activity occurs at the early period of drying, except for the conditions where the samples at initial moisture contents of 13.5 and 19.5 % d.b. are dried at lower temperature of 135°C, and a slow reduction is a consequence. This figure also shows the faster rate of inactivation at the higher temperature, as would be expected because more thermal energy is being transferred when drying temperature is increased. The inactivation results for the samples at the initial moisture contents of 13.5 and 36% d.b. showed the same fashion as in Figure 7, but the rate of inactivation amongst their initial moisture contents was not identical even though the inlet steam temperature was the same, a relatively faster rate of inactivation for the samples at higher moisture content. These results can clearly be seen in Figure 8, presenting the apparent reaction rate constant for the inactivation versus bed temperature. These reaction constants were obtained from statistical fitting of eq.(3) to the residual urease activity data.

To reduce the residual urease activity to an acceptable range, it required 7-8 minutes at a temperature of 120°C and became shorter at the higher temperature for the initial moisture content of 13.5% d.b. The treatment time was decreased as the initial moisture content increased, with the treatment time of 5 minutes at temperatures of 120-135°C and 2 minutes at the temperature of 150°C for the moisture content of 19.5% d.b. In addition, for the initial moisture content of 36% d.b., the treatment time was only about 2 minutes, which is long enough for inactivating the urease enzyme under the above-mentioned temperature range.

Figure 8 demonstrates how the temperature and initial moisture content can cause a rapid inactivation of urease through the thermal treatment with fluidised bed. Large differences in the patterns of inactivation are observed between such operating parameters. The influence

of temperature plays an important role in accelerating the urease inactivation for soybean containing low to moderate moisture contents, in particular at the initial moisture content of 19.5% d.b. showing a large increase in the reaction rate constant from 0.43 to 1.7 min⁻¹ when the corresponding bed temperature rises from 113 to 140°C. This effect turns into lesser importance for the higher initial moisture content, as indicated by a linear increase in the apparent reaction rate constant with increasing temperature for soybean sample at 36% d.b. At such high initial moisture content, the prevalent contribution of moisture initially present in soybeans induces the rapid inactivation in the first two minute of drying, by which the residual urease activity lies between 15 and 17% after soybeans are treated with temperature in the range studied.

The rate constant and equilibrium activity are empirically correlated with the initial moisture content and bed temperature, and their relationships are given by the following equations:

$$k = \left(5.7696 \times 10^{-18} + 1.3531 \times 10^{-16} M_{in} - \frac{8.59758 \times 10^{-15}}{T} \right) \exp(-0.245571 T M_{in} + 97.7304 M_{in} + 0.09702 T) \quad (9)$$

$$C_{eq} = \left(-0.047523 + 0.071742 M_{in}^2 + 0.000122 T \right) \exp \left(-\frac{978.15 M_{in}}{T} + \frac{3227.286}{T} \right), \quad (10)$$

As shown in Figure 7, the kinetic model of urease inactivation proposed, along with its constant parameters in equations (9) and (10), can reasonably predict the experimental data.

Colour Changes

The changes in colour of a product reflect a sensation to human eye and the visual examination is often used to evaluate product colour. The L-, a- and b-values of soybean at the beginning are respectively 85.71, 0.38 and 24.33, presenting yellow colour. Figure 9 shows the change in the behaviours of L-, a- and b-values for soybeans dried at various steam temperatures, with a progressive decrease of the L-value whilst the increase of the a- and b-values with the increased drying time are evident. The decrease in L-value upon heating is attributed to the formation of brown pigments, as a result of Maillard reaction. The linear behaviour of the lightness suggests a zero-order kinetic model.

In addition to the L-value, a- and b-values are also used to indicate characteristics of brown pigments formed by heat treatment. The change of a-value is initially slow and followed by a rapid raise of the level of redness. To explain the whole range of redness, the change of a-value follows the Monod kinetic reaction. For the b-value, it exponentially increases according to the first-order reaction kinetics. The reaction rate constants of the L-, and b-values were determined by a linear regression technique whereas the rate constant of the a-value was determined by a non-linear regression because of non-linearity of equation (6). The experimentally determined reaction rate constants are presented in Figure 10 to show the effect of temperature on their reaction rate constants. The results indicate that the reaction speeds of the colour parameters increase with increased temperature. The increase in the reaction speed of the individual colour parameters has a difference of magnitude in which the fast reaction speed is the lightness followed by the redness, and the slowest speed is the yellowness. From this figure, it can be seen that the initial moisture content has some effect on the colour of soybeans during heat treatment. This influence on the colour change is different to that found with the urease inactivation in a way that the higher moisture content slows down the rate of brown pigment formation, as interpreted by lower reaction rate constants of both lightness and redness shown in Figures 10a and b. The moisture content is not influential to the yellowness

change for soybeans. The slow development of brown colour is attributed to the fact that the lower concentration of the reactive compounds inside the food material retards the browning rate and this lower concentration effect seems to be more dominant than the effect of reactant mobility, which has higher motivation at elevated initial moisture contents. The effect of water content on the browning rate for food materials has been reported by several workers (Prachayawarakorn et al., 2004; Rapusas and Driscoll, 1995). The results found from their investigations were similar to this finding.

According to the experimental results, such reaction rate constants of the L-, a- and b-values were empirically correlated with the relevant parameters by the following equations:

$$\begin{aligned} \text{For L-value} \quad k_L &= (-200.35 - 6.8356M_{in} + 0.53253T) \exp\left(-\frac{1087.66}{T}\right) \\ R^2 &= 0.99, \text{RSS} = 0.004 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{For b-value} \quad k_b &= (-0.2435 + 6.4 \times 10^{-4}T) \exp\left(-\frac{5.3 \times 10^{-5}}{T}\right) \\ R^2 &= 0.99, \text{RSS} = 0.0127 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{For a-value} \quad k_a &= \left[1.5 \times 10^9 - 1.1343 \times 10^8 M_{in} - 3.2052 \times 10^6 T\right] \exp\left(-\frac{8019}{T}\right) \\ R^2 &= 0.96, \text{RSS} = 0.007 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} c &= \left(-66.6919 + 0.181201T + \frac{3417.06M_{in}}{T}\right) \exp\left[1.5M_{in} - \frac{898.370M_{in}}{T}\right] \\ R^2 &= 0.95, \text{RSS} = 0.2267 \end{aligned} \quad (14)$$

The result for the changes of L-, a- and b-values, calculated by using equations (11-14), with drying time are depicted in Figure 9, suggested that the proposed models can predict the colour parameters in a good agreement with the experimental results over a wide range of drying condition.

Protein Solubility

For determining the amount of soluble proteins, some treated soybean samples that contain the level of urease activity lower than the required standard limit were analysed. Changes in protein solubility of soybeans treated at different operating conditions are shown in Table 1. The protein solubility is about 94.3% for raw soybeans and it is decreased faster when the soybeans were subjected to contact with steam at higher temperatures and for longer times. The reduction in protein solubility is caused by the destruction of helical regions of the proteins and subsequent disulfide bond, which links between amino acid groups. Consequently, the proton of hydrogen in water molecules inside proteins will react with the sulphur of disulfide to form as sulfhydryl. However, the formation of sulfhydryl is not stable and protein molecules will aggregate with the neighbouring molecules by disulfide bond, leading to the larger molecules of protein and the subsequent reduction in their dispersability in water.

As shown in Table 1, for the low initial moisture content of 13.5% d.b., the inlet steam temperature of 120°C is sufficiently high enough to inactivate the urease enzyme and the treating time is taken only 7 minutes, which is 4 times shorter than the use of the same technique but the hot air replaced the superheated steam (Osella et al., 1997; Soponronnarit et al., 2001). Using this temperature, the protein solubility and lysine content maintain at the satisfactory levels of 85% and 2.80 mg/g soybean, respectively. In addition, the colour of treated soybeans does not changed much from the beginning, with the values of 83, 1.45 and 25 for the respective lightness, redness and yellowness related parameters. However, the higher temperature of 120°C is not recommended because of lower protein solubility than the desirable range.

When the superheated steam was introduced to the moist soybeans, it beneficially provides shorter time for inactivation together with high protein solubility and lysine content.

Unfortunately, their moisture contents at that treating time are still higher than the level for the extended storage. They therefore need to further dry to the safe moisture content. As can be seen from Table 1, the superheated steam can comply with both requirements, drying and urease inactivation, for soybeans at initial moisture content of 19.5% d.b. while preserving their nutritional value and yellow colour as long as the inlet steam temperature varies between 120 and 135°C. At elevated initial moisture content, two-stage drying, where the soybean is treated with superheated steam at such a temperature range for a certain time to inactivate the urease enzyme and then followed with low-temperature hot-air drying to prevent the denaturation of protein and brown colour development, should be applied.

CONCLUSION

Soybean treatment using superheated-steam fluidised-bed technique was examined. Steam was initially condensed onto the kernel surface which enables grains to adsorb it. An amount of condensed steam related to steam temperature and initial moisture content in a way that high steam inlet temperature and high initial moisture content reduced the quantity of condensing steam. During evaporation period, the transport of water is governed by internal diffusion and the rate of water removal depends on the temperature and moisture content, the first factor being the most important. During its operation, the urease activity and the colour of soybeans, described by three Hunter parameters L-, a- and b-values, are also changed. The rates of urease inactivation and brown pigment formation, corresponding to the decrease of L-value and increases of a- and b-values, were enhanced by increasing temperature. In addition, the inactivation rate was faster whereas the change rates of L- and a-values became slower with higher initial moisture content, except for the b-value which showed an insignificant change. To inactivate the urease enzyme while maintaining soybean qualities in terms of protein solubility, lysine and colour, inlet steam temperature should not exceed 135°C; with

120°C being the minimum required for treating dry soybean. Furthermore, this technique can be acted as the simultaneous operation of inactivating urease and removing water in a single operation for the moist soybean at a certain level.

ACKNOWLEDGEMENT

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

REFERENCES

- AACC. Approved method of the American Association of Cereal Chemist (9th ed.). St. Paul, MN: AACC, 1995.
- Abd El-Hady, E.A.; Habiba, R.A. Effect of soaking and extrusion conditions on antinutrients and protein digestibility of legume seeds. *Lebensm-Wiss. U.-Technol.* 2003, 36, 285-293.
- Alonso, R.; Grant, G.; Dewey, P.; Marzo, F. Nutritional assessment in vitro and in vitro of raw and extruded peas (*Pisum sativum*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2000, 68, 2286-2290.
- American Oil Chemists' Society (AOCS). Protein solubility index. AOCS Official method BA 10-63, 1979.
- ASA. Fullfat Soybeans Handbook of American Soybean Association, Singapore, 1990.
- Avila, I.M.L.B; Silva, C.L.M. Modeling kinetics of thermal degradation of colour in peach puree. *Journal of Food Engineering* 1999, 39, 161-166.
- Baker, E.C.; Mustakas, G.C. Heat inactivation of trypsin inhibitor, lipoxxygenase and urease in soybeans: Effect of acid and base additives. *Journal of The American Oil Chemists' Spciety* 1973, 50, 137-141.

