



สำนักพัฒนาอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

คู่มือการจัดการอาหารสัตว์ เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากระบบการเลี้ยงโคนม



นายจิระศักดิ์ ชอบแต่ง

เลขทะเบียนวิชาการ 67(2)-0214-026
ISBN 978-616-608-853-3

คู่มือการจัดการอาหารสัตว์เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบการเลี้ยงโคนม

เลขทะเบียนผลงานวิชาการ 67(2)-0214-026

ISBN 978-616-608-853-3

จัดทำโดย

นายจิระศักดิ์ ชอบแต่ง

สำนักพัฒนาอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

พ.ศ. 2567

พิมพ์ที่

โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด

145,147 ถนนเลียบเมืองนนทบุรี ตำบลตลาดขวัญ อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี 11000



คู่มือการจัดการอาหารสัตว์เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก
จากระบบการเลี้ยงโคนม

นายจิระศักดิ์ ชอบแต่ง

สำนักพัฒนาอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

คำนำ

อุตสาหกรรมโคนมทั่วโลกปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณ 2.7 เพอร์เซ็นต์ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก (FAO, 2023) ในห่วงโซ่การผลิตน้ำนมโคมีผู้มีส่วนได้ส่วนเสียมากมายและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเหล่านั้นก็มีส่วนในการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้น ความตระหนักรู้เกี่ยวกับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกที่มีต่อความปกติสุขของโลกของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเหล่านั้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญที่จะช่วยส่งเสริมให้ทุกคนบนโลกนี้ร่วมมือกันลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ

วิธีการที่จะลดก๊าซเรือนกระจกอย่างแท้จริงที่ไม่ใช่เป็นการผลักภาระก๊าซเรือนกระจกของตัวเองไปให้ผู้อื่นนั้นเป็นสิ่งที่อุตสาหกรรมโคนมต้องการ การประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกนั้นต้องอาศัยหลักการคิดเชิงระบบหรือการคิดตลอดห่วงโซ่อุปทานที่เริ่มตั้งแต่การแสวงหาทรัพยากรธรรมชาติเพื่อผลิตปัจจัยการผลิตของฟาร์ม การทำฟาร์ม การแปรรูปน้ำนม การขนส่ง รวมไปถึงการบริโภคและการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle assessment, LCA) เป็นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาจากแนวคิดการคิดเชิงระบบซึ่งจะช่วยแก้ไขปัญหการผลักภาระก๊าซเรือนกระจกจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียคนหนึ่งไปยังอีกคนหนึ่งหรือจากก๊าซเรือนกระจกชนิดหนึ่งไปเป็นก๊าซเรือนกระจกอีกชนิดหนึ่ง

อาหารสัตว์เป็นปัจจัยการผลิตที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบการผลิตน้ำนมโค โคนมต้องการอาหารสำหรับการดำรงชีพ การให้ผลผลิตน้ำนม การสืบพันธุ์และกิจกรรมอื่น ๆ ของโค การเลือกใช้อาหารคุณภาพดีที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับต่ำเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดก๊าซเรือนกระจกจากระบบการผลิตน้ำนมโคได้ นอกจากนี้ การปรับปรุงคุณภาพอาหาร การใช้สารเสริมเพื่อลดการผลิตก๊าซมีเทนจากระบบหมักย่อยอาหารของโคนม รวมไปถึงการจัดการของเสียที่มีประสิทธิภาพ กิจกรรมเหล่านี้ก็สามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรมโคนมได้เช่นกัน

คู่มือนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เจ้าหน้าที่ส่งเสริมของภาครัฐและเอกชน ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ตลอดจนเกษตรกรที่มีความสนใจเข้าใจถึงขั้นตอนวิธีการประเมินผลการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและใช้เป็นแนวทางในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบการผลิตน้ำนมโคได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	(1)
สารบัญ	(2)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(4)
บทนำ	1
บทที่ 1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับการเลี้ยงโคนมในประเทศไทย	3
- ประวัติการเลี้ยงโคนมในประเทศไทย	3
- แนวโน้มการเลี้ยงโคนมและการผลิตน้ำนมโคในประเทศไทย	4
- รูปแบบการเลี้ยงโคนมในประเทศไทย	6
บทที่ 2 ความสำคัญของอาหารโคนม	7
- ประเภทของอาหารโคนม	7
- หลักสำคัญในการประกอบสูตรอาหารสำหรับโคนม	9
บทที่ 3 การประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตน้ำนมโค	11
- หลักการประเมินก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตน้ำนมโค	11
- ค่าแฟกเตอร์ก๊าซเรือนกระจกของปัจจัยการผลิตของระบบการผลิตน้ำนมโค	15
บทที่ 4 การลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการใช้อาหารโคนม	17
- การผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์	19
- การจัดหาวัตถุดิบอาหารสัตว์	23
- การปรับปรุงคุณภาพอาหารโคนม	24
- การประกอบสูตรอาหารโคนม	24
- การให้อาหารโคนม	25
- การใช้สารเสริมสำหรับโคนม	29
- การจัดการของเสียในฟาร์มโคนม	32
บทที่ 5 ตัวอย่างการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตน้ำนมโค	38
- การผลิตหญ้าแห้งโกลาแห้ง	38
- การผลิตอาหารข้น	40
- การผลิตน้ำนมโค	42
เอกสารอ้างอิง	48

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าและส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นมระหว่างปี พ.ศ. 2556 – 2566 ของประเทศไทย	5
2	ค่า characterization factor สำหรับใช้ในการแปลงหน่วยของก๊าซเรือน กระจกชนิดต่าง ๆ ให้เป็นหน่วยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า	14
3	ตัวอย่างค่าแฟคเตอร์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปัจจัยการผลิตของ ระบบการผลิตน้ำมันโค	16
4	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์และสัดส่วนของก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิต วัตถุดิบอาหารโคนม	20
5	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของปุ๋ยเคมีชนิดต่าง ๆ	21
6	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัตถุดิบอาหารสัตว์สำหรับใช้เลี้ยงโคนม	26
7	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของไฟฟ้าในประเทศไทยแยกตามแหล่งผลิต	26
8	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของน้ำมันเชื้อเพลิงในประเทศไทยแยกตามประเภท	27
9	ปริมาณปัจจัยการผลิตและผลผลิตหญ้าแพงโกลาแห้งในพื้นที่ 1 ไร่ ในรอบ การผลิต 1 ปี	39
10	ปริมาณปัจจัยการผลิตและผลผลิตอาหารชั้นสำหรับใช้เลี้ยงโคนม	41
11	การคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของปัจจัยการผลิตสำหรับใช้ในการผลิต อาหารชั้นสำหรับใช้เลี้ยงโคนม	42
12	ข้อมูลฟาร์ม ปัจจัยการผลิตและผลผลิตของระบบการผลิตน้ำมันโค	44
13	แหล่งและค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตน้ำมันโค	47

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แนวโน้มของจำนวนโคนมทั้งหมดและแม่โครีดนมในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ.2556-2566	4
2	ชนิดของก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากกิจกรรมต่าง ๆ ของระบบการผลิต นํ้านมโค	17
3	ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการผลิตนํ้านมและค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของ นํ้านมโคมาตรฐาน 1 กิโลกรัม	18
4	บ่อหมักย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ	34
5	เครื่องแยกกากมูลโคขนาดใหญ่	36
6	การฉีดมูลสัตว์เหลวเข้าสู่ได้ผิวดินในแปลงข้าวโพด	37
7	ตัวอย่างการไหลเวียนของวัสดุและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบ การผลิตหญ้าแพงโกลาแห้ง	38
8	ตัวอย่างการไหลเวียนของวัสดุและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบ การผลิตอาหารข้นสำหรับโคนม	41
9	ตัวอย่างการไหลเวียนของวัสดุและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบ การผลิตนํ้านมโค	43

บทนำ

การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศทำให้โลกเกิดสภาวะเรือนกระจกส่งผลให้อุณหภูมิของโลกเพิ่มสูงขึ้นและก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศซึ่งในท้ายที่สุดแล้วจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของโลกและความปกติสุขของมวลมนุษย์ (Gerber et al., 2013) ระบบการผลิตอาหารของโลกมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณ 30 เพอร์เซ็นต์ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดในโลก (FAO, 2023) ดังนั้น หากไม่สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบการผลิตอาหารลงได้ก็จะไม่สามารถบรรลุเป้าหมายในการป้องกันไม่ให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นมากกว่า 1.5 องศาเซลเซียส ภาคปศุสัตว์เป็นแหล่งของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญคิดเป็น 11 เพอร์เซ็นต์ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด (IPCC, 2019) และจากการที่ประชากรของโลกเพิ่มมากขึ้นผนวกกับสภาพทางเศรษฐกิจที่ดีขึ้นส่งผลให้ความต้องการบริโภคสินค้าปศุสัตว์เพิ่มมากขึ้นทำให้ต้องมีการผลิตสินค้าปศุสัตว์เพิ่มมากขึ้นเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการอาหารของมนุษย์ (UN, 2017)

น้ำนมโคและผลิตภัณฑ์นมเป็นสินค้าปศุสัตว์ที่มีความสำคัญที่มีการผลิตและบริโภคกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก อุตสาหกรรมโคนมมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในสัดส่วนที่สูงมากคิดเป็น 30 เพอร์เซ็นต์ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากภาคปศุสัตว์ทั้งหมด (Herrero et al., 2016) นอกจากนี้ การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากภาคปศุสัตว์มีสัดส่วนมากถึง 30 เพอร์เซ็นต์ของปริมาณก๊าซมีเทนทั้งหมด และ 88 เพอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนจากภาคปศุสัตว์เกิดจากกระบวนการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของสัตว์เคี้ยวเอื้อง นอกจากนี้การจัดการสิ่งขี้ถ่ายและของเสียที่ไม่ถูกต้อง ไม่เหมาะสมและไร้ประสิทธิภาพส่งผลให้เกิดก๊าซเรือนกระจกปริมาณมาก สิ่งขี้ถ่ายและของเสียจากฟาร์มโคนมมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากเป็นอันดับ 2 รองจากก๊าซมีเทนจากการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมน

ห่วงโซ่อุปทานน้ำนมโคประกอบด้วยหลายขั้นตอนเริ่มตั้งแต่การผลิตอาหารสัตว์ การนำอาหารไปเลี้ยงสัตว์และการจัดการของเสียและสิ่งขี้ถ่าย นอกจากอาหารโคนมแล้วในห่วงโซ่อุปทานน้ำนมโคยังมีการใช้ปัจจัยการผลิตอื่น ๆ อีกจำนวนมาก เช่น เชื้อเพลิงและไฟฟ้า เป็นต้น ขั้นตอนเหล่านี้ล้วนมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะมีก๊าซเรือนกระจกมากมายหลายชนิดแต่ในระบบการเลี้ยงโคนมมีก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญเพียง 3 ชนิด คือ ก๊าซมีเทน ก๊าซไนตรัสออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Grossi et al., 2019) โดยขั้นตอนต่าง ๆ ในห่วงโซ่อุปทานน้ำนมโคมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่างชนิดกันในปริมาณที่แตกต่างกัน เช่น ก๊าซก๊าซเรือนกระจกที่เกี่ยวข้องกับตัวสัตว์ ได้แก่ ก๊าซมีเทนที่เกิดจากกระบวนการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของสัตว์ ส่วนการผลิตและจัดหาวัตถุดิบอาหารสัตว์นั้นส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงและก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน และการจัดการสิ่งขี้ถ่ายและของเสียจะเกิดก๊าซไนตรัสออกไซด์และก๊าซมีเทน

การให้ความสำคัญเกี่ยวกับผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการเลี้ยงโคนมในประเทศไทยนั้นยังคงมีน้อยมากถึงแม้ว่าปัญหาที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก หรือ ภาวะโลกร้อน ได้ทวีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อย และจากการที่อุตสาหกรรมโคนมมีส่วน

ในการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกการหาแนวทางหรือมาตรการในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นสิ่งจำเป็นเร่งด่วนซึ่งนอกจากจะช่วยลดผลกระทบจากภาวะโลกร้อนแล้วยังมีส่วนช่วยให้ประเทศไทยประสบความสำเร็จในการเข้าสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนภายในปี พ.ศ. 2593 และเข้าสู่ภาวะการปลดปล่อยมลพิษเป็นศูนย์ในปี พ.ศ. 2608 ตามที่ได้ให้สัตยาบันไว้กับประชาคมโลก

คู่มือนี้มุ่งให้ความรู้และแนวทางการจัดการด้านอาหารโคนมเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเริ่มต้นตั้งแต่การผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์ การจัดหาอาหาร การปรับปรุงคุณภาพอาหารสัตว์ การประกอบสูตรอาหารสัตว์ การใช้สารเสริมอาหารสัตว์ ไปจนถึงการนำอาหารไปเลี้ยงสัตว์และสิ้นสุดที่การจัดการสิ่งขี้ถ่ายและของเสีย รวมไปถึงการให้ความรู้เกี่ยวกับวิธีการใช้เครื่องมือในการประเมินปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและแสดงตัวอย่างการประเมินปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก หรือ การประเมินค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตน้ำนมโค

บทที่ 1

ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับการเลี้ยงโคนมในประเทศไทย

การเลี้ยงโคนมในประเทศไทยจากอดีตจนถึงปัจจุบันมีพัฒนาการตามลำดับ ในบทนี้จะกล่าวถึง 3 ประเด็นสำคัญของการเลี้ยงโคนมในประเทศไทย ดังนี้ 1) ประวัติการเลี้ยงโคนมในประเทศไทย 2) แนวโน้มการเลี้ยงโคนมและการผลิตน้ำนมโคในประเทศไทย และ 3) รูปแบบการเลี้ยงโคนมในประเทศไทย

1.1 ประวัติการเลี้ยงโคนมในประเทศไทย

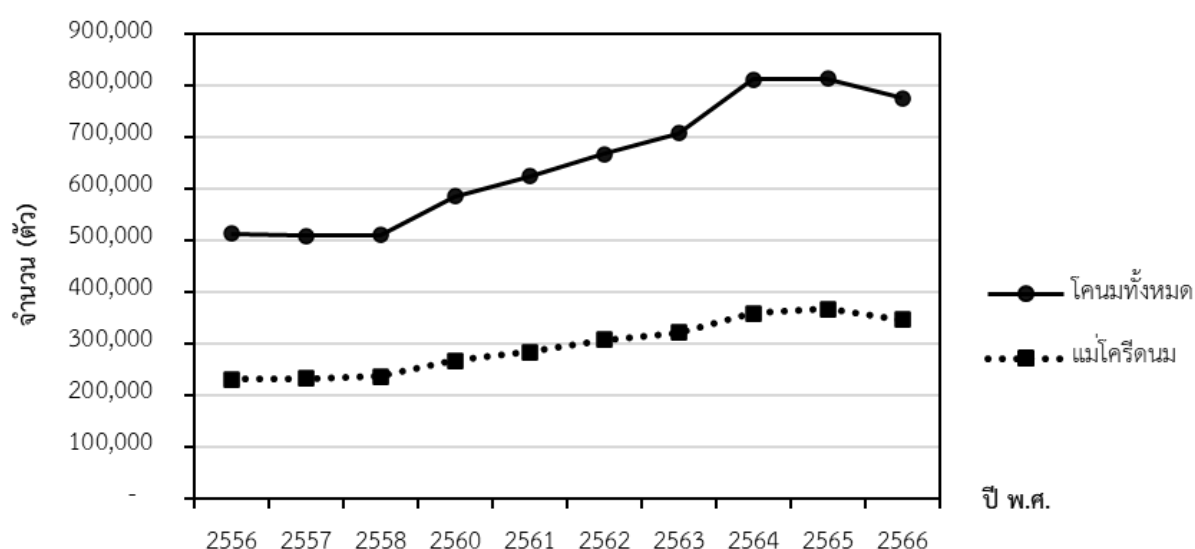
จากหนังสือ “การเลี้ยงโคนม” ซึ่งเป็นตำราการเลี้ยงโคนมเล่มแรกของประเทศไทยเขียนโดย ม.ร.ว. ชวนิศนดากร วรวรรณ (ชวนิศนดากร, 2534) กล่าวว่า ประวัติการเลี้ยงโคนมในประเทศไทยเริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2450 โดยชาวอินเดียที่อพยพเข้ามาอยู่ในประเทศไทยได้นำโคนมพันธุ์บังกาลาซึ่งเป็นโคอินเดีย (*Bos indicus*) มาเลี้ยงเพื่อรีดนมสำหรับการบริโภคในครัวเรือน โคเหล่านี้ให้ผลผลิตน้ำมน้อยและเพียงพอสำหรับการบริโภคในครัวเรือนเท่านั้น ต่อมาในปี พ.ศ. 2463 มีการทดลองเลี้ยงโคนมแบบยุโรปในพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์โดยหม่อมเจ้าสิทธิพร กฤดากร เพื่อผลิตนมสดบรรจุขวดขายให้กับผู้บริโภคในพื้นที่ จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2495 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ได้จัดตั้งฟาร์มโคนมเพื่อเป็นแหล่งผลิตน้ำนมและมีการจำหน่ายน้ำนมให้ผู้บริโภคในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล และในปี พ.ศ. 2504 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้ตั้งโรงงานแปรรูปน้ำนมเพื่อผลิตน้ำนมพาสเจอร์ไรส์บรรจุขวดเพื่อจำหน่ายเป็นแห่งแรกของประเทศไทย ต่อมาในปี พ.ศ. 2505 ได้มีการจัดตั้งฟาร์มโคนมไทย-เดนมาร์กขึ้นที่ตำบลมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี เพื่อเลี้ยงโคนมแบบธุรกิจและเป็นศูนย์ฝึกอบรมอาชีพการเลี้ยงโคนม การจัดตั้งฟาร์มโคนมไทย-เดนมาร์กมีส่วนช่วยกระตุ้นให้การเลี้ยงโคนมและการบริโภคน้ำนมโคในประเทศไทยขยายตัวอย่างกว้างขวางและเพิ่มมากขึ้น หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 การบริโภคน้ำนมโคในประเทศไทยขยายวงกว้างมากยิ่งขึ้น มีการนำเข้านมผงจากต่างประเทศเข้ามาเพื่อใช้สำหรับเลี้ยงทารกและใช้ในการผลิตนมข้นหวาน รัฐบาลในขณะนั้นเล็งเห็นถึงความสำคัญของอุตสาหกรรมน้ำนมโคจึงมีนโยบายส่งเสริมการเลี้ยงโคนมเพื่อให้มีน้ำนมโคเพียงพอกับความต้องการของผู้บริโภคที่เพิ่มขึ้น

