*วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์ ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม): 39-50, 2565*
*Songklanakarin Journal of Plant Science, Vol. 9, No. 2 (July-December): 39-50, 2022*

*Invited article-ISSN: 2351-0846*

# นวัตกรรมการลดไซยาไนด์ในมันสำปะหลังต่อการนำใช้ประโยชน์ในอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง

# Decreasing Innovation Hydrocyanic Acid (HCN) in Cassava on Utilization in Ruminant Feed

**ปิ่น จันจุฬา**[1*]
**Pin Chanjula**[1*]

[1] สาขาวิชานวัตกรรมการผลิตสัตว์และการจัดการ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110
[1] Animal Production Innovation and Management Division, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Songkhla, 90110

[*] *Corresponding author: pin.c@psu.ac.th*
*Received 1 November 2022; Revised 15 December 2022; Accepted 23 December 2022*

**บทคัดย่อ**

มันสำปะหลังเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดอยู่ในเขตร้อน เป็นอาหารหลักที่สำคัญของประชากรบางประเทศ จัดว่าเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย นอกจากส่วนหัวแล้วส่วนลำต้นทั้งหมดที่เป็นผลพลอยได้จากการปลูกมันยังมีโปรตีนสูง สามารถนำมาใช้เป็นอาหารหยาบสัตว์เคี้ยวเอื้อง เช่น โค และกระบือได้เป็นอย่างดี ข้อด้อยของมันสำปะหลังสด คือ มีองค์ประกอบของสารไซยาไนด์ (กรดไฮโดรไซยานิค) เกิดจากการไฮโดรไลซีสสาร cyanogenic glycoside ที่อยู่ในมันสำปะหลังมี 2 ชนิด คือ linamarin กับ lotaustralin โดยกรดไซยาไนด์ของมันสำปะหลัง เกิดมาจาก linamarin เป็นส่วนใหญ่ ถ้าสัตว์ได้รับในสภาพสด จะเกิดความเป็นพิษต่อสัตว์ โดยแสดงอาการขาดออกซิเจนรุนแรง ล้มลงนอน อ้าปากหายใจถี่ กล้ามเนื้อเกร็ง และชักก่อนตาย วิธีการลดสารพิษ กรดไฮโดรไซยานิค ในมันสำปะหลังสามารถระเหยหรือกำจัดออกไปได้ง่าย โดยการตากแดดหรือการให้ความร้อนเช่น การต้ม การนึ่งและการอบแห้ง สามารถลดสารไซยาไนด์ให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์ นอกจากนี้ถ้าร่างกายของสัตว์ได้รับสารไซยาไนด์ ในปริมาณไม่มาก ร่างกายสามารถเปลี่ยนสารไซยาไนด์ เป็นสารไทโอไซยาเนต (thiocyanate) ที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกายแล้วขับออกได้ ดังนั้นการลดพิษในมันสำปะหลังอย่างถูกวิธีเป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์มันสำปะหลังให้สูงมากขึ้น

**คำสำคัญ:** ไซยาไนด์, ไกลโคไซด์, ลินามาริน, ซัลเฟอร์, มันสำปะหลัง

**Abstract**

Cassava, a tropical plant, is a staple crop in some countries. It is one of the economically important crops in Thailand, harvesting not only its root parts as a primary product but also other vegetative parts used as roughage for ruminants such as cows and buffaloes because of its high protein content. However, fresh cassava contains cyanide compounds (hydrocyanic acid), formed by hydrolysis of cyanogenic glycoside substances (linamarin and lotaustralin), as poisonous matters to animals and cause severe oxygen deprivation, lying down, gasping for breath, shortness of breath, tense muscles, and convulsion before death. To reduce the hydrocyanic acid amount in fresh cassava to an unharmful level for animals, there are some methods of evaporation, exposure to the sun, and heat treatments like boiling, steaming, and drying. After the proper reduction, the animal body can convert a small amount of the remaining cyanide into thiocyanate, which is non-toxic to the animal and extractable. Therefore, appropriately reducing the poisonous matter in fresh cassava is how to increase cassava consumption to a high level.

**Keyword:** Cyanide, Glycoside, Linamarin, Sulfur, Cassava


*Published by Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University. All rights reserved.*
*For Permissions, please e-mail: sjps.psu@gmail.com*

**บทนำ**

มันสำปะหลัง (cassava หรือ tapioca) เป็นพืชหัว (tuber) ที่นิยมปลูกอย่างกว้างขวางในพื้นที่เขตร้อน (tropical zone) และสามารถเจริญได้ดีในดินร่วนปนทราย (sandy-loam) ที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ มีฝนตกน้อย รวมทั้งอุณหภูมิสูง จึงมีการปลูกเพื่อเป็นแหล่งรายได้ของเกษตรกรในหลายๆ ประเทศ เป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย มีพื้นที่ในการปลูกทั้งหมดมากกว่า 6 ล้านไร่ ซึ่งในประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่ (90% ของพื้นที่ปลูกทั้งหมด) อยู่ในภาคตะวันออก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศไทยผลผลิตที่ได้ส่วนหนึ่งจะแปรรูปเป็นแป้งมันสำปะหลัง (tapioca starch) เพื่อใช้เป็นอาหารคน และใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อีกส่วนหนึ่งจะถูกแปรรูปเป็นมันเส้น (tapioca chips หรือ cassava chips) และมันอัดเม็ด (cassava pellets) ส่วนใหญ่เป็นการผลิตเพื่อการส่งออกมากกว่า 80% โดยเฉพาะตลาดสหภาพยุโรป หรืออียู (European Union, EU) และในทวีปเอเชีย เพื่อผลิตเป็นอาหารสัตว์ (animal feed) และอาหารมนุษย์ (human food) และเหลือใช้ภายในประเทศเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงมักมีการแข่งขันทางด้านการค้า และนำปัญหาเรื่องคุณภาพของสินค้ามาเป็นข้อกีดกันทางการค้าและรับซื้อราคาต่ำเป็นประจำ ดังนั้น จึงมีความพยายามที่จะหาวิธีการปรับปรุงมันสด มันเส้น หรือมันอัดเม็ดให้มีคุณภาพดีขึ้นตามความต้องการของตลาด และอีกทางหนึ่งควรหาทางเพิ่มมูลค่าและเพิ่มปริมาณการใช้ประโยชน์มันสำปะหลังให้มากขึ้น เช่น ผลักดันและส่งเสริมสนับสนุนอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ในประเทศ โดยใช้มันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบหลักให้เข้าสู่มาตรฐานสากล (codex) และมาตรฐานของประเทศคู่ค้า อย่างไรก็ตาม ปัญหาอย่างหนึ่งในการนำใช้ประโยชน์ได้ของมันสำปะหลังและผลพลอยได้ยังต่ำนอกเหนือจากคุณภาพ ความสะอาด การปลอมปน และการปนเปื้อนของสารเคมีแล้ว อาจเนื่องมาจากรสชาติ ความฟ่าม (bulkiness) ระดับของคอนเด้นท์แทนนินส์ (condensed tannin, CT) และสารพิษโดยเฉพาะไซยาไนด์ (cyanide) หรือไฮโดรเจนไซยาไนด์ (hydrogen cyanide, HCN) ที่สูง (Wannapat *et al*., 2001) ที่มีความเป็นพิษต่อคนและสัตว์ ซึ่งสารพิษนี้แม้ว่าสลายไปได้ง่ายในระหว่างกระบวนการผลิตแป้งมัน มันเส้น หรือมันอัดเม็ด แต่ยังคงมี HCN จำนวนหนึ่งที่ยังไม่ถูกไฮโดรไลซ์ และเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง เนื่องจากปัจจุบันบางโรงงานมีกระบวนการผลิตยังไม่ได้มาตรฐาน ตลอดจนไซยาโนเจนิก ไกลโคไซด์ (cyanogenic glycoside) ที่ยังไม่ถูกไฮโดรไลซ์นั้นสามารถไฮโดรไลซ์ได้ในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งเป็นพิษต่อคนและสัตว์ทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับระบบประสาท คอหอยพอก และโรคแคระ เป็นต้น โดยปัจจุบันมีนักวิจัยได้รายงานถึงแนวทางในการลดไซยาไนด์ในวัตถุดิบอาหารสัตว์ไวหลายแนวทาง เช่น การตากแดด อัดเม็ด การหมัก การแปรรูปหรือการเสริมอาหารบางกลุ่ม อาทิ กรดอะมิโนเมทไธโอนีน และไวตามินบี12 จะช่วยลดพิษของไซยาไนด์ลงได้ (สาโรช, 2547)

จากความสำคัญดังกล่าว บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์ของการทบทวนเอกสารครั้งนี้เพื่อเสนอภาพรวม กลไกการสร้าง การเกิดพิษ นวัตกรรมการลดไซยาไนด์ในมันสำปะหลังต่อการนำใช้ประโยชน์ในอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง ซึ่งจะใช้เป็นแนวทางการลดพิษ และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสัตว์ ตลอดทั้งเป็นการส่งเสริมอาชีพเกษตรกรเพื่อความยั่งยืนต่อไปในอนาคต