- Cheong, Y.L. Fullfat soybean meal production and utilization. Technical Bulletin of American Soybean Association, Singapore, 1997.
- Crank, J. The mathematics of diffusion. 2nd ed., Oxford Univ. Press, Oxford 1975.
- Heinrich, S.; Krüger, G.; Mörl, L. Modelling of the batch treatment of wet granular solids with superheated steam in fluidised beds. *Journal of Chemical Engineering Processing* 1999, 38, 131-142.
- Krokida, M.K.; Tsami, E.; Urbricain, M.J. Kinetics on colour changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology* 1998, 16(3-5), 667.
- Osella, C.A.; Gordo, N.A.; González, R.J.; Tosi, E.; Ré, E. Soybean heat-treated using a fluidized bed. *Lebensm. Wiss u.-Technology* 1997, 30, 676-680.
- Rackis, J.J.; Wolf, W.I.; Baker, E.C. Protease inhibitors in plant foods: content and inactivation. In *Nutritional and Toxicological Significance of Enzyme Inhibitors in Foods*: Friedmann, M., Ed., Plenum Press, New York, 1986.
- Raghavan, G.S.V.; Harper, J.M. Nutritive value of salt-bed roasted soybeans for broiler chicks. *Poultry Science* **1974**, 53(2), 547-553.
- Ramesh, M.N. Moisture transfer properties of cooked rice during drying. *Lebensm. Wiss u.-Technology* 2003, 36, 245-255.
- Rapusas, R.S.; Driscoll, R.H. Kinetics of non-enzymatic browning in onion slices during isothermal heating. *Journal of Food Engineering* 1995, 24, 417-429
- Rasmussen., 2002, Determination of residual urease activity.
<http://www.analytichem.com/Applications/Kjeldah/>.
- Salin, J.G. Steam drying of wood for improved particle board and lower energy consumption. *Paper and Timber* 1988, 9, 806-810.
- Saravacos, G.D.; Raouzeos, G.S. Diffusivity of moisture in air drying of raisins. In *Drying'86*, Vol.2, Mujumdar, A.S. (ed), Hemisphere, McGrawHill 1986, 487-491.

- Prachayawarakorn, S.; Sawangduanpen, S.; Saynampheung, S.; Poolpatarachewin, T.; Soponronnarit, S.; Nathakarakule, A. Kinetics of colour change during storage of dried garlic slices as affected by relative humidity and temperature. *Journal of Food Engineering* 2004, 62, 1-7.
- Soponronnarit, S.; Swasdisevi, T.; Wetchacama, S.; Wutiwiwatchai, W. Fluidised bed drying of soybeans. *Journal of Stored Products Research* 2001, 37, 133-151.
- Valle, F.R. Nutritional qualities of soya protein as affected by processing. *Journal American Oil Chemists' Society* 1981, 58(3), 419-429.
- AccQ-Tag Instruction Manual. Lysine determination. Manual no. WAT052874. Revo April, 1993.

Table 1 Protein solubility and lysine content of soybeans treated with superheated steam at various temperatures

Initial moisture content (%d.b.)	Inlet steam temperature(°C)	Treating time (min)	Moisture content after treatment (%d.b.)	Protein solubility (%)	Δ pH	Lysine content (mg/g of soybean)
Raw soybeans	-	-	-	94.3	1.9	2.85
13.5	120	7	14.0	85.7	0.2	2.80
	135	5	12.4	71.7	0.03	2.76
	150	5	10.7	54.9	0.04	NA
	120	5	18.3	85.2	0.04	2.67
19.5	120	15	16.7	75.3	0.005	NA
		5	16.5	82.3	0.01	2.71
	135	7	14.8	76.7	0.005	NA
		2	18.9	83.8	0.02	NA
	150	5	14.1	72.9	0.015	2.82
	120	2	38.9	80.6	0.05	NA
36	135	2	34.1	81.4	0.025	NA
		15	14.7	59.4	0	NA
	150	2	31.6	75.3	0.02	NA
		10	11.4	53.6	0	NA

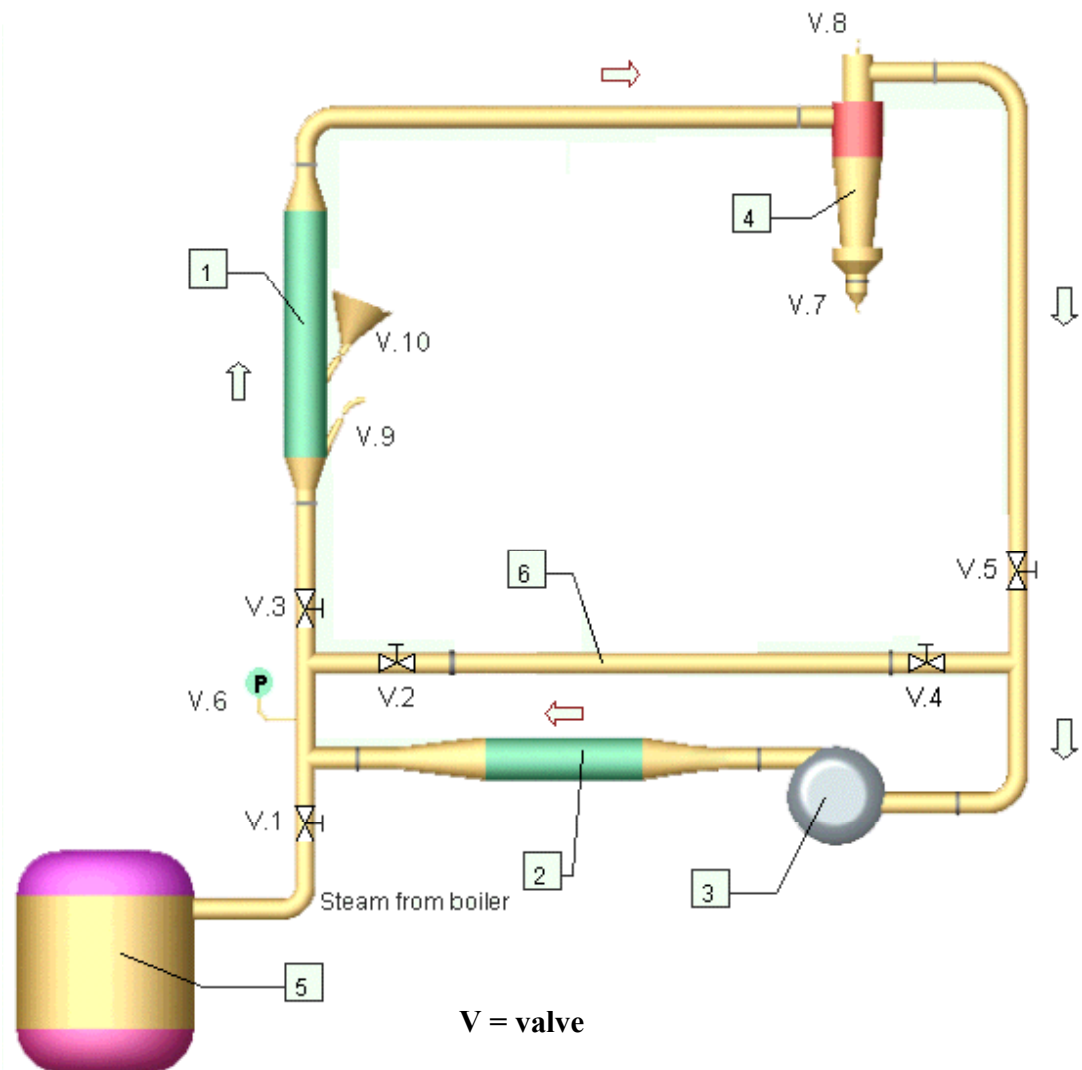


Figure 1 Schematic diagram of superheated-steam fluidised-bed system
[1) fluidised-bed dryer, 2) heater unit, 3) fan, 4) cyclone, 5) boiler
6) bypass line]

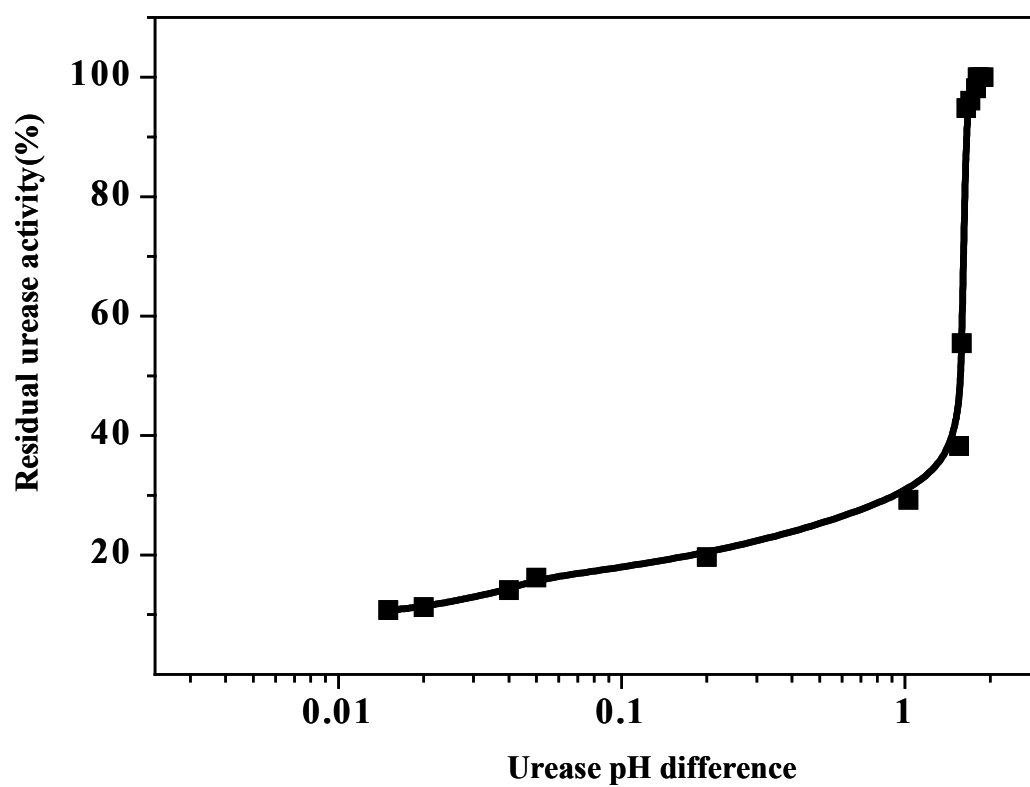


Figure 2 Relationship between pH difference and residual urease activity

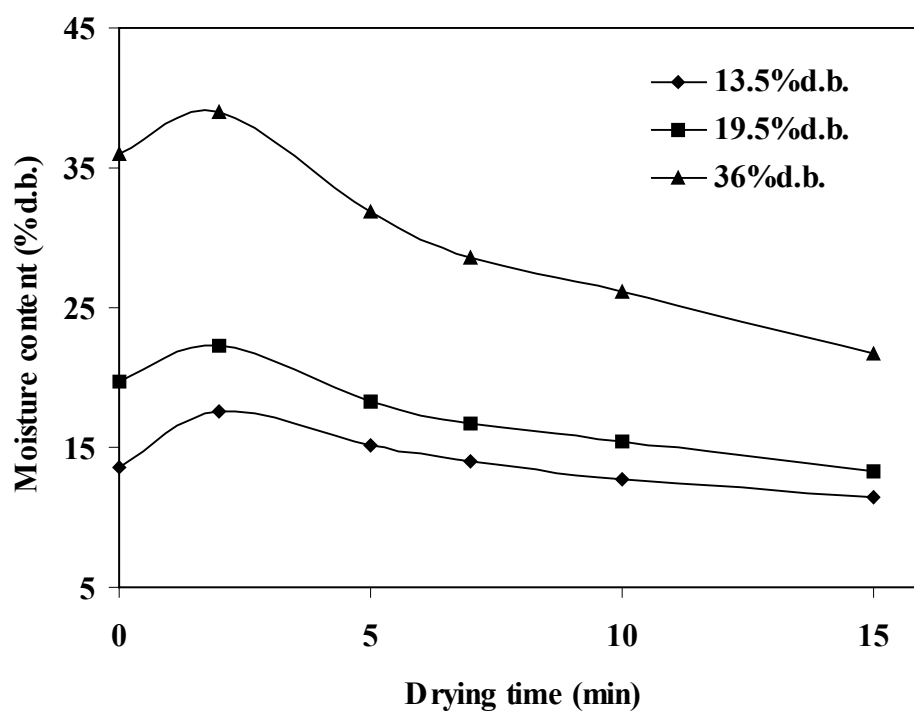


Figure 3 Change of moisture content at three different initial moisture contents (inlet superheated steam temperature of 120°C)

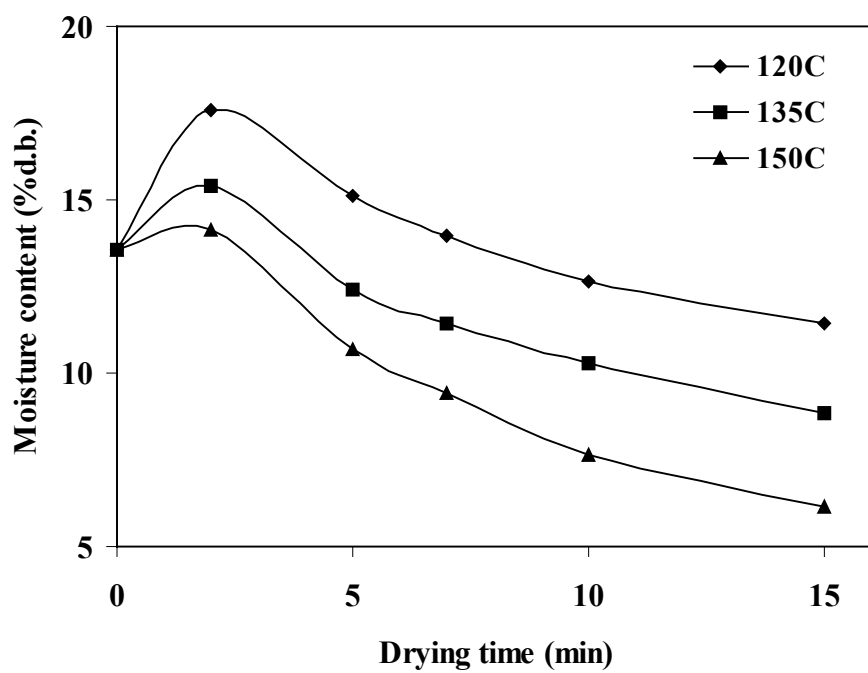


Figure 4 Change of moisture content at three different inlet steam temperatures (initial moisture content of 13.5% d.b.)

