

## การสลายตัวของสารไซยาไนด์ในหัวมันสำปะหลังบดด้วยเอนไซม์ที่มีอยู่เอง

สุรินทร์ ตั้งมั่นคงวรกุล<sup>1</sup> สุวิช ศิริวัฒน์โยธิน<sup>2</sup> และ วีระ โลหะ<sup>3</sup>  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

รับเมื่อ 10 กันยายน 2545 ตอรับเมื่อ 22 สิงหาคม 2546

### บทคัดย่อ

ในหัวมันสำปะหลังประกอบด้วยสารตั้งต้นไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์ (cyanogenic glycoside) กับ เอนไซม์ลินามาเรส (linamarase) และ ไฮดรอกซีไนไตรไลเอส (hydroxynitrile lyase) ซึ่งอยู่ในส่วนที่แยกจากกัน เมื่อส่วนของเนื้อเยื่อถูกทำลายสารตั้งต้นและเอนไซม์ทั้งสองจะพบกัน และเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายได้เป็นกรดไฮโดรไซยานิก (hydrocyanic) กับอะซีโตน (acetone) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสภาวะการสลายตัวของไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์ ในหัวมันสำปะหลังบดโดยเอนไซม์ที่มีอยู่เองดังกล่าว หัวมันสำปะหลังที่ใช้เป็นพันธุ์ KU50 อายุ 10-12 เดือน ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ pH และปริมาณของแข็ง พบว่าสภาวะการปล่อยไซยาไนด์อิสระสูงสุดเป็นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ pH 5 ภายในเวลา 30 นาที และลักษณะการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบที่มีการเสื่อมสภาพของเอนไซม์เกิดขึ้นพร้อมกันด้วย

<sup>1</sup> นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

<sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

## Release of Free Cyanide from Rased Cassava Root by Its Enzymes

Surin Tungmunkongvorakul<sup>1</sup>, Suwit Siriwattanayotin<sup>2</sup>, and Weera Loha<sup>3</sup>

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

*Received 10 September 2002 ; accepted 22 August 2003*

### Abstract

Natively, cassava root composed of both cyanogenic glycosides and linamarase enzyme. When the root was rasped, the cyanogenic glycosides were digested by linamarase enzyme to hydrocyanic acid and acetone. The objectives of this study was to determine the optimal condition for release of cyanogenic glycosides by an enzyme in a cassava root. The cassava roots (KU50), of age 10-12<sup>th</sup> month were used in the experiments. Temperature, pH and solid content were selected as the parameters for this study. It found that the release of free cyanide was maximum at 50 degree celcius and pH of 5 in 30 minutes. The deactivated catalyst type of reaction was shown the best fit with results.

---

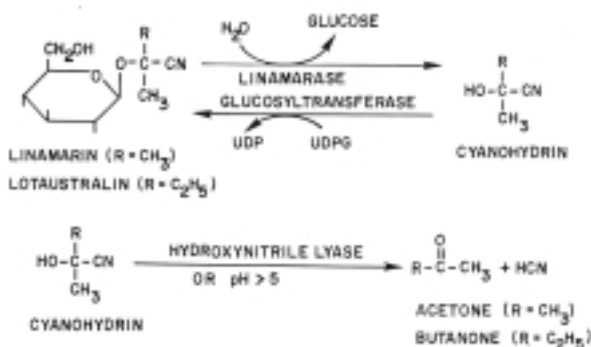
<sup>1</sup> Graduate Student, Department of Food Engineering.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Food Engineering.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Chemical Engineering.

## 1. บทนำ

ในหัวมันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* Crantz) ส่วนใหญ่ จะพบไซยาไนด์อยู่ในรูปของไกลโคไซด์ 2 ชนิด คือ ลินามาริน (linamarin) และ โลตอสตราลิน (lotaustralin) ไกลโคไซด์ทั้งสองนี้สามารถถูกไฮโดรไลซ์โดย เอนไซม์ที่มีอยู่ในหัวมันสำปะหลัง แล้วปล่อยกรดไฮโดรไซยานิกออกมา ดังรูปที่ 1 ซึ่งภายในสภาวะปกติจะไม่เกิดปฏิกิริยา ดังกล่าว เนื่องจากสับสเตอร์กับเอนไซม์อยู่คนละส่วนกัน โดยไกลโคไซด์อยู่ใน vacuole ส่วนเอนไซม์อยู่ในผนังเซลล์ [1] แต่เมื่อน้ำเยื่อถูกทำลายหรือถูกบดขยี้ ไซยาโนกลูโคไซด์จะถูกไฮโดรไลซ์ ปล่อยกรดไฮโดรไซยานิกที่มีความเป็นพิษต่อคนและสัตว์ออกมา แม้ว่าสารพิษนี้จะสลายไปได้โดยง่ายในระหว่างกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง แต่ยังคงมีไกลโคไซด์จำนวนหนึ่งที่ยังไม่ถูกไฮโดรไลซ์เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง ไกลโคไซด์ส่วนนี้สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ในระบบการย่อยอาหารซึ่งเป็นพิษต่อผู้บริโภค เนื่องจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังใช้เวลานานมาก และมีการนำน้ำล้างจากขั้นตอนการเหวี่ยงแยกแป้งกลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นการประหยัดน้ำ จึงมีไซยาไนด์เหลืออยู่ในแป้งมันสำปะหลังประมาณ 1 - 10 ppm. [2]