***ลักษณะทางพฤษศาสตร์ และความสำคัญของมันสำปะหลัง***

มันสำปะหลัง (cassava) มีชื่อพื้นเมืองแตกต่างกับไปตามท้องถิ่นที่กำเนิด เช่น manioc (Francophone areas), yucca (Spanish), tapioca (Latin America), mamdioca (Portuguese) และ guacamote เป็นต้น อยู่ในวงศ์ (family) Euphorbiaceae สกุล (genus) *Manihot* มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ *Manihot esculenta*, Crantz. เชื่อกันว่าเป็นพืชพื้นเมืองของทวีปอเมริกาแถบศูนย์สูตรตั้งแต่ประเทศเม็กซิโก กัวเตมาลา ฮอนดูลัส เปรู โปลิเวียและบราซิล มีแหล่งกำเนิดที่แม่น้ำ Zaire และถูกนำไปปลูกยังแถบร้อนอื่นๆ เช่น เอเชีย โดยนักสำรวจชาวปอร์ตุเกตในช่วงศตวรรษที่ 17 ส่วนในประเทศไทยมีชื่อเรียกมันสำปะหลังในชื่อต่างๆ กันตามท้องถิ่นที่ปลูก เช่น มันไม้ มันสำโรง ทางภาคอีสานจะเรียกว่า มันต้นเตี้ย ขณะที่ภาคใต้จะเรียกว่า มันเทศ (จรุงสิทธ์ และอัจฉรา, 2537) ลักษณะโดยทั่วไปมันสำปะหลังจะสูงประมาณ 1-5 เมตร หรือมากกว่าก็มี มีอายุอยู่ได้นานหลายปี ใบจะเป็นแบบ palmate คือ มีแฉกคล้ายนิ้วมือตั้งแต่ 3-9 แฉก รูปทรงแฉกแตกต่างกันไปตามแต่ละพันธุ์ เช่น เรียวยาว หรือสั้นป้อม ดอกมีทั้งดอกตัวผู้ (staminate flower) และดอกตัวเมีย (pistillate flower) ในช่อดอกเดียวกัน รากและหัวของมันสำปะหลังที่ปลูกโดยท่อนพันธุ์จะมีระบบรากแบบ (adventitious root system) แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ รากที่ใช้สะสมอาหาร (storage root) และรากจริง (true root ) โดยรากจริงจะเจริญลึกลงไปในดินยึดเหนียวลำต้น รากสะสมอาหารจะอยู่ด้านข้างรอบรัศมีของต้นประมาณ 60 เซนติเมตร (ดนัย, 2537)

มันสำปะหลังจัดว่าเป็นพืชพลังงานที่สำคัญเป็นอันดับ 5 ของโลกรองจากข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าว และมันฝรั่ง สามารถนำทุกส่วนของต้นมันสำปะหลังมาใช้ประโยชน์ได้ นอกจากใช้ส่วนหัวเป็นแหล่งพลังงานสูงในสูตรอาหารสัตว์แล้ว ส่วนลำต้นอ่อนมันสำปะหลังและใบยังมีโปรตีนสูง 20-25% ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งอาหารหยาบเสริมได้อย่างดีให้กับสัตว์เคี้ยวเอื้องโดยเฉพาะและเพิ่มผลผลิตน้ำนมโคได้อีกด้วย (Wanapat *et al*., 2001) โดยเฉพาะมันเส้น (cassava chip) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากมันสำปะหลัง และนิยมใช้อย่างแพร่หลายในวงการอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง (กฤตพลและคณะ, 2534; Chanjula *et al*., 2007) โดยมันเส้นประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรตจำพวกแป้งประมาณ 64-72% ย่อยสลายได้ง่าย มีการย่อยสลายในกระเพาะรูเมนสูง จึงถือเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ

สำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง อย่างไรก็ตาม มันสำปะหลังมีข้อด้อย เนื่องจากในหัวมันสำปะหลังประกอบด้วยสารตั้งต้นไซยาโนเจนิก ไกลโคไซด์ (cyanogenic glycoside) กับเอนไซม์ลินามาเรส (linamarase) และไฮดรอกซีไนทริล ไลเอส (hydroxynitrile lyase) ซึ่งอยู่ในส่วนที่แยกกัน แต่เมื่อส่วนของเนื้อเยื่อถูกทำลาย สารตั้งต้นและเอนไซม์จะมารวมกันและเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายได้เป็นกรดไฮโดรไซยานิก (hydrocyanic acid) และอะซิโตน (acetone) ซึ่งอยู่ในรูปสารละลายที่เป็นพิษ หากสัตว์กินไซยาไนด์ในปริมาณที่สูงจะเกิดพิษอย่างเฉียบพลันทำให้ตายได้ แต่ถ้ากินในปริมาณที่ไม่มากจะเป็นพิษอย่างเรื้อรังทำให้สมรรถภาพการผลิตลดลง และอาการอื่นๆ อีกหลายอย่าง

***ปริมาณ กลไกการสร้าง โครงสร้างและการกระจายตัวของกรด hydrocyanic***

ปริมาณของสาร cyanogenic glycoside ในมันสำปะหลังจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับพันธุ์ ตำแหน่งที่สะสม ชนิด และสภาพแวดล้อมในการปลูก (Table 1) จะเห็นว่า แต่ละส่วนของมันสำปะหลังทั้งชนิดหวาน และขมมีปริมาณกรด hydrocyanic ไม่เท่ากัน โดยชนิดขมจะมีมากกว่าชนิดหวาน และส่วนใบจะมีมากกว่าส่วนหัว และเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกรด hydrocyanic ที่อยู่ในส่วนต่างๆ ของพืชชนิดอื่นแล้วก็พบว่ามันสำปะหลังมีปริมาณกรด hydrocyanic ที่น้อยกว่า จากการรายงานของ Darjento (1952) อ้างโดย เจริญศักดิ์ (2519) กล่าวว่าปริมาณปุ๋ยไนโตรเจน และความชื้นในดิน จะมีส่วนในการเพิ่ม หรือลดปริมาณสาร cyanogenic glycoside เนื่องจากธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของกรดแอมิโนแวลีน (valine, Val) และไอโซลิวซีน (isoleucine, Iso) ซึ่งเป็นสารที่จะเปลี่ยนไปเป็น cyanogenic glycoside ดังนั้น ถ้ามีการใช่ปุ๋ยไนโตรเจนมาก ก็จะส่งผลให้เกิด cyanogenic glycoside ได้มากเช่นเดียวกัน

**Table 1** Quantity of hydrocyanic (HCN) in tropical plant

| Plant/ tissue | mg HCN/kg |
|---|---|
| Cassava (bitter) / dried root cortex | 2,450 |
| Cassava (bitter) / leaves | 310 |
| Cassava (bitter) / whole tubers | 395 |
| Cassava (sweet) / leaves | 468 |
| Cassava (sweet) / whole tubers | 462 |
| Sorghum/ whole immature plant | 2,500 |
| Bamboo/ immature shoot tip | 8,000 |
| Lima beans from Java (colored) | 3,120 |
| Lima beans from Puerta Rico (black) | 3,000 |
| Lima beans from Burma (white) | 2,100 |

ที่มา: Vetter (1999)

นอกจากนี้ จากทำการทดลองปลูกมันสำปะหลังในสภาพดินแฉะกับดินแห้ง พบว่าปริมาณกรด hydrocyanic ในมันสำปะหลังที่ปลูกในสภาพดินแฉะมีปริมาณน้อยกว่าในสภาพดินแห้ง นอกจากในมันสำปะหลังแล้วกรด hydrocyanic หรือ HCN สามารถพบได้อีกในพืชทั่วไป เช่น ข้าวเจ้า ข้าวสาลี ข้าวบาร์เล่ย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวไรน์ ข้าวฟ่าง ข้าวโพด ถั่วชนิดต่างๆ และอ้อย (ธาตรี, 2550) เป็นต้น และเป็นสารประกอบตามธรรมชาติที่พบในพืชมากกว่า 2,500 ชนิด (Vetter, 1999)

กรด hydrocyanic acid หรือ hydrogen cyanide (HCN) เป็นพิษต่อคน และสัตว์ ซึ่งสาร HCN ถูกสร้างจากกรดอะมิโน 2 ชนิด คือ valine และ isoleucine การสังเคราะห์จาก valine จะได้เป็น glycoside ของ acetone cyanohydrin เรียกว่า ลินามาริน (linamarin หรือ 2-hydroxy isobutyronitrile-a-D-glucopyranoside) ถ้าสังเคราะห์จาก isoleucine จะได้โลทอสตราลิน (lotaustralin หรือ 2-hydroxy-2-methilbutyronitrile-b-D-glucopyranoside) ซึ่งเป็น glycoside ของ methylethyl ketone cyanohydrin โครงสร้างของ linamarin และกับ lotaustralin มีลักษณะคล้ายกัน แต่แตกต่างกันตรงหมู่ที่มาเกาะโดย linamarin จะมีหมู่ methyl ทั้ง 2 ตัว ส่วน lotaustralin จะมีหมู่ ethyl เกาะอยู่ด้วย (Figure 1)