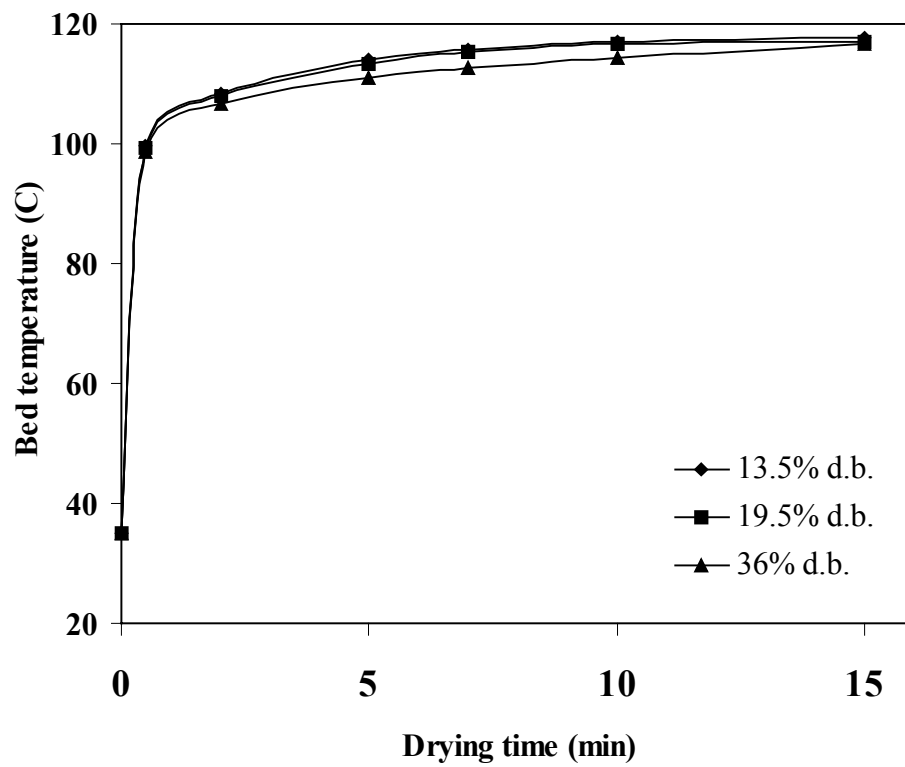
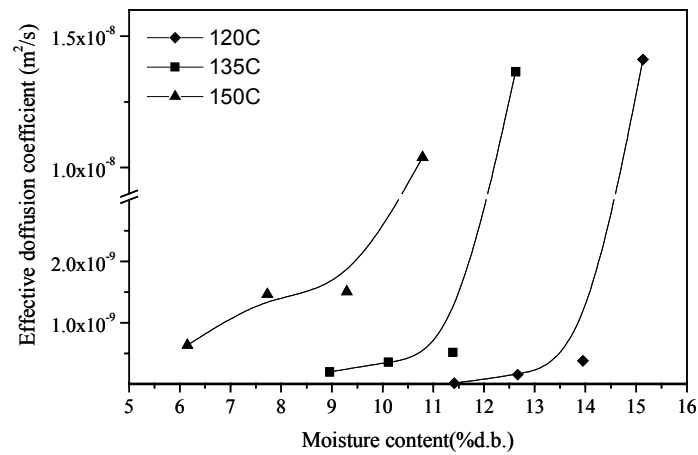
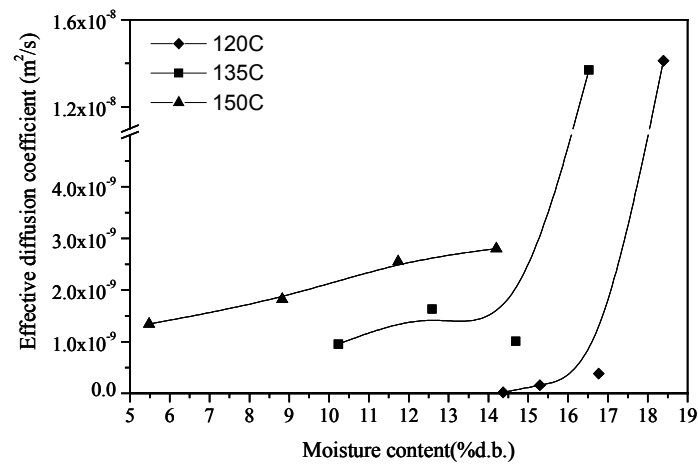


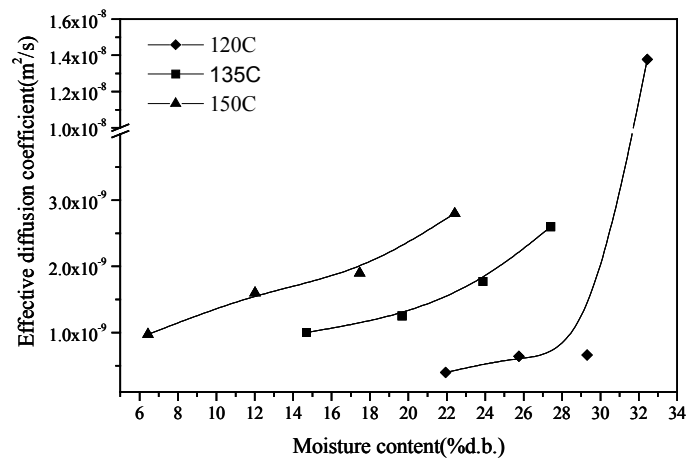
Figure 5 Change of bed temperature at different initial moisture contents (inlet superheated steam temperature of 120°C)



a) initial moisture content of 13.5% d.b.



b) initial moisture content of 19.5% d.b.



c) initial moisture content of 36% d.b.

Figure 6 Relationships between effective diffusion coefficient and moisture content at different steam temperatures

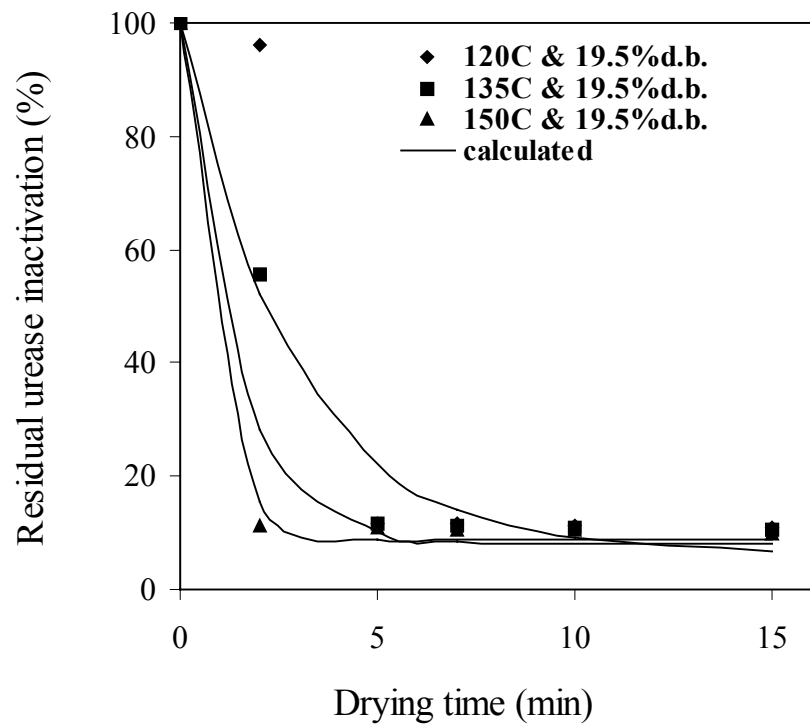


Figure 7 Change in residual urease activity versus time at different inlet steam temperatures

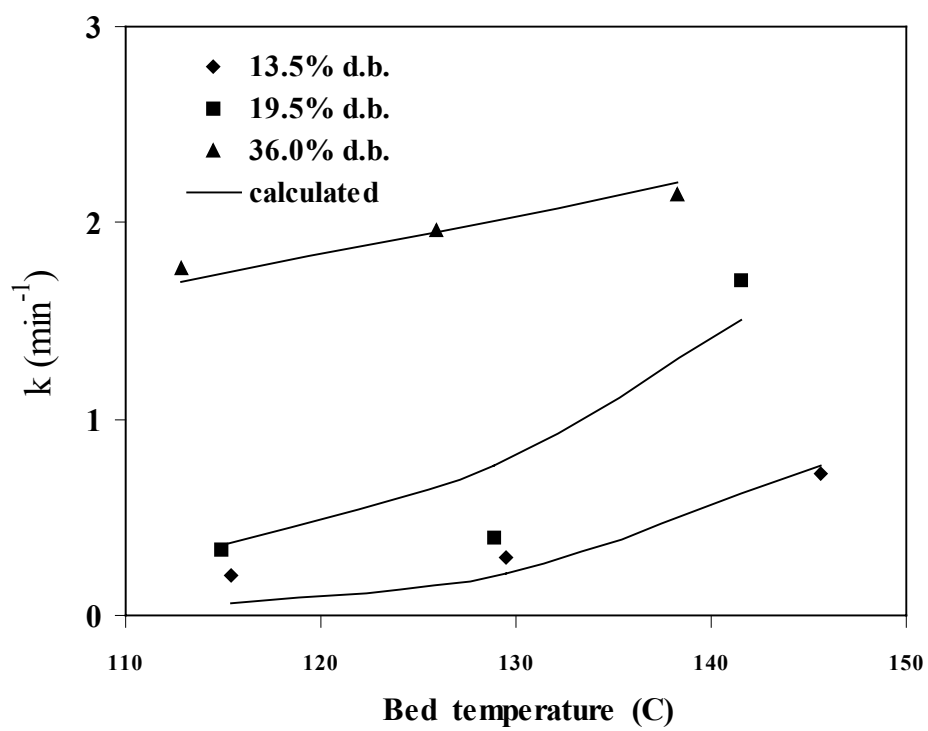


Figure 8 Apparent rate constant for inactivating urease enzyme at different temperatures and initial moisture contents