การเลี้ยงโคนมในประเทศไทยมีการพัฒนาและขยายตัวอย่างมากหลังจากที่รัฐบาลไทยดำเนินโครงการ “นมโรงเรียน” ในปี พ.ศ. 2536 จำนวนโคนมและสมรรถนะการผลิตของโคนมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ หลายหน่วยงานของภาครัฐและเอกชนมีการส่งเสริมให้การเลี้ยงโคนมมีการบริหารจัดการฟาร์มอย่างเป็นระบบตามมาตรฐานการทำฟาร์มโคนมที่ดี และมีการเพิ่มผลผลิตภาพการผลิตน้ำนมอย่างต่อเนื่อง องค์การส่งเสริมการเลี้ยงโคนมแห่งประเทศไทย (อสมค.) และกรมปศุสัตว์ได้พัฒนาปรับปรุงพันธุ์โคนมในประเทศไทยโดยมุ่งไปที่การสร้างโคนมลูกผสมและได้ขยายพันธุ์โคนมให้เกษตรกรนำไปเลี้ยง การเลี้ยงโคนมในประเทศไทยมีการพัฒนาระบบการเลี้ยงเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน

1.2 แนวโน้มการเลี้ยงโคนมและการผลิตน้ำนมโคในประเทศไทย

จากข้อมูลสถิติของกรมปศุสัตว์ พบว่า ในปี พ.ศ. 2566 ประเทศไทยมีโคนมทั้งสิ้น 774,461 ตัว เป็นแม่โคนมจำนวน 418,782 ตัว (54.07 เปอร์เซ็นต์) โควสาวอายุ 1 ปีขึ้นไปจำนวน 156,614 ตัว (20.22 เปอร์เซ็นต์) และลูกโคอายุน้อยกว่า 1 ปี จำนวน 149,077 ตัว (19.25 เปอร์เซ็นต์) ข้อมูลในภาพที่ 1 แสดงให้เห็นว่า ในช่วง 2 ปีที่ผ่านมาจำนวนโคนมในประเทศไทยลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุส่วนหนึ่งเกิดจากการระบาดของโรคปากและเท้าเปื่อยและโรคลัมปีสกินรวมไปถึงการที่ต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นมากจนทำให้เกษตรกรหลายรายเลิกเลี้ยงโคนม

เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนโคนมย้อนหลังไป 10 ปี คือ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 - 2566 พบว่า ประชากรโคนมทั้งหมดในประเทศไทยเพิ่มขึ้นจาก 512,205 ตัว เป็น 724,473 ตัว และจำนวนแม่โครีดนมเพิ่มขึ้นจาก 229,899 ตัว เป็น 345,791 ตัว คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 41.44 และ 50.41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 1 แนวโน้มของจำนวนโคนมทั้งหมดและแม่โครีดนมในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ.2556-2566
ที่มา: กรมปศุสัตว์ (2566)

รายงานแผนปฏิบัติการด้านโคนมและผลิตภัณฑ์นมระยะที่ 1 (พ.ศ. 2564-2570) รายงานว่า ความต้องการบริโภคผลิตภัณฑ์นมของคนไทยเพิ่มขึ้น 1.07 เปอร์เซ็นต์ต่อปี อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำนมดิบที่ผลิตได้ในประเทศไม่เพียงพอต่อความต้องการบริโภค สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2566) รายงานข้อมูลการนำเข้า-ส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นมตั้งแต่ปี 2556-2566 (ตารางที่ 1) และพบว่า การนำเข้านมและผลิตภัณฑ์นมมีปริมาณและมูลค่าเพิ่มขึ้นทุกปี ในทางกลับกัน ปริมาณและมูลค่าการส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นมมีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบริโภคนมและผลิตภัณฑ์นมภายในประเทศมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 1 ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าและส่งออกนมและผลิตภัณฑ์นมระหว่างปี พ.ศ. 2556 – 2566 ของประเทศไทย

ปี พ.ศ.	นำเข้า		ส่งออก	
	ปริมาณ (กก.)	มูลค่า (บาท)	ปริมาณ (กก.)	มูลค่า (บาท)
2556	150,732,385	14,638,845,070	41,413,620	2,419,155,292
2557	169,522,748	19,033,610,541	39,228,482	2,116,764,895
2558	197,485,933	14,322,474,524	38,962,019	2,032,918,741
2559	176,064,014	10,641,748,757	39,382,355	1,928,186,397
2560	190,573,542	13,825,689,563	45,887,271	1,684,719,983
2561	199,734,311	13,079,943,989	29,806,945	1,522,268,544
2562	207,691,146	13,495,009,412	25,199,855	1,238,150,824
2563	202,154,746	14,639,211,966	19,449,357	1,191,330,686
2564	208,469,585	17,622,616,732	21,899,886	1,484,712,605
2565	207,000,392	23,879,360,758	21,531,540	1,453,361,212
2566	200,922,011	18,707,626,613	21,188,563	1,500,038,868

ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2566)

ในปัจจุบันถึงแม้ว่าปริมาณการผลิตน้ำนมของประเทศไทยจะยังไม่เพียงพอกับความต้องการบริโภคของคนไทยแต่ประเทศไทยสามารถผลิตน้ำนมโคดิบได้มากถึง 1.2 ล้านตันต่อปี สร้างมูลค่าให้กับอุตสาหกรรมโคนมมากกว่า 22,800 ล้านบาท มูลค่าจากอุตสาหกรรมโคนมได้ถูกปันส่วนให้กับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียตลอดห่วงโซ่อุปทานน้ำนม ได้แก่ เกษตรกรผู้ผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์ โรงงานอาหารสัตว์ ฟาร์มโคนมและการค้าปลีกผลิตภัณฑ์นม เป็นต้น ในปัจจุบันอัตราการบริโภคนมและผลิตภัณฑ์นมของคนไทยเฉลี่ยเท่ากับ 18 ลิตรต่อคนต่อปี และมีการกำหนดยุทธศาสตร์ให้อัตราการบริโภคเพิ่มขึ้นเป็น 25 ลิตรต่อคนต่อปี ภายในปี พ.ศ. 2569 ซึ่งนับว่าเป็นโอกาสของอุตสาหกรรมน้ำนมโคในประเทศไทย นอกจากนี้ โครงการนมโรงเรียนที่ดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536 โดยรัฐบาลไทยได้กำหนดหลักเกณฑ์ที่สำคัญไว้ประการหนึ่ง คือ นมโรงเรียนต้องใช้น้ำนมดิบที่ผลิตในประเทศเท่านั้น นับว่าเป็นการเปิดโอกาสทางการตลาดให้กับเกษตรกรผู้เลี้ยงโคนมของประเทศไทย

1.3 รูปแบบการเลี้ยงโคนมในประเทศไทย

รูปแบบการเลี้ยงโคนมในประเทศไทยมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับความสามารถในการเข้าถึงทรัพยากรและความสามารถในการจัดการฟาร์มของเกษตรกร อย่างไรก็ตาม การเลี้ยงโคนมในประเทศไทยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

1) การเลี้ยงแบบผูกยืนโรง การเลี้ยงโคนมในรูปแบบนี้แม่โคนมถูกเลี้ยงผูกไว้ในโรงเรือนโดยการล่ามคอหรือยึดไว้กับขื่อของเดี่ยว แม่โคจะกินอาหาร นอนพัก รีดนมและคลอดลูกในช่องที่เลี้ยงผูกเอาไว้

2) การเลี้ยงแบบกึ่งขังกึ่งปล่อย ในรูปแบบนี้แม่โคจะถูกเลี้ยงผูกยืนโรง หลังรีดนมตอนเช้าจะปล่อยโคออกแทะเล็มแปลงหญ้า และจะต้อนโคกลับมาเลี้ยงผูกยืนโรงในตอนเย็นอีกครั้งหนึ่งจนกว่าจะถึงเวลาปล่อยในตอนเช้าของวันรุ่งขึ้น ระหว่างที่แม่โคถูกผูกยืนโรงในคอกหรือปล่อยในบริเวณที่จำกัดเกษตรกรจะนำหญ้าและอาหารสัตว์มาให้โคกินเพิ่มเติม

3) การเลี้ยงแบบปล่อยอิสระในคอก ในรูปแบบนี้แม่โคนมถูกปล่อยอิสระอยู่ในคอก สามารถเดินไปไหนมาไหนได้ภายในบริเวณที่จำกัด พื้นที่บางส่วนจะแบ่งเป็นที่นอนและที่กินอาหาร ส่วนการรีดนมแม่โคจะถูกนำไปรีดนมในพื้นที่หรือส่วนของโรงเรือนที่จัดเอาไว้เป็นการเฉพาะ

ปัจจุบันรูปแบบการเลี้ยงโคนมในประเทศไทยเป็นการเลี้ยงแบบปล่อยอิสระในคอกทั้งนี้เนื่องจากเกษตรกรส่วนใหญ่มีพื้นที่จำกัดไม่สามารถทำแปลงหญ้าเพื่อปล่อยให้โคแทะเล็มได้ นอกจากนี้ การปล่อยโคแทะเล็มแปลงหญ้ายังมีความเสี่ยงด้านสุขภาพของโคนมที่เกิดจากการรุกรานของเห็บจนเป็นสาเหตุให้โคเป็นไข้เห็บ ส่วนการเลี้ยงแบบผูกยืนโรงก็ยังคงมีอยู่ถึงแม้ว่าสัดส่วนจะลดน้อยลงไปตามลำดับ สำหรับการเลี้ยงแบบกึ่งขังกึ่งปล่อยนั้นมีจำนวนน้อยมากเนื่องจากข้อจำกัดในการปล่อยสัตว์แทะเล็มแปลงหญ้า

ยุทธศาสตร์ชาติหรือหญ้าพื้นเมืองในช่วงหน้าฝนและฟางข้าวในช่วงหน้าแล้งรวมไปถึงวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรและอาหารจัดเป็นแหล่งอาหารหายากที่สำคัญสำหรับใช้เลี้ยงโคนมของเกษตรกรรายย่อย อาหารหายากเหล่านี้ส่วนใหญ่มีคุณภาพต่ำและมีสารอาหารไม่เพียงพอความต้องการของโคนม ในการนี้เกษตรกรแก้ปัญหาโดยการเพิ่มปริมาณการให้อาหารชั้นกับแม่โคนม การใช้อาหารชั้นในปริมาณมากเกินไปนั้นนอกจากจะทำให้ต้นทุนการผลิตน้ำนมเพิ่มขึ้นแล้วยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพแม่โคอีกด้วย นอกจากนี้ หากมีรวมเอาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกระบวนการให้อาหารชั้นจะทำให้ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดห่วงโซ่อุปทานของน้ำนมโคเพิ่มขึ้นด้วย

การเลี้ยงโคนมให้ประสบความสำเร็จนั้นเกษตรกรต้องให้ความสำคัญกับการจัดการอาหารสัตว์ ในการนี้ขอแนะนำให้เกษตรกรและผู้สนใจศึกษาหาความรู้ด้านอาหารโคนมเพิ่มเติมจากหนังสือเรื่อง “ความต้องการโภชนะของโคนมในประเทศไทย” ซึ่งเป็นแหล่งความรู้ด้านการจัดการอาหารโคนมที่สามารถใช้เป็นข้อมูลในการเพิ่มประสิทธิภาพการให้อาหารโคนมในประเทศไทยได้เป็นอย่างดี (คณะกรรมการความต้องการโภชนะของโคนมในประเทศไทย, 2563)

บทที่ 2

ความสำคัญของอาหารโคนม

การจัดการอาหารโคนมเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญซึ่งนอกจากจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและผลิ ภาพการผลิตของฟาร์มโคนมแล้วยังส่งผลต่อผลกำไรของการทำฟาร์มรวมไปถึงการส่งผลต่อ คุณภาพของ สิ่งแวดล้อมอีกด้วย การจัดการอาหารโคนมที่มีประสิทธิภาพช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปัจจัยการผลิตเมื่อ เทียบต่อหน่วยน้ำนมที่ผลิตได้ การเลือกใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์และรูปแบบการให้อาหารสัตว์ที่เหมาะสมเป็น กระบวนการที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้ปัจจัยการผลิตและความยั่งยืนทางด้านสิ่งแวดล้อมของระบบ การผลิตน้ำนมโค

ในบทนี้จะกล่าวถึง 2 ประเด็นสำคัญที่เกี่ยวข้องกับอาหารโคนม ดังนี้ 1) ประเภทของอาหารโคนม และ 2) หลักสำคัญในการประกอบสูตรอาหารโคนม

2.1 ประเภทของอาหารโคนม

อาหารโคนมเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อระบบการเลี้ยงโคนม สารอาหารที่โคนมได้รับส่งผลโดยตรงต่อ สมรรถนะการผลิต สุขภาพและสวัสดิภาพสัตว์ของโคนม อย่างไรก็ตาม วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่แตกต่างกันจะมี คุณค่าทางโภชนาหรือสารอาหารแตกต่างกัน เช่น อาหารหยาบซึ่งเป็นวัตถุดิบอาหารหลักสำหรับใช้เลี้ยงโคนม ส่วนใหญ่มีคุณค่าทางโภชนาหรือสารอาหารต่ำและไม่เพียงพอที่จะช่วยให้โคนมมีสมรรถนะการผลิตสูงสุดได้ ดังนั้น การใช้อาหารชั้นที่มีสารอาหารเข้มข้นเป็นการเติมเต็มเพื่อให้โคนมได้รับสารอาหารอย่างเพียงพอกับ ความต้องการ

วัตถุดิบอาหารสัตว์สำหรับใช้เลี้ยงโคนมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามคุณสมบัติ คือ อาหารหยาบและอาหารชั้น

2.1.1 อาหารหยาบ

อาหารหยาบ หมายถึง อาหารที่มีเยื่อใยหยาบมากกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ หรือ มีสัดส่วนของผนังเซลล์ มากกว่า 35 เปอร์เซ็นต์ และมีโปรตีนหยาบน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นวัตถุดิบอาหารหลักของโคนม อาหาร หยาบส่วนใหญ่มีความเข้มข้นของสารอาหารต่อหน่วยน้ำหนักค่อนข้างต่ำแต่มีเยื่อใย หยาบอยู่ในระดับสูง แหล่งของอาหารหยาบได้จากพืชอาหารสัตว์และผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร

หญาธรรมชาติหรือหญ้าน้ำเลี้ยงและฟางข้าวถือได้ว่าเป็นแหล่งอาหารหยาบพื้นฐานที่มีความสำคัญ กับการเลี้ยงโคนมในประเทศไทยเนื่องจากเกษตรกรสามารถเข้าถึงได้ง่ายและมีราคาถูก เกษตรกรเก็บเกี่ยว หญ้าธรรมชาติมาเลี้ยงโคนมในช่วงหน้าฝนซึ่งมีมากและหาได้ง่ายจากพื้นที่สาธารณะ ในขณะที่ในหน้าแล้ง เกษตรกรใช้ฟางข้าวที่มีการสำรองเอาไว้มาเลี้ยงโคนม จากการพัฒนาพันธุ์กรรมโคนมให้มียสมรรถนะการผลิต และมีผลผลิตน้ำนมต่อตัวสูงขึ้นทำให้การใช้หญ้าธรรมชาติและฟางข้าวมีข้อจำกัดในด้านคุณค่าทางโภชนาและ สารอาหาร โคนมที่เลี้ยงด้วยหญ้าธรรมชาติและฟางข้าวเพียงอย่างเดียวจะได้รับสารอาหารไม่เพียงพอที่จะทำ

ให้โคนมมีผลผลิตน้ำนมสูงสุดได้ เกษตรกรแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการให้อาหารข้นเพื่อเป็นการเพิ่มสารอาหารให้กับโคนม อย่างไรก็ตาม การให้อาหารข้นมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ มีราคาแพง และการให้อาหารข้นในสัดส่วนที่มากเกินไปจะส่งผลเสียต่อสุขภาพของโคนม