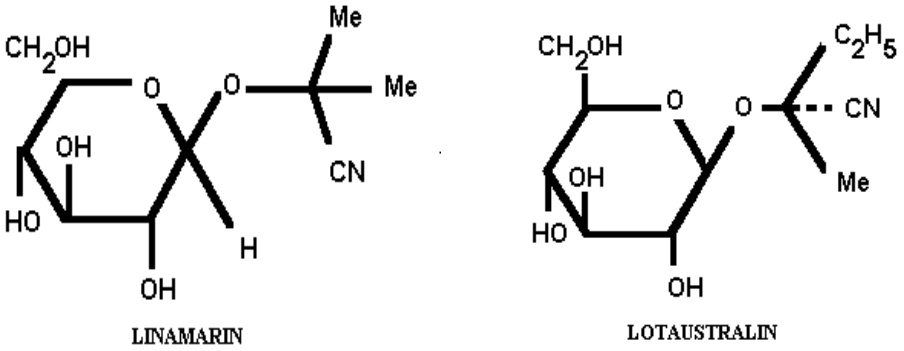


**Figure 1** Structure of linamarin and lotaustralin
ที่มา: Nartey (1968)

ในมันสำปะหลังส่วนใหญ่จะพบ cyanide ที่อยู่ในรูปของ glycoside มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำนมอยู่ในกระเปาะใต้ผิวหรือเปลือก สารประกอบ cyanogenic glycosides (CG) พบครั้งแรกเรียกว่า manihotoxin ในพืชพบว่ามีอยู่ถึง 12 ชนิด (Table 2) แต่ที่พบในมันสำปะหลังมีอยู่ 2 ชนิด คือ cyanogenic glycoside linamarin และ lotaustralin โดยทั่วไปในพืชจะมีปริมาณสารทั้งสองชนิดแตกต่างกัน ในมันสำปะหลังจะมี linamarin มากถึง 93% ส่วน Lotaustralin พบประมาณ 2-7% (อมรรัตน์และคณะ, 2550; Nartey, 1968) ดังแสดงการสังเคราะห์ linamarin (Figure 2) ดังนั้น กรด hydrocyanic ส่วนใหญ่จึงมาจาก linamarin

**Table 2** Structure of cyanogenic glycoside

| Glycoside | Sugar | Aglycone | Source |
|---|---|---|---|
| Amygdalin | Gentiobiose | D-Mandelonitrile | *Prunus* sp. |
| Prunasin | D-glucose | D-Mandelonitrile | *Prunus* sp., Many. *Rosaceae Eucalyptus* sp. |
| Sambunigrin | D-glucose | L-Mandelonitrile | *Sambucus nigra*, *Acacia* sp. (Australin) |
| Prulaurasin | D-glucose | DL-Mandelonitrile | *Vicia angustifolia* L. and other Vicia |
| Vicianin | Vicianose | D-Mandelonitrile | *Vicia angustifolia* L. and other Vicia |
| Dhuin | D-glucose | L-P-Hydroxymandelonitrile | *Sorghum* sp. |
| Taxiphyllin | D-glucose | D-P-Hydroxymandelonitrile | *Taxus* sp. |
| Zierin | D-glucose | m-Hydroxymandelonitrile | *Zieria laevigata* Sm. |
| Linamarin | D-glucose | α-Hydroxymandelonitrile | *Linum usitatissimum* L., *Phaseolus lunatus* sp., *Trifloliumrepens* L., *Lotus* sp., *Manihot* sp. |
| Lotaustralin | D-glucose | α-Hydroxy-α-methyl Butyronitrile (methylethyl ketone cyanohydrin) | See Linamarin |
| Acacipetalin | D-glucose | β-Dimenthyl-α-hydroxyacrylonitrile | *Acacia* sp. (South African) |
| Gynocardin | D-glucose | Gynocardinonitrile | *Gynocardia odorata*, Reinw |

ที่มา: Nartey (1968

จากการศึกษากระบวนการสังเคราะห์ทางชีวเคมีในต้น พบว่า cyanogenic glycoside ไม่ใช่สารสุดท้ายใน chemical pathway ซึ่งจาก cyanogenic glycoside จะสังเคราะห์เป็นสารอื่นต่อไปโดยไม่ปล่อยกรด hydrocyanic ออกมา ปกติแล้วกรด hydrocyanic จะเป็นพิษต่อพืช โดยจะไปยับยั้งกระบวนการหายใจของเซลล์ใน mitochondria โดยยับยั้งการทำงานของ cytochrome oxidase ในกระบวนการ electron transport system (ETS) ซึ่งยับยั้งการนำ oxygen ($O_2$) ในการรับ electron ของ hydrogen แต่ในมันสำปะหลังกรด hydrocyanic จะไม่เป็นพิษต่อเซลล์ เนื่องจาก กรด hydrocyanic สามารถเปลี่ยนเป็นกรดอะมิโนที่เป็นประโยชน์ในการเจริญเติบโต คือ cyanogenic aspartic acid, glutamic acid และ glutamine (Nartey, 1968) ซึ่งสารเหล่านี้เชื่อว่าเป็นสารสุดท้ายในกระบวนการสังเคราะห์ cyanogenic glycoside

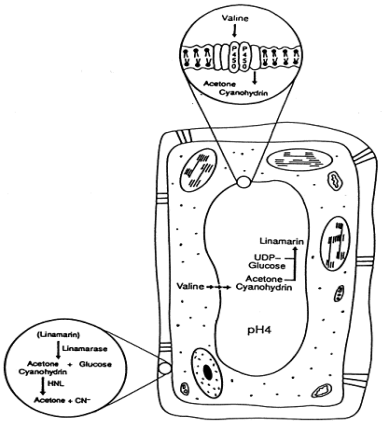


**Figure 2** Linamarin synthesis and cyanide product from mesophyll cell of cassava leave
ที่มา: McMahon และคณะ (1995) อ้างโดย Vetter (1999)

สารประกอบ cyanogenic glycoside ที่สังเคราะห์ได้นี้อยู่ในเนื้อเยื่อของพืชจะไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสัตว์ แต่ถ้าเซลล์เนื้อเยื่อของพืชถูกทำลายหรือถูกบดขยี้ จะเป็นการกระตุ้นเร่งให้มีการสลายตัวของสารประกอบนี้โดยเอนไซม์ลินามาเรส (linamarase) (β-glucosidase) ที่มีความจำเพาะต่อสับสเตรตสูง ซึ่งอยู่ในชั้น mesophyll cells เข้าไปไฮโดรไลซ์ cyanogenic glycoside ที่อยู่ใน vacuole ได้กลูโคส และ acetone cyanohydrin (**α**-hydroxynitrile) แต่ acetone cyanohydrin ไม่เสถียรจะถูกย่อยสลายต่อด้วยเอนไซม์ **α**-hydroxynitrile lyase (oxynitrilase) จนได้ ketone หรือ aldehyde และกรด hydrocyanic หรือ HCN (Figure 3) ส่วนการย่อยสลาย lotaustralin ก็ให้ผลิตภัณฑ์ทำนองเดียวกัน คือ กลูโคส เมทิลเอทิลคีโตน และกรด hydrocyanic ซึ่งกระบวนการเกิดกรด hydrocyanic อิสระนี้เรียกว่า cyanogenesis ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อผู้บริโภค หรือสัตว์

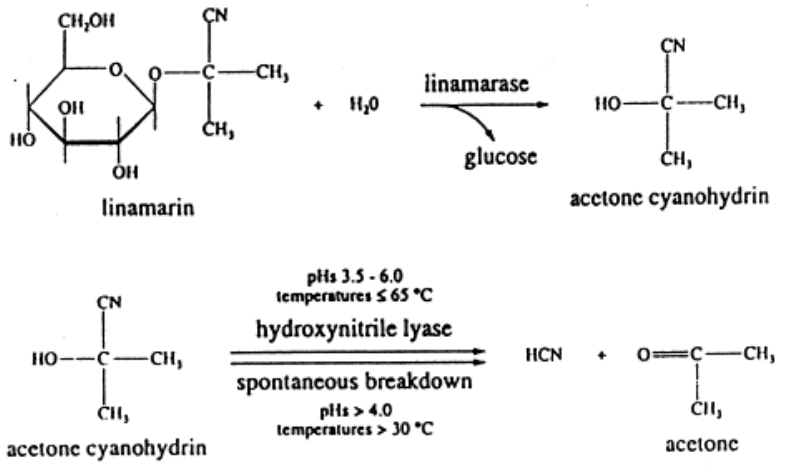


**Figure 3** Enzyme catalyzed degradation of cyanogenic glycosides (linamarin) to hydrocyanic acid
ที่มา: Nartey (1968)

ความเป็นพิษจะมีความรุนแรงแตกต่างกันแล้วแต่ปริมาณของการได้รับสารพิษ ชนิดสัตว์ และช่องทางที่ได้รับสารพิษ Nartey (1968) รายงานว่า การได้รับสารพิษทางเส้นเลือดจะแสดงอาการความเป็นพิษเร็วที่สุด (Table 3) นอกจากนี้ ขึ้นอยู่กับสภาพที่เหมาะสม โดยกระบวนการนี้เกิดได้ดีในสภาพที่มี pH 4 และอุณหภูมิ 35°C (Wanda *et al*., 1998)