รูปที่ 1 การไฮโดรไลซ์ลินามารินและโลทอสตราลินจากเอนไซม์ลินามาเรส

การศึกษาเกี่ยวกับไซยาไนด์ในมันสำปะหลัง รวมถึงอิทธิพลต่างๆ ที่มีต่อปริมาณไซยาไนด์ในมันสำปะหลัง ที่ผ่านมา เป็นดังนี้ Gomez และ Valdivieso [3] ศึกษาผลของอายุและพันธุ์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงไซยาไนด์ในเนื้อเยื่อของมันสำปะหลังทั้งต้น ในมันสำปะหลัง 2 พันธุ์ คือ CMC-40 และ CMC-81 พบว่าส่วนเปลือกของมันสำปะหลังพันธุ์ CMC-40 อายุ 9 เดือน มีไซยาไนด์มากที่สุด มณีและปณิก [4] ศึกษาอัตราการสลายตัวของสารประกอบไซยาไนด์ในกากมันสำปะหลังและน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังในสภาวะต่างๆ พบว่าอัตราการสลายตัวของสารประกอบไซยาไนด์ในกากมันสำปะหลังและในน้ำทิ้งมากที่สุด คือ ภายใต้การอบแห้งที่ในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และภายใต้หลอดแสงอาทิตย์และแสง UV สูง ตามลำดับ Arguedas และ Cooke [5] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไซยาไนด์ในกระบวนการสกัดแป้ง พบว่าไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์ส่วนใหญ่ในหัวมันสำปะหลังจะถูกเปลี่ยนเป็นไซยาไนด์อิสระในขั้นตอนการบด Cooke และ Maduagwu [6] ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อปริมาณไซยาไนด์ในมันเส้น พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 46.5 องศาเซลเซียส สามารถลดไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์ได้มากที่สุด Jones และคณะ [7] ศึกษาถึงผลของการลดขนาดก่อนการอบแห้งต่อ

ปริมาณไซยาไนด์ในมันเส้น พบว่าการเตรียมมันเส้นด้วยเครื่องจักรสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ได้มากกว่าการเตรียมด้วยมือ และปริมาณไซยาไนด์จะลดลงอีกหากขนาดของมันเส้นเล็กกว่าเดิม Birk, Bravdo และ Shoseyov [8] ศึกษาผลของการหมักของมันสำปะหลังโดย *A. niger* (B-1) ที่มีต่อปริมาณไซยาไนด์และปริมาณโปรตีน พบว่ากระบวนการหมักสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ลงได้ และทำให้ปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น Uritani, Garcia และ Mendoza [9] ศึกษาคุณสมบัติทางชีวเคมีของ Purified Linamarase ที่ได้จาก *A. oryzae* (SA-1) Itoh-nashida, Hiraiwa และ Uda [10] ทำการศึกษาคุณสมบัติของ Purified  $\beta$ -D-glucosidase (Linamarase) ที่สกัดจาก Butter Bean Cooke, Blake และ Battershill [11] ศึกษาคุณสมบัติของ Purified Linamarase ซึ่งสกัดจากเนื้อของหัวมันสำปะหลังที่ปกเปลือก Mkpong และคณะ [12] ศึกษาคุณสมบัติของ Purified Linamarase ซึ่งสกัดจากเนื้อเยื่อใบมันสำปะหลัง และ Yeoh [13] ศึกษาคุณสมบัติทางจลนศาสตร์ของ  $\beta$ -glucosidase ซึ่งสกัดจากใบ เปลือก และแกนของมันสำปะหลัง จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าเอนไซม์ลินามาเรสมี optimum activity ที่ pH อยู่ในช่วง 5.1-7.3 และที่อุณหภูมิ 40-55 องศาเซลเซียส

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีการศึกษาการสลายตัวของไกลโคไซด์เนื่องจากเอนไซม์ที่มีอยู่ในหัวมันสำปะหลัง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่การศึกษาการสลายตัวของไกลโคไซด์ไปเป็นไซยาไนด์อิสระเนื่องจากเอนไซม์ที่มีอยู่ในหัวมันสำปะหลังหลังการบด โดยพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิ pH และสัดส่วนของของแข็งเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการลดไซยาไนด์ในผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง

## 2. วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง

มันสำปะหลังที่ใช้เป็นพันธุ์ KU50 มีอายุ 10-12 เดือน จาก อ.เขาหินซ้อน จ.ฉะเชิงเทรา การวิเคราะห์ปริมาณไซยาไนด์ใช้วิธี Enzymatic Method ของ O'Brien, Taylor และ Poulter [14] ทำโดยสกัดตัวอย่างด้วยกรดฟอสฟอริกผสมแอลกอฮอล์ แล้วเติมเอนไซม์ลินามาเรสจากมันสำปะหลังของบริษัท BDH UK ปรับ pH ให้อยู่ในสภาพต่าง เติม color reagent แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร ได้ค่าเป็น Total Cyanide สำหรับการวิเคราะห์ Non-Glycosidic Cyanogen ใช้วิธีการเดียวกัน แต่ไม่ต้องเติมเอนไซม์ ส่วนการวิเคราะห์ Free cyanide (HCN) ไม่เติมเอนไซม์และไม่ต้องปรับ pH

ซึ่ง Cyanogenic Glycoside = Total Cyanide - Non-Glycosidic Cyanogen

และ Non-Glycosidic Cyanogen = Cyanohydrin + Free cyanide

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนทั้งหมด (total protein) ใช้วิธี Kjeldahl Method [15] การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนที่ละลายน้ำได้ (soluble protein) ใช้วิธี Dye-binding Method [15] และปริมาณความชื้นของตัวอย่างวัดด้วยวิธีอบแห้ง การปรับ pH ทำด้วยการใช้  $H_2SO_4$  และ NaOH ส่วนการควบคุมอุณหภูมิจะทำโดยให้หลอดใส่ตัวอย่างจุ่มอยู่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

การตรวจหาปริมาณไซยาไนด์ในส่วนต่างๆ ของหัวมันสำปะหลัง ทำโดยส้อมตัวอย่างหัวมันสำปะหลัง 3 ชุด แต่ละชุดแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนเปลือก ส่วนเนื้อ และส่วนแกน โดยทุกตัวอย่างจะลอกเปลือกบางสีน้ำตาล

ด้านนอกออก ตัดให้แต่ละส่วนมีลักษณะเป็นลูกบาศก์ขนาดประมาณ 1-2 ซม. นำไปตรวจหาปริมาณไซยาไนด์ และ  
ทำแบบเดียวกันกับหัวมันสำปะหลังที่ปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือก

การวัดไซยาไนด์อิสระต่อเวลาในส่วนต่างๆ ของหัวมันสำปะหลัง ทำโดยเตรียมตัวอย่างในลักษณะข้างต้น  
และบดในน้ำ โดยเตรียมที่สัดส่วนของหัวมันสำปะหลัง : น้ำ เท่ากับ 33 : 100 ก. หรือคิดเป็นที่ปริมาณของแข็งร้อยละ  
33 บดนานประมาณ 2 นาที ดึงตัวอย่างมาตรวจหาปริมาณไซยาไนด์และความชื้นทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 90 - 100  
นาที

ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 70 องศาเซลเซียส ช่วง pH 3.0 ถึง 10.0 กับปริมาณของแข็งที่  
ร้อยละ 33 50 และ 80 ตามลำดับ

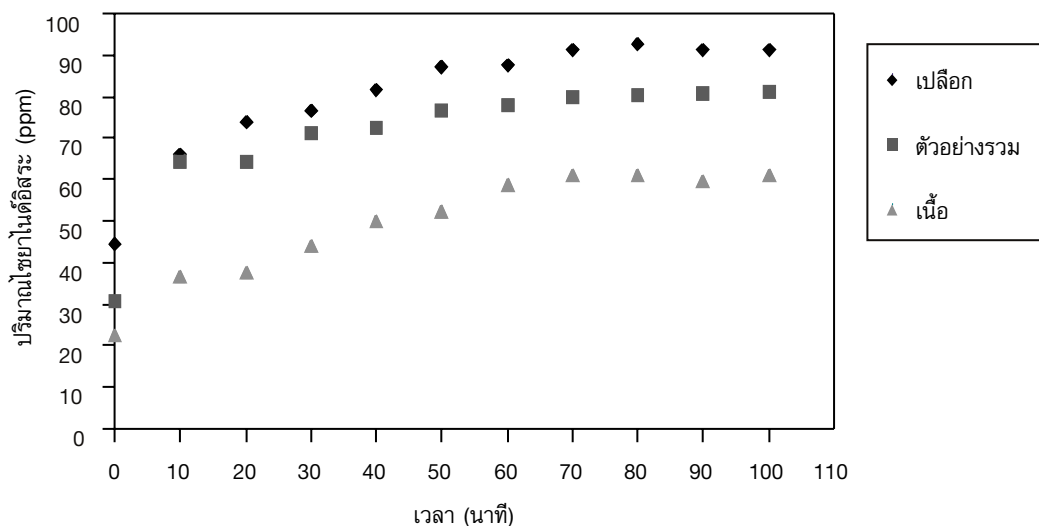
### 3. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.1 ปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมด (total cyanide) ในส่วนแกน เนื้อและเปลือกของหัวมันสำ  
ปะหลังบด พบว่ามีค่าเฉลี่ยเป็น 12.46 99.26 และ 130.44 ppm. ตามลำดับ โดยบริเวณส่วนใกล้เปลือกจะมีค่า  
เฉลี่ยสูงกว่า เนื่องจากเป็นส่วนที่มีการสังเคราะห์ไกลโคไซด์ของพืช เพื่อป้องกันตัวเองในการถูกแมลงหรือสัตว์ที่กิน  
พืชมากัดกินหรือ ทำลาย [5] ปริมาณไซยาไนด์ในหัวมันสำปะหลังที่ปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือกมีค่าเฉลี่ยเป็น 43.94  
และ 82.01 ppm. ตามลำดับ สอดคล้องกับงานของ Nguyen และ คณะ [16] ซึ่งพบว่าในหัวมันสำปะหลังสด, เปลือก  
บาง และเปลือกหนา มีปริมาณไซยาไนด์เท่ากับ 114, 212 และ 238 ppm ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในส่วนของ  
เปลือกมีไซยาไนด์อยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งถ้าสามารถกำจัดส่วนเปลือกออกไปได้ก่อนการบดจะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์  
แป้งมัน สำปะหลังมีปริมาณไซยาไนด์ลดลงได้