พืชอาหารสัตว์คุณภาพดีเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มสารอาหารให้กับโคนมและช่วยลดปริมาณการให้อาหารข้น ปัจจุบันแหล่งอาหารหายากทางเลือกที่สำคัญสำหรับการเลี้ยงโคนมในประเทศไทยมีหลากหลายมากขึ้น ทั้งที่มีการผลิตเพื่อใช้เป็นอาหารโคนมโดยตรงและที่เป็นผลผลิตร่วมที่ได้จากอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ผลิตเพื่อใช้เป็นอาหารโคนมโดยตรง เช่น ต้นข้าวโพดพร้อมฝักและหญ้าอาหารสัตว์ เป็นต้น ส่วนวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ได้จากอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร เช่น เปลือกข้าวโพดและเปลือกสับปะรด เป็นต้น

2.1.2 อาหารข้น

อาหารข้น หมายถึง อาหารที่มีเยื่อใยหยาบน้อยกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ โดยอาหารข้นสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยตามความเข้มข้นของสารอาหารจำนวน 4 กลุ่ม ดังนี้

(1) อาหารข้นที่เป็นแหล่งโปรตีน วัตถุดิบอาหารสัตว์ประเภทนี้จะมีความเข้มข้นของโปรตีนต่อหน่วยน้ำหนักอยู่ในระดับสูงกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความเข้มข้นของพลังงานอาจจะมีมากหรือน้อยแตกต่างกันไป อาหารข้นที่เป็นแหล่งโปรตีนโดยส่วนใหญ่เป็นเมล็ดถั่วและผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร แหล่งโปรตีนที่สำคัญสำหรับใช้เลี้ยงโคนม ได้แก่ กากถั่วเหลืองและกากเมล็ดฝ้าย เป็นต้น

(2) อาหารข้นที่เป็นแหล่งพลังงาน วัตถุดิบอาหารสัตว์ประเภทนี้จะมีความเข้มข้นของแป้งและน้ำตาลต่อหน่วยน้ำหนักอยู่ในระดับสูง โดยส่วนใหญ่จะเป็นเมล็ดธัญพืช พืชหัวและผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร แหล่งพลังงานที่สำคัญสำหรับใช้เลี้ยงโคนม ได้แก่ เมล็ดข้าวโพด มันสำปะหลังและปลายข้าว เป็นต้น

(3) อาหารข้นที่เป็นแหล่งไขมัน วัตถุดิบอาหารสัตว์ประเภทนี้จะมีความเข้มข้นของไขมันต่อหน่วยน้ำหนักอยู่ในระดับสูง โดยส่วนใหญ่จะเป็นไขมันจากพืชและสัตว์ แหล่งไขมันจากพืช ได้แก่ น้ำมันพืชต่าง ๆ และวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีไขมันสูง เช่น ถั่วเหลืองอบและเมล็ดฝ้าย เป็นต้น ส่วนแหล่งไขมันจากสัตว์ ได้แก่ ไขมันสัตว์

(4) อาหารข้นที่เป็นแหล่งวิตามินและแร่ธาตุ วัตถุดิบอาหารประเภทนี้จะมีความเข้มข้นของวิตามินและแร่ธาตุต่อหน่วยน้ำหนักอยู่ในระดับสูง ในส่วนของแร่ธาตุจะแบ่งออกเป็นแร่ธาตุหลักและแร่ธาตุปลีกย่อย แร่ธาตุหลัก ได้แก่ แคลเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม โพแทสเซียม โซเดียม คลอรีน และกำมะถัน แหล่งแร่ธาตุหลักที่สำคัญสำหรับใช้ผสมในอาหารโคนม เช่น เปลือกหอยป่นเป็นแหล่งแคลเซียม ไคแคลเซียม ฟอสเฟตเป็นแหล่งแคลเซียมและฟอสฟอรัส หินฟุนเป็นแหล่งฟอสฟอรัส เกลือเป็นแหล่งโซเดียมและคลอรีน เป็นต้น สำหรับวิตามินและแร่ธาตุปลีกย่อยส่วนใหญ่จะใช้สารผสมล่วงหน้าหรือพรีมิกซ์ซึ่งมีจำหน่ายตามร้านจำหน่ายวัตถุดิบอาหารสัตว์

2.2 หลักสำคัญในการประกอบสูตรอาหารสำหรับโคนม

ความต้องการโภชนะของโคนมมีความซับซ้อนและหลากหลายทำให้การประกอบสูตรอาหารโคนมที่มีประสิทธิภาพมีความซับซ้อนและหลากหลายตามไปด้วย ปริมาณการกินอาหารของโคเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงในขั้นตอนของการประกอบสูตรอาหารเนื่องจากปริมาณการกินอาหารของโคนมจะเป็นตัวกำหนดปริมาณโภชนะที่โคนมจะได้รับ ความสามารถในการกินอาหารของโคนมถูกกำหนดโดยหลายปัจจัยและปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ 1) ปัจจัยด้านตัวสัตว์ 2) ปัจจัยด้านอาหารสัตว์ และ 3) ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการอาหารสัตว์

2.2.1 ปัจจัยของตัวสัตว์

ปัจจัยของสัตว์ที่ส่งผลต่อปริมาณการกินอาหาร ได้แก่ สภาวะทางสรีระวิทยาของสัตว์ เช่น หากโคนมอยู่ในระยะต้นของการให้นมแม่โคนมจะกินอาหารได้น้อยเมื่อเทียบกับโคนมที่อยู่ในระยะกลางของการให้นมเป็นต้น ในสภาวะปกติปัจจัยหลักที่ควบคุมปริมาณการกินอาหารของโคนม คือ ความต้องการพลังงานของตัวโคนมเอง สภาการวิจัยแห่งชาติของประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ NRC (2001) แนะนำว่า ทฤษฎีของการกินอาหารของโคนมระยะให้น้ำนม คือ ปริมาณการกินอาหารในสภาพวัตถุแห้ง (กิโกรัมต่อวัน) เท่ากับ ความต้องการพลังงานสุทธิของโคนม (เมกกะแคลอรีต่อวัน)หารด้วยความเข้มข้นของพลังงานสุทธิเพื่อการให้น้ำนมของอาหารสัตว์ (เมกกะแคลอรีต่อกิโลกรัมอาหารในสภาพวัตถุแห้ง) อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าปริมาณการกินอาหารของแม่โคนมในช่วง 3 สัปดาห์แรกของการให้นมแม่โคจะกินอาหารได้ต่ำกว่าปริมาณการกินอาหารตามหลักทฤษฎีประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่า ปริมาณการกินอาหารของแม่โคนมหลังคลอดอาจถูกกำหนดด้วยปัจจัยอื่นนอกเหนือจากความต้องการพลังงานของสัตว์และความเข้มข้นของพลังงานสุทธิในอาหารสัตว์

2.2.2 ปัจจัยทางด้านอาหารสัตว์

ปัจจัยด้านอาหารสัตว์นั้นส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับปริมาณและคุณภาพของอาหารสัตว์ อาหารสัตว์ที่มีคุณภาพดีสามารถย่อยได้ง่ายทำให้กระเพาะรูเมนมีพื้นที่ว่างสำหรับอาหารใหม่มากขึ้นสัตว์ก็จะกินอาหารได้มากขึ้น ในทางกลับกัน หากเป็นอาหารคุณภาพต่ำการย่อยอาหารเป็นไปอย่างเชื่องช้าอาหารก็จะถูกกักให้อยู่ในกระเพาะรูเมนนานขึ้นทำให้มีพื้นที่ว่างสำหรับอาหารใหม่น้อยลงส่งผลให้โคนมกินอาหารได้น้อยลง ความน่ากินของอาหารก็มีผลโดยตรงกับปริมาณการกินอาหาร โคนมกินอาหารที่มีความน่ากินได้มากขึ้น นอกจากนี้ระดับความชื้น ระดับผนังเซลล์และระดับไขมันในอาหาร รวมไปถึงสัดส่วนของอาหารหยาดต่ออาหารข้นก็มีผลอย่างมากต่อการกินอาหารของโคนม เช่น ในอาหารโคนมที่มีความชื้นมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ระดับความชื้นในอาหารที่เพิ่มขึ้นทุก 1 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้การกินอาหารของแม่โคนมลดลง 0.02 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว ในทำนองเดียวกัน ระดับผนังเซลล์ในอาหารส่งผลต่อปริมาณการกินอาหารของโคนม ในขณะที่ในอาหารที่มีผนังเซลล์ในระดับต่ำความต้องการอาหารของแม่โคจะถูกควบคุมโดยความต้องการพลังงานแต่ในอาหารที่มีผนังเซลล์อยู่ในระดับสูงปริมาณการกินอาหารของแม่โคจะถูกควบคุมโดยระดับของผนังเซลล์ในอาหาร

ตัวอย่างเช่น ในอาหารที่ระดับพลังงานเซลมากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มขึ้นของระดับพลังงานเซลในอาหารจะทำให้โคนมกินอาหารได้น้อยลง สำหรับอิทธิพลของระดับไขมันในอาหารต่อการกินอาหารของโคนมนั้นเกี่ยวข้องกับความต้องการพลังงานของโคทั้งนี้เนื่องจากไขมันมีพลังงานสูงกว่าคาร์โบไฮเดรต ดังนั้น อาหารที่มีระดับไขมันสูงกว่าจะทำให้โคนมกินอาหารได้น้อยกว่าอาหารที่มีไขมันในระดับต่ำกว่า สัดส่วนของอาหารหยาบและอาหารข้นส่งผลต่อการกินอาหารของโคนมโดยสัดส่วนอาหารข้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โคนมกินอาหารได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม สัดส่วนอาหารข้นไม่ควรเกิน 60 เปอร์เซ็นต์ของอาหารทั้งหมดที่โคนมกิน

2.2.3 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการอาหารสัตว์

ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการอาหารสัตว์มีส่วนสำคัญในการควบคุมปริมาณการกินอาหารของโคนม สำหรับปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการระบายความร้อนออกจากตัวสัตว์ ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับโคนมอยู่ระหว่าง 5 – 20 องศาเซลเซียส และการผลิตน้ำนมของแม่โคนมจะลดลงหากอุณหภูมิสูงกว่า 20 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากแม่โคกินอาหารได้น้อยลง ภาวะอากาศร้อนขึ้นในประเทศไทยทำให้การระบายความร้อนออกจากตัวโคนมเป็นไปอย่างยากลำบากส่งผลให้โคนมเกิดสภาวะเครียดจากความร้อนและกินอาหารได้น้อยลง ดังนั้น การจัดการอาหารสัตว์จึงเป็นทางเลือกในหนึ่งในการแก้ปัญหา เช่น การเพิ่มมื้ออาหารหรือการให้อาหารที่ละน้อยแต่บ่อยครั้งจะช่วยให้โคนมกินอาหารได้มากขึ้น รวมไปถึงการให้อาหารโคนมในเวลากลางคืนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงเวลากลางวันก็ช่วยให้โคนมกินอาหารมากขึ้นเช่นกัน หรือแม้แต่การให้โคนมเข้าถึงอาหารได้ตลอดเวลาก็สามารถช่วยเพิ่มปริมาณการกินอาหารของโคนม เช่น โคนมที่มีเวลากินอาหารมากกว่า 5 ชั่วโมงต่อวันจะกินอาหารได้มากกว่าโคนมที่มีเวลากินอาหารน้อยกว่า 5 ชั่วโมงต่อวัน

บทที่ 3

การประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตน้ำมันโค

การประเมินปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตน้ำมันโค หรือ การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์เป็นการคำนวณหรือการจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์นมซึ่งเริ่มตั้งแต่การได้มาซึ่งทรัพยากรธรรมชาติเพื่อนำมาผลิตปัจจัยการผลิต การขนส่ง การใช้ปัจจัยการผลิต การทำฟาร์มโคนม การแปรรูปน้ำมัน รวมไปถึงการบริโภคและการจัดการของเสียที่เกิดจากการบริโภคผลิตภัณฑ์นมเหล่านั้น

การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) เป็นเครื่องมือที่องค์การมาตรฐานสากล หรือ International Organization for Standardization (ISO) ได้กำหนดแนวทางและวิธีการในการดำเนินการทั้งนี้เพื่อให้การประเมินวัฏจักรชีวิตของสินค้าหรือบริการใด ๆ มีมาตรฐานเดียวกัน (หารายละเอียดเพิ่มเติมได้จากคู่มือ ISO 14040 และ ISO 14044) เครื่องมือนี้สามารถใช้ในการประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมในภาพรวมรวมถึงการประเมินเฉพาะปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของสินค้าและบริการใด ๆ ต่อมาเมื่อการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ได้รับความนิยมมากขึ้น องค์การ ISO จึงได้กำหนดแนวทางและวิธีการสำหรับประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของสินค้าและบริการใด ๆ (หารายละเอียดเพิ่มเติมได้จากคู่มือ ISO 14067) โดยเป็นการปรับปรุงดัดแปลงหลักการพื้นฐานจากคู่มือ ISO 14040 และ ISO 14044

ในบทนี้จะกล่าวถึง 2 ประเด็นสำคัญในการประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตน้ำมันโค ดังนี้ 1) หลักการประเมินก๊าซเรือนกระจก (คาร์บอนฟุตพริ้นท์) ของระบบการผลิตน้ำมันโค และ 2) ค่าแฟคเตอร์ก๊าซเรือนกระจกของปัจจัยการผลิตของระบบการผลิตน้ำมันโค

3.1 หลักการประเมินก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตน้ำมันโค

ในการประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก หรือ คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตน้ำมันโค โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “การประเมินวัฏจักรชีวิต” จะเริ่มต้นตั้งแต่กระบวนการได้มาซึ่งทรัพยากรธรรมชาติสำหรับใช้ในการผลิตปัจจัยการผลิตของฟาร์มโคนม การผลิตปัจจัยการผลิต การขนส่งที่เกี่ยวข้อง การทำฟาร์มเลี้ยงโคนม การแปรรูปน้ำมันจนถึงการบริโภคผลิตภัณฑ์นมและการจัดการของเสียที่เกิดจากการบริโภค ซึ่งกระบวนการเหล่านี้มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งทางตรงและทางอ้อม ทางตรง ได้แก่ การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการทำฟาร์ม เช่น การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้ (เผาไหม้) น้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิล การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากการหมักย่อยอาหารในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ และการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการจัดการสิ่งขี้ถ่ายและของเสียจากฟาร์ม เป็นต้น ส่วนทางอ้อม ได้แก่ การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตปัจจัยการผลิตที่นำมาใช้ในระบบการผลิตน้ำมันโค เช่น การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตไฟฟ้า และกระบวนการขุดเจาะและกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิง และกระบวนการผลิตปุ๋ยเคมี เป็นต้น

การจัดทำบัญชีมลพิษทุกชนิดที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของน้ำนมโคจะช่วยป้องกันปัญหาที่อาจจะเกิดจากการผลกระทบมลพิษจากขั้นตอนหนึ่งไปยังอีกขั้นตอนหนึ่ง หรือ จากมลพิษชนิดหนึ่งไปยังมลพิษอีกชนิดหนึ่ง (Chobtang, 2016) มลพิษทุกชนิดจะถูกจำแนกออกเป็นกลุ่มตามลักษณะจำเพาะที่มีต่อผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภท โดยมลพิษในกลุ่มเดียวกันจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเดียวกันหรือมีหน่วยเดียวกันตามประเภทของตัวชี้วัดทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยใช้แบบจำลองห่วงโซ่ของเหตุและผล (cause-effect chain) ดังนั้น ในกรณีการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตน้ำนมโค ก๊าซเรือนกระจกทุกชนิดจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน คือ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (carbon dioxide equivalence) ผลรวมของก๊าซเรือนกระจกทุกชนิดที่มีหน่วยเดียวกัน คือ ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของน้ำนมโค

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตน้ำนมโคนั้นมีขั้นตอน ดังนี้

3.1.1 การกำหนดวัตถุประสงค์

การกำหนดวัตถุประสงค์เป็นขั้นตอนแรก ๆ ของการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการศึกษาจะช่วยให้การตัดสินใจเลือกใช้วิธีการ เลือกขอบเขตและเลือกหน่วยหน้าที่ได้อย่างเหมาะสม ตัวอย่างการกำหนดวัตถุประสงค์ เช่น เพื่อการขอรับรองฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ หรือ เพื่อใช้ผลการประเมินในการปรับปรุงประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อมของฟาร์ม เป็นต้น

3.1.2 การกำหนดขอบเขตของระบบ

การกำหนดขอบเขตของระบบเป็นการแจ้งว่ากิจกรรมใดบ้างในระบบการผลิตน้ำนมโคที่จะนำเข้ามาใช้ในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ เช่น การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตน้ำนมโคที่เริ่มตั้งแต่การได้มาซึ่งทรัพยากรธรรมชาติไปจนถึงผลผลิตน้ำนมดิบหน้าฟาร์ม ในกรณีนี้ก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่เกิดขึ้นตั้งแต่การจัดการทรัพยากรธรรมชาติ การผลิตปัจจัยการผลิต การขนส่ง การใช้อาหารสัตว์ การทำฟาร์ม ตลอดจนการจัดการของเสียจะถูกรวบรวมมาทั้งหมดแต่จะไม่รวมการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในขั้นตอนอื่น ๆ หลังจากขั้นตอนการทำฟาร์ม หรือ ในบางกรณีอาจจะมีบางกิจกรรมที่ไม่ถูกรวมเข้ามาโดยมีสาเหตุหรือเหตุผลแตกต่างกันไป เช่น การไม่รวมการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากขั้นตอนการผลิตวัคซีนสำหรับใช้ในฟาร์มโคนมทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตวัคซีนได้ หรือ ผลกระทบของระบบการผลิตวัคซีนที่มีต่อคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตน้ำนมโคนั้นอาจมีน้อยมาก เป็นต้น