**Table 3** Level of toxicity of HCN on some type of animals

| Species | Route | LD50 (mg/kg bw) |
|---|---|---|
| Mouse | IV | 0.99 (HCN) |
| Mouse | SC | 6.0 (KCN) |
| Mouse | IV | 2.5 (KCN) |
| Mouse | oral | 598 (NaSCN) |
| Rat | IV | 0.81 (HCN) |
| Rat | oral | 10-15 (KCN) |
| Rat | oral | 765 (NaSCN) |
| Rat | IP | 540 (NaSCN) |
| Guinea-pig | IV | 1.43 (HCN) |
| Guinea-pig | SC | 5.8 (NaCN) |
| Rabbit | IV | 0.66 (HCN) |
| Rabbit | SC | 2.2 (NaCN) |
| Cat | IV | 0.81 (HCN) |
| Dog | IV | 1.34 (HCN) |
| Dog | oral | 5.3 (KCN) |
| Dog | IV | 2.8 (NaCN) |
| Monkey | IV | 1.30 (HCN) |

ที่มา: Nartey (1968)

***บทบาทของกรด hydrocyanic ในมันสำปะหลัง***

นักวิชาการหลายท่านให้ความเห็นว่า cyanogenic glycoside ในมันสำปะหลังช่วยป้องกันการถูกทำลายโดยโรค และแมลง โดยเอนไซม์ linamarase จะเข้า hydrolyse สาร cyanogenic glycoside ได้กรด hydrocyanic ที่เป็นพิษ แต่จากการทดลองของ CIAT (1973) อ้างโดยเจริญศักดิ์ (2519) รายงานว่า พันธุ์ใดที่มีปริมาณสาร cyanogenic glycoside สูง โอกาสที่ถูกทำลายโดยไรกลับยิ่งมาก นอกจากนี้ โรคใบจุดและความต้านทานของเพลี้ยไฟต่อมันสำปะหลังไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณ cyanogenic glycoside อาจเนื่องมาจากภายในต้นมันสำปะหลังการสังเคราะห์ linamarin จากกรด valine จะเกิดที่ใบแล้วเคลื่อนย้ายมาสะสมในส่วนของราก แล้วเปลี่ยนเป็น acetone cyanohydrin รวมกับกรด cysteine และสุดท้ายของกระบวนการจะได้กรดแอมิโนที่เป็นประโยชน์ในการเจริญเติบโตคือ asparagine, aspartic acid, glutamic acid กับ glutamine (เจริญศักดิ์, 2519) (Figure 4) ดังนั้น เกี่ยวกับบทบาทของกรด hydrocyanic ในมันสำปะหลัง ควรที่ได้มีการศึกษาต่อไปในอนาคต

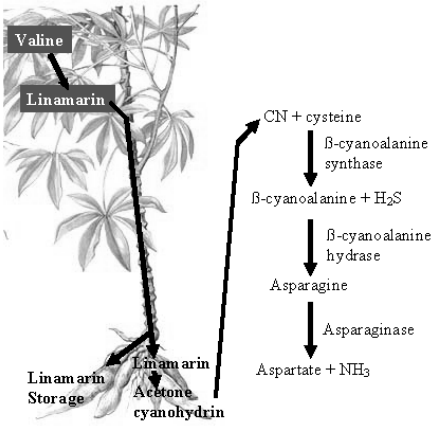


**Figure 4** Proposed pathway for the transportation of linamarin from the leaves to root and the reassimilation of cyanide into asparagine

ที่มา: Siritunga และ Sayre (2007)

***การสะสมของกรด hydrocyanic ในส่วนต่างๆ ของต้นมันสำปะหลัง***

จากการศึกษาการกระจายตัวของกรด hydrocyanic ในมันสำปะหลังพบว่า มีความแตกต่างกัน โดยทั่วไปพบในส่วนเปลือกของหัวมันสำปะหลังจะมีมากที่สุด (มากกว่าในเนื้อ 5-6 เท่า) รองลงมาเป็นเปลือกลำต้น ใบอ่อน ใบแก่ ก้านใบและเนื้อของหัว (Table 4) อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารนี้จะแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อม พันธุ์ วิธีการวิเคราะห์ แม้แต่ในพันธุ์เดียวกัน และต้นเดียวกันก็ยังมีความแปรปรวนในปริมาณ โดยทั่วไปการวิเคราะห์ออกมาเป็นปริมาณของกรด hydrocyanic ด้วยการไฮโดรไลซ์ cyanogenic glycoside โดยเอนไซม์ในหัวมันเอง (autolyse) หรือใช้สารประเภทกรด

**Table 4** Quantity of hydrocyanic acid in part of cassava

| Part of plant | Hydrocyanic acid | |
|---|---|---|
| | FW (mg/kg) | DW (mg/kg) |
| Young leave | 490 | 1,365 |
| Old leave | 380 | 1,055 |
| Stem | 150 | 417 |
| Outer bark | 535 | 1,486 |
| Outer tuber | 640 | 1,778 |
| Tuber | 140 | 390 |
| Cassava chip | - | 30 |
| Cassava pellet | - | 14 |
| Cassava hay | - | 275 |

ที่มา: ปรารถนา (2534)

***ไซยาไนด์ และพิษของไซยาไนด์***

ไซยาไนด์ (cyanide) เป็นสารเคมีที่สามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติ อาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารเคมีต่างๆ ในธรรมชาติหรือจากการขับถ่ายของเสียหรือจากการสลายตัวของสารประกอบบางชนิดในธรรมชาติโดยจุลินทรีย์พืชและสัตว์ (Newmont, 2002) ทั้งคนและสัตว์ที่ได้รับไซยาไนด์เข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่สูงจะเกิดพิษอย่างเฉียบพลันทำให้ตายได้แต่ถ้ากินในปริมาณที่ไม่มากจะเป็นพิษอย่างเรื้อรังทำให้สมรรถนะการผลิตลดลงและอาการอื่น ๆ อีกหลายอย่าง Burrows (2012) ได้อธิบายกลไกการเกิดพิษของไซยาไนด์เกิดจาก ไซยาไนด์จะจับกับโมเลกุลที่มีประจุบวก ที่สำคัญคือ โมเลกุลของเหล็ก (Fe) ซึ่งมีทั้ง Ferrous ($Fe^{2+}$) ซึ่งอยู่ใน hemoglobin ปกติและ Ferric ion ($Fe^{3+}$) ซึ่งอยู่ใน myoglobin ปกติ แต่ไซยาไนด์จะจับกับ $Fe^{3+}$ ได้ดีกว่า $Fe^{2+}$ ทำให้เมื่อ $CN^-$ เข้าสู่ร่างกายแล้วจะไปจับกับ $Fe^{3+}$ ใน myoglobin เนื่องจาก myoglobin ทำงานในระบบ electron transport system (ETS) ที่ mitochondria ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ คือ พลังงาน น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเมื่อไซยาไนด์จับกับ myoglobin จะขัดขวางไม่ให้กระบวนการ electron transport ทำงานได้ตามปกติ คือ ยับยั้งการทำงานของ เอนไซม์ cytochrome-oxidase และกระบวนการ phosphorylation oxidative ซึ่งขัดขวางการลำเลียงออกซิเจนและการถ่ายทอดอิเลคตรอนของการหายใจระดับเซลล์ (Cereda and Mattos, 1996) มีผลทำให้เซลล์ร่างกายขาดออกซิเจนและพลังงาน เซลล์ของร่างกายจึงอยู่ในสภาพของ anoxia และเกิดภาวะ lactic acidosis ในที่สุด โดยเฉพาะเซลล์ในระบบประสาทและสมองซึ่งเป็นอวัยวะที่ทนต่อภาวะ anoxia ได้น้อยที่สุด ผู้ป่วยจึงมักมีอาการทางสมองเช่น ชัก หมดสติ มีการหายใจผิดปกติเนื่องจากมีการกดศูนย์ควบคุมการหายใจ ทำให้คนและสัตว์ตายในที่สุด แต่ถ้าได้รับเข้าร่างกายในปริมาณที่ไม่มากจะเป็นพิษอย่างเรื้อรังทำให้สมรรถนะการผลิตลดลงและอาการอื่นๆ อีกหลายอย่าง ระดับค่าที่เป็นพิษของไซยาไนด์ในคนและสัตว์คือประมาณ 0.5 – 3.5 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมถึงจะเสียชีวิตได้ จากการรายงานของ สุรินทร์และคณะ (2546) พบว่าปริมาณไซยาไนด์ในหัวมันสำปะหลังสดที่ไม่ปลอกเปลือกมีค่าเท่ากับ 82.0 ppm ในขณะที่ Nguyen et al. (1997) พบปริมาณไซยาไนด์ในหัวมันสดค่อนข้างสูงกว่าคือ 114 ppm นอกจากนี้ Coursey (1973) ได้รายงานว่าปริมาณของกรดไซยาไนด์ในหัวมันสดอาจอยู่ในช่วงตั้งแต่ 15-400 ppm และสามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีกรดไซยาไนด์ต่ำ (10 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ของหัวสด) และกลุ่มที่มีกรดไซยาไนด์สูง (2000 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ของหัวสด) ทั้งนี้ความแตกต่างอาจเนื่องจาก อายุ และสายพันธุ์ของมันสำปะหลังที่ทำการปลูก