#### 3.2 การเกิดไซยาไนด์อิสระ

การศึกษาการเกิดไซยาไนด์อิสระต่อเวลาในส่วนเปลือก ส่วนเนื้อ และในตัวอย่างรวมของหัวมันสำปะหลัง  
เพื่อหาระยะเวลาที่ใช้ในการสลายตัวของไซยาไนด์อินทรีย์ไกลโคไซด์นั้น ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 1 พบว่าปริมาณ  
ไซยาไนด์อิสระจะมีลักษณะค่อยๆ เพิ่มมากขึ้น และเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 70 นาที ซึ่งจะให้ผลในลักษณะ  
เดียวกันทั้งในส่วนเปลือก ส่วนเนื้อ และตัวอย่างรวม ซึ่งในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะใช้เวลาในการ  
ผลิตทั้งสิ้นประมาณ 45-50 นาที ดังนั้นไซยาไนด์อินทรีย์ไกลโคไซด์บางส่วนจึงยังไม่ถูกไฮโดรไลซ์โดยเอนไซม์ที่มีใน  
หัวมันสำปะหลัง เมื่อพิจารณาเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ย พบว่าที่เปลือกจะมีอัตราเร็วมากกว่าใน  
ตัวอย่างรวมและในส่วนเนื้อ ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าในเปลือกมีปริมาณเอนไซม์และปริมาณไซยาไนด์อินทรีย์  
ไกลโคไซด์อยู่ปริมาณมากกว่าส่วนอื่น [10]



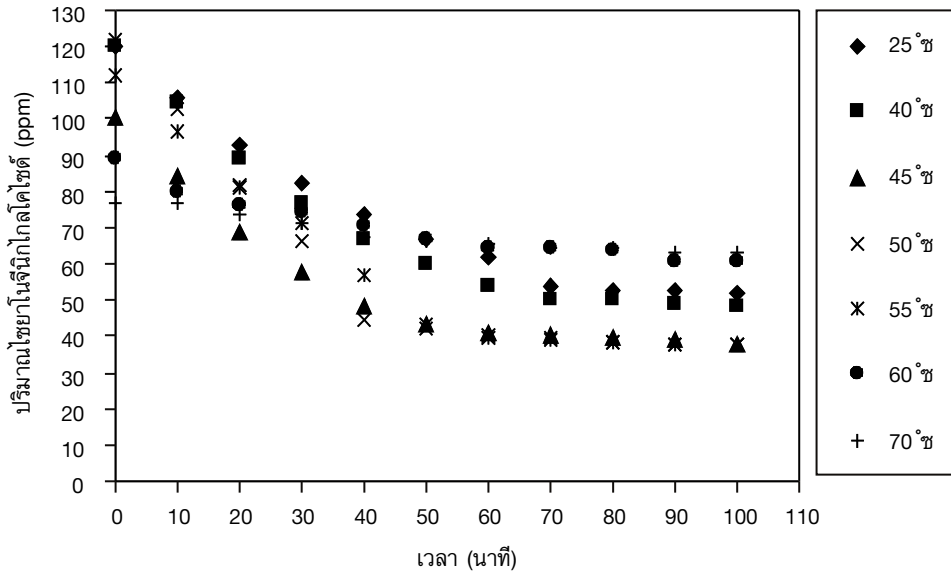
**รูปที่ 1** การเกิดไซยาโนดีอัสระในส่วนเนื้อ ส่วนเปลือก และตัวอย่างรวม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส pH 7.0 และปริมาณของแข็งร้อยละ 33