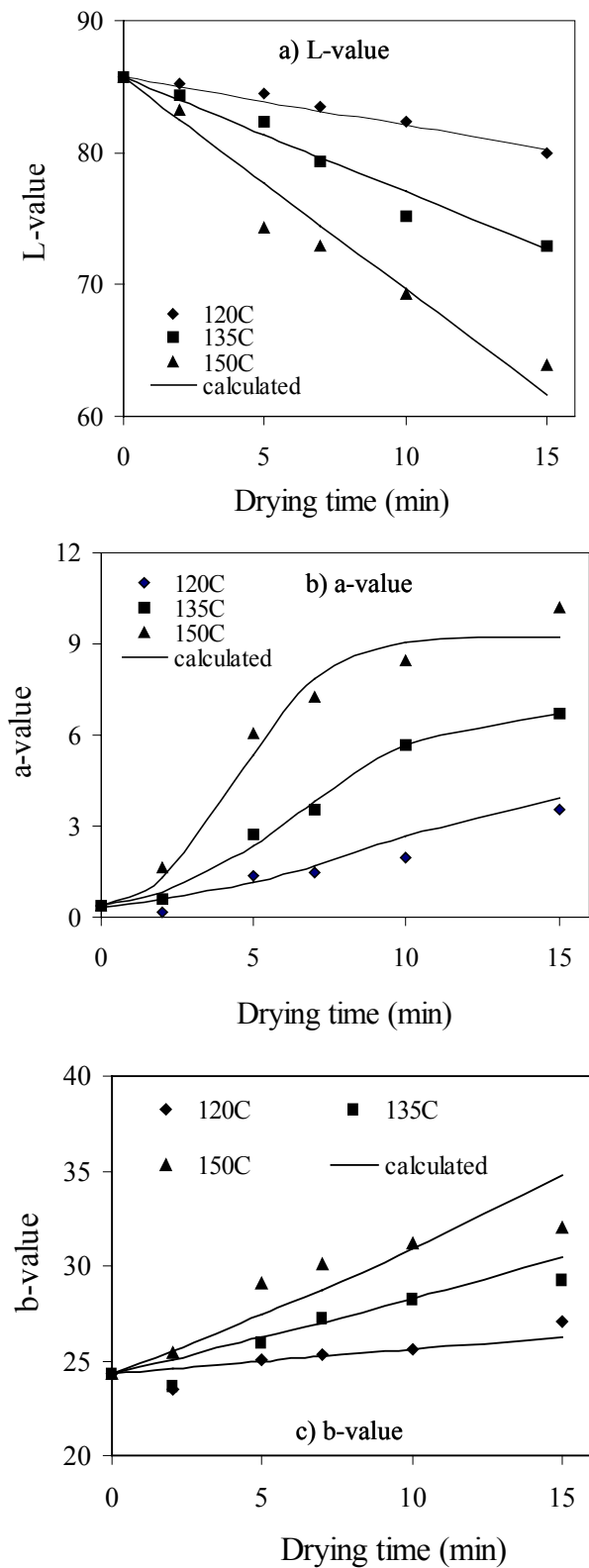
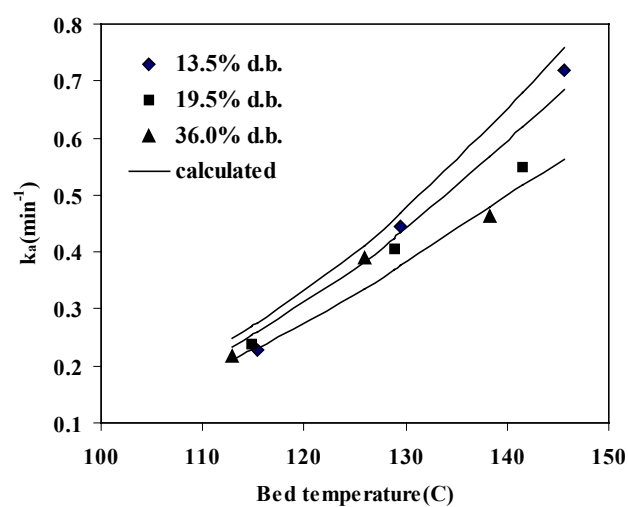
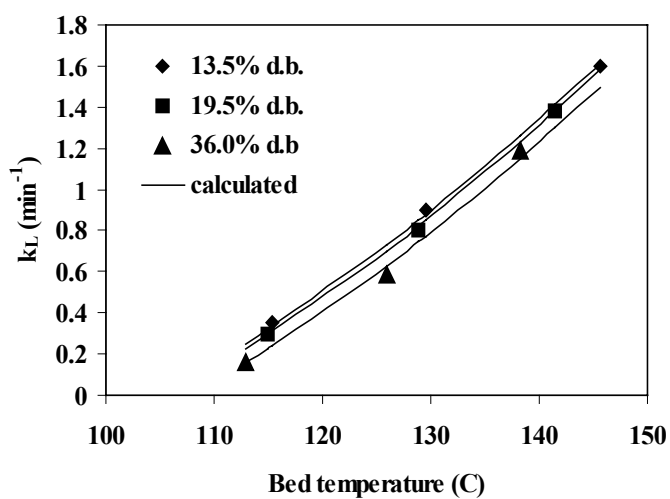


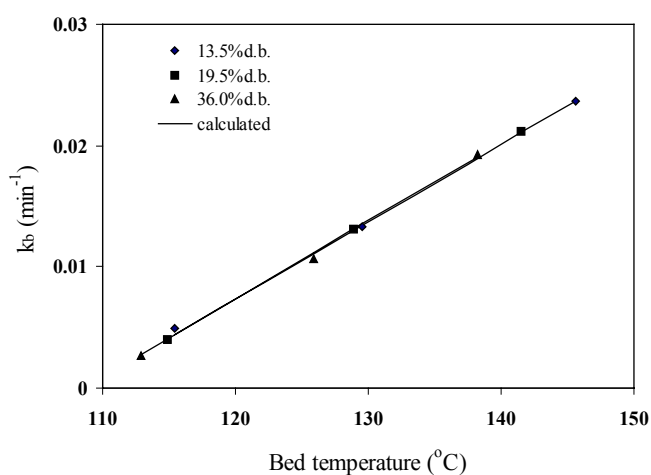
Figure 9 Changes in colour parameters versus drying time for different inlet superheated steam temperatures (initial moisture content of 13.5% d.b.)



a) kinetic constant of redness



b) kinetic constant of lightness



c) kinetic constant of yellowness

Figure 10 Effect of initial moisture content on colour parameters at various bed temperatures

Kinetics of drying and urease inactivation of soybeans during heating with hot air and superheated steam under fluidisation condition

Somkiat Prachayawarakorn^{1*}, Paveena Prachayawasin¹

and Somchart Soponronnarit²

¹ Department of Chemical Engineering, ² School of Energy and Materials

King Mongkut's University of Technology Thonburi

Suksawat 48 Road, Bangkok 10140, Thailand

Abstract

The present work investigates the behaviours of moisture diffusion and urease inactivation in soybean during which the kernels are fluidised by superheated steam and hot air. Experimental results indicate the effective diffusion coefficient and apparent inactivation rate constant to be depended not only on the moisture content and temperature, but also on the type of heating medium where the superheated steam provides a faster rate of enzymatic inactivation than does the hot air while giving a slower rate of moisture diffusion. The inactivation of urease enzyme, along with maintaining protein solubility and lysine content to be in standard range, was succeeded as soybeans were treated a temperature between 135 and 150°C for the hot air and the treatment temperature could be reduced lower than 135°C by using superheated steam.

Keywords: Fluidised bed, Quality, Soybean, Superheated steam

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

1. Introduction

Full fat soybeans, referred as soybeans prior to oil extraction, have a high potential to use as a feedstuff because of their high oil and high-quality protein contents. However, the presence of biologically active compounds in raw full fat soybeans, such as trypsin inhibitors, haemagglutinins, lectins and saponins, limits the utilisation of their nutritive values (Hensen et al., 1987; Liener, 1994), resulting in the health and performance of non-ruminants and immature ruminants. To eliminate or reduce antinutritional factors, heat treatment is needed. Different technological processes have been developed but all are based upon heating for a certain amount of time. Heat treatment methods frequently used are for example cooking, wave emission treatments and roasting treatments (Stewart et al., 2003; Hensen et al., 1987; Raghavan & Harper, 1974). The method that will be studied in the present research is devoted to the roasting treatment. The roasting methods involve the treatment of soybeans using the heated air with a temperature varying between 110 and 170°C (Cheong, 1997). There are many types of roasting technique such as rotary drum dryer, salt bed roasting and conventional grain dryer. Most of these methods provide non-uniform cooking of soybeans since the contact between medium and kernels is ineffective.

To improve its uniformity, fluidised bed is an alternative approach. With this technique, the fluid is forced through a bed of particles, with a sufficiently high flow rate that the lift force is counterbalanced with the weight of particles. This accordingly induces particles to suspend and simultaneously rotate in fluid stream, so that each particle in the bed intimately contacts with almost the same fluid temperature. While

soybean kernels are being suspended, drying and inactivation of trypsin inhibitors take place simultaneously in the bed. Control of the fluidised-bed roasting for soybean is difficult. Different variables influence each other and are therefore difficult to separate independently. Thus, it is necessary to understand the involved mechanisms and their relationships in order to be able to control the roasting process effectively. Several workers used moisture content of soybean, temperature and time as control parameters for the roasting process (Soponronnarit et al., 2001; Osella et al., 1997).

Air is commonly used as drying medium. With the hot air, some exhaust air is delivered to atmosphere and this waste energy causes drying as energy intensive process. There is a strong incentive to make the process more efficient. The use of superheated steam as drying medium can save a lot of energy since the waste heat can be recovered or used for other units of industrial process (Berghel & Renström, 2002; Fitzpatrick, 1998). Fixed bed, fluidized bed, flash and impinging stream driers have been applied to dehydrate a variety of products including paddy, shrimp, sugar beet pulp, potato and paper.

This study is directed towards understanding the steam drying process, together with inactivation of antinutritional factors while soybeans are being treated, and how the results from steam treatment are differently produced from the conventional hot air. The differences considered were the drying rate and inactivation rate, both of which were quantitatively determined by effective diffusion coefficient and reaction rate constant, respectively. In addition to both parameters, protein solubility of treated samples was also determined.

2. Materials and methods

Raw soybeans, with an initial moisture content of 13.5% d.b., were purchased from local market. The dry soybeans were rewetted by adding the required amount of water to get the initial moisture contents of 19.5 and 36% d.b. After rewetting, samples were kept in cold room at a temperature range between 8 and 10°C for a week to allow water to penetrate into kernels. Before treating soybeans, the sample taken from the cold room was left in environmental condition until grain temperature was close to ambient temperature.

2.1 Equipments

Figure 1 schematically shows a system of superheated-steam fluidized-bed dryer. The system consists of four main components i.e. a boiler, a drying chamber with a dimension of 15 cm diameter and 100 cm height, an electrical fan and heaters. The designed system can be alternatively used either hot air or superheated steam. Before treating soybeans with superheated steam, the hot air at the same temperature as the desired level of superheated steam was initially employed for warming up the components until their temperatures reached the desired level. The reason of using hot air aims to prevent possible condensation of steam in the system. The saturated steam, generated from a small boiler at 106 kPa absolute pressure, was then entered into the system by opening a valve V1 and at the same time, the air was vent to atmosphere at a valve V8. The saturated vapour was reheated at unit No.2 containing 13.5 kW electrical heaters to change its state to superheated vapour. The velocity required for fluidising kernels in the bed was accelerated by the backward curve blade electrical fan, with a 2.2 kW motor connected to a frequency inverter to precisely adjust the flow rate. The saturated vapour was eventually reheated at unit No.2 containing 13.5 kW electrical heaters to change its state as superheated vapour.

In experiments, the superficial velocity flowing through particle bed was approximately 3.2 m/s for superheated steam and 2.6 m/s for hot air. At both selected velocities, Reynolds number was identical. After the fluid left the drying chamber, it conveyed to a reverse flow cyclone and the cleaned fluid was fully reused for superheated steam whereas the hot air, with a certain portion, was delivered to atmosphere and the remaining portion was reheated and mixed with fresh air.