***อาการของสัตว์ที่ได้รับไซยาไนด์และแนวทางการลดไซยาไนด์***

อาการที่สัตว์ได้รับกรดไฮโดรไซยานิกในปริมาณมาก เช่น กระบือ สัตว์จะกระวนกระวายกล้ามเนื้อทั่วไปจะสั่นตามด้วยหายใจเร็ว บางตัวมีน้ำลายไหล อุจจาระ ปัสสาวะ ล้มตัวนอนอ้าปากหายใจ อาจจะชักก่อนตาย เมื่อผ่าซากจะพบว่าเลือดตกตะกอนช้าหรือไม่ตกตะกอนเลย และอาจมีจุดเลือดบนอวัยวะภายใน (ปรารถนา, 2534) และจากการศึกษาของ Soto-Blanco และคณะ (2002) พบว่าเมื่อแพะได้รับไซยาไนด์ระดับหนึ่ง จะมีอาการทางประสาทและตรวจพบว่าเซลล์ประสาทในสมองและไขสันหลังบางส่วนถูกทำลาย นอกจากนี้ Ragoobirsingh และคณะ (1993) ได้ทำการศึกษาโดยการให้อาหารที่มีลินามารินแก่สุนัข ปรากฏว่า ระดับเม็ดเลือดขาวของสุนัขลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ control และน้ำตาลในเลือดก็สูงขึ้นจนอยู่ในระดับที่อันตราย

แนวทางการแก้พิษและลดสารพิษในมันสำปะหลัง Bailey (1980) อ้างโดย ปรารถนา (2534) รายงานว่าในสัตว์ที่มีน้ำหนัก 225-450 กิโลกรัม กระทำอันใดอันหนึ่งดังนี้

- ฉีดโซเดียมไนไตร 2% 50-100 mL เข้าเส้นเลือด
- ฉีดไทโอซัลเฟต 20% 50-100 mL เข้าเส้นเลือด
- ฉีดเมททีลีนบลู 1% 100-450 mL เข้าเส้นเลือด

อาจจะให้ยาข้างต้นซ้ำอีกหลังจากให้ครั้งแรก 1-4 ชั่วโมง ปริมาณน้อยกว่าครั้งแรกเล็กน้อย นอกจากนี้ในร่างกายของคนและสัตว์ยังมีกระบวนการทำลายกรด HCN โดยในร่างกายนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกรดไฮโดรไซยานิกโดยอาศัย enzyme rhodanase จะพบอยู่ทั่วร่างกายแต่ส่วนมากจะพบในตับรวมตัวเข้ากับ colloid sulfur หรือ thiosulfate ได้เป็น thiocyanate ที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย Hammer และคณะ (2013) ได้อธิบายเกี่ยวกับกลไกการกำจัดไซยาไนด์โดยสารประกอบซัลเฟอร์ไว้ว่าเกิดจากปฏิกิริยาจาก sodium thiosulfate เพื่อจับกับไซยาไนด์ใน methemoglobin กลายเป็น thiocyanate โดยการกระตุ้นของเอนไซม์ rhodanese ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบได้ในเนื้อเยื่อตับส่วนของ mitochondria โดยพบทั่วไปในร่างกายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม จากนั้น thiocyanate ถูกขับออกทางแล้วขับออกทางปัสสาวะ เหงื่อ และน้ำลายต่อไป ดังแสดงใน Figure 5 ส่วนวิธีปฏิบัติโดยทั่วไปในการลดสารพิษไซยาไนด์ของมันสำปะหลังสามารถทำได้ง่ายๆ ด้วยวิธีที่ไม่ซับซ้อน เช่น การตากแดด หรือการให้ความร้อน โดยความร้อนที่ใช้มากกว่า 72 องศาเซลเซียส นั้น เอนไซด์ลินามาเรสจะเสียสภาพถูกทำลายไป (Wanda *et al*., 1998) แต่ในการนำมาบริโภคหรือให้สัตว์กิน สารไซยาโนเจนนิค ไกลโคไซด์ที่ยังคงเหลืออยู่อาจถูกไฮโดรไลซ์โดยเอนไซด์ที่มาจากพืชผักชนิดอื่นที่กินร่วมได้ ดังนั้นการเลือกพันธุ์มันที่มีปริมาณไซยาโนเจนนิค ไกลโคไซด์น้อยจึงน่าจะปลอดภัยกว่า แต่มีรายงานที่แสดงว่า กระบวนการต้ม การบดขยี้ และการตากแดดสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ลงได้ เช่น Emmanuel และคณะ (1982) ได้ทำการลดสารไซยาไนด์ในใบมันสำปะหลัง โดยวิธีการบดแล้วต้มเป็นเวลา 80 นาที สามารถลดไซยาไนด์ได้สูงถึง 60% และไม่มีปริมาณไซยาไนด์เหลืออยู่เลย ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ เมธา (2531) อ้างโดยปรารถนา (2534) ที่กล่าวว่า การบดขยี้แล้วตากแดด 2–3 วันทำให้กรดไฮโดรไซยานิกจาก 2,098 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เป็น 314 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งเป็นระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคหรือสัตว์ที่กิน และสามารถลดไซยาไนด์ได้ถึง 85% รวมถึงการนำไปอบโดยใช้ความร้อนมากกว่า 75 องศาเซลเซียส จะมีกรดไซยาไนด์เหลือเพียง 59.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ขอบเขตของความเป็นพิษนั้นจะขึ้นอยู่กับสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดที่มีความทนทานต่อสารพิษหนึ่งๆ ในปริมาณที่แตกต่างกันออกไป โดยส่วนใหญ่สัตว์ที่มีขนาดร่างกายใหญ่จะสามารถทนพิษได้มากกว่าสัตว์ที่มีขนาดเล็ก แต่ก็เป็นที่ยอมรับกันว่าไซยาไนด์เป็นสารพิษรุนแรงที่ทำให้คนหรือสัตว์ที่บริโภคไซยาไนด์50–60 mg/Day อาจมีอันตรายถึงตายได้ (ยุพดี, 2539)