3.1.3 การกำหนดหน่วยหน้าที่

การกำหนดหน่วยหน้าที่ของระบบซึ่งจะใช้เป็นหน่วยอ้างอิงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ การกำหนดหน่วยหน้าที่ของระบบการผลิตน้ำนมโคอาจจะแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ เช่น หน่วยพื้นที่ฟาร์ม (ไร่) หรือ หน่วยผลผลิตน้ำนมมาตรฐาน (fat and protein corrected milk, FPCM) (กิโลกรัม) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตน้ำนมโคส่วนใหญ่จะใช้ผลผลิตน้ำนมมาตรฐาน 1 กิโลกรัม

เป็นหน่วยน้ำหนักที่ สมาพันธ์โคนมนานาชาติ หรือ IDF (2022) แนะนำสูตรที่ใช้ในการคำนวณผลผลิตน้ำนมมาตรฐาน ดังนี้

$$\text{FCPM (kg)} = \text{raw milk (kg)} \times [0.2534 + (0.1226 \times \% \text{ milk fat}) + (0.0776 \times \% \text{ milk true-protein})]$$

3.1.4 การปันส่วนภาระมลพิษระหว่างผลผลิตร่วม

ระบบการผลิตน้ำนมโคมีผลผลิตร่วมที่สำคัญ คือ 1) น้ำนมดิบ และ 2) แม่โคคัดทิ้งและลูกโคส่วนเกิน และในกรณีมูลสัตว์ก็นับเป็นผลผลิตร่วมของระบบการผลิตน้ำนมโคด้วยหากมีการจำหน่ายมูลสัตว์

การปันส่วนภาระมลพิษระหว่างน้ำนมดิบและแม่โคคัดทิ้งและลูกโคส่วนเกินนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ เช่น การปันส่วนโดยใช้น้ำหนักของผลผลิตร่วม หรือ การปันส่วนโดยใช้อัตราทางเศรษฐกิจของผลผลิตร่วม อย่างไรก็ตาม สมาพันธ์โคนมนานาชาติ (IDF, 2022) แนะนำว่า การปันส่วนภาระมลพิษในระบบการผลิตน้ำนมโคควรใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานสุทธิสำหรับการผลิตน้ำนม และปริมาณพลังงานสุทธิสำหรับการเพิ่มน้ำหนักตัวของแม่โคคัดทิ้งและลูกโคส่วนเกิน ดังนี้ AF_{milk} = ปริมาณพลังงานสุทธิสำหรับการผลิตน้ำนม (เมกกะแคลอรี) หารด้วยผลรวมของปริมาณพลังงานสุทธิสำหรับการผลิตน้ำนมและปริมาณพลังงานสุทธิสำหรับการเพิ่มน้ำหนักตัวของแม่โคคัดทิ้งและลูกโคส่วนเกิน (เมกกะแคลอรี) โดยที่ AF_{milk} หมายถึง สัดส่วนของมลพิษที่จะถูกปันส่วนมาให้กับผลผลิตน้ำนม และภาระมลพิษที่ปันส่วนให้กับแม่โคคัดทิ้งและลูกโคส่วนเกินจะเท่ากับ $1 - AF_{\text{milk}}$

3.1.5 การใช้ที่ดินและการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน

การใช้ที่ดินและการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินเป็นอีกกิจกรรมหนึ่งที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อันเกิดจากการสูญเสียคาร์บอนในดิน การใช้ที่ดินและการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินอาจส่งผลต่อการลดลงหรือการเพิ่มขึ้นของสารประกอบคาร์บอนในดินซึ่งจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับสถานะของที่ดินก่อนและหลังการใช้ เช่น หากที่ดินนั้นเป็นป่าสมบูรณ์แล้วนำมาใช้ในการปลูกพืชเพื่อเป็นอาหารโคนมก็จะเกิดการสูญเสียคาร์บอนในดินปริมาณมาก การสูญเสียคาร์บอนในดินจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์แล้วปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ ในทางกลับกัน หากที่ดินเดิมเป็นพื้นที่เสื่อมโทรมแล้วนำมาใช้ปลูกหญ้าอาหารสัตว์ดินก็จะมีการสะสมคาร์บอนในดินเพิ่มมากขึ้นนับเป็นการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์จากชั้นบรรยากาศมาเก็บไว้ในดินในรูปของแข็ง ซึ่งในกรณีนี้การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ที่ดินและการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจะมีค่าเป็นลบ อย่างไรก็ตาม การประเมินการสูญเสียคาร์บอนในดินยังมีความแปรปรวนมาก ดังนั้น การแปรผลต้องดำเนินการอย่างระมัดระวัง IDF (2022) แนะนำว่า ในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตน้ำนมโคควรมีการประเมินก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้ที่ดินและการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินด้วย แต่การรายงานปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนนี้ให้แยกออกมาจากค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ปกติ

3.1.6 การจัดทำบัญชีมลพิษ

ขั้นตอนการจัดทำบัญชีมลพิษจะเป็นการนำข้อมูลปริมาณการใช้ปัจจัยการผลิตของทุกกิจกรรมที่อยู่ในระบบการผลิตน้ำมันโคมาใช้ในการคำนวณปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยส่วนใหญ่การคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกจะดำเนินการเฉพาะในส่วนของกิจกรรมที่เกิดขึ้นในฟาร์ม (เช่น การผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์ และการเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น) ส่วนปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกระบวนการผลิตปัจจัยการผลิต (เช่น การผลิตปุ๋ยเคมี น้ำมันเชื้อเพลิงและไฟฟ้า) จะใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลนานาชาติ (เช่น ฐานข้อมูล ecoinvent และ Agric-Footprint เป็นต้น) หรือ อาจใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลของประเทศไทย เช่น ฐานข้อมูลขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 3.2)

3.1.7 การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์

ขั้นตอนนี้จะเป็นการนำข้อมูลปริมาณก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิด (เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน และก๊าซไนตรัสออกไซด์) ที่รวบรวมได้จากขั้นตอนการจัดทำบัญชีมลพิษมาแปลงให้เป็นหน่วยเดียวกันโดยใช้ค่า characterization factor ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยโดยองค์กรนานาชาติ เช่น องค์การนานาชาติเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก หรือ International Panel for Climate Change (IPCC)

ตารางที่ 2 แสดงค่า characterization factor สำหรับใช้ในการแปลงก๊าซเรือนกระจกชนิดต่าง ๆ ให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน คือ คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (carbon dioxide equivalence) โดยสามารถเลือกใช้ค่า characterization factor ให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์

ตารางที่ 2 ค่า characterization factor สำหรับใช้ในการแปลงหน่วยของก๊าซเรือนกระจกชนิดต่าง ๆ ให้เป็นหน่วยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

ที่มา	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ก๊าซมีเทน (fossil / biogenic)	ก๊าซไนตรัสออกไซด์
ILCD (2011)	1	25.00 / 25.00	298
IPCC (2013) (100 ปี)	1	30.50 / 27.75	265
IPCC (2013) (20 ปี)	1	85.40 / 82.65	264
IDF (2022)	1	29.80 / 27.00	273

3.1.8 การแปลผล

ขั้นตอนนี้เป็นการแปลผลการศึกษาโดยการนำผลการประเมินมาเชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ตั้งแต่เริ่มต้น

3.2 ค่าแฟคเตอร์ก๊าซเรือนกระจกของปัจจัยการผลิตของระบบการผลิตน้ำมันโค

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของสินค้าและบริการใด ๆ ต้องใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องจำนวนมากและมีความหลากหลายส่งผลให้การจัดทำบัญชีมลพิษของแต่ละหน่วยงานหรือองค์กรมีความแตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอและความน่าเชื่อถือของข้อมูลการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจำเป็นต้องมีองค์กรกลางที่คอยให้คำแนะนำและกำหนดแนวทางในการใช้ข้อมูล สำหรับประเทศไทยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ซึ่งเป็นหน่วยงานรับผิดชอบหลักในการให้การรับรองฉลากคาร์บอนของสินค้าในประเทศไทยได้จัดทำรายการค่าแฟคเตอร์สำหรับใช้ในการคำนวณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission factor) หรือ ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของปัจจัยการผลิตต่าง ๆ สำหรับใช้ในการจัดทำบัญชีมลพิษของระบบการผลิตน้ำมันโค ตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างค่าแฟคเตอร์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปัจจัยการผลิตบางชนิดที่เกี่ยวข้องกับระบบการผลิตน้ำมันโค สำหรับค่าแฟคเตอร์ของปัจจัยการผลิตอื่น ๆ รวมถึงการอัปเดตข้อมูลค่าแฟคเตอร์สามารถดูได้ที่เว็บไซต์ขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ได้ที่เว็บไซต์ <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th>

ตารางที่ 3 ตัวอย่างค่าแฟคเตอร์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปัจจัยการผลิตของระบบการผลิตน้ำมันโค

ลำดับ ที่	ชื่อผลิตภัณฑ์	รายละเอียด	หน่วย	ค่าแฟคเตอร์ (kg CO ₂ e/ หน่วย)
1	น้ำมันดีเซล/น้ำมันโซ ลาร์	น้ำมันดีเซลที่ได้จากกระบวนการกลั่น น้ำมันดิบ; LCIA method IPCC (2013) GWP 100a V1.03	kg	0.3522
2	แร่ธาตุพรีมิกซ์	ผลิตจากการผสมแร่ธาตุต่างๆ ตามส่วนผสม เพื่อให้ได้แร่ธาตุและวิตามินพรีมิกซ์สำหรับ การเลี้ยงโคนม; LCIA method IPCC (2013) GWP 100a V1.03	kg	0.1748
3	การใช้รถแทรกเตอร์สี่ ล้อขนาด 90 แรงม้า	สำหรับพื้นที่ราบ ในการปลูกข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลังและอ้อย; LCIA method IPCC (2013) GWP 100a V1.03	hr	56.9422
4	การพรวนจานโดย แทรกเตอร์ ขนาด90 แรงม้า	ครอบคลุมการผลิตรถแทรกเตอร์ การผลิต จาน และการนำไปใช้ในการเกษตร; LCIA method IPCC (2013) GWP 100a V1.03	m ²	0.0039
5	การใช้เครื่องใส่ปุ๋ยมูล สัตว์ขนาด 90 แรงม้า	ครอบคลุมการผลิตรถแทรกเตอร์ การผลิต เครื่องหว่าน และการนำไปใช้ในการเกษตร; LCIA method IPCC (2013) GWP 100a V1.03	m ²	0.0023
6	การใช้เครื่องสูบน้ำ สำหรับการเกษตร ขนาด 15 แรงม้า	เหมาะสมสำหรับเครื่องสูบน้ำ (ปั้มน้ำ) ขนาด ความเร็วการสูบน้ำที่ประมาณ 1 ลูกบาศก์ เมตรต่อนาที; LCIA method IPCC (2013) GWP 100a V1.03	m ³	0.0510
7	การใช้เครื่องพ่นยา แบบติดท้ายรถ แทรค เตอร์ ขนาด 35 แรงม้า	ต่อพ่วงเข้ากับรถแทรกเตอร์ขนาดกลางหรือ ขนาดใหญ่แล้ว; LCIA method IPCC (2013) GWP 100a V1.03	m ²	0.0008

ที่มา: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)

บทที่ 4

การลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการใช้อาหารโคนม

ระบบการผลิตน้ำนมโคมีก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ 3 ชนิด คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์ ก๊าซเรือนกระจกทั้ง 3 ชนิดนี้จะถูกปลดปล่อยจากกิจกรรมหรือขั้นตอน ต่าง ๆ ของระบบการผลิตน้ำนมโคในปริมาณที่แตกต่างกันไป ภาพที่ 2 แสดงชนิดของก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยจากกิจกรรมต่าง ๆ ในระบบการผลิตน้ำนมโค ก๊าซเรือนกระจกปลดปล่อยจากตัวสัตว์โดยตรง คือ ก๊าซมีเทนที่เกิดจากระบบการหมักย่อยอาหารในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ ส่วนก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากระบบการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์นั้นส่วนมากจะเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซไนตรัสออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการใช้ปุ๋ยเคมีไนโตรเจนและปุ๋ยอินทรีย์หรือปุ๋ยคอก สำหรับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการสิ่งขี้ถ่ายและของเสียส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทนและ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ และก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากขั้นตอนการนำของเสียที่บำบัดแล้วไปใช้เป็นสารปรับปรุงปรุงดินและปุ๋ยอินทรีย์ส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซไนตรัสออกไซด์

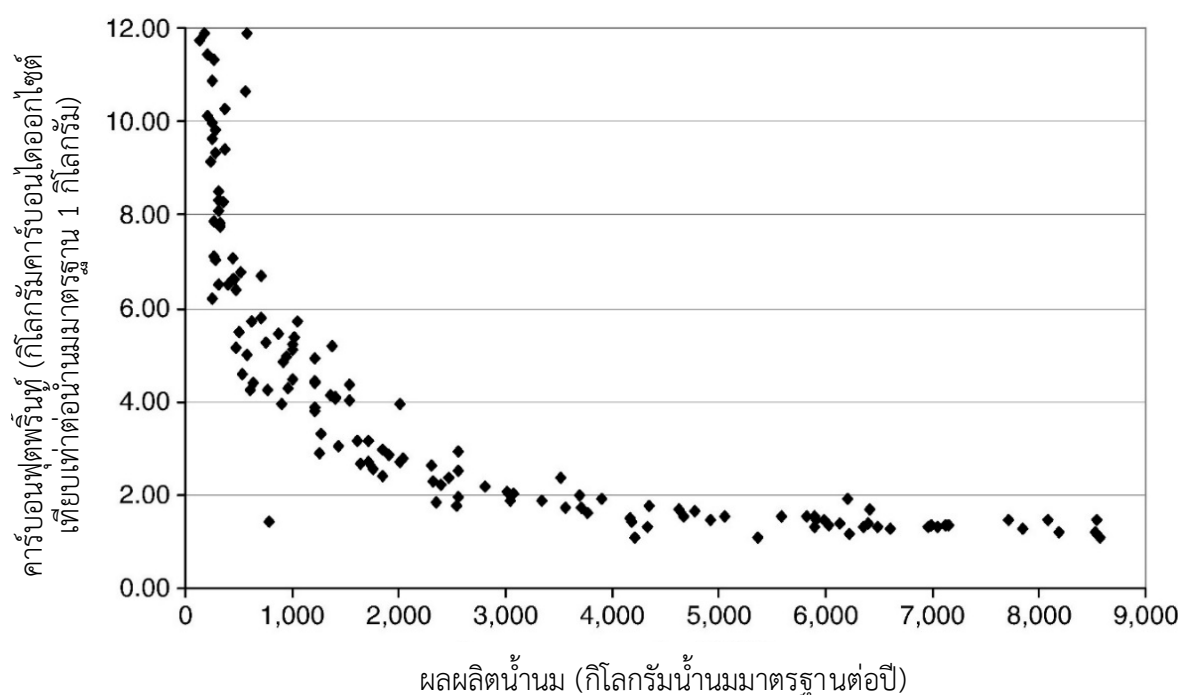


ภาพที่ 2 ชนิดของก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากกิจกรรมต่าง ๆ ของระบบการผลิตน้ำนมโค

ที่มา: ดัดแปลงจาก Rotz (2018)

ก๊าซแอมโมเนียและสารไนเตรตนั้นมักจะพบว่าการปลดปล่อยในขั้นตอนของการใช้ปุ๋ยเคมีในโตรเจน การจัดการสิ่งขี้ถ่ายและของเสีย และการนำของเสียที่บำบัดแล้วไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากปุ๋ยเคมีในโตรเจน และสิ่งขี้ถ่ายของโคนมมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ และถึงแม้ว่าก๊าซแอมโมเนียและสารประกอบไนเตรตจะไม่ใช้ก๊าซเรือนกระจกโดยตรงแต่กระบวนการเมแทบอลิซึมของก๊าซแอมโมเนียและสารประกอบไนเตรตจะได้ก๊าซไนตรัสออกไซด์ออกมาในปริมาณหนึ่ง (IPCC, 2006)

โดยทั่วไปสมรรถนะการผลิตของโคนมจะมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับ ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก หรือ ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์เมื่อคิดต่อผลผลิตน้ำนม 1 กิโลกรัม กล่าวคือ โคนมที่ให้ผลผลิตน้ำนมสูงจะมีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่ำทั้งนี้เนื่องจากโคนมเป็นสัตว์มีชีวิตจึงมีความต้องการอาหารจำนวนหนึ่งสำหรับใช้ในการดำรงชีพ และใช้อาหารส่วนที่เหลือจากการดำรงชีพไปในการสร้างน้ำนม ดังนั้น การที่แม่โคนมให้น้ำนมเพิ่มมากขึ้นก็หมายความว่าสัดส่วนของอาหารเพื่อการดำรงชีพต่อการผลิตน้ำนม 1 กิโลกรัม จะถูกเจือจางลง หรือ มีค่าลดลง ผลจากการรวบรวมข้อมูลสมรรถนะการผลิตน้ำนมของโคนมและค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อผลผลิตน้ำนมมาตรฐาน 1 กิโลกรัม ของ Gerber et al. (2011) แสดงในภาพที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของน้ำนมลดลงเมื่อโคนมให้ผลผลิตน้ำนมเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการผลิตน้ำนมและค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของน้ำนมโคมาตรฐาน 1 กิโลกรัม