Soybeans, with an amount of 1 kilogram corresponding to a 10 cm bed height, were treated with hot air and superheated steam at temperatures of 120, 135 and 150° C. A PID controller, with an accuracy of $\pm 1^{\circ}\text{C}$, was used to control the inlet temperature at desired level. The temperature at other two positions viz within bed and outlet from drying chamber was also monitored by inserting K type thermocouples connected with a data logger, with an accuracy of reading $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Samples were withdrawn from drying chamber at valve V.9 to determine quantitatively the moisture content, urease activity, protein solubility and lysine content. The moisture content of soybean was determined by drying in an electrical oven at 103°C for 72 hours (ASA, 1990).

2.2 Urease activity measurement

Urease enzyme present in raw soybeans does not affect on growth depression in animals. Urease enzyme can be inactivated by heat treatment of soybeans and its inactivation rate is almost the same as that of trypsin inhibitors (Baker and Mustakas, 1973, Osella et al., 1997). Hence, urease activity is practically used as a criterion for quality control of soybean meal. At the present study, it was determined by Rasmussen's method (Rasmussen, 2002). The reaction time for urease enzyme to develop ammonia was 60 minutes. The residual urease activity is expressed as the

ratio of milliequivalents of ammonia produced from urea per gram of thermally treated soybeans to that obtained from raw soybeans. In uncooked soybeans, ammonia was produced with an approximate value of 5 milliequivalents/g. The residual urease activity for adequately treated soybeans gives in a range of 10 and 20%. Below 10% presents the over heating.

2.3 Protein solubility measurement

Protein solubility is an important parameter to feed meal industry that uses to characterise the quality of soybeans after passing the heating process, in addition to trypsin inhibitors. Protein solubility was determined according to the AOCS method BA 10-63 (AOCS, 1979). This method involves the dispersion of proteins in 0.2% KOH solution. The protein solubility is defined as the ratio of nitrogen content in the supernatant after extraction with 0.2% KOH to total nitrogen content of material. The total nitrogen content and the nitrogen content in the supernatant were performed by Kjeldahl method.

2.4 Lysine measurement

Lysine content in soybean was analysed by AccQ-Tag method (1993). The grounded soybean was hydrolysed by HCl solution at 110°C for 22 hours and was then derivatized with 6-aminoquinolyl-N-hydroxysuccinimidyl carbamate (AccQ-Fluor reagent). The lysine content was eventually determined by a high performance liquid chromatography.

2.5 Drying kinetics

Solid materials when subjected to dry with superheated steam and hot air under the same inlet temperature result in differently phenomenological change in rate of moisture removal. Difference in the moisture transport rate amongst both drying

media is mostly explained by the temperature difference between the drying surface and drying medium (Schwartz & Bröcker, 2000; Sheikholeslami & Watkinson, 1992). This leads to different heat transfer rate, which may then influence on diffusivity as a parameter characterising the internal structure and the nature of the solid.

In determining the effective diffusivity, it was assumed that soybean had a spherical shape and Fick's equation for transient state, along with the initial and boundary conditions, was then solved analytically and the solution was eventually expressed as (Crank, 1975)

$$\frac{M(t)}{M_{in}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (1)$$

where D_{eff} is the effective diffusion coefficient (m^2/s), r is the particle radius (m), $M(t)$ is the moisture content of soybean at time t (d.b.), M_{in} is the initial moisture content and t is the drying time (s). To achieve eq.(1), it was assumed that gas-phase mass transfer resistance was negligible and moisture content at the grain surface was nil after the grain was contacted with a fluid at a temperature above normal boiling point temperature. In addition, the moisture content of soybeans at positions within grain after rewetting was spatially uniform at the beginning.

Several authors (Babalís & Belessiotis (2004); Prachayawarakorn et al. (2002); Hebbar & Rastogi (2001)) used eq. (1) to describe the diffusional flow of moisture inside the agricultural materials dried with different drying media i.e. infrared radiation, superheated steam and hot air. In their work, the effective diffusivity was determined by correlating the moisture data with eq. (1) and then applying a non linear regression technique to estimate the diffusive parameter.

Because of non-linearity of drying curves, a method of slopes was used to determine the effective diffusivity through which the moisture content of material was reduced under a given condition. Differentiation of eq.(1) with respect to time yields

$$\frac{dM(t)}{dt} = -\frac{6M_{in}D_{eff}}{r^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2\pi^2D_{eff}t}{r^2}\right) \quad (2)$$

The drying slope was known experimentally and replaced into eq. (2) on the left hand side. Accordingly, its effective value was estimated. With such a simple approach, it can understand how the moisture content and drying medium affect the diffusional transport behaviour of moisture inside the kernel. Relationship between the effective diffusivity and the drying conditions is explained by an empirical equation of which their constants are determined by a non linear regression technique. The validity of the proposed equation is dictated by the coefficient of determination, R^2 , and residual sum of square, RSS which is defined as

$$RSS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{exp,i} - Z_{cal,i})^2}{n - p}} \quad (3)$$

where Z_{exp} is the experimental value of the dependent variable, Z_{cal} is the calculated value from the model, n is the total number of experimental data and p is the number of constant parameters in the fitted equation.

2.6 Thermal inactivation of urease enzyme

The apparent kinetics of urease inactivation in raw soybean were studied in a series of experiments by means of thermal treatment in the fluidised bed using superheated steam and hot air as described in section 2.1. The thermal inactivation of urease follows the modified first-order reaction which is expressed by

$$\frac{C(t) - C_{eq}}{C_{in} - C_{eq}} = \exp(-kt) \quad (4)$$

where $C(t)$ is the residual urease activity at time t , C_{in} is the residual urease activity at the beginning, C_{eq} is the residual urease activity at infinite time, k is the apparent rate constant, min^{-1} , and t is the reaction time, minute. Rewriting eq.(4), it thus becomes

$$C(t) = (C_{in} - C_{eq}) \exp(-kt) + C_{eq} \quad (5)$$

k and C_{eq} are obtained by the method of non-linear regression when the residual urease activity is plotted against the treatment time and their values depend on both drying condition and drying medium.

3. Results and discussions

3.1 Moisture reduction in superheated steam and hot air

Figure 2 shows the changes of moisture content of soybean in superheated steam and hot air. In the experiments, soybeans at initial moisture content of 13.5% d.b. were contacted with both drying media at a temperature of 135°C and the experimental results are shown that the curve of moisture change in superheated-steam drying is almost the same trend as found in hot air, except for the early period of drying at which soybean kernel gains in moisture content from the steam condensation. As found from the experiments, soybeans adsorbed more moisture in low-temperature superheated steam than high-temperature superheated steam. The moisture contents of soybeans in superheated steam at temperatures of 120, 135 and 150°C were increased by 3.0, 1.9 and 0.6%, respectively, for the samples at initial moisture content of 13.5%. Tang & Cenkowski (2000) also found the similar result in which quantity of adsorbing condensed steam by potatoes was larger with lower temperature of superheated steam. These results may possibly suggest that the amount of condensed steam is reduced when the superheated steam at elevated temperature is employed.

During period of steam condensation, the superficial velocity flowing through the particle bed was dropped, due to some amounts of steam condensation, and this caused insufficient speed to lift the particles. Consequently, bed of particles likely acted as a packed bed. This behaviour occurred at a very short period, approximately a half of minute of total drying time. After that, the bed of particles could be moved freely although the condensation period still existed, indicating decrease in an amount of condensed steam.

Difference in the behaviours between superheated steam and hot air reflects on the temperature within bed of particles where the bed temperature from the superheated-steam drying rapidly increases from room temperature to above 100°C in a very short period, as shown in Fig.3 for the temperature of 135°C, whilst the bed temperature from the hot air drying is risen with a slower rate. However, when the drying is extended for a longer period, the bed temperatures amongst superheated steam and hot air are not largely different.

3.2 Effective diffusion coefficient

By applying eq.(2) to the experimental results, one notices that the effective diffusion coefficient varies with moisture content in a way that their values decrease with decrease in moisture content as shown in Fig.4, where the data presented were obtained by drying soybeans at initial moisture content of 36% d.b. and temperatures of 135 and 150°C. In addition, the data were selected at the specific range where the change of bed temperature with time was small. The dependence of effective diffusion coefficient with moisture content was also reported by several workers (Pel, Brocken & Kopinga, 1996, Koptuyg et al., 2000, Azzouz et al., 2002). From all studies, the moisture movement towards the exterior surface is limited by internal diffusion and its movement causes morphology of materials to be changed. The

change of material characteristic makes the transport of water to be distorted and this influence possibly results in the variation in moisture diffusivity.

In addition, the value of diffusion coefficient also relies upon the drying media in which soybean drying in hot air has a higher moisture diffusion rate than in the superheated steam. In principle, the diffusion coefficient of moisture in soybean should be higher with superheated steam because the bed temperature, as a main driving force for accelerating moisture movement, is higher as already illustrated in Fig.2, but it is apparently lower. The poorer diffusion rate of water in soybean while contacted with superheated steam may result from the rapid rise in the bed temperature which induces larger changes of the soy proteins, for both denaturation degree and aggregation state (Yamauchi, Yamagishi & Iwabuchi, 1991; Hermansson, 1978). The denaturation may be resulted in proteins unfolding, which exposes more water-binding sites. This phenomenon therefore results in the movement of water to be difficult when soybeans are subject to be dried by superheated steam. The denaturation also reflected the solubility and water imbibing capacity in which the denaturated soybean sample had a greater amount of water uptake than the native sample (Jovanovich et al., 2003).

Reduction in effective diffusion coefficient to moisture content of soybean in drying media of superheated steam and hot air shows difference in magnitude under the same temperature and the analysis using a nonlinear regression technique has suggested the following forms to predict the effective diffusivity of soybean moisture content in both drying media:

Hot air :

$$D_{\text{eff}} = (-8.47 \times 10^{-8} + 4.17 \times 10^{-10}T - 5.1 \times 10^{-13}T^2) \exp(1.49M \exp(0.003T)) \quad (6)$$

Superheated steam:

$$D_{\text{eff}} = \left[36 \times 10^{-26} \exp(0.09204T) \right] \exp \left[(-2313.9 + 11.753T - 0.01487T^2)M \right] \quad (7)$$

The results from statistical fit gave the corresponding R^2 and RSS of 0.86 and 3.6×10^{-10} for superheated steam and of 0.8 and 3.1×10^{-10} for hot air.

3.3 Inactivation of urease enzyme

Soybeans treated by superheated steam and hot air were withdrawn from the fluidised-bed at different treatment times to determine the urease activity and the results are illustrated in Fig. 5, showing the variation of residual urease activity after soybeans, with initial moisture contents of 13.5% and 19.5% d.b., were thermally treated by superheated steam and hot air at temperature of 120°C. Using different drying media diversely exhibits the urease inactivation where decrease in the urease activity is relatively faster in the environmental superheated steam than in the hot air. Insufficient inactivation is obvious with hot air for soybean at the initial moisture content of 13.5% d.b. for which the residual urease activity, shown in Fig. 5, remains steadily 40% although an extended period of drying time is applied. As the initial moisture content is increased to 19.5% d.b., however, the sufficient inactivation is detected at a drying time longer than 25 minutes.

In contrast to hot air, elimination of urease enzyme can be achieved with superheated-steam temperature of 120°C, with the level of residual activity below 20% after soybeans with moisture contents of 13.5 and 19.5 d.b.%d.b. are contacted with this medium for 7 and 5 minutes, respectively. The achievement of using superheated steam over the hot air for inactivating the urease enzyme can probably be explained by the different phenomena between superheated steam and hot air during which both media contact the kernels. The appearance of steam condensation on the grain surfaces makes the bed temperature to be strikingly increased because of

releasing heat from the steam condensation, which is more powerful than the heat from the hot-air convection, thereby allowing the higher bed temperature in particular at early period of time for the superheated steam and correspondingly stimulating the faster inactivation of urease enzyme.