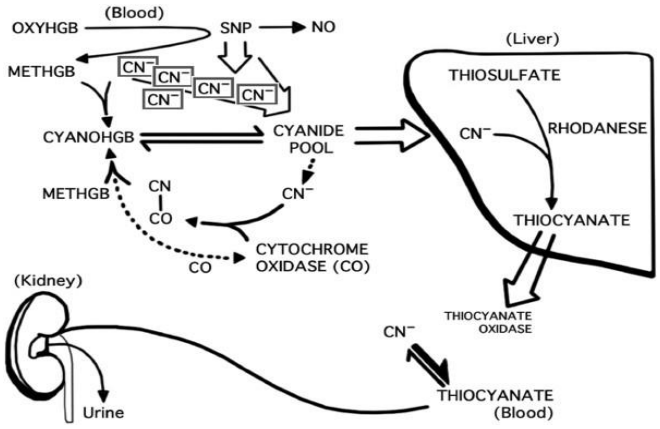


**Figure 5** Mode of action of cyanide detoxification to thiocyanate in liver cell
ที่มา: Hammer และคณะ (2013)

นอกจากนี้ จากการศึกษาของ สุรินทร์ และคณะ (2546) ซึ่งได้ทำการศึกษาแนวทางการลดกรดไซยาไนด์ในหัวมันสำปะหลังสดโดยทำให้เอนไซม์ลินามาเรสสลายตัวไม่สามารถกลับมาย่อยสลายสาร cyanogenic glycoside เพื่อให้เปลี่ยนเป็นไซยาไนด์ได้ พบว่า การใช้ความร้อนที่ 30 องศาเซลเซียส และ pH 5 ในเวลา 30 นาที จะทำให้เอนไซม์มีการเสื่อมสภาพลงได้ และการนำหัวมันสำปะหลังสดมาด้วยเชื้อรา *Aspergillus niger* และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* กับ *Candida* sp. พบว่า จะมีปริมาณโปรตีนหยาบ 8-10 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณของกรดไซยาไนด์ 4.0 ppm ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์ (จรัญ และจรูญ, 2530) สอดคล้องกับ Boonnop และคณะ (2009) ศึกษาการนำมันสำปะหลังสดมาหมักด้วยเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ที่เลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อแบบกึ่งแข็ง-กึ่งเหลว นาน 132 ชั่วโมง พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณโปรตีนขึ้น 13.5 เปอร์เซ็นต์ และยังสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ได้ นอกจากนี้ หัวมันสำปะหลังสามารถทำการจัดเก็บรักษาไว้ให้คงสภาพได้นานในรูปแบบของการหมัก ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถทำลายสารพิษในมันสำปะหลังและยังสามารถเพิ่มปริมาณโปรตีนในมันสำปะหลังได้สูงขึ้นถึง 10-25 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ *Aspergillus niger*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus* spp. และ *Rhizopus oyzae* (อุษณีย์ภรณ์ และคณะ, 2550) และปริวัฒน์ (2555) ศึกษาการใช้หัวมันสำปะหลังสดร่วมกับหญ้าเนเปียร์หมักด้วยเชื้อรา *Aspergillus niger* และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในอาหารโคเนื้อ พบว่ามีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อต่ำกว่ากลุ่มควบคุม ขณะที่ สิทธิศักดิ์ และอุทัย (2553) ได้นำหัวมันสำปะหลังสดมาหมักโดยการสับให้ละเอียดแล้วบรรจุลงในถุงพลาสติก ไล่อากาศ และปิดให้แน่นหมักไว้นาน 30 วัน ก่อนจะนำมาให้แก่โคนมสาว พบว่าการเสริมหัวมันสดหมักทดแทนมันเส้นในสูตรอาหาร สามารถปรับปรุงกระบวนการหมักในรูเมน เพิ่มอัตราการเจริญเติบโต และลดต้นทุนด้านอาหารเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่มีการทดแทน

ปัจจุบันมีการใช้นวัตกรรมการลดกรดไซยาไนด์ด้วยการใช้ซัลเฟอร์ (sulfur, S) พบว่าซัลเฟอร์ยังมีบทบาทต่อการกำจัดสารพิษไซยาไนด์ที่สัตว์ได้รับจากอาหาร โดยการทำลายไซยาไนด์นั้นเกิดขึ้นโดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์ rhodanase และ $\beta$ – mercaptopyruvate ที่มีอยู่ในเซลล์ของตัวสัตว์และจุลินทรีย์ในรูเมนสามารถสร้างขึ้นได้บางส่วน (Frankenberg, 1980) สำหรับเอนไซม์ rhodanase ถือเป็น sulfur transferase ที่สามารถเร่งให้เกิดการสร้าง thiocyanate จากไซยาไนด์ จากนั้น thiocyanate จะถูกขับออกทางปัสสาวะและถือเป็นการลดสารพิษของไซยาไนด์ได้ จากรายงานจาก NRC (2001) พบว่าสัตว์เคี้ยวเอื้องที่ได้รับวัตถุดิบอาหารที่มีสารไซยาไนด์ เช่น มันสำปะหลัง หรือข้าวฟ่าง มีความจำเป็นที่จะต้องเสริมซัลเฟอร์ในระดับที่เพิ่มขึ้นเพื่อที่จะช่วยในการลดความเป็นพิษของไซยาไนด์ลง โดยปริมาณความต้องการซัลเฟอร์เพื่อใช้ในการลดไซยาไนด์ของเอนไซม์ rhodanese ในเซลล์ตับประมาณ 1.2 กรัมของซัลเฟอร์ต่อไซยาไนด์ที่ถูกย่อย (Wheeler *et al*., 1975)

ผลของระดับความเข้มข้น thiocyanate ในเลือดของสัตว์ที่ได้รับอาหารที่มีไซยาไนด์จากแหล่งต่างกัน (Table 5) กรณีที่สัตว์ได้รับวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีส่วนประกอบของไซยาไนด์ไม่สูงมากนัก จุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนอาจสามารถกำจัดไซยาไนด์ออกนอกร่างกายโดยเปลี่ยนเป็น thiocyanate ได้เอง อนันต์ และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาการเสริมแหล่งของไซยาไนด์ที่มากจากยอดมันสำปะหลังสดหมักที่ระดับ 4 กิโลกรัมต่อวัน พบว่า โคนมจะมี thiocyanate ในน้ำนมเพิ่มขึ้น 70.8 เปอร์เซ็นต์ ส่วน Punthanara และคณะ (2009) ได้ทำการเสริมใบมันสำปะหลังแห้งในโคนมที่ระดับ 3 กิโลกรัมต่อวัน พบว่าจะส่งผลทำให้ค่าความเข้มข้นของไทโอไซยาเนตในน้ำนมเพิ่มขึ้น 56 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่มีการเสริมใบมันสำปะหลังแห้ง ในขณะที่ Srisaikham และคณะ (2018) ที่ได้ทำการเสริมเปลือกมันสำปะหลังสดที่ระดับ 1 กิโลกรัมต่อวัน (ปริมาณไซยาไนด์ที่ได้รับ 140 ppm ต่อวัน) จะส่งผลทำให้โคนมสามารถเปลี่ยนเป็น thiocyanate ได้สูงขึ้นถึง 50.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริม มากไปกว่านั้น Promkot และ Wanapat (2009) พบว่า การเสริมซัลเฟอร์ที่ระดับ 0.4 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารผสมสำเร็จที่มีใบมันสำปะหลังสดเป็นองค์ประกอบ 10 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีผลทำให้อัตราการสูญหายของไซยาไนด์และอัตราการผลิตสาร thiocyanate และอัตราการเปลี่ยนไซยาไนด์เป็น thiocyanate เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และจากการศึกษาแกะที่ปล่อยแทะเล็มแปลงข้าวฟ่างได้รับการเสริมซัลเฟอร์ระดับ 0.13 เปอร์เซ็นต์พบว่าไซยาไนด์เปลี่ยนเป็น thiocyanate ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Wheeler *et al*., 1983) สอดคล้องกับรายงานของ Cherdthong และคณะ (2018) พบว่าความเข้มข้นของ thiocyanate ในเลือดมีค่าเพิ่มขึ้น 4 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อเสริมซัลเฟอร์ 4 เปอร์เซ็นต์ในอาหารอัดก้อน นอกจากนี้ ฐิติพร และคณะ (2561) ได้ทำการเสริมซัลเฟอร์ที่ระดับ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ในสูตรอาหารผสมสำเร็จและเสริมมันสำปะหลังสดที่ระดับ 2 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักตัวในโครีดนม สามารถทำให้ค่าความเข้มข้นของ thiocyanate ในเลือดมีค่าเพิ่มขึ้นมากถึง 71.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับโคนมที่ไม่ได้รับการเสริมซัลเฟอร์ ดังนั้นการเสริมซัลเฟอร์ในสูตรอาหารผสมสำเร็จหมัก (fermented total mixed ration) ที่มีมันสำปะหลังสดเป็นองค์ประกอบหลัก ยังเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถเร่งอัตราการลดลงของปริมาณไซยาไนด์ในหัวมันสำปะหลังสดได้ Supapong และคณะ (2019) ได้ทำการศึกษาการเสริมซัลเฟอร์ที่ 2 เปอร์เซ็นต์ ในสูตรอาหารผสมสำเร็จหมักที่มีมันสำปะหลังสดเป็นองค์ 40 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการหมักที่ระยะเวลา 7 วัน จะส่งผลทำให้ค่าความเข้มข้นของ thiocyanate ในเลือดของโคเนื้อมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 40.3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่เสริมซัลเฟอร์ที่ 1 เปอร์เซ็นต์ และอาหารไม่ได้ผ่านการหมัก ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ซัลเฟอร์เข้าไปกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ rhodanase ที่ทำหน้าที่ในการทำลายสารพิษไซยาไนด์ให้กลายเป็นไทโอไซยาเนตได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นนอกจากความเป็นพิษของ

ไซยาไนด์จะไม่เกิดขึ้นกับสัตว์ที่ได้รับวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบแล้ว สัตว์ยังสามารถได้รับประโยชน์จากไทโอไซยาเนตที่เปลี่ยนมาจากไซยาไนด์อีกทางหนึ่งด้วย

**Table 5** Blood thiocyanate concentration in animals as affected by feed containing cyanide content

| Feedstuff | Feeding method | Sulfur level | Animal | Blood thiocyanate concentration | References |
|---|---|---|---|---|---|
| Cassava hay | Supplement 3 kg/d *vs* 0 kg/d | None | Cow | ↑56% | Punthanara *et al*. (2009) |
| Fresh cassava peel | Supplement 1 kg/d *vs* 0.5 kg/d | None | Cow | ↑50.4% | Srisaikham *et al*. (2018) |
| Fresh cassava root | Supplement 1.5% BW *vs* 1% BW | 4% in feed block | Beef cattle | ↑21.3% | Cherdthong *et al*. (2018) |
| Fresh cassava leaf | Inclusion 10% in TMR | 0.4% *vs* 0.15% in TMR | Beef cattle | ↑13.6% | Promkot and Wanapat (2009) |
| Fresh cassava root | Inclusion 40% in FTMR for 7 d vs 0 d | 2% *vs* 1% in TMR | Cattle | ↑40.3% | Supapong *et al*. (2019) |