### 3.3 ผลของอุณหภูมิ

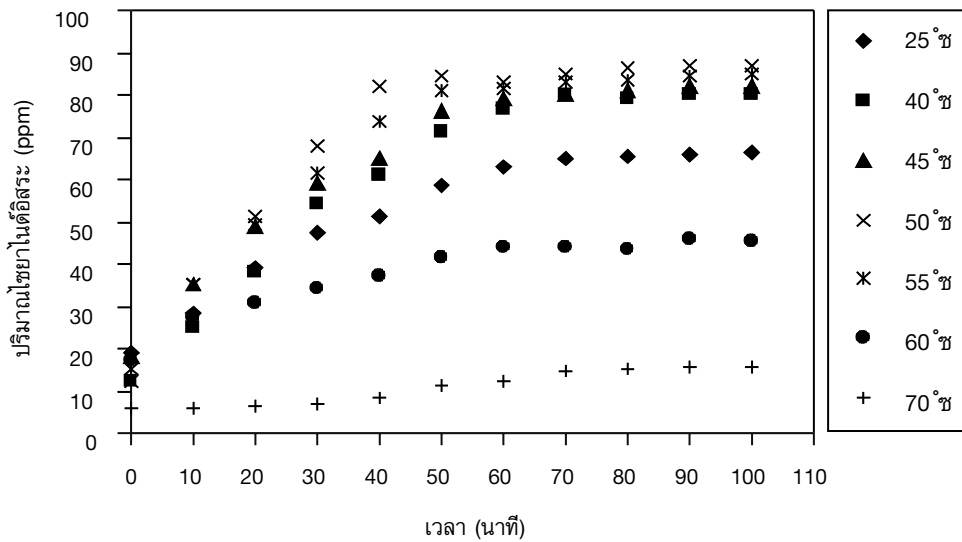
ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสลายตัวของไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์ในหัวมันสำปะหลังบด ที่ pH 7.0 และปริมาณของแข็งร้อยละ 33 แสดงในรูปที่ 2 และ 3 โดยไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์จะมีปริมาณลดลงตามเวลา ในขณะที่ปริมาณไซยาโนดีอัสระจะเพิ่มขึ้นและค่อยๆ คงที่ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายตัวของสารไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์ และอัตราการเกิดของไซยาโนดีอัสระได้ดีที่สุด ขณะที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีอัตราที่ต่ำกว่า อาจเป็นเพราะที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส โปรตีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเอนไซม์ลดลง

### 3.4 ผลของ pH

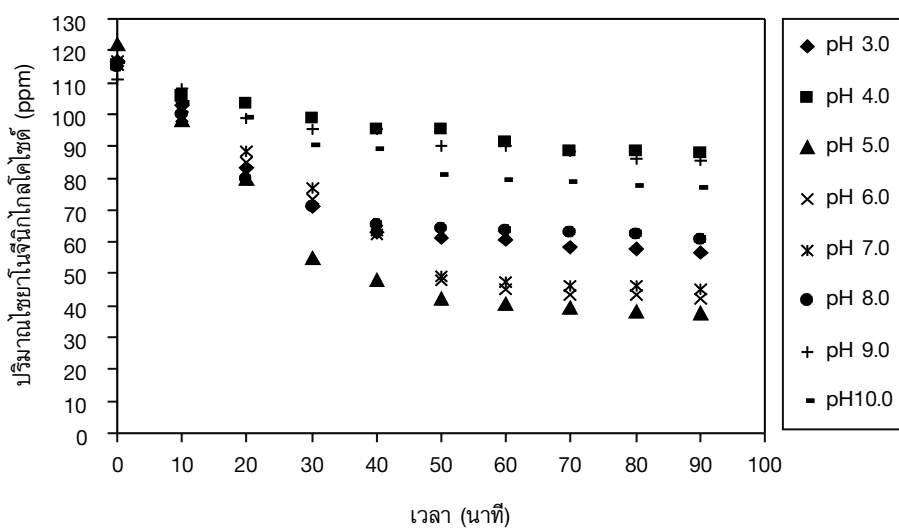
ผลของ pH ที่มีต่อการสลายตัวของไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์ในหัวมันสำปะหลังบด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และปริมาณของแข็งร้อยละ 33 แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าที่ pH 5.0 จะมีอัตราการสลายตัวได้ดีที่สุด ขณะที่ pH 4.0 และ 9.0 จะมีอัตราที่ต่ำกว่า อาจเป็นเพราะที่ pH 4.0 เป็นสภาวะซึ่งโปรตีนเกิดการรวมตัวกันได้ดี ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเอนไซม์ลดลง และที่ pH 9.0 มีความเป็นด่างสูงทำให้เอนไซม์ถูกยับยั้ง [9]