Fig.6 shows the apparent rate constant of urease inactivation, determined by fitting the experimental data to eq. (5), under condition of different initial moisture contents and inlet-steam temperatures. At each of the initial moisture content of soybean, the apparent rate constant in the superheated steam is higher than is in the hot air and the difference in their apparent rates becomes larger when the higher level of moisture is employed. As observed for these results, it can be seen that the temperature shows a strong contribution to inactivate the urease enzyme, as indicated by the steep slope of plotting the residual urease activity against the temperature, when soybeans at any moisture level are treated with superheated steam or hot air. However, the temperature effect seems to be less pronounced for sample at 36%d.b treated with superheated steam: the value of inactivation rate constant increases slightly with temperature. This behaviour is rather different to that found in hot air for the same level of moisture studied at which the temperature still plays an important role in accelerating the inactivation. This is perhaps because the heat transferring from hot air to the highly moist gains is mostly utilised for vaporising the moisture so that progression of the temperature within bed of particles is correspondingly lower and loss in the moisture content becomes faster, leading to a slower rate of inactivation.

As discussed about the apparent kinetics of urease inactivation, their behaviours amongst the superheated steam and hot air show diversity particularly at low temperature of 120°C and the relationships of the apparent rate constant and equilibrium value with the relevant parameters i.e. bed temperature and initial

moisture content, are given separately for each heating medium by the following empirical equations:

Hot air:

$$k = (-7.92 \times 10^9 + 3.54 \times 10^8 M_{in} + 2.086 \times 10^7 T - \frac{1.224 \times 10^8 M_{in}}{T}) \times \exp\left(-\frac{0.5526}{M_{in}} - \frac{6697.61}{T} - \frac{2392.2 M_{in}}{T}\right) \quad R^2 = 0.99 \text{ and } RSS = 0.079 \quad (8)$$

$$C_{eq} = 6.67 \times 10^{-8} + 5.0 \times 10^{-6} M_{in}^2 + 1.80 \times 10^{-11} T - 2.69 \times 10^{-11} M_{in} T \times \exp\left(\frac{0.740}{M_{in}} + \frac{5960.5}{T}\right) \quad R^2 = 0.85 \text{ and } RSS = 10.4 \quad (9)$$

Superheated steam:

$$k = \left(-1.014 \times 10^4 + 0.075 T^2 - 7.66 \times 10^4 M_{in} + 1.89 \times 10^4 M_{in}^2 + \frac{2.62 \times 10^7 M_{in}}{T}\right) \times \exp\left(-\frac{0.5348}{M_{in}} - \frac{1507.5}{T}\right) \quad R^2 = 0.95 \text{ and } RSS = 0.347 \quad (10)$$

$$C_{eq} = (-0.047523 + 0.071742 M_{in}^2 + 1.22 \times 10^{-4} T) \exp\left(-\frac{978.15 M_{in}}{T} + \frac{3227.286}{T}\right) \quad R^2 = 0.95 \text{ and } RSS = 1.47 \quad (11)$$

The adequacy of the fitted models to predict the apparent rate constants throughout the operating conditions, for both steam and hot air, is presented in Fig.6 by solid lines.

3.4 Protein solubility and amino lysine

In addition to antinutritional factors considered by feed meal industries, protein solubility and lysine content are also paid attention because both qualities are detrimentally affected by thermal process. Overcooking of soybeans can denature and

insolubilize the protein, resulting in poor performance of poultry when the overcooked soybeans are fed (Marsman et al., 1995; Zhu, Riaz & Lusas, 1996; Osella et al., 1997). Some treated soybean samples that contained the urease activity lower than 20% were taken to examine the protein solubility and lysine content. Changes in protein solubility of soybeans thermally treated by superheated steam and hot air at different temperatures are shown in Table 1. Raw soybean taken to treat with the hot air and superheated steam was bought from different lots and it contained the lysine about 2.9 milligram/gram soybean for the superheated-steam experiments and 3.1 milligram/gram soybean for the hot air. When the soybeans are treated thermally, its qualities in terms of protein solubility and lysine content depend upon the treatment time, temperature and type of heating medium.

As soybeans with the initial moisture content of 13.5% d.b., at which it is practically used for long-term storage, are dealt with the hot-air temperatures of 120 to 150°C, the urease enzyme can be inactivated within 5 minutes, except only for the temperature of 120°C at which the enzyme cannot be inactivated. At this temperature range, the protein solubility is in a range of 71 to 78%, below 73% presenting unacceptable for the feed meal, and the lysine is given in the range of 2.8 to 3 milligram/gram soybean, which is beyond the standard requirement for which the lysine content is higher than 2.4 milligram/gram soybean. For the superheated steam, the urease can be inactivated within a shorter time, requiring only 5 to 7 minutes, as compared to the hot-air treatment under the same treatment condition. Under these treatment times, the protein solubility and the lysine fall to the respective ranges of 54.9 to 85% and 2.7 to 2.8 milligram/gram soybean. These results, for both superheated steam and hot air, are realised that the treatment temperature can be reduced when the heating medium is changed from hot air to the superheated steam;

the temperature of 120°C can be effectively employed for the superheated steam whilst the temperature of 135°C is a minimum required for the hot air. Under the specified temperatures for both heating media, it is likely that soybeans treated by superheated steam have a higher quality of protein solubility than those treated by hot air, due to faster heating rate and the corresponding shorter treating time.

When both heating media are introduced to treat soybeans at the elevated moisture content, the results are shown that although the level of urease activity is in the acceptable range, using hot air at temperature of 120°C is not recommended because of poor protein solubility whereas the protein solubility for the steam-treated soybeans is beyond 80%. The increase of temperature for particular hot air shows positive results in which the higher protein solubility is clearly noticed and its quality is not very different from that obtained from the treatment by superheated steam at temperature of 120°C or higher. As can be seen in Table 1, even though the higher moisture content can eliminate the enzymatic activity in a short period of time and consequently, improve the protein solubility, but the moisture content of soybean does not reach the level for storage and it needs further to be dried. Under such situations, it is likely to meet the requirements at the initial moisture content of 19.5% d.b. for which soybean should be treated with hot-air temperature of 135 to 150°C or steam temperature of 120 to 135°C. Beyond this moisture level, two-stage drying, where the soybean is treated with superheated steam or hot air at such a temperature range for a certain time to inactivate the urease enzyme and then followed with low-temperature hot-air drying, should be applied, otherwise the soybeans are overcooked, indicating by lower protein solubility than the desired range.

According to these results, there are two practical approaches to treat the raw soybeans for feed meal industries where the dry soybeans are stored. The

superheated-steam fluidised bed may suitably be applied to eliminate the antinutritional factors in dry soybeans and the appropriate treatment temperature should be lower than 135°C, preferably a temperature of 120°C. To avoid the difficulty of operating the superheated steam system, hot air is an alternative method and in this case, the dry soybeans should be added with a certain amount of water in order to accelerate the enzymatic inactivation before the large amount of protein insolubilization is developed. To achieve the high quality of treated soybeans, the suitable initial moisture content for treating soybeans with hot air should be given below 20% d.b. and the temperature should be employed at a temperature higher than 135°C.

4. Conclusions

Soybeans when subjected to thermal treatments using different heating media exhibit distinctly moisture transfer rate and inactivation of urease enzyme. The diffusional rate of moisture in soybean, as evaluated by effective diffusion coefficient, is relatively slower in the superheated steam than in the hot air, whereas the rate of enzymatic inactivation in the superheated steam, as evaluated by apparent inactivation rate constant of the modified first order reaction, becomes faster. For each heating medium, the effective diffusion coefficient and inactivation rate constant are shown to be positively related to moisture content and temperature. To get rid of the urease enzyme present in soybean and simultaneously preserve its nutritional qualities, protein solubility and lysine content, in the standard range, the fluidised bed should be operated at temperature of 135 to 150°C for the hot air and below 135°C for the superheated steam. Under such temperature ranges, the superheated steam-type heating medium shows the protein solubility of treated sample to be higher than hot air when applied to the dry soybean, except for the moist soybean where the types of

heating medium do not impact on such quality since the urease enzyme is inactivated at a short period of time before the protein denaturation is largely formed.

5. Acknowledgement

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

6. References

- AccQ-Tag Instruction Manual. Lysine determination. Manual no. WAT052874. Revo April, 1993.
- ASA. Fullfat Soybeans *Handbook of American Soybean Association*, Singapore, 1990.
- American Oil Chemists' Society (AOCS). Protein solubility index. AOCS Official method BA 10-63: AOCS, 1979.
- Azzous, A., Guizani, A., Jomaa, W. & Belghith, A. (2002). Moisture diffusivity and drying kinetics equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*, 55, 323-330.
- Babalis, S.T. & Belessiotis, V.G. (2004). Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, 65, 449-458.
- Baker, E.C.& Mustakas, G.C. (1973). Heat inactivation of trypsin inhibitor, lipoxxygenase and urease in soybeans: Effect of acid and base additives. *Journal of The American Oil Chemists' Society*, 50, 137-141.
- Berghel, J. & Renström, R. (2002). Basic design criteria and corresponding results performance of a pilot-scale fluidized superheated atmospheric condition steam dryer. *Biomass and Bioenergy*, 23, 103-112.

- Cheong, Y.L. (1997). Fullfat soybean meal production and utilization. *Technical Bulletin of American Soybean Association*, Singapore. MITA (P) No. 044/11/96.
- Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion. 2nd ed., Oxford Univ. Press, Oxford.
- Fitzpatrick, J. (1998) Sludge processing by anaerobic digestion and superheated steam drying. *Water Research*, 32, 2897-2902.
- Hebbar, U. & Rastogi, N.K. (2001). Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *Journal of Food Engineering*, 47, 1-5.
- Hensen, B.C., Flores, E.S., Tanksley, Jr.T.D. & Knabe, D.A. (1987). Effect of different heat treatments during processing of soybean meal on nursery and growing pig performance. *Journal of Animal Science*, 65, 1283-1291.
- Hermansson, A.M. (1978). Physico-chemical aspects of soy proteins structure formation. *Journal of Texture Studies*, 9, 33-58.
- Jovanovich, G., Puppo, M.C., Giner, S.A. & Añón (2003). Water uptake by dehydrated soy protein isolates comparison of moisture equilibrium vapour sorption and water imbibing methods. *Journal of Food Engineering*, 56, 331-338.
- Koptuyug, I.V., Kabanikhin, S.I., Iskakov, K.T., Fenelonov, V.B., Khitrina, L.Yu., Sagdeev, R.Z. & Parmon, V.N. (2000). A Quantitative NMR imaging study of mass transport in porous solids during drying. *Chemical Engineering Science*, 55, 1559-1571.
- Liener, I.E. (1994). Implications of antinutritional components in soybean foods. *Crit. Rev. Food. Sci. Nutr.*, 34, 31-67.
- Osella, C.A., Gordo, N.A., González, R.J., Tosi, E.& Ré, E. (1997). Soybean heat-treated using a fluidized bed. *Lebensm. Wiss u.-Technology*, 30, 676-680.

- Pel, L., Brocken, H. & Kopinga, K. (1996). Determination of moisture diffusivity in porous media using moisture concentration profiles. *International Journal of heat and mass transfer*, 39, 1273-1280.
- Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S., Wetchagama, S. & Jaisut, D. (2002). Desorption isotherms and drying characteristics of shrimp in superheated steam and hot air, *Drying Technology-An International Journal*, 20, 669-684.
- Raghavan, G.S.V. & Harper, J.M. (1974). Nutritive value of salt-bed roasted soybeans for broiler chicks. *Poultry Science*, 53, 547-553.
- Rasmussen (2002). Determination of residual urease activity. <http://www.analytichem.com/Applications/Kjeldahl/>.
- Marsman, G.J.P., Gruppen, H., van Zuilichem, D.J., Resink, J.W. & Voragen, A.G.J. (1995). The influences of screw configuration on the in vitro digestibility and protein solubility of soybean and rapeseed meals. *Journal of Food Engineering*, 26, 13-28.
- Schwartz, J.P. & Bröcker, S. (2000). The evaporation of water into air of different humidities and the inversion temperature phenomenon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 1791-1800.
- Sheikholeslami, R. & Watkinson, A.P. (1992). Rate of evaporation of water into superheated steam and humidified air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35, 1743-1751.
- Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Wetchacama, S., Wutiwiwatchai, W. (2001). Fluidised bed drying of soybeans. *Journal of Stored Products Research*, 37, 133-151.