ที่มา: ดัดแปลงจาก Gerber et al. (2011)

อาหารสัตว์มีความสำคัญอย่างมากต่อระบบการผลิตน้ำนมโค อาหารสัตว์นั้นนอกจากจะเป็นส่วนประกอบหลักของต้นทุนการผลิตแล้วอาหารสัตว์ยังเป็นแหล่งการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญอีกด้วย ถึงแม้ว่าระบบการจัดการอาหารโคนมที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกแตกต่างกันไปแต่การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้อาหารสัตว์ก็ยังคงเป็นแหล่งก๊าซเรือนกระจกหลักในระบบการผลิตน้ำนมโค การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการใช้อาหารสัตว์คิดเป็น 60 - 80 เปอร์เซ็นต์ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดในระบบการผลิตน้ำนมโคทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในกระบวนการใช้อาหารสัตว์

กระบวนการใช้อาหารสัตว์สำหรับโคนมประกอบด้วย 7 ขั้นตอน ดังนี้ 1) การผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์ 2) การจัดหาวัตถุดิบอาหารสัตว์ 3) การปรับปรุงคุณภาพวัตถุดิบอาหารสัตว์ 4) การประกอบสูตรอาหารโคนม 5) การให้อาหารโคนม 6) การใช้สารเสริมสำหรับโคนม และ 7) การจัดการของเสียในฟาร์มโคนมทุกขั้นตอนจะส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งโดยตรงและทางอ้อม

4.1 การผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์

วัตถุดิบอาหารสัตว์สำหรับใช้เลี้ยงโคนมส่วนใหญ่ได้จากระบบการผลิตพืชซึ่งอาจจะเป็นการผลิตพืชเพื่อใช้เป็นอาหารโคนมโดยตรง เช่น ข้าวโพดอาหารสัตว์ หญ้าอาหารสัตว์และถั่วอาหารสัตว์ เป็นต้น หรืออาจจะได้จากผลผลิตร่วมในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร เช่น กากถั่วเหลือง กากเนื้อในเมล็ดปาล์มน้ำมัน และกากมันสำปะหลัง เป็นต้น ในระบบการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์แต่ละชนิดมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลากหลายชนิดในปริมาณที่แตกต่างกันออกไป

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์มีหลากหลาย ปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ พันธุกรรมของพืช การจัดการเขตกรรมและระดับการใช้เทคโนโลยี ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อระดับการให้ผลผลิตและประสิทธิภาพการใช้ปัจจัยการผลิตของพืชซึ่งในที่สุดก็จะส่งผลต่ออัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยผลผลิตพืชหรือต่อหน่วยของวัตถุดิบอาหารสัตว์

พันธุกรรมของพืชเป็นตัวควบคุมการแสดงออกลักษณะต่าง ๆ ของพืช พืชที่มีพันธุกรรมดีหมายถึงพืชที่สามารถให้ผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตสูง ปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ดีและสามารถใช้ประโยชน์จากปัจจัยการผลิต เช่น ที่ดิน เชื้อเพลิง ปุ๋ยและน้ำ ได้ในระดับสูง ดังนั้น พืชที่มีพันธุกรรมดีจะสามารถให้ผลผลิตที่มีคุณภาพต่อหน่วยพื้นที่และต่อหน่วยการใช้ปัจจัยการผลิตสูง และสามารถตอบสนองต่อระบบการเกษตรแบบประณีตได้ดี ช่วยให้มีผลผลิตเพิ่มมากขึ้นโดยไม่ต้องใช้ที่ดินเพิ่มขึ้นซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงจากการเปลี่ยนพื้นที่ป่าสมบูรณ์มาเป็นพื้นที่การเกษตร การพัฒนาพันธุกรรมของพืชในบางครั้งส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้น เช่น พืชที่มีผลผลิตสูงแต่มีประสิทธิภาพในการใช้ปุ๋ยต่ำทำให้ต้องมีการใช้ปุ๋ยเคมีเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นเมื่อคิดต่อหน่วยผลผลิต หรือ พืชที่ให้ผลผลิตสูงแต่มีความต้านทานโรคและแมลงต่ำทำให้ต้องใช้สารเคมีกำจัดโรคและแมลงศัตรูพืชเพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้น เป็นต้น ดังนั้น ในการพัฒนาพันธุกรรมของพืชจึงมีความจำเป็นที่

จะต้องมีการประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรเสียก่อนเพื่อให้มั่นใจว่าการพัฒนาพันธกรรมของพืชเหล่านั้นไม่ส่งต่อการเพิ่มการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก

กระบวนการใช้ปุ๋ยเคมีโดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจนในระบบการผลิตวัตถุดิบอาหารโคนมนั้นเป็นกิจกรรมสำคัญที่มีการปลดปล่อยเรือนกระจกอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตปุ๋ยยูเรียมีส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ (มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากกระบวนการใช้ปุ๋ยยูเรียเป็นก๊าซไนตรัสออกไซด์) การปลดปล่อยก๊าซมีเทนในระบบการผลิตพืชมีสัดส่วนเพียงเล็กน้อยยกเว้นในระบบการผลิตข้าวแบบน้ำขังซึ่งมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนเป็นสัดส่วนที่สูงมาก (ตารางที่ 4) นอกจากนี้ การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากแหล่งฟอสซิลเป็นจุดวิกฤติที่สำคัญเนื่องจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 4 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์และสัดส่วนของก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตวัตถุดิบอาหารโคนม

รายการ	คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (kg CO ₂ e/kg)	คาร์บอนไดออกไซด์ (%)	ไนตรัสออกไซด์ (%)	มีเทน (%)
เมล็ดข้าวโพด (TH)	0.623	74.64	22.20	3.16
เมล็ดข้าวโพด (US)	0.420	59.82	37.30	2.88
ข้าว (CN)	1.250	13.15	26.60	60.25
เมล็ดข้าวสาลี (UA)	0.299	63.54	34.70	1.76
เมล็ดเรปซิด (DE)	0.758	39.25	59.00	1.75
เมล็ดถั่วเหลือง (USA)	0.380	68.97	28.70	2.33
หัวมันสำปะหลังสด (TH)	0.080	59.17	38.70	2.13
ข้าวโพดพร้อมฝักหมัก (NL)	0.091	48.55	48.70	2.75

ที่มา: ฐานข้อมูล ecoinvent v 3.4

การใช้ปุ๋ยเคมีมากเกินไปจนความจำเป็นหรือมากเกินไปจนความต้องการของพืชย่อมส่งผลให้มีการสูญเสียทั้งการสูญเสียทางเศรษฐกิจและการสูญเสียทรัพยากร นอกจากนี้ ยังส่งผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมด้วยเนื่องจากการผลิตปุ๋ยเคมีนั้นมีความเข้มข้นของการใช้ทรัพยากรและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ในระดับสูงมาก เช่น ในกระบวนการผลิตปุ๋ยยูเรีย 1 กิโลกรัมไนโตรเจนนั้นมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก 3.33 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เป็นต้น (ตารางที่ 5) นอกเหนือจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตแล้วการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนก็มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วยเช่นกัน IPCC (2006) รายงานว่า ปุ๋ยไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O-N) ในอัตรา 1 เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจน โดยจะเกิดขึ้นทันทีเมื่อมีการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน นอกจากนี้ ปุ๋ยไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซแอมโมเนีย (NH₃-N) ในอัตรา 10 เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจน และก๊าซแอมโมเนียเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนตรัสออกไซด์ใน

อัตรา 1 เปอร์เซ็นต์ของแอมโมเนียไนโตรเจน และยังมีปุ๋ยไนโตรเจนบางส่วนที่จะสูญเสียไปในรูปของสารไนเตรต ($\text{NO}_3\text{-N}$) โดยการชะละลายและการไหลบ่า สารไนเตรตเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนตรัสออกไซด์ในอัตรา 0.75 เปอร์เซ็นต์ของไนเตรตไนโตรเจน จะเห็นได้ว่า การผลิตและการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระบบการผลิตพืช

ตารางที่ 5 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของปุ๋ยเคมีชนิดต่าง ๆ

ชื่อปุ๋ยเคมี	สูตรปุ๋ยเคมี	หน่วย	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์
ปุ๋ยยูเรีย	46-0-0	$\text{kgCO}_2\text{e/kg N}$	3.33
ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต	21-0-0	$\text{kgCO}_2\text{e/kg N}$	1.82
ปุ๋ยโพแทสเซียมซัลเฟต	0-0-50	$\text{kgCO}_2\text{e/kg K}_2\text{O}$	1.51
ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	0-0-60	$\text{kgCO}_2\text{e/kg K}_2\text{O}$	0.47
ปุ๋ยฟอสฟอรัส	18-46-0	$\text{kgCO}_2\text{e/kg P}_2\text{O}_5$	2.16

ที่มา: ฐานข้อมูล ecoinvent v 3.4

กระบวนการใช้ปุ๋ยเคมีโดยเฉพาะอย่างยิ่งปุ๋ยไนโตรเจนเป็นแหล่งการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดในระบบการผลิตเมล็ดธัญพืช และถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการพัฒนาพันธุ์กรรมของพืชให้มีการตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้นหรือมีประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนของพืชเพิ่มขึ้น แต่การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนก็ยังคงเป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญ นอกจากนี้ การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงก็มีส่วนสำคัญในระบบการผลิตเมล็ดธัญพืชโดยมีส่วนแซร์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับ 6 – 13 เปอร์เซ็นต์ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด สำหรับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกระบวนการใช้เครื่องจักรกลการเกษตร และสารเคมีกำจัดโรคและแมลงศัตรูพืชนั้นคิดเป็นส่วนน้อยทั้งนี้การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนหนึ่งได้ถูกแยกไปอยู่กับกระบวนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงแล้ว เช่น การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการฉีดยา หรือ การใช้สารเคมีกำจัดโรคและแมลงศัตรูพืช (Riedesel et al., 2022)

ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการใช้ปุ๋ยเคมีไนโตรเจนและการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจึงเป็นกระบวนการที่เป็นจุดวิกฤติทางด้านสิ่งแวดล้อม ส่วนก๊าซไนตรัสออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกวิกฤติของการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์ ยกเว้น วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เกี่ยวข้องกับข้าวซึ่งมีก๊าซมีเทนที่เกิดจากการระบบทำนาแบบน้ำขังเป็นก๊าซเรือนกระจกวิกฤติ

เทคโนโลยีการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ย หรือ การจัดการปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน หรือ การจัดการปุ๋ยแบบแม่นยำ (ปุ๋ยสั่งตัด) ที่ยึดหลักการใส่ปุ๋ยที่สอดคล้องกับปริมาณความต้องการธาตุอาหารของพืชในแต่ละระยะของการเจริญเติบโต ผนวกกับการใช้เทคนิคการใส่ปุ๋ยที่เหมาะสมเป็นเทคโนโลยีที่เป็นความหวังสำหรับใช้เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตพืช เช่น ในระบบการผลิตข้าวโพดพร้อมฝักเพื่อทำข้าวโพดพร้อมฝักหมักนั้นข้าวโพดจะมีผลผลิตเพิ่มมากขึ้นเมื่อได้รับปุ๋ยเคมีในอัตราที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม

ก็ตาม การตอบสนองต่ออัตราการใช้ปุ๋ยจะลดลงเมื่อมีการใส่ปุ๋ยเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า มีผลทำให้คาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อ 1 กิโลกรัมของข้าวโพดเพิ่มขึ้น 34 เปอร์เซ็นต์ แต่ทำให้ผลผลิตข้าวโพดเพิ่มขึ้นเพียง 6 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ในทำนองเดียวกัน ในระบบการผลิตเมล็ดข้าวโพดอาหารสัตว์ การใช้ปุ๋ยเคมีเป็นองค์ประกอบหลักของคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดคิดเป็น 65 - 80 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับปริมาณและวิธีการใส่ปุ๋ย แต่หากมีการใช้เทคโนโลยีการใส่ปุ๋ยแม่นยำ หรือ ปุ๋ยสั่งตัด จะช่วยลดค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของเมล็ดข้าวโพดได้ถึง 22 เปอร์เซ็นต์ และหากใช้ปุ๋ยสั่งตัดร่วมกับการส่งเสริมให้ปลูกข้าวโพดในพื้นที่ที่เหมาะสม ไม่มีการทำลายป่าและไม่มีการเผาต้นข้าวโพดค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดจะลดลงถึง 48 เปอร์เซ็นต์ (สุริพร และคณะ, 2561)

การปรับพื้นที่ทางการเกษตรโดยใช้ระบบเลเซอร์จะได้พื้นที่ที่มีความลาดชันที่เหมาะสมจะช่วยให้การจัดการน้ำ ปุ๋ยและการเก็บเกี่ยวข้าวมีประสิทธิภาพมากขึ้นส่งผลให้การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการทำนาลดลง 14 - 22 เปอร์เซ็นต์ (Nguyen et al., 2022) ดังนั้น หากมีการนำข้าวและปลายข้าวซึ่งเป็นผลผลิตร่วมจากการทำนาจากระบบที่มีการปรับพื้นที่นี้มาใช้เป็นอาหารสัตว์ก็จะช่วยให้อาหารสัตว์มีภาวะก๊าซเรือนกระจกลดลงด้วย ระบบการเกษตรแม่นยำเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่เป็นความหวังในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบการผลิตพืชซึ่งหมายถึงรวมถึงระบบการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์สำหรับใช้เลี้ยงโคนมด้วย

การใช้ปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้าและสารปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นเทคโนโลยีทางเลือกในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนของพืชรวมถึงลดการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของก๊าซไนตรัสออกไซด์และก๊าซแอมโมเนีย ปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้าและสารปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนที่ยืนยันว่าสามารถใช้ได้จริง ได้แก่ ปุ๋ยยูเรียละลายช้า สารต้านปฏิกิริยา nitrification และสารต้านเอนไซม์ยูรีเอส (urease inhibitor) การใช้ปุ๋ยยูเรียละลายช้านี้นอกจากจะช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนโดยรวมแล้วยังช่วยลดความถี่ของการใส่ปุ๋ยซึ่งจะช่วยลดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงในการหว่านปุ๋ย นอกจากนี้ ปุ๋ยยูเรียละลายช้ายังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนของพืชอีกด้วย โดยรวมแล้วการใช้ปุ๋ยยูเรียละลายช้านี้นอกจากสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบการผลิตพืชได้ถึง 37 เปอร์เซ็นต์แล้วยังช่วยเพิ่มผลผลิตเมล็ดธัญพืชได้ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ (Guo et al., 2016) ในทำนองเดียวกัน การใช้สารต้านปฏิกิริยา nitrification สามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์และลดการชะละลายของปุ๋ยไนโตรเจน โดยรวมแล้วการใช้สารต้านปฏิกิริยา nitrification สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบการผลิตเมล็ดข้าวสาลีและข้าวโพดได้ 35 - 38 เปอร์เซ็นต์ (Liu et al., 2013) ส่วนการใช้สารต้านเอนไซม์ยูรีเอสมีผลยับยั้งการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของก๊าซแอมโมเนียจากระบบการหว่านปุ๋ยผิวดินได้ถึง 82 - 96 เปอร์เซ็นต์ (Rawluk et al., 2001) อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของการใช้ปุ๋ยละลายช้าและสารปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน คือ มีราคาแพง

การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนโดยวิธีการฝังกลบสามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากระบบการผลิตเมล็ดข้าวสาลีได้ 21 - 29 เปอร์เซ็นต์ (Xu et al., 2015) ถึงแม้ว่าการฝังกลบปุ๋ยไนโตรเจนจะช่วยลด

การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกแต่ต้องใช้แรงงานเพิ่มขึ้นหรือต้องใช้เครื่องจักรกลการเกษตรขนาดใหญ่เข้ามาช่วยซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต

สำหรับเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวนั้นมีหลากหลายแต่ที่ได้ผลและมีการยอมรับในวงกว้างทั้งในประเทศไทยและนานาชาติ ได้แก่ เทคโนโลยีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งซึ่งนอกจากสามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซก๊าซมีเทนได้ 30 – 40 เปอร์เซ็นต์ และยังช่วยลดปริมาณการใช้น้ำได้ 20 – 30 เปอร์เซ็นต์ (Li et al., 2023) อย่างไรก็ตาม มีข้อกังวลเกี่ยวกับเทคโนโลยีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง คือ จะมีผลทำให้การปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในช่วงน้ำแห้ง