รูปที่ 2 การสลายตัวของไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์ ที่อุณหภูมิ 25 40 45 50 55 60 และ 70 องศาเซลเซียส pH 7.0 และปริมาณของแข็งร้อยละ 33



รูปที่ 3 การเกิดไซยาโนไดอัสเรที่อุณหภูมิ 25 40 45 50 55 60 และ 70 องศาเซลเซียส pH 7.0 ปริมาณของแข็งร้อยละ 33



รูปที่ 4 การสลายตัวของไอโซฟลาโวนไกลโคไซด์ ที่ pH 3.0-10.0 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และปริมาณของแข็งร้อยละ 33

### 3.5 สัดส่วนของไอโซฟลาโวนไกลโคไซด์ต่อโปรตีนทั้งหมดในหัวมันสำปะหลัง

จากการทดลองหาสัดส่วนของไอโซฟลาโวนไกลโคไซด์ต่อโปรตีนทั้งหมด (ppm.:1%protein) ในส่วนต่างๆของหัวมันสำปะหลัง เพื่อจะศึกษาผลของปริมาณเอนไซม์ต่อการสลายไอโซฟลาโวนไกลโคไซด์ไปเป็นไอโซฟลาโวนดีอิสระ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส pH 7.0 และปริมาณของแข็งร้อยละ 33 ได้ผลดังตารางที่ 1 พบว่า สัดส่วนดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกันทั้งในส่วนเปลือก เนื้อ และแกน โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 48.65 48.72 และ 49.30 ppm.:1%Protein ตามลำดับ โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ หรือกล่าวได้ว่าส่วนที่มีปริมาณไอโซฟลาโวนไกลโคไซด์อยู่เป็นจำนวนมากจะมีปริมาณโปรตีนอยู่มากด้วย

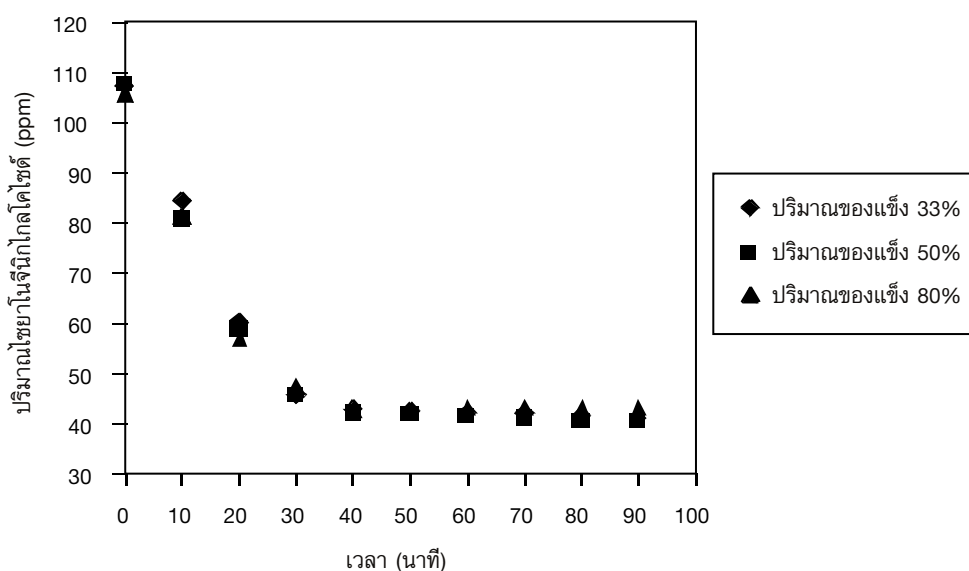


**ตารางที่ 1** สัดส่วนของโซยานोजินิกไกลโคไซด์ต่อโปรตีนทั้งหมด ในส่วนแกน เนื้อ และเปลือกของหัวมันสำปะหลัง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส pH 7.0 และปริมาณของแข็งร้อยละ 33

การทดลองที่	สัดส่วนของโซยานोजินิกไกลโคไซด์ต่อโปรตีนทั้งหมด (ppm.:1%protein)		
	ตำแหน่งของหัวมันสำปะหลัง		
	แกน	เนื้อ	เปลือก
1	50.13	48.88	48.54
2	47.33	48.09	48.06
3	49.92	49.30	49.19
4	48.94	50.02	49.02
5	50.20	47.38	48.48
เฉลี่ย	49.30	48.72	48.65