- Stewart, O.J., Raghavan, G.S.V., Orsat, V. & Golden, K.D. (2003). The effect of drying on unsaturated fatty acids and trypsin inhibitor activity in soybean. *Process Biochemistry*, 39, 483-489.
- Tang, Z. & Cenkowski, S. (2000). Dehydration dynamics of potatoes in superheated steam and hot air. *Canadian Agricultural Engineering*, 42, 6.1-6.12
- Yamauchi, F., Yamagishi, T. & Iwabuchi, S. (1991). Molecular understanding of heat-induced phenomena of soybean protein. *Food Review International*. 7, 283-322.
- Zhu, S., Riaz, M.N. & Lusas, E.W. (1996). Effect of different extrusion temperature and moisture content on lipoxygenase inactivation and protein solubility in soybeans. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 44, 3315-3318.

Captions

Table 1 Protein solubility and lysine content of soybeans treated with superheated steam and hot air at various temperature.

Fig. 1 Schematic diagram of superheated-steam fluidised-bed system

[1) fluidised-bed dryer, 2) heater unit, 3) fan, 4) cyclone, 5) boiler, 6) bypass line).

Fig. 2 Drying curves of soybean superheated-steam and hot-air fluidised bed.

Fig.3 Change of temperature within bed of soybeans being fluidised by superheated steam and hot air

Fig. 4 Variation of effective diffusion coefficient with moisture content in the soybean contacted with superheated steam and hot air
(initial moisture content of 36% d.b.).

Fig. 5 Apparent kinetics of urease inactivation present in soybean during thermal treatments with superheated steam and hot air.

Fig. 6 Variation of apparent rate constant of urease inactivation with initial moisture content and bed temperature for soybeans treated by superheated steam and hot air.

Table 1 Protein solubility and lysine content of soybeans treated with superheated steam and hot air at various temperatures.

Temperature (°C)	M _{in} (%d.b.)	Time(min.)	M (t) (%d.b.)	Urease activity (%)	Protein solubility (%)	Lysine content (mg/g soybean)	
Hot air	Raw soybean				100	94.28	2.9-3.1
	120	13.5	50	3.93	37	71.10	NA
		19.5	30	6.98	19	70.98	3.0
		36	30	10.06	17	63.28	3.0
	135	13.5	5	9.72	15	78.68	3.1
		19.5	5	14.42	13	84.33	NA
		36	5	23.72	12	85.19	NA
			15	12.68	0	66.64	NA
	150	13.5	5	8.21	10	74.17	2.8
		19.5	2	15.52	16	87.86	NA
		36	5	20.74	10	76.83	NA
			10	10.32	0	57.90	NA
Superheated steam	120	13.5	7	13.95	16	85.66	2.8
		19.5	5	18.34	12	85.20	2.7
		36	2	38.95	13	80.59	NA
	135	13.5	5	12.44	11	71.76	2.7
		19.5	5	16.52	9	82.25	2.7
		36	2	34.14	12	81.38	NA
			15	14.70	0	59.51	NA
	150	13.5	5	10.67	12	54.94	NA
		19.5	2	18.94	11	83.84	NA
			5	14.06	10	72.90	2.8
		36	2	31.61	11	75.13	NA
			10	11.41	0	53.59	NA

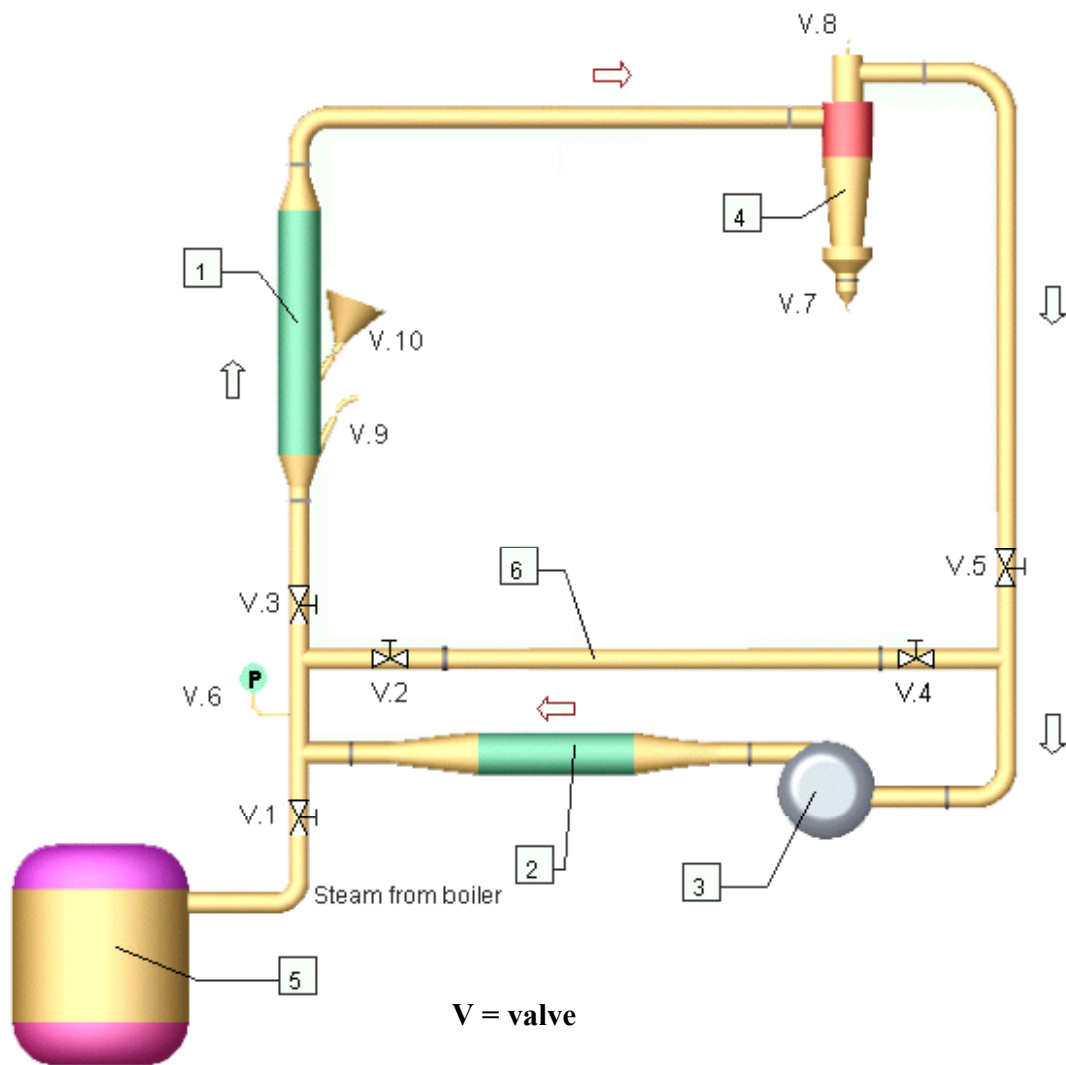


Fig. 1 Schematic diagram of superheated-steam fluidised-bed system
[1) fluidised-bed dryer, 2) heater unit, 3) fan, 4) cyclone, 5) boiler,
6) bypass line] .

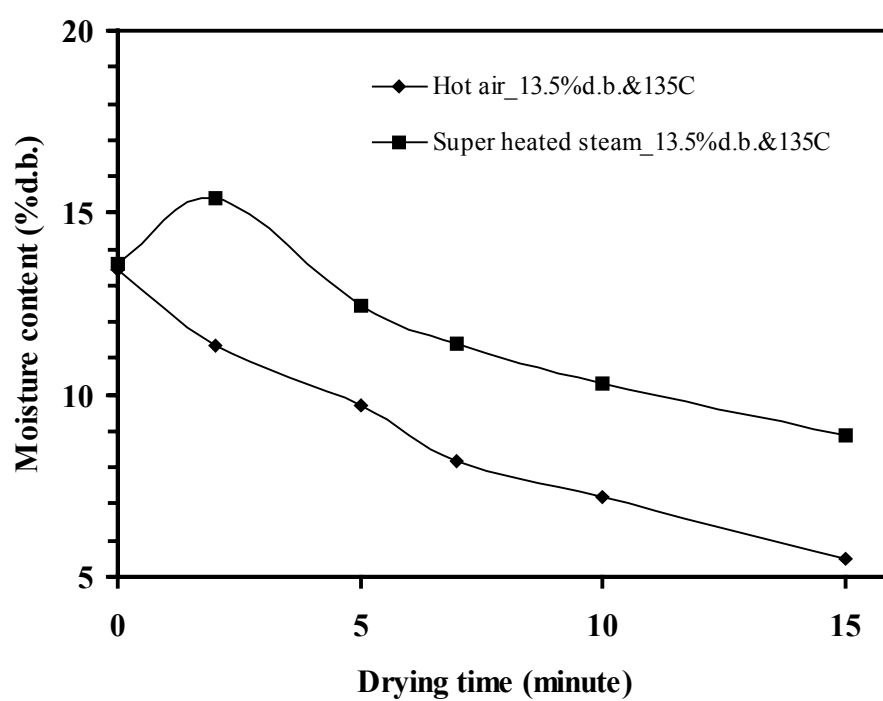


Fig.2 Drying curves of soybean in superheated-steam and hot-air fluidised bed.

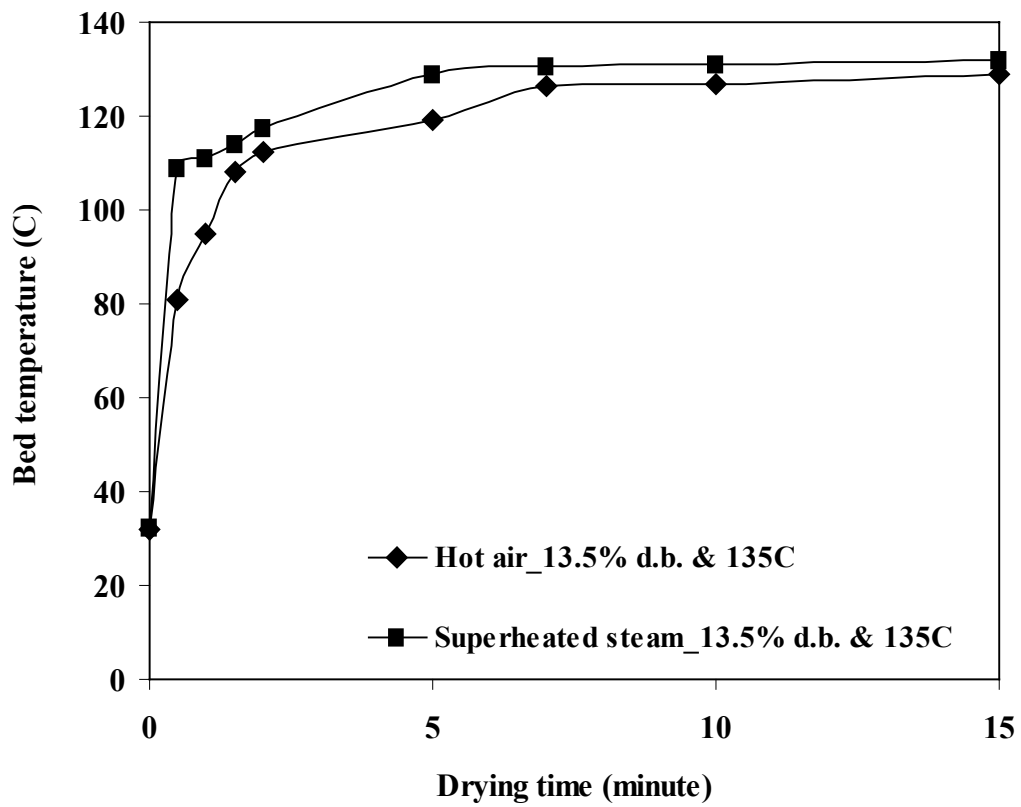


Fig. 3 Change of temperature within bed of soybeans being fluidised by superheated steam and hot air .