4.2 การจัดหาวัตถุดิบอาหารสัตว์

การจัดซื้อสีเขียว หรือ กระบวนการจัดซื้อที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หรือ การจัดซื้อที่ควรวรรณา ระดับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของสินค้าที่ต้องการมาเป็นหลักเกณฑ์ร่วมในการจัดซื้อสินค้าและบริการ กล่าวคือ สินค้าประเภทเดียวกัน หรือ สินค้าที่ทำหน้าที่อย่างเดียวกัน การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ได้จากการจัดซื้อสีเขียวจะน้อยกว่าการจัดซื้อทั่วไป อย่างไรก็ตาม การคำนึงถึงการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของสินค้าใด ๆ จะจำเป็นต้องพิจารณาตลอดวัฏจักรชีวิตของสินค้าที่จัดซื้อ

การจัดซื้อวัตถุดิบอาหารสัตว์สำหรับใช้ประกอบสูตรอาหารโคนมนั้นนอกเหนือจากองค์ประกอบทางเคมี คุณค่าทางโภชนาและราคาของวัตถุดิบอาหารสัตว์แล้วข้อมูลการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของวัตถุดิบอาหารสัตว์เหล่านั้น หรือ ข้อมูลค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (ตัวอย่างข้อมูลค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัตถุดิบอาหารสัตว์แสดงในตารางที่ 2) เป็นเกณฑ์ในการจัดซื้อที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้ ในกระบวนการจัดซื้อวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมนั้นประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ ดังนี้ 1) ต้องเป็นสินค้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม 2) มีการจัดซื้อที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม 3) สินค้ามีฉลากสิ่งแวดล้อม และ 4) มีเกณฑ์ข้อกำหนดสินค้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หมายถึง วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากขั้นตอนการผลิต การขนส่ง การใช้เลี้ยงสัตว์และการจัดการของเสียหรือสิ่งขับถ่ายต่ำกว่าวัตถุดิบอาหารสัตว์อื่น ๆ ที่ทำหน้าที่เดียวกัน (วัตถุดิบอาหารสัตว์ประเภทเดียวกัน) หรือ วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่ำกว่า ส่วนการจัดซื้อที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมนั้นหมายถึง การจัดซื้อสินค้าที่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เกณฑ์ข้อกำหนดส่วนใหญ่จะหมายถึง การมีฉลากสิ่งแวดล้อมหรือการมีข้อมูลการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัตถุดิบอาหารสัตว์นั้น ๆ โดยฉลากสิ่งแวดล้อมนั้นจะบ่งบอกระดับความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมหรือระดับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่หน่วยงานที่มีหน้าที่ได้มอบให้กับวัตถุดิบอาหารสัตว์นั้น ๆ สำหรับประเทศไทยหน่วยหลักที่มีหน้าที่รับรองฉลากคาร์บอนให้กับสินค้าใด ๆ รวมไปถึงวัตถุดิบอาหารสัตว์ คือ องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (www.tgo.or.th) สำหรับเกณฑ์ข้อกำหนดวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมหมายถึง คุณสมบัติของวัตถุดิบอาหารสัตว์ด้านสิ่งแวดล้อมซึ่งได้จากการพิจารณาผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม หรือ การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัตถุดิบอาหารสัตว์นั้น ๆ

ข้อมูลการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก หรือ ข้อมูลค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัตถุดิบอาหารสัตว์ในประเทศไทยในปัจจุบันยังมีน้อยมากและไม่ครอบคลุมวัตถุดิบอาหารสัตว์ทุกประเภททำให้การจัดซื้อวัตถุดิบอาหารสัตว์สีเขียวยังคงเป็นประเด็นท้าทายอย่างยิ่ง การศึกษาวิจัยและการเร่งการรับรองฉลากคาร์บอนจะช่วยให้การจัดซื้อสีเขียวมีประสิทธิภาพมากขึ้นและจะช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบการผลิตนํ้านมโคในประเทศไทย

4.3 การปรับปรุงคุณภาพอาหารโคนม

คุณภาพอาหารสัตว์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ ความสามารถในการย่อยได้ ความสมดุลของสารอาหาร ความสดใหม่ การปนเปื้อนหรือการเจ็บและควมน่ากิน เป็นต้น การปรับปรุงคุณภาพวัตถุดิบอาหารสัตว์หรืออาหารสัตว์สำเร็จรูปสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีกล วิธีทางชีวภาพและวิธีทางเคมี โดยวัตถุประสงค์หลักของการปรับปรุงคุณภาพอาหารสัตว์ คือ การเพิ่มการใช้ประโยชน์จากอาหารสัตว์ได้มากขึ้นซึ่งสามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของโคนมเมื่อคิดต่อผลผลิตนํ้านม 1 กิโลกรัม (Hristov et al., 2013) ในทำนองเดียวกัน การเพิ่มความน่ากินของอาหารสัตว์จะช่วยให้สัตว์กินอาหารได้มากขึ้นสัตว์ก็จะได้รับสารอาหารมากขึ้นทำให้สามารถให้ผลผลิตได้มากขึ้น ผลผลิตที่เพิ่มมากขึ้นจะช่วยลดสัดส่วนของสารอาหารที่สัตว์ต้องใช้เพื่อการดำรงชีพทำให้ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลงเมื่อคิดต่อผลผลิตนํ้านม 1 กิโลกรัม

การจัดการแปลงหญ้าเพื่อปรับปรุงคุณภาพของหญ้าอาหารสัตว์สามารถทำได้โดยการกำหนดอายุการตัด หญ้าเขตร้อนส่วนใหญ่จะมีคุณภาพลดลงเมื่อมีอายุการตัดเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของหญ้าอาหารสัตว์มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของสัตว์ ตัวอย่างเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของวัตถุแห้งของหญ้าแพงโกลาที่มีอายุการตัด 28 วัน สูงกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ แต่มีค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่ำกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับหญ้าแพงโกลาที่มีอายุการตัด 45 วัน (จิระศักดิ์ และคณะ, 2555) ในทำนองเดียวกัน Aby et al. (2019) รายงานว่าแม้ว่าการตัดหญ้าอายุน้อยเพื่อผลิตหญ้าหมักคุณภาพดีจะได้ผลผลิตหญ้าลดลง 22 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อนำหญ้าหมักคุณภาพดีนั้นไปเลี้ยงโคนมส่งผลให้นํ้านมโคมีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ลดลง 10 เปอร์เซ็นต์

4.4 การประกอบสูตรอาหารโคนม

การประกอบสูตรอาหารสำหรับใช้เลี้ยงโคนมควรคำนึงถึงการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนที่เกิดจากการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมน การลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนเป็นการเพิ่มระดับพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของอาหารโคนมทั้งนี้เนื่องจากมีเทนมีค่าพลังงานเท่ากับ 13.3 กิโลแคลอรีต่อกรัม อย่างไรก็ตามการประกอบสูตรอาหารโคนมเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของสัตว์นั้นมียปัจจัยหลายประการที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ ต้นทุนการผลิต สมรรถนะการผลิตและสวัสดิภาพสัตว์ของโคนม

สูตรอาหารโคนมสำหรับใช้เลี้ยงโคนมแต่ละระยะมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ ความแตกต่างด้านสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิและความชื้น ซึ่งส่งผลต่อการกินอาหารของโค ทำให้ต้องประกอบสูตรอาหารที่แตกต่างออกไป การเข้าถึงวัตถุดิบอาหารสัตว์และราคาของวัตถุดิบอาหารสัตว์เป็นข้อจำกัดที่สำคัญในการเลือกใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์สำหรับใช้ในการประกอบสูตรอาหารสัตว์ ประเภทและคุณภาพของวัตถุดิบส่งผลโดยตรงต่อการกินอาหารและการใช้ประโยชน์จากอาหารของโคนม อาหารที่มีคุณภาพสูงซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ได้สูง มีการสูญเสียน้อย การสูญเสียพลังงานจากอาหารในรูปของก๊าซมีเทนในระบบหมักย่อยอาหาร นอกจากจะลดสัดส่วนพลังงานที่โคนมสามารถใช้ประโยชน์ได้แล้วยังเป็นการเพิ่มการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ภาระก๊าซเรือนกระจกที่ติดมากับวัตถุดิบอาหารสัตว์ชนิดต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการผลิตอาหารสัตว์สำเร็จรูป 1 กิโลกรัม มีส่วนแชร์ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตอาหารสัตว์ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการใช้พลังงานของโรงงานอาหารสัตว์มีส่วนแชร์เพียง 2 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น และการขนส่งที่เกี่ยวข้องมีส่วนแชร์ 6 เปอร์เซ็นต์ (Adom et al., 2013) ดังนั้น ในกระบวนการผลิตอาหารสัตว์นั้นนอกจากวัตถุดิบอาหารสัตว์เป็นจุดวิกฤติที่สำคัญอย่างยิ่งแล้วการขนส่งและการใช้พลังงานภายในโรงงานอาหารสัตว์ก็เป็นจุดวิกฤติที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก น้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานสำหรับใช้ในการขนส่ง ส่วนแหล่งพลังงานที่มีการใช้ในโรงงานอาหารสัตว์ส่วนใหญ่เป็นไฟฟ้าและก๊าซธรรมชาติ กล่าวได้ว่าจุดวิกฤติทางด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตอาหารสัตว์และการขนส่งที่เกี่ยวข้อง คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

วัตถุดิบอาหารสัตว์ทุกชนิดมีภาระก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากในการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์) แตกต่างกันไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกตั้งต้นและคุณค่าทางโภชนาของวัตถุดิบเหล่านั้น ตารางที่ 6 แสดงตัวอย่างค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัตถุดิบอาหารสัตว์สำหรับใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเลือกใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์เพื่อประกอบสูตรอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาตรงกับความต้องการของโคนมและมีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่ำที่สุด ข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัตถุดิบอาหารสัตว์เหล่านี้รวบรวมจากฐานข้อมูลนานาชาติ ecoinvent

การเลือกใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีภาระก๊าซเรือนกระจกต่ำ ๆ เป็นแนวทางที่สามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตอาหารสัตว์ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัตถุดิบอาหารสัตว์สำหรับใช้เลี้ยงโคนมในประเทศไทยยังมีน้อยมากทำให้การเลือกซื้อวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีคุณภาพดีและมีภาระก๊าซเรือนกระจกในระดับต่ำยังคงเป็นประเด็นท้าทายที่สำคัญ

นอกเหนือจากการเลือกใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีภาระก๊าซเรือนกระจกน้อย หรือ มีค่าคาร์บอนฟุต พริ้นท์ต่ำ ๆ แล้ว การใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อาจเป็นเทคโนโลยีทางเลือกสำหรับทดแทนการใช้ไฟฟ้าจากพลังงานฟอสซิล ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ต่ำกว่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้าประมาณ 10 เท่า (ตารางที่ 7) นอกจากนี้ การวางแผนการขนส่งที่มีประสิทธิภาพร่วมกับการใช้ยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่ำกว่าทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (ตารางที่ 8) อาจเป็นทางเลือกในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบการขนส่งอาหารสัตว์

ตารางที่ 6 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัตถุดิบอาหารสัตว์สำหรับใช้เลี้ยงโคนม

ชนิดวัตถุดิบอาหารสัตว์	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (kgCO ₂ e/kg)
แหล่งโปรตีน	
กากถั่วเหลือง	3.840
กากเนื้อในเมล็ดปาล์มน้ำมัน (มาเลเซีย)	0.650
กากเรปซีด	0.700
กากมะพร้าว	1.120
กากเบียร์สด	0.006
แหล่งพลังงาน	
ปลายข้าว	1.760
มันเส้น	0.759
เมล็ดข้าวโพด	0.658
รำข้าว	0.837
รำข้าวสาลี	0.477
แหล่งอาหารหยาด	
ข้าวโพดพร้อมฝักหมัก	0.146
กากมันสำปะหลังสด	0.027
เปลือกมันสำปะหลังสด	0.046
หญ้าหมัก (ไม่ระบุชนิดหญ้า)	0.132
หญ้าแห้ง (ไม่ระบุชนิดหญ้า)	0.471

ที่มา: ฐานข้อมูล ecoinvent v 3.4

ตารางที่ 7 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของไฟฟ้าในประเทศไทยแยกตามแหล่งผลิต

แหล่งไฟฟ้า	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (kgCO ₂ e/kWh)
ไฟฟ้าจากการไฟฟ้า (consumption mix)	0.1850
ไฟฟ้าจากระบบโซลาร์เซลล์	0.0178

ที่มา: ฐานข้อมูล ecoinvent v 3.4

ตารางที่ 8 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของน้ำมันเชื้อเพลิงในประเทศไทยแยกตามประเภท

ประเภทน้ำมันเชื้อเพลิง	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (kgCO ₂ e/L)	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (gCO ₂ e/100 km)
น้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซล (B7)	2.5337	14.5924
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (CNG)	3.3580	26.7751
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG)	1.6893	25.4281

ที่มา: งานวิจัยนโยบายองค์กร (2564)

การวิจัยเพื่อเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของโคนมและคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการผลิตน้ำนม 1 กิโลกรัม จากโคนมที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมครบส่วนที่มีการข้าวโพดพร้อมฝักหมักทดแทนการใช้หญ้าไรย์หมัก (rye grass) พบว่า สัดส่วนการใช้ข้าวโพดพร้อมฝักหมักที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนต่อปริมาณการกินอาหาร 1 กิโลกรัม ลดลง แต่ไม่มีผลต่อปริมาณการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่อผลผลิตน้ำนม 1 กิโลกรัม อย่างไรก็ตาม การใช้ข้าวโพดพร้อมฝักหมักทดแทนหญ้าหมักทำให้ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อผลผลิตน้ำนม 1 กิโลกรัม มีค่าลดลง ทั้งนี้ เกิดจากการที่ข้าวโพดพร้อมฝักหมักมีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่ำกว่า ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของหญ้าหมัก (van Gastelen et al., 2023) ในทำนองเดียวกัน การใช้ข้าวโพดพร้อมฝักหมักในสูตรอาหารโคนมทำให้น้ำนมโคที่มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่ำกว่าโคนมที่ได้รับอาหารสูตรที่มีต้นข้าวบาร์เลย์หมักถึง 15 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากข้าวโพดพร้อมฝักหมักมีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่ำกว่าต้นข้าวบาร์เลย์หมัก (Guyader et al., 2017)

4.5 การให้อาหารโคนม

หลักการสำคัญของการให้อาหารโคนม คือ การให้สัตว์ได้รับโภชนาตามความต้องการเพื่อให้สามารถแสดงออกลักษณะทางพันธุกรรมได้อย่างเต็มที่ อย่างไรก็ตาม จากการที่โคนมเป็นสัตว์เคี้ยวเอื้องจึงต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนช่วยย่อยอาหารทำให้การให้อาหารโคนมนั้นนอกจากจะต้องให้สัตว์รับโภชนาอย่างเพียงพอกับความต้องการแล้วยังต้องคำนึงถึงระบบนิเวศในกระเพาะรูเมนด้วย โดยการให้อาหารโคนมนั้นจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อความปกติของระบบนิเวศในกระเพาะรูเมน รูปแบบการให้อาหารโคนมสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ 1) การให้อาหารแบบแยกส่วน 2) การให้อาหารผสมครบส่วน (total mixed rations, TMR) และ 3) การปล่อยแทะเล็มในแปลงหญ้าร่วมกับการเสริมอาหารข้นหรือไม่ก็ได้

การให้อาหารแบบแยกส่วน หมายถึง การให้อาหารโคนมที่มีการแยกส่วนระหว่างอาหารข้นและอาหารหยาบ โดยส่วนใหญ่โคนมจะได้รับอาหารหยาบแบบเต็มที่และได้รับอาหารข้นแบบจำกัด การจำกัดปริมาณอาหารข้นนั้นขึ้นอยู่กับสมรรถนะการผลิตของโคนม โดยโคนมที่มีสมรรถนะการผลิตสูงจะได้รับอาหารข้นในปริมาณเพิ่มขึ้น ส่วนการให้อาหารผสมครบส่วนนั้น หมายถึง การให้อาหารที่มีการผสมกันอย่างดีระหว่างอาหารข้นและอาหารหยาบโดยการให้อาหารผสมครบส่วนนั้นจะให้วันละครั้งหรือวันละหลายครั้งก็ได้ การให้

อาหารผสมครบส่วนนั้นจะช่วยให้ประสิทธิภาพการใช้อาหารสัตว์เพิ่มขึ้น 8 - 12 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับการให้อาหารแบบแยกส่วน ทั้งนี้เนื่องจากการให้อาหารผสมครบส่วนนั้นจะช่วยรักษาระบบนิเวศในกระเพาะรูเมนของสัตว์ให้มีความสม่ำเสมอได้มากกว่าซึ่งจะช่วยให้การดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ของจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการปล่อยและเล็มในแปลงหญ้านั้นสัตว์จะถูกปล่อยให้หากินอาหารเองจากแปลงหญ้าที่เตรียมไว้ การจัดการแปลงหญ้าเพื่อให้มีปริมาณพืชอาหารสัตว์และคุณค่าทางโภชนาที่เหมาะสมจะช่วยให้สัตว์ได้รับอาหารในปริมาณและคุณภาพที่สอดคล้องกับความต้องการ อย่างไรก็ตาม พืชอาหารสัตว์ส่วนใหญ่มีข้อจำกัดด้านอาหารสัตว์ เช่น การมีความฟามเนื่องจากมีเยื่อใยในระดับสูงจะส่งผลต่อการย่อยในระบบทางเดินอาหารทำให้สัตว์กินอาหารได้น้อยลงและได้รับสารอาหารไม่เพียงพอกับความต้องการ ดังนั้นการเสริมด้วยอาหารข้นจะช่วยให้สัตว์ได้รับสารอาหารเพิ่มมากขึ้น