### 3.6 ผลของปริมาณของแข็ง

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5 พบว่าที่สัดส่วนของหัวมันสำปะหลัง : น้ำที่ใช้บดเท่ากับ 33:100 50:100 80:100 หรือคิดเป็นปริมาณของแข็งร้อยละ 33 50 และ 80 ตามลำดับ ไม่มีผลต่อการสลายตัวของโซยานोजินิกไกลโคไซด์ ทั้งนี้เป็นเพราะในการเปลี่ยนสัดส่วนปริมาณของแข็งนั้นปริมาณยังคงทำให้โปรตีนในหัวมันสำปะหลังมีอยู่เท่าเดิม อัตราการสลายตัวของโซยานोजินิกไกลโคไซด์จึงไม่เปลี่ยนแปลง



**รูปที่ 5** การสลายตัวของโซยานोजินิกไกลโคไซด์ ที่ปริมาณของแข็งร้อยละ 33 50 และ 80 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส pH 5.0

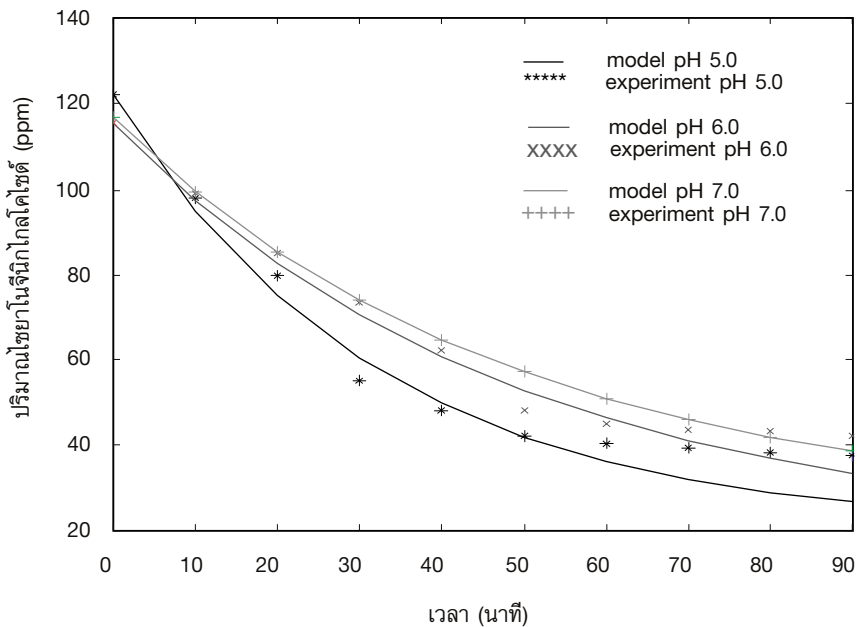
### 3.7 ลักษณะการสลายตัวของไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์

เมื่อนำผลการทดลองมาทดสอบหาลักษณะการสลายตัวของไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์ ในหัวมันสำปะหลังบด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส pH 5.0 และปริมาณของแข็งร้อยละ 33 โดยพิจารณาว่าปริมาณโปรตีนทั้งหมดนั้นเป็นเอนไซม์พบว่ารูปแบบสมการปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่มีการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นพร้อมกันในลักษณะสมการที่ 1 [17] ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลมากที่สุด ดังแสดงในสมการที่ 2 และมีลักษณะแบบเดียวกันกับที่ pH 6.0 และ 7.0 ดังแสดงในรูปที่ 6

$$R = \frac{V_{max}[S]\exp(-k_d t)}{(K_m + [S])} \tag{1}$$

$$R = \frac{3.22[S]\exp(-0.03t)}{(3.06 + [S])} \quad (r = 0.90) \tag{2}$$

- เมื่อ  $R$  เป็นอัตราการสลายตัวของไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์ (ppm./sec)
- $V_{max}$  เป็นอัตราสูงสุดของปฏิกิริยา
- $[S]$  เป็นความเข้มข้นของไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์
- $k_d$  เป็นค่าคงที่ของการเสื่อมสภาพของเอนไซม์
- $K_m$  เป็นค่าคงที่
- $t$  เป็นเวลา



รูปที่ 6 ลักษณะการสลายตัวของไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณของแข็งร้อยละ 33 และ pH 5.0 6.0 และ 7.0

#### 4. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในหัวมันสำปะหลังจะมีปริมาณไซยาไนด์มากที่สุดอยู่ในส่วนเปลือก รองลงมาคือส่วนเนื้อ และส่วนแกน ตามลำดับ สัดส่วนของไซยาไนด์ในกลไกโคไซด์ต่อปริมาณโปรตีนทั้งหมด ในส่วนแกน ส่วนเนื้อ และส่วนเปลือก มีค่าใกล้เคียงกัน สัดส่วนของปริมาณของแข็งในมันสำปะหลังบดไม่มีผลต่อการสลายตัวของไซยาไนด์ในกลไกโคไซด์ สภาวะที่เหมาะสมในการสลายตัวของไซยาไนด์ในกลไกโคไซด์ คือที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส pH 5.0 และปริมาณของแข็งร้อยละ 33 และควรมีเวลาให้กับการสลายตัวเองที่สภาวะดังกล่าวอย่างน้อย 30 นาที ลักษณะของปฏิกิริยาการสลายตัวของไซยาไนด์ในกลไกโคไซด์โดยพิจารณาให้มีการเสื่อมสภาพของเอนไซม์ด้วยให้ผลที่สอดคล้องกับข้อมูลมากที่สุด