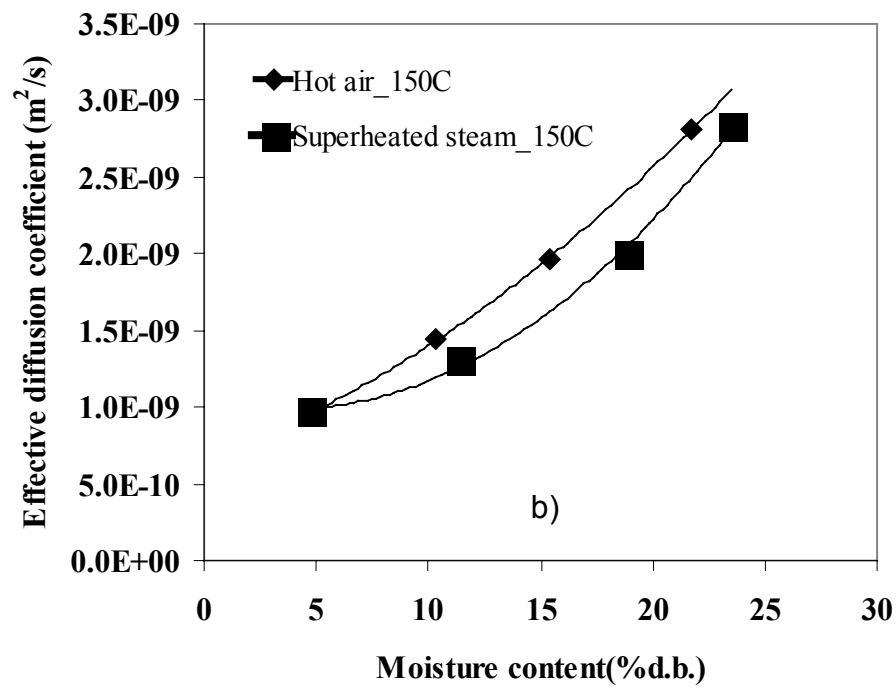
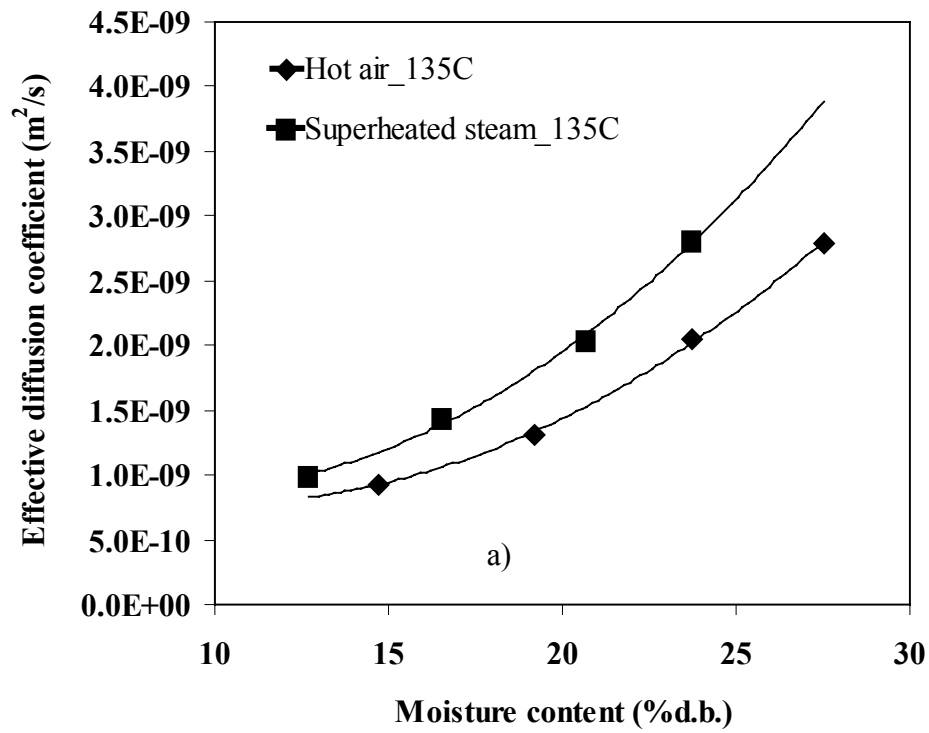


Fig. 4 Variation of effective diffusion coefficient with moisture content in the soybean contacted with superheated steam and hot air (initial moisture content of 36%d.b.).

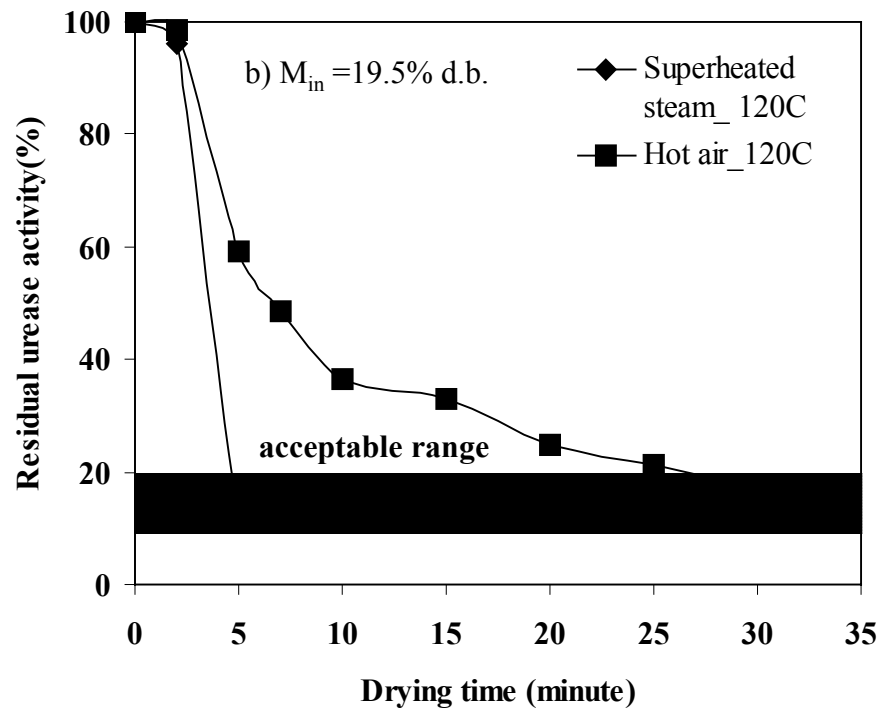
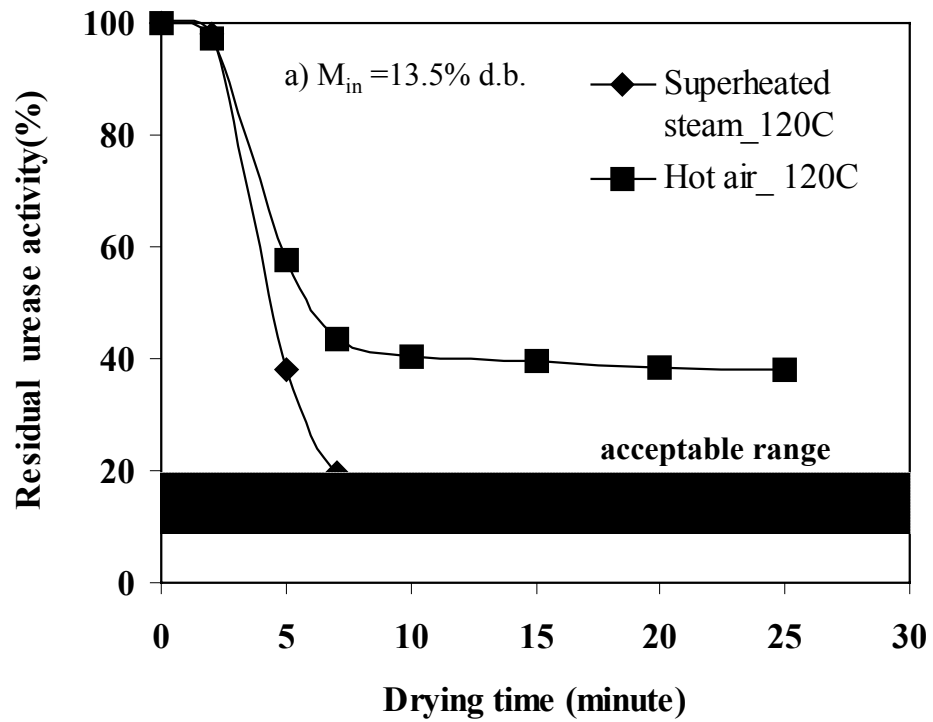


Fig 5. Apparent kinetics of urease inactivation present in soybean during thermal treatment with superheated steam and hot air.

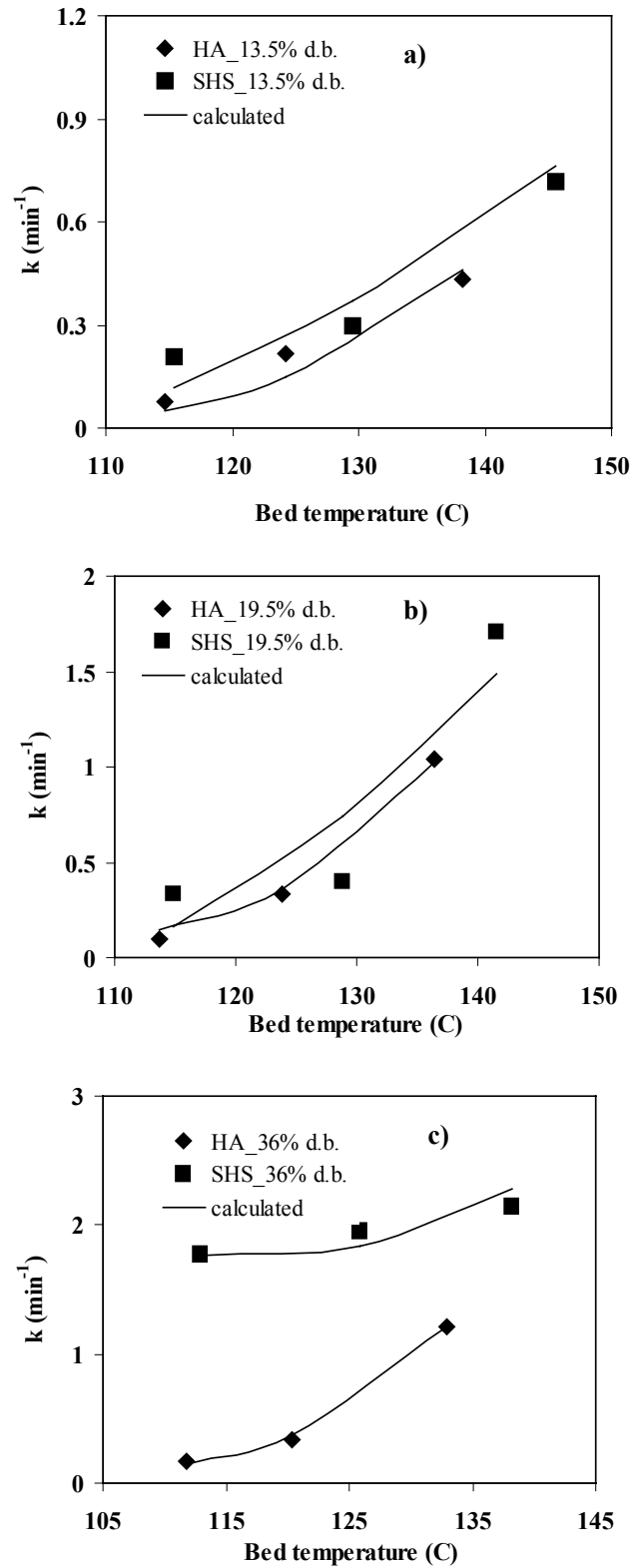


Fig. 6 Variation of apparent rate constant of urease inactivation with initial moisture content and bed temperature for soybeans treated by superheated steam and hot air.