รูปแบบการให้อาหารโคนมเป็นอีกขั้นตอนที่มีความสำคัญที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งที่เกิดจากการหมักย่อยในกระเพาะรูเมนและการจัดการสิ่งขี้ถ่าย เช่น การปล่อยสัตว์และเล็มแปลงหญ้านั้นนอกจากจะมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบหมักย่อยในกระเพาะรูเมนแล้วการขับถ่ายลงในแปลงหญ้าโดยตรงจะทำให้มีการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์มากกว่าการจัดการมูลแบบอื่น ตัวอย่างเช่น Chobtang et al. (2017) เปรียบเทียบค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของน้ำนมโคที่มีการจัดการอาหารสัตว์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเพิ่มการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเพื่อเพิ่มผลผลิตหญ้าจากแปลงหญ้าสำหรับการและเล็ม หรือ การเพิ่มการใช้อาหารสัตว์ที่ซื้อมาจากภายนอกฟาร์ม พบว่า ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลผลิตน้ำนม 1 กิโลกรัม ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ส่งผลต่อตัวชี้วัดสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ เช่น การเพิ่มการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนจะเหนี่ยวนำให้เกิดภาวะฝนกรด ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน และการปนเปื้อนไนโตรเจนของระบบนิเวศน์เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน การซื้อวัตถุดิบอาหารสัตว์จากนอกฟาร์มมาใช้จะเหนี่ยวนำให้เกิดความเป็นพิษของระบบนิเวศน์น้ำจืดและการปนเปื้อนของแหล่งน้ำจืดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น ในบางกรณีการใช้ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์เพื่อประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมอาจจะไม่ครอบคลุมตัวชี้วัดคุณภาพของสิ่งแวดล้อมทุกด้านจึงเป็นข้อควรระมัดระวัง

ก๊าซมีเทนมีส่วนแซร์มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ของค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของน้ำนมมาตรฐาน 1 กิโลกรัม และมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนทั้งหมดเกิดจากการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของสัตว์ กล่าวได้ว่าก๊าซมีเทนที่ปลดปล่อยจากระบบการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของสัตว์เป็นจุดวิกฤติทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ นอกจากนี้ ก๊าซมีเทนอีกส่วนหนึ่งมาจากการจัดการสิ่งขี้ถ่ายและของเสียภายในฟาร์มสำหรับก๊าซไนตรัสออกไซด์นั้นส่วนใหญ่มาจากการจัดการมูล ส่วนการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการทำฟาร์มนั้นมาจากการใช้เชื้อเพลิงจากแหล่งฟอสซิล

การใช้อาหารสัตว์คุณภาพดีที่สามารถย่อยได้ง่ายและมีสัดส่วนของเยื่อใยเหมาะสมจะช่วยให้การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบหมักย่อยอาหารลดลง อย่างไรก็ตาม มีประเด็นที่ต้องคำนึงถึงและควรมีการประเมินผลได้ผลเสีย นั่นคือการผลิตอาหารหยาบคุณภาพดีนั้นส่วนใหญ่ต้องใช้ปัจจัยการผลิตเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะปุ๋ยเคมี การใช้ปุ๋ยเคมีเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระบบการผลิตอาหารหยาบคุณภาพดีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การจัดการอาหารแบบแม่นยำเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่เป็นความหวัง นอกจากนี้ การใช้สารเสริมที่มีฤทธิ์ยับยั้งหรือลดการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนในกระเพาะรูเมนนับเป็น

อีกทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ หรือ การเลือกใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ระดับต่ำก็เป็นทางเลือกที่จะช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบการผลิตนํ้านมโค

การเลือกใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีคุณภาพสูงเป็นอีกทางเลือกที่สำคัญในการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมน วัตถุดิบอาหารสัตว์คุณภาพสูงสามารถย่อยได้ง่ายให้พลังงานสูง และในระหว่างการย่อยมีการผลิตไฮโดรเจนอิสระน้อยทำให้มีสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนน้อย การเพิ่มสัดส่วนการใช้ข้าวโพดพร้อมฝักหมักในอาหารโคนมช่วยให้ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่อการผลผลิตนํ้านม 1 กิโลกรัม ลดลง 5 – 20 เปอร์เซ็นต์ หรือ การเพิ่มคุณภาพของอาหารหยาบในอาหารโคนมช่วยให้ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่อการผลผลิตนํ้านม 1 กิโลกรัม ลดลง 10 – 20 เปอร์เซ็นต์ (van Gastelen et al., 2019)

การจัดการอาหารสัตว์แบบแม่นยำเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่เป็นความหวังสำหรับการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนเมื่อเทียบต่อผลผลิตนํ้านม 1 กิโลกรัม การให้อาหารสัตว์แบบแม่นยำเป็นการจัดการให้สัตว์ได้รับสารอาหารในปริมาณและช่วงเวลาตามที่สัตว์ต้องการ การให้อาหารมากหรือน้อยเกินไปไม่เป็นผลดีกับทั้งตัวสัตว์และเศรษฐกิจของฟาร์ม โคนมที่อ้วนหรือผอมเกินไปจะมีความเสี่ยงที่จะเกิดโรคเกี่ยวกับระบบเมแทบอลิซึม การให้อาหารมากเกินไปนอกจากจะทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นแล้วยังทำให้การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นด้วย ในทำนองเดียวกัน การให้โคนมได้รับโปรตีนมากเกินไปจะทำให้โคนมขับถ่ายไนโตรเจนออกมามากขึ้น ไนโตรเจนที่ขับออกมาจะเป็นแหล่งของก๊าซไนตรัสออกไซด์และก๊าซแอมโมเนีย ส่วนการให้อาหารน้อยเกินไปนั้นนอกจากจะทำให้สูญเสียโอกาสการผลิตนํ้านมแล้วยังส่งผลให้สูญเสียอาหารไปเพื่อการดำรงชีพของสัตว์โดยเปล่าประโยชน์และยังส่งผลให้การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อผลผลิตนํ้านม 1 กิโลกรัม เพิ่มขึ้นด้วย ในทำนองเดียวกัน การที่จะสามารถจัดการอาหารโคนมแบบแม่นยำได้นั้นต้องอาศัยข้อมูลความต้องการโภชนาของสัตว์แต่ละช่วงของอายุและการให้ผลผลิต และข้อมูลคุณค่าทางโภชนาของวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีความแม่นยำซึ่งต้องมีการศึกษาวิจัยกันต่อไป นอกจากนี้ การจัดการอาหารสัตว์แบบแม่นยำต้องการโครงสร้างพื้นฐานที่สามารถจัดเก็บและบันทึกข้อมูลโคนม (ระบบจัดเก็บข้อมูล) และคนงานที่มีทักษะสูงพอสมควร

4.6 การใช้สารเสริมสำหรับโคนม

นอกเหนือจากการใช้สารเสริมเพื่อประสิทธิภาพและคุณภาพของนํ้านมโคแล้วปัจจุบันมีการพัฒนาสารเสริมที่มีฤทธิ์ในการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของโคนม

กระบวนการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของโคนมจะเกิดไฮโดรเจนอิสระซึ่งหากมีการสะสมในกระเพาะรูเมนของสัตว์จะก่อให้เกิดสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมสำหรับการดำรงชีพของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในกระเพาะรูเมน ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจุลินทรีย์ในกลุ่ม archaea จะนำไฮโดรเจนอิสระไปเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เป็นก๊าซมีเทน จากนั้น โคนมก็จะเรอเอาก๊าซมีเทนเหล่านั้นออกมา กลไกการออกฤทธิ์ของสารเสริมเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนนั้นมีทั้งที่เป็นการยับยั้งการทำงานของกระบวนการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนโดยตรงและที่เป็นการเปลี่ยนแปลงระบบนิเวศน์ในกระเพาะรูเมนให้อยู่ในสภาพที่ไม่เหมาะสมกับการ

สังเคราะห์ก๊าซมีเทน อย่างไรก็ตาม สารเสริมเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนที่ดินนั้นจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อโคนมไม่ว่าจะเป็นด้านสมรรถนะการผลิต สุขภาพสัตว์ สวัสดิภาพสัตว์และคุณภาพของผลผลิต

สารเสริมเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามที่มา ได้แก่ กลุ่มที่ 1) สารเสริมที่เป็นสารประกอบทางเคมี กลุ่มที่ 2) สารเสริมที่เป็นสารประกอบจากพืช และกลุ่มที่ 3) สารเสริมที่เป็นสารประกอบจากสาหร่ายทะเล

กลุ่มที่ 1 สารเสริมที่เป็นสารประกอบทางเคมี

สารประกอบทางเคมีหลายชนิดสามารถใช้เป็นสารเสริมเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของโคนมได้ สารประกอบเคมีที่ได้รับความนิยมและมีจำหน่ายในปัจจุบัน ได้แก่ สาร 3-nitrooxypropanol ไนเตรตและสารไอโอโนฟอร์

สาร 3-nitrooxypropanol เป็นสารประกอบที่มีประสิทธิภาพสูงในการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของโคนมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการกินอาหารและประสิทธิภาพการผลิตน้ำนมของโค สาร 3-nitrooxypropanol มีโครงสร้างโมเลกุลและรูปร่างคล้ายกับ methyl-coenzyme M ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของเอนไซม์ coenzyme M reductase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่มีความจำเพาะกับจุลินทรีย์กลุ่ม archaea ในการสังเคราะห์ก๊าซมีเทน ดังนั้น เมื่อสาร 3-nitrooxypropanol เข้าไปแทนที่ methyl-coenzyme M จึงทำให้จุลินทรีย์ archaea ไม่สามารถสังเคราะห์เอนไซม์ coenzyme M reductase จึงทำให้กระบวนการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนไม่สมบูรณ์ ทีมนักวิจัยชาวเนเธอร์แลนด์ รายงานว่า การใช้สาร 3-nitrooxypropanol สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของโคนมได้ถึง 39 เปอร์เซ็นต์ (Dijkstra et al., 2018) และทีมนักวิจัยของประเทศสหรัฐอเมริกาแนะนำให้ใช้สาร 3-nitrooxypropanol ในอัตรา 127 มิลลิกรัมต่ออาหารในสภาพแห้ง 1 กิโลกรัม ซึ่งจะช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนอย่างน้อย 30 เปอร์เซ็นต์ (Feng and Kebreab, 2020)

สารไอโอโนฟอร์ (ionophore) จัดอยู่ในกลุ่มยาปฏิชีวนะ เป็นสารในกลุ่มคาร์บอกซิลิกโพลีอีเทอร์ที่สร้างโดยจุลินทรีย์ *Streptomyces spp.* มีโครงสร้างโมเลกุลที่หลากหลายและมีโพรงที่สามารถเก็บกักประจุบวกได้ กลไกการทำงานของสารไอโอโนฟอร์ คือ การเข้าไปจับกับเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนทำให้การแลกเปลี่ยนประจุบวกที่เยื่อหุ้มเซลล์เปลี่ยนแปลงไปมีผลไปยังการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เหล่านั้น สารไอโอโนฟอร์ที่มีการใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ สารโมนენซิน (monensin) โดยสารโมนენซินจะส่งผลยับยั้งการจับไฮโดรเจนไอออนของจุลินทรีย์กลุ่ม archaea ทำให้ปริมาณการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนลดลง (Rezaei Ahvanooei et al., 2023) สารโมนენซินสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนที่เกิดจากกระบวนการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของโคนมได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสารโมนენซินมีฤทธิ์เป็นยาปฏิชีวนะหลายประเทศจึงไม่อนุญาตให้ใช้เป็นสารเสริมในสัตว์รวมถึงประเทศไทย

ไนเตรตเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์ยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนในกระเพาะรูเมน (Feng et al., 2020) โดยกลไกการออกฤทธิ์ คือ ไนเตรตทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนอิสระทำให้มีไฮโดรเจนอิสระสำหรับการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนน้อยลง นอกจากนี้ ไนเตรตจะถูกรีดิวส์เป็นไนไตรท์ซึ่งมีผลยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทน การเสริมไนเตรตในระดับ 10 กรัมต่ออาหารแห้ง 1 กิโลกรัม

มีผลทำให้การสังเคราะห์ก๊าซมีเทนลดลง 12 เปอร์เซ็นต์ (Maigaard et al., 2024) อย่างไรก็ตาม มีความกังวลเกี่ยวกับการใช้ไนเตรตเป็นสารเสริมอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องเนื่องจากไนเตรตจะถูกเปลี่ยนเป็นไนโตรที่ในกระเพาะรูเมนและไนโตรที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์เคี้ยวเอื้อง

กลุ่มที่ 2 สารเสริมที่เป็นสารประกอบจากพืช

มีการศึกษาวิจัยการใช้สารประกอบจากพืชในการยับยั้งหรือลดกระบวนการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนในการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนของโคนม และพบว่า มีสารประกอบจากพืชจำนวนมากที่มีศักยภาพ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีสารสกัดจากพืชเพียง 4 ชนิด ที่ได้รับความนิยมและมีจำหน่ายในท้องตลาด ได้แก่ สารแทนนิน สารซาโปนิน น้ำมันหอมระเหย และสารฟลาโวนอยด์

สารแทนนิน (tannins) เป็นสารประกอบโพลีฟีนอลิกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีโครงสร้างซับซ้อน มีความสามารถในการตกตะกอนโปรตีน สามารถละลายน้ำได้ สามารถจับกับโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตได้ สารแทนนิน มี 2 ชนิด คือ ไฮโดรไลซาเบิลแทนนิน และคอนเดนซ์แทนนิน สำหรับสารไฮโดรไลซาเบิลแทนนินนั้น ถึงแม้ว่าจะสามารถลดการการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนได้ดีกว่าคอนเดนซ์แทนนินแต่เมื่อมีการดูดซึมเข้าสู่ตัวสัตว์ จะเกิดความเป็นพิษกับตัวสัตว์ ในทางกลับกัน คอนเดนซ์แทนนินไม่สามารถดูดซึมได้จึงไม่เป็นพิษกับสัตว์ สารคอนเดนซ์แทนนินมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนและโปรโตซัวได้ (Ku-Vera et al., 2020) อย่างไรก็ตาม มีข้อควรระวัง คือ สารแทนนินมีฤทธิ์เป็นสารต้านโภชนาด้วย (Hegarty et al., 2021) การใช้สารแทนนินเป็นสารเสริมในอาหารโคนมสามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากกระบวนการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนได้ 13-30 เปอร์เซ็นต์ (Ku-Vera et al., 2020)

สารซาโปนิน (saponins) เป็นสารประกอบกลุ่ม glycosides มีหมู่เคมีที่มีความหลากหลายและซับซ้อน เช่น hydroxyl hydroxymethyl และ carboxyl ด้วยเหตุนี้จึงทำให้กลไกการออกฤทธิ์มีความหลากหลายตามไปด้วย สารซาโปนินมีความเป็นพิษต่อโปรโตซัวโดยตรงทำให้จำนวนโปรโตซัวและจุลินทรีย์ที่อาศัยร่วมอยู่กับโปรโตซัวโดยเฉพาะจุลินทรีย์ archaea มีจำนวนลดลง ส่งผลให้อัตราการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนลดลงตามไปด้วย โดยมีกลไกการออกฤทธิ์ คือ การที่สารซาโปนินจะไปจับกับไขมันที่เยื่อหุ้มเซลล์ของโปรโตซัวทำให้เยื่อหุ้มเซลล์สูญเสียการควบคุมการเข้าออกของแร่ธาตุที่มีประจุจนทำให้เซลล์แตก การใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีเสริมสารซาโปนินมีผลทำให้การสังเคราะห์ก๊าซมีเทนในกระเพาะรูเมนลดลงได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ (Valencia SalaZar et al., 2018)

น้ำมันหอมระเหย (essential oils) เป็นของเหลวที่สกัดได้จากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ดอก เมล็ด หน่อ ใบ เนื้อไม้ ผล กิ่งและราก พืชที่มีน้ำมันหอมระเหย เช่น ตะไคร้ ขิง กระเทียมและยูคาลิปตัส เป็นต้น น้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้ส่วนใหญ่มีผลทำให้จำนวนแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนลดลงซึ่ง จะทำให้การสังเคราะห์ก๊าซมีเทนลงได้ถึง 19 เปอร์เซ็นต์ (Mohammed et al., 2004) อย่างไรก็ตาม กลไกการออกฤทธิ์นั้นยังไม่ชัดเจนนัก การใช้ น้ำมันหอมระเหยเป็นสารเสริมสำหรับโคนมนั้นไม่ต้องกังวลเรื่องความเป็นพิษต่อสัตว์ และผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม การใช้น้ำมันหอมระเหยในระดับสูงอาจจะส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์กลุ่มที่เป็นประโยชน์ได้ มีสิ่งที่ต้องคำนึงในการใช้น้ำมันหอมระเหยเป็นสารเสริมเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทน คือ น้ำมันหอมระเหยมีราคาแพง