เมื่อพิจารณาการประยุกต์ไปใช้ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง อาจจะมีปัญหาเรื่องช่วงเวลาที่จะต้องมีให้สำหรับการทำงานของเอนไซม์ระยะเวลาหนึ่ง ขณะที่การปรับสภาพความเป็นกรดต่างกับอุณหภูมิในกระบวนการผลิตอาจทำได้ยากเช่นกัน ดังนั้นจึงอาจต้องพิจารณาหาทางลดไซยาไนด์ในผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการอื่น เช่น ผลิตเอนไซม์เข้มข้นจากส่วนหนึ่งส่วนใดของมันสำปะหลังก่อน เพื่อนำมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

#### 5. เอกสารอ้างอิง

1. White, W.L.B., McMahon, J.M., and Sayre, R.T., 1994, "Regulation of Cyanogenesis in Cassava," *International Workshop on Cassava*, Ibadan, Nigeria, March 1-4, p. 69-78.
2. กล้านรงค์ ศรีรอต, 2542, *เทคโนโลยีของแป้ง*, บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด, 225 หน้า.
3. Gomez, G. and Valdivieso, M., 1984, "Changes in Cyanide Content of Cassava Tissues as Affected by Plant Age and Variety," *Proceedings of the Sixth Symposium of the International Society for Tropical Root Crops*, International Potato Center, Lima, Peru, pp. 323-336.
4. มณี แต่โสภางษ์ และ ปณิก ภาณุประภา, 2529, *การศึกษ้อัตราการสลายตัวของสารประกอบไซยาไนด์ในกากมันสำปะหลังและน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 102 หน้า.
5. Arguedas, P. and Cooke, R.D., 1982, "Residual Cyanide Concentration during the Extraction of Cassava Starch," *Journal of Food Technology*, Vol. 17, pp. 251-262.
6. Cooke, R.D. and Maduagwu, E.N., 1978, "The Effects of Simple Processing on the Cyanide Content of Cassava Chips," *Journal of Food Technology*, Vol. 13, pp. 299-306.

7. Jones, D.M., Trim, D.S., Bainbridge, Z.A., and French, L., 1994, "Influence of Selected Process Variables on the Elimination of Cyanide from Cassava," *J. Sci. Food Agric.*, Vol. 66, pp. 535-542.
8. Birk, R., Bravdo, B. and Shoseyov, O., 1996, "Detoxification of Cassava by *Aspergillus niger* B-1", *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 45, No. 3, pp. 411-414.
9. Uritani, I., Garcia, V.V., and Mendoza, E.M.T., 1994, *Postharvest Biochemistry of Plant Food-Materials in the Tropics*, Jpn.Sci.Soc.Press, Tokyo, pp. 47-56.
10. Itoh-Nashida, T., Hiraiwa, M., and Uda, Y., 1987, "Purification and Properties of  $\beta$ -D-Glucosidase (Linamarase) from the Butter Bean, *Phaseolus lunatus*," *Journal of Biochem*, Vol. 101, pp. 847-854.
11. Cooke, R.D., Blake, G.G., and Battershill, J.M., 1978, "Purification of Cassava Linamarase," *Phytochemistry*, Vol. 17, pp. 381-383.
12. Mkpong, O.E., Yan, H., Chism, G., and Sayre, R.T., 1990, "Purification, Characterization, and Localization of Linamarase in Cassava," *Plant Physiology*, Vol. 93, pp. 176-181.
13. Yeoh, H.H., 1989, "Kinetic Properties of  $\beta$ -Glucosidase from Cassava," *Phytochemistry*, Vol. 28, No. 3, pp. 721-724.
14. O'Brien, G.M., Taylor, A.J., and Poulter, N.H., 1991, "Improved Enzymic Assay for Cyanogens in Fresh and Processed Cassava," *J. Sci. Food Agric.*, Vol. 56, No. 3, pp. 277-289.
15. สุรินทร์ ตั้งมันคงวรกุล, 2544, *การศึกษาการสลายตัวของไซยาไนด์จากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 213 หน้า.
16. Ngugen, T.L., Ogle, R.B., and Preston, T.R., 1997, "Cassava Root Silage for Crossbred Pigs under Village Conditions in Central Vietnam," *Livestock Research for Rural Development*, Vol. 9, No. 2, pp. 203-211.
17. Levenspiel, O., 1972, *Chemical Reaction Engineering*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 537-562.