ความเข้มข้นของ thiocyanate ในเลือดที่เพิ่มขึ้น หากมีการส่งผ่านไปยังน้ำนมโคพบว่าจะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำนม โดยไทโอไซยาเนตจะส่งผลกระตุ้นระบบการทำงานของ lactoperoxidase (LP) system (LPS) และจะทำลายจุลินทรีย์ทั้งแกรมบวก และแกรมลบได้ ทำให้ปริมาณจำนวนโซมาติกเซลล์ในน้ำนมลดลง (Zapico *et al*., 1995) ซึ่งสามารถยืดอายุ (shelf-life) การเก็บรักษาน้ำนมดิบให้นานขึ้น สำหรับกลไกในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์เริ่มขึ้นจาก thiocyanate ในน้ำนมจะถูกออกซิไดซ์ให้ได้เป็น hypothiocyanite และ hypothiocyanous acid จากนั้นไอโอดีนไอออนจะถูกออกซิไดซ์ต่อเป็น hypoiodite และ hypoiodous acid ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการยับยั้งจุลินทรีย์ในน้ำนม โดยสารทั้งสองชนิดจะมีกลไกในการยับยั้งคือการเข้าทำลายผนังเซลล์และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตและตายในที่สุด (Srisaikham *et al*., 2018) ดังนั้น การให้วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีไซยาไนด์เป็นส่วนประกอบในระดับที่เหมาะสม อาจนำไปสู่การผลิต thiocyanate และเพิ่มคุณภาพน้ำนมดิบของโคนมได้ จากการศึกษาในโคนมที่ได้รับการเสริมเปลือกมันสำปะหลังสดที่ระดับ 1 กิโลกรัมต่อวัน จะกระตุ้นให้ lactoperoxidase (LP) ในน้ำนมมีการทำงานดียิ่งขึ้น และส่งผลต่อการลดจำนวนแบคทีเรียรวมในน้ำนมจาก 2.51 x $10^5$ เหลือเพียง 1.98 x $10^4$ CFU เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเปลือกมันสำปะหลังสด (Srisaikham *et al*., 2018) ขณะที่การศึกษาของอนันต์ และคณะ (2555) พบว่าโคนมเมื่อได้รับการเสริมใบมันสำปะหลังหมัก จะส่งผลทำให้จำนวนโซมาติกเซลล์ในน้ำนมลดลงจาก 318 x$10^3$ เหลือ 72.3 x $10^3$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับ Punthanara และคณะ (2009) รายงานปริมาณจุลินทรีย์ในน้ำนมโคจะลดลงจาก 2.5 x $10^5$ เหลือ 1.3 x $10^5$ CFU ในโคนมที่ได้รับการเสริมใบมันสำปะหลังแห้งที่ระดับ 4 กิโลกรัมต่อวัน

**สรุปและข้อเสนอแนะ**

มันสำปะหลังเป็นพืชที่ให้ประโยชน์ได้มากมาย แต่มีข้อด้อยตรงที่มีสารพิษ คือ กรดไฮโดรไซยานิก ที่เป็นอันตรายต่อคนหรือสัตว์ ซึ่งทั้งคนหรือสัตว์ที่บริโภคมันสำปะหลังที่ยังสดหรือไม่ได้ผ่านกระบวนการลดพิษใดๆ เลย อาจทำให้เสียชีวิตได้ กรดไฮโดรไซยานิกในมันสำปะหลัง เกิดจากสาร ไซยาโนเจนนิค ไกลโคไซด์ 2 ชนิด คือ ลินามาริน กับโลทราสตราริน โดยมาจากลินามารินเป็นส่วนมาก สารทั้ง 2 ชนิดนี้จะอยู่ในเซลล์พืช ในภาพที่ไม่แสดงความเป็นพิษกับตัวพืช แต่ถ้าเซลล์พืชถูกทำลายจะเป็นการเร่งให้เอนไซด์เข้าทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์สารไซยาโนเจนนิค ไกลโคไซด์ แล้วปล่อยกรดไฮโดรไซยานิกออกมา ดังนั้นการทำลายเซลล์พืช เช่น การหั่น การบดขยี้ ควบคู่กับการตากแดด 2–3 วัน หรือการให้ความร้อน เช่น การอบ การนึ่ง ที่อุณหภูมิมากกว่า 72 องศาเซลเซียส จะสามารถลดสารพิษไฮโดรไซยานิคได้อย่างรวดเร็ว จนอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดพิษต่อคนและสัตว์ นอกจากนี้ การเสริมซัลเฟอร์สามารถลดปริมาณไซยาไนด์ในวัตถุดิบอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง ซึ่งถือเป็นนวัตกรรมใหม่ที่จะได้มาซึ่งกลยุทธ์ในการลดพิษไซยาไนด์ ตลอดทั้งยังส่งผลดีต่อคุณภาพน้ำนมของโคนมด้วย แต่ทั้งนี้ก็ต้องคำนึงถึงปริมาณที่เหมาะสมต่อการลดพิษและความสามารถในการกำจัดพิษของร่างกายสัตว์ด้วย อย่างไรก็ตาม การศึกษาวิธีในการลดสารพิษอย่างมีประสิทธิภาพ ปริมาณสารไซยาไนด์ระเหยออกทั้งหมด แต่ก็ยังไม่ทราบว่าสารไซยาโนเจนนิค ไกลโคไซด์ที่เหลือจะมีผลต่อผู้บริโภคหรือสัตว์ที่กินหรือไม่ ซึ่งถ้าได้ใช้พันธุ์มันสำปะหลังที่มีปริมาณไซยาโนเจนนิค ไกลโคไซด์ต่ำ เกษตรกรหรือผู้ที่สนใจจะมั่นใจมากขึ้นในการนำส่วนต้นของมันสำปะหลังไปใช้ได้อย่างมีศักยภาพมากขึ้น

**เอกสารอ้างอิง**


กฤตพล สมมาตย์ เมธา วรรณพัฒน์, ฉลอง วชิราภากร, ศักดิ์สิทธิ์ จันทร์ไทย และเวชสิทธิ์ โทบุราณ. 2534. ความสามารถในการย่อยสลายอินทรียวัตถุของอาหารพลังงานในกระเพาะหมักของโคและกระบือ. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 29. ระหว่างวันที่ 4-7 กุมภาพันธ์ 2534.

จรัญ เจตนะจิตรและ จรูญ คำนวณตา. 2530. การเพิ่มโปรตีนในมันสำปะหลังโดยการหมัก I. หมักด้วยเชื้อรา *Aspergillus niger* และ ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* and *Candida* sp. ในระดับชาวบ้าน. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 25 สาขาวิทยาศาสตร์ 3-6 กุมภาพันธ์ 2530 ณ อาคารศูนย์เรียนรวม วิทยาเขตบางเขน.

จรุงสิทธ์ ลิ่มศิลา และอัจฉรา ลิ่มศิลา. 2537. ประวัติการแพร่กระจายความสำคัญและดินฟ้าอากาศที่เหมาะสม การสัมมนาเรื่อง ปัญหาการผลิต การใช้มันสำปะหลัง และการลดต้นทุนการผลิต สิงหาคม 2537, หน้า 173-176.

เจริญศักดิ์ โรจนฤกธิ์พิเชษฐ์. 2519. มันสำปะหลัง. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน.

ฐิติพร ไกรโสดา, ทิพย์วดี ประไพวงษ์, วุฒิกร สระแก้ว, หทัยชนก อินทร์สูงเนิน, และฉลอง วชิราภากร. 2561. ผลของการเสริมหัวมันสาปะหลังสดร่วมกับกามะถันต่อสมรรถนะการให้ผลผลิตน้ำนม และเมแทบอไลต์ในเลือดของโครีดนม. วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร. 35 (พิเศษ 2):98-108.

ดนัย ศุภหาร. 2537. พฤกษศาสตร์และพันธุ์ของมันสำปะหลัง. การสัมมนาเรื่อง ปัญหาการผลิต การใช้มันสำปะหลัง และการลดต้นทุนการผลิต. สิงหาคม 2537, หน้า 173.

ธาตรี จีราพันธุ์. 2550. อาหารและการให้อาหารสัตว์. ภาควิชาเทคโนโลยีเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์,นครสวรรค์.

ปรารถนา พฤษะศรี. 2534. การใช้ใบมันสำปะหลังตากแห้งเป็นอาหารกระบือ. ว. โค-กระบือ (พฤศจิกายน–ธันวาคม 2534). 14(6):24-28.

ปริวัฒน์พรโสภิณ. 2555. การใช้หัวมันสำปะหลังสดหมักเชื้อจุลินทรีย์เป็นอาหารโคเนื้อและสุกรเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตกาฬสินธุ์.