สารฟลาโวนอยด์ (flavonoids) เป็นสารประกอบโพลีฟีนอลจากพืช มีฤทธิ์ช่วยลดจำนวนแบคทีเรียกลุ่มที่สังเคราะห์ก๊าซมีเทนและสามารถลดกระบวนการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนในกระเพาะรูเมนโดยการดูดซับไฮโดรเจนอิสระ ปัจจุบันมีสารฟลาโวนอยด์จำหน่ายโดยมีชื่อทางการค้าว่า Bioflavex® เป็นสารสกัดจากส้ม (citrus) การใช้สารฟลาโวนอยด์เป็นสารเสริมในอัตรา 200 ไมโครกรัมต่อกรัมวัตถุดิบ ทำให้การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนลดลง 1 – 11 เปอร์เซ็นต์ (Seradj et al., 2014)

กลุ่มที่ 3 สารเสริมที่เป็นสารประกอบจากสาหร่ายทะเล

สาหร่ายทะเลเป็นพืชขนาดใหญ่สามารถพบได้ทั้งในทะเลน้ำอุ่นและทะเลน้ำเย็น สาหร่ายทะเลแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ chlorophyta (สาหร่ายสีเขียว) phaeophyta (สาหร่ายสีน้ำตาล) และ rhodophyta (สาหร่ายสีแดง) องค์ประกอบทางเคมีและสารออกฤทธิ์ในสาหร่ายมีความหลากหลายมากแตกต่างกันไปตามชนิดของสาหร่าย ช่วงเวลาที่เก็บเกี่ยว แหล่งที่พบ รวมไปถึงความเข้มข้นของสารอาหาร (แร่ธาตุ) ในน้ำทะเล สาหร่ายทะเลมีสารโบโรโมฟอร์มซึ่งเป็นสารประกอบฮาโลเจนที่ระเหยง่ายและสามารถยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ archaea โดยไม่ส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนกลุ่มอื่น ๆ สารโบโรโมฟอร์มพบมากในสาหร่ายสีแดง กลไกการออกฤทธิ์ในการลดการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนในกระเพาะรูเมนของสารโบโรโมฟอร์มเป็นการปิดกั้นการทำงานของเอนไซม์ coorinoid และยับยั้งการกระบวนการเคลื่อนย้ายหมู่ methyl ในกระบวนการสังเคราะห์มีเทน

การใช้สาหร่ายสีแดง *Asparagopsis taxiformis* เป็นสารเสริมในอาหารโคนมอัตรา 0.50 เปอร์เซ็นต์ของอาหารแห้งมีผลทำให้การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระเพาะรูเมนลดลง 34 เปอร์เซ็นต์ แต่ทำให้โคนมกินอาหารได้น้อยลง 7.1 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้โคมีผลผลิตน้ำนมลดลง 6.5 เปอร์เซ็นต์ (Stefenoni et al., 2021) สาเหตุที่ทำให้โคกินอาหารลดลงน่าจะมาจากการที่อาหารที่เสริมด้วยสาหร่ายมีความน่ากินน้อยลง อย่างไรก็ตาม การใช้สาหร่ายในโคนมนั้นมีข้อจำกัด คือ การพบการปนเปื้อนของโบโรโมฟอร์มในน้ำนม ซึ่งสารโบโรโมฟอร์มเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง

4.7 การจัดการของเสียในฟาร์มโคนม

ของเสียจากฟาร์มโคนมส่วนใหญ่เป็นมูลและปัสสาวะของโคซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่หากไม่มีการจัดการที่ถูกต้องและเหมาะสมก็จะส่งผลให้มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมาก ก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญที่เกิดจากการจัดการของเสีย นอกจากนี้ มูลและปัสสาวะของโคยังเป็นแหล่งของการปลดปล่อยก๊าซแอมโมเนียซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอีกด้วย หากไม่มีการจัดการที่เหมาะสมแล้วการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากของเสียอาจมากถึง 40 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดในระบบการผลิตน้ำนมโค

การจัดการสิ่งขับถ่ายและของเสียในระบบการเลี้ยงโคนมมีหลากหลายรูปแบบเริ่มตั้งแต่ระบบการกำจัดของเสียที่มีความซับซ้อนน้อยที่ไม่สามารถนำผลผลิตจากการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ได้ ไปจนถึงระบบที่มีความซับซ้อนมากซึ่งสามารถนำผลผลิตที่เกิดจากการบำบัดสิ่งขับถ่ายและของเสียกลับมาใช้ใหม่ เช่น

ก๊าซชีวภาพและกากตะกอนของเสีย เป็นต้น ดังนั้น ระบบการจัดการมูลสัตว์ที่แตกต่างกันย่อมมีการใช้ปัจจัยการผลิตและมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกแตกต่างกันด้วย

สิ่งขับถ่ายและของเสียจากการเลี้ยงโคนมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ 1) ประเภทของแข็ง (solid manure) 2) ประเภทของเหลว (liquid manure) และ 3) สิ่งขับถ่ายที่ลงแปลงหญ้าโดยตรง สิ่งขับถ่ายที่เป็นของเหลวจะมีสถานะไร้ออกซิเจนโดยสภาพ ดังนั้น ก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซมีเทน ในขณะที่ สิ่งขับถ่ายที่เป็นของแข็งมีโอกาสเกิดก๊าซไนตรัสออกไซด์มากขึ้นโดยเฉพาะส่วนที่มีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจน และเกิดก๊าซมีเทนจากส่วนที่ไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจน ส่วนสิ่งขับถ่ายลงในแปลงหญ้าโดยตรงจะมีโอกาสเกิดไนตรัสออกไซด์สูงแต่จะเกิดก๊าซมีเทนต่ำเนื่องจากการสัมผัสกับออกซิเจนได้มากกว่า

ในปัจจุบันการจัดการของเสียจากระบบการเลี้ยงโคนมเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสามารถทำได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความสามารถในการเข้าถึงเทคโนโลยี ปัจจุบันมีหลากหลายเทคโนโลยีให้เลือกใช้ เช่น เทคโนโลยีการคลุมบ่อบำบัดเพื่อเก็บกักก๊าซมีเทน การหมักย่อยแบบไร้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซมีเทน และ การทำปุ๋ยหมัก เป็นต้น

การคลุมบ่อบำบัดเพื่อเก็บกักก๊าซมีเทนเป็นเทคโนโลยีอย่างง่ายที่ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและแอมโมเนียรวมไปถึงกลิ่นไม่พึงประสงค์จากการบำบัดของเสีย ปัจจุบันมีการปรับแต่งการคลุมบ่อบำบัดในหลายรูปแบบทั้งนี้เพื่อเป็นการแก้ปัญหาของการคลุมอย่างง่ายและเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บกักก๊าซมีเทน เช่น การคลุมด้วยแผ่นพลาสติกชนิดอยู่กับที่ หรือ การคลุมด้วยพลาสติกที่สามารถปรับตัวให้ลอยขึ้นได้เมื่อความดันเพิ่มขึ้น เป็นต้น การเผาทำลายก๊าซมีเทนที่กักเก็บได้นับเป็นการลดผลกระทบจากก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการของเสียอย่างง่ายทั้งนี้การเผาก๊าซมีเทนจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีค่าศักยภาพความร้อนน้อยกว่าก๊าซมีเทนถึง 28 เท่า อย่างไรก็ตาม หากมีการนำก๊าซมีเทนที่กักเก็บได้ไปใช้ประโยชน์ก็จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนขึ้นไปอีกระดับหนึ่ง เช่น การนำก๊าซมีเทนที่ได้ไปเป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มนับเป็นการช่วยลดการใช้ก๊าซหุงต้มที่ได้จากฟอสซิล เทคโนโลยีการคลุมบ่อมีต้นทุนต่ำแต่การรั่วไหลของก๊าซเป็นจุดอ่อนของระบบคลุมบ่อบำบัดที่ต้องมีการกำกับดูแลและตรวจสอบสม่ำเสมอเนื่องจากวัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดรอยรั่ว

การหมักย่อยแบบไร้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซมีเทน หรือ ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ใช้หลักคิดแบบเดียวกับการคลุมบ่อบำบัดน้ำเสียนั่นคือการอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตก๊าซมีเทน จากนั้น นำก๊าซมีเทนที่เก็บกักได้ไปใช้ประโยชน์ อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบกับระบบการคลุมบ่อบำบัดแล้วระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีระบบการควบคุมที่มีความเข้มงวดมากกว่าทั้งนี้เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากที่สุด วัตถุดิบหรือสารตั้งต้นสำหรับใช้ในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถใช้ได้ทั้งแบบเชิงเดี่ยวและแบบผสม สารตั้งต้นเชิงเดี่ยวเป็นการใช้ของเสียจากระบบการเลี้ยงโคนมเพียงอย่างเดียว ส่วนสารตั้งต้นแบบผสมเป็นการใช้ของเสียจากระบบการเลี้ยงโคนมร่วมกับชีวมวลอื่น ๆ เช่น หญ้าหมัก และเศษอาหาร เป็นต้น โดยปกติการใช้สารตั้งต้นแบบผสมจะได้ก๊าซชีวภาพมากกว่าการใช้สารตั้งต้นแบบเดี่ยว ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่มีราคาแพงซึ่งเป็นข้อจำกัดสำหรับเกษตรกรรายย่อย นอกจากนี้ ต้องอาศัย

ความรู้และความเชี่ยวชาญในการจัดการระบบ อย่างไรก็ตาม ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ปริมาณมากและสามารถนำไปใช้ได้หลากหลาย เช่น การใช้ทดแทนก๊าซหุงต้มในครัวเรือน การใช้ทดแทนก๊าซธรรมชาติสำหรับเป็นเชื้อเพลิงรถยนต์ หรือ การใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น นับเป็นการลดการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลได้เป็นอย่างดีซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อีกระดับหนึ่ง

การหมักย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (ภาพที่ 4) กระบวนการนี้อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์เพื่อเปลี่ยนอินทรีย์วัตถุจากสิ่งขับถ่ายไปเป็นก๊าซชีวภาพ (ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 30-40 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซมีเทน 60-70 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล และกากตะกอนที่มีความคงตัวทางชีวภาพและมีธาตุอาหารพืชในระดับสูง การหมักย่อยที่ไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเป็นกระบวนการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีประสิทธิภาพ หากมีการจัดการไม่ให้เกิดการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพระบบนี้สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากสิ่งขับถ่ายและของเสียจากการเลี้ยงโคนมได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ยังมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์



ภาพที่ 4 บ่อหมักย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

การทำปุ๋ยหมักเป็นกระบวนการที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อให้ได้ปุ๋ยหมักที่มีความคงตัวและมีคุณสมบัติเป็นสารปรับปรุงดินและมีธาตุอาหารพืชเหมาะสม การทำปุ๋ยหมักส่วนใหญ่จะใช้ส่วนของแข็ง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการแยกของแข็งออกจากของเหลว ส่วนของเหลวที่ได้อาจจะนำไปบำบัดโดยใช้ระบบการคลุมบ่อบำบัด ปัจจุบันมีเทคโนโลยีการทำปุ๋ยหมักให้เลือกใช้

หลายแบบและประสิทธิภาพการหมักของแต่ละแบบก็จะแตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของการทำปุ๋ยหมัก คือ ในการผลิตปุ๋ยหมักจะมีการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์และก๊าซแอมโมเนีย 10 – 55 เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนตั้งต้น นับเป็นการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ อย่างไรก็ตาม ปุ๋ยหมักสามารถทดแทนการใช้ปุ๋ยเคมีได้ในระดับหนึ่งซึ่งจะช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการใช้ปุ๋ยเคมี

การทำปุ๋ยหมักอาศัยกระบวนการหมักแบบใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์เพื่อเปลี่ยนสิ่งขับถ่ายและของเสียจากการเลี้ยงโคนมไปเป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายฮิวมัสซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารบำรุงดินและธาตุอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ในกระบวนการทำปุ๋ยหมักจะมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์ การนำสิ่งขับถ่ายและของเสียจากระบบการเลี้ยงโคนมไปเป็นปุ๋ยหมักสามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 70-80 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม มีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น ระยะเวลาและความถี่ของการกลับกองปุ๋ยหมัก การทำปุ๋ยหมักเหมาะสำหรับสิ่งขับถ่ายและของเสียที่เป็นของแข็ง อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการทำปุ๋ยหมักจะช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้แต่การนำปุ๋ยหมักไปใช้ในกระบวนการผลิตพืชจะเกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอีกครั้งหนึ่ง

การแยกเอาส่วนที่เป็นของแข็งออกจากส่วนของเหลวจากของเสียจากการเลี้ยงโคนมโดยใช้เครื่องแยกกากกำลังได้รับความนิยมมากขึ้น (ภาพที่ 5) นำส่วนของแข็งไปผลิตเป็นปุ๋ยคอกหรือปุ๋ยหมักจะนำส่วนของเหลวเข้าสู่ระบบการหมักย่อยที่ไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่มีประสิทธิภาพมาก อย่างไรก็ตาม การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของส่วนของแข็งและของเหลวแตกต่างกัน เช่น ส่วนของแข็งจะมีการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เพิ่มมากขึ้นถึง 1,100 เท่า เมื่อเทียบกับของเสียที่ไม่ได้แยกกาก โดยส่วนของแข็ง ทั้งนี้เกิดจากการที่ส่วนของแข็งมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนและเกิดกระบวนการ nitrification ในทางกลับกัน การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากการแยกกากลดลงอย่างน้อย 30 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับการไม่แยกกาก และจากการที่ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซเรือนกระจกหลักที่เกิดจากการจัดการของเสียจึงทำให้การแยกกากช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อคิดเป็นหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (kg CO₂ equivalent) เมื่อเทียบกับการไม่แยกกาก (Jayasundara et al., 2016)



ภาพที่ 5 เครื่องแยกกากมูลโคขนาดใหญ่

การนำมูลสัตว์ไปเป็นปุ๋ยสำหรับการผลิตพืชนั้นแม้ว่าจะเกิดประโยชน์โดยช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม มูลสัตว์หรือปุ๋ยคอกดังกล่าวยังคงมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเข้าสู่ชั้นบรรยากาศด้วยเช่นกัน สำหรับก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการนำมูลสัตว์ไปใช้เป็นปุ๋ยมีทั้งที่เป็นก๊าซเรือนกระจกโดยตรง เช่น ก๊าซไนตรัสออกไซด์ และที่เป็นก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม เช่น ก๊าซแอมโมเนียและสารประกอบไนเตรต ดังนั้น การใช้มูลสัตว์เป็นปุ๋ยบำรุงดินต้องมีการจัดการและใช้เทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม

ในทำนองเดียวกับการใช้ปุ๋ยเคมี เทคนิคการใส่ปุ๋ยคอกมีผลอย่างมากต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก การนำเครื่องจักรกลการเกษตรขนาดใหญ่มาช่วยในการใส่ปุ๋ยคอกช่วยให้การใส่ปุ๋ยคอกมีประสิทธิภาพมากขึ้นแต่ก็ต้องแลกด้วยการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น การหว่านปุ๋ยมูลสัตว์ลงในแปลงพืชเป็นวิธีการที่มีการใช้ทั่วไป ส่วนของเหลวหรือน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดอาจนำไปใช้ในระบบการผลิตโดยการปล่อยเข้าแปลงพืช การใช้ปุ๋ยมูลสัตว์ในลักษณะนี้ทำให้มีสูญเสียไนโตรเจน 40 – 90 เปอร์เซ็นต์ (Meisinger and Jokela, 2000) การจัดการใช้ประโยชน์มูลสัตว์ที่ไม่ถูกต้องและไม่เหมาะสมจะเป็นแหล่งของการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ที่สำคัญ นอกจากนี้ อาจมีการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของก๊าซแอมโมเนียและสารประกอบไนเตรต

การเจือจางปุ๋ยมูลสัตว์ให้มีความเข้มข้นที่เหมาะสมจะช่วยให้พืชสามารถนำธาตุไนโตรเจนใช้ประโยชน์ได้ทันเวลาและมีประสิทธิภาพจะช่วยลดการสูญเสียไนโตรเจน นอกจากนี้ การฉีดปุ๋ยเหลวเข้าสู่ใต้ผิวดิน (ภาพที่ 6) ก็จะช่วยลดการสูญเสียไนโตรเจนได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ (Rotz, 2004) การใส่ปุ๋ยมูลสัตว์โดยคำนึงถึงช่วงเวลาที่สุดคล้องกับความต้องการปุ๋ยของพืชช่วยลดการสูญเสียไนโตรเจนได้อย่างมีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกับการใช้ปุ๋ยเคมี การใช้สารเสริมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ย เช่น สารต้านปฏิกิริยา nitrification

และ สารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยลดการสูญเสียไนโตรเจนจากมูลสัตว์ได้เป็นอย่างดี รวมไปถึง การหลีกเลี่ยง การใส่ปุ๋ยมูลสัตว์ก่อนฝนตกและการปรับความเป็นกรด-ด่างของดินก็มีส่วนช่วยลดการปลดปล่อย ก๊าซไนตรัสออกไซด์จากปุ๋ยมูลสัตว์



ภาพที่ 6 การฉีดมูลสัตว์เหลวเข้าสู่ใต้ผิวดินในแปลงข้าวโพด

บทที่ 5