ยุพดี สิทธิบุศย์. 2539. ความเป็นพิษของมันสำปะหลัง. นสพ. กสิกร, (พฤศจิกายน–ธันวาคม 2539). 69(6):572–575.

สาโรช ค้าเจริญ. 2547. อาหารและการให้อาหารสัตว์ไม่ เคี้ยวเอื้อง. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ม.ป.ป. http: www.oae.go.th สำนักงานเศรษฐกิจ การเกษตร. [6/7/2004].

สุรินทร์ ตั้งมั่นคงวรกุล, สุวิช ศิริวัฒนโยธิน และวีระ โลหะ. 2546. การสลายตัวของสารไซยาไนด์ในหัวมันสำปะหลังบดด้วยเอนไซด์ที่มีอยู่เอง. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. 26:475-486.

สิทธิศักดิ์ คำผา และอุทัย โคตรดก. 2533. การวิจัยการใช้หัวมันสำปะหลังสดทดแทนมันเส้นในอาหารข้นสำหรับโคนมสาว. มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.

อนันต์ เพชรล้ำ, สุรชัย บุญลือ, วีระชัย ทองดี, คณาวิทย์ ปะทะโน, พนมพร วงศ์เชียงเพ็ง, มาโนช กองเย็น, อนุรักษ์ ผมไผ และลัดดา ผมศักดิ์. 2560. ผลของการเสริมยอดมันสำปะหลังหมักต่อปริมาณและคุณภาพน้ำนมของโครีดนมในฟาร์มเกษตรกรรายย่อย. แก่นเกษตร. 40 ฉบับพิเศษ 2:114-117.

อมรรัตน์ พรหมบุญ, สุนันทา รัตนาโภ และทิพย์มนต์ ภัทราคร. 2550. พิษไซยาไนด์อันตรายจริงหรือ. ใน: นิทรรศการงานวิจัยบนเส้นทางงานวิจัย มหาวิทยาเกษตรศาสตร์ ภาควิชาชีวเคมีคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อุษณีย์ภรณ์ สร้อยเพ็ชร์, เทอดศักดิ์คำเหม็ง, ฉลอง วชิราภากร และ วิชัย ลีลาวัชรมาศ. 2550. การใช้มันสำปะหลังหมักกึ่งแห้งด้วยเชื้อรา *Aspergillus niger* เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ในสูตรอาหารเป็ดเนื้อ. การประชุมวิชาการสัตวศาสตร์. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

Boonnop, K., M. Wanapat, N. Nontaso, and S. Wanapat. 2009. Enriching nutritive value of cassava root by yeast fermentation. Sci. Agric. 66:616-620.

Brinker, A.M. and D.S. Seigler. 1989. Methods for the detection and quantitative determination of cyanide in plant materials. Phytochemical Bulletin. 21:24-31.

Burrows, G.E., and R.J. Tyrl. 2012. RosaceaeJuss. In Toxic Plants of North America, Second Edition, Wiley Blackwell, Oxford, UK. doi:10.1002/9781118413425.ch64.

Cereda, M.P. and M.C.Y. Mattos. 1996. Linamarin-The Toxic Compound of Cassava. J. Venom. Anim. Toxins,. 2 (1):15-19.

Chanjula, P., W. Ngampongsai, and M. Wanapat. 2007. Effects of replacing ground corn with cassava chip in concentrate on feed intake, nutrient utilization, rumen fermentation characteristics and microbial populations in goats. Asian-Aust. J. Anim. Sci. 20: 1557–1566.

Cherdthong, A., B. Khonkhaeng, A. Seankamsorn, C. Supapong, M. Wanapat, N. Gunun, P. Gunun, P. Chanjula and S. Polyorach. 2018. Effects of feeding fresh cassava root with high-sulfur feed block on feed utilization, rumen fermentation and blood metabolites in Thai native cattle. Trop. Anim. Health Prod. 50:1365-1371.

Coursey, D.G. 1973. Cassava as food: Toxicity and Technology. In Proceedings of an International Workshop, Chronic cassava toxicity, Development and Research Center, Ottawa, London. pp. 89-96.

Ragoobirsingh, D., H.M. Robinson and E.Y.St.A. Morrison. 1993. Effects of cassava cyanoglucoside, linamarin, on blood sugar levels in the dog. The Journal of Nutritional Biochemistry. 4:625-629.

Emmanuel, N., M. Maduagwu and I.B. Umoh. 1983. Detoxification of cassava leaves by simple traditional methods. J. Toxicology. 15:335-339.

Frankenberg, L. 1980. Enzyme therapy in cyanide poisoning: Effect of rhodanese and sulfur compounds. Arch. Toxical. 45:315-323.

Nartey, F. 1968. Studies on cassava, Manihot utilissima Pohl-I. Cyanogenesis: The biosynthesis of linamarin and lotaustralin in etiolated seedlings. Phytochemistry 7:1307-1312.

Hammer, G.B., S.G. Connolly, S.R. Schulman, A. Lewandowski, C.Cohane, T.L. Reece, R. Anand, J. Mitchelland, and D.R. Drover. 2013. Sodium nitroprusside is not associated with metabolic acidosis during intraoperative infusion in children. BMC. Anesth. 13:2253-2259.

Hughes. MA., J. Hughes, S. Liddle, and Z. Kerestessy. 1994. Biochemistry and molecularbiology of cyanogenesis. In CIAT. The Cassava Biotechnology Network. Vpl. II. Proceedings of the Second International Scientific Meeting.August 22-26, 1994. Bogor, Indonesia. pp. 385-395.

Nambisan. 1994. Evaluation of the effect of various processing techniques on cyanogen content reduction cassava. 42:18-25.

Newmont. 2002. Cyanide. Available: https://goo.gl/ zSVwTN. Accessed Sep. 20, 2016.

Nguyen, T.L., R.B. Ogle, and T.R. Preston. 1997. Cassava root silage for crossbred pigs under village conditions in Central Vietnam. Livest. Res. Rural Dev. 9:2-9.

NRC. 2001. Nutrient requirements of dairy cattle. 7th Ed. National Academic Press, Washington DC.

Okafor. 2004. Determination of the hydrolytic activity of *Achatina achatina* β-glucosidease toward some Plant cyanogenic glycosides of some tropical plants. J. Cyanogenesis in plant. 9:401-405.

Promkot, C., and M., Wanapat. 2009. Effect of Elemental sulfur supplementation on rumen environment parameters and utilization efficiency of fresh cassava foliage and cassava hay in dairy cattle. Asian-Australas. J. Anim. Sci. 22:1366-1376.

Punthanara, S., P. Chairatanayuth, P. Vijchulata, S. Surapat, U. Kuntho, and W. Narongwanichakarn. 2009. Effects of cassava hay supplementation on antibacterial activity of the lactoperoxidase system in raw milk of dairy cows. Kasetsart J. Nat. Sci. 43: 486-496.

Soto-Blanco, B., P.C. Maiorka, and S.L. Górniak. 2002. Neuropathologic study of long term cyanide administration to goats. Food and Chemical Toxicology. 40:1693-1698.

Siritunga, D. and R. Sayre. 2007. Transgenic Approaches for Cyanogen Reduction in Cassava. Journal of AOAC International. 90: 1450-1454

Srisaikham, S., W. Suksombat, and P. Lounglawan. 2018. Fresh cassava peel in dairy cattle diet: Effects on milk production, hygienic quality of raw milk and somatic cell counts. Songklanakarin J. Sci. Technol. 40:977-984.

Supapong, C., A. Cherdthong, M. Wanapat, P. Chanjula and S. Uriyapongson. 2019. Effect of sulfur levels in fermented total mixed ration containing fresh cassava root on feed utilization, rumen characteristics, microbial protein synthesis and blood metabolites in Thai native beef cattle. Animals. 9:261.

Vetter, J. 1999. Plant cyanogenic glycosides. J. Toxicon. 38:11-36.

Wanapat, M., Petlum, A., Poungchompu, O., Rowlinson, P. and Toburan, W. 2001. Effect of level of cassava hay supplementation and concentrate use on milk yield and composition. In: Current Research and Development on Use of Cassava as Animal Feed M. Wanapat ed. Khon Kaen University, Khon kaen, July 23-24, 2001:68-68.

Wanda, L.B.W., D.I. Arias-Garzon, J.M. McMahon, and R.T. Sayre. 1998. Cyanogenesis in Cassava The Role of Hydroxynitrile Lyase in Root Cyanide Production. American Society of Plant. 116:1219–1225.

Wheeler, J.L., D.A. Hedges, and A.R. Till. 1975. A possible effect of cyanogenicglucoside in sorghum on animal requirement for sulfur. J. Agric. Sci. 84: 377-349.

Zapico, P., P. Gaya, M. Nuñez, and M. Medina.1995. Activity of Goat's milk lactoperoxidase system on Pseudomonas fluorescence and Escherichia coli at refrigeration temperatures. J. Food Prot. 58:1136-1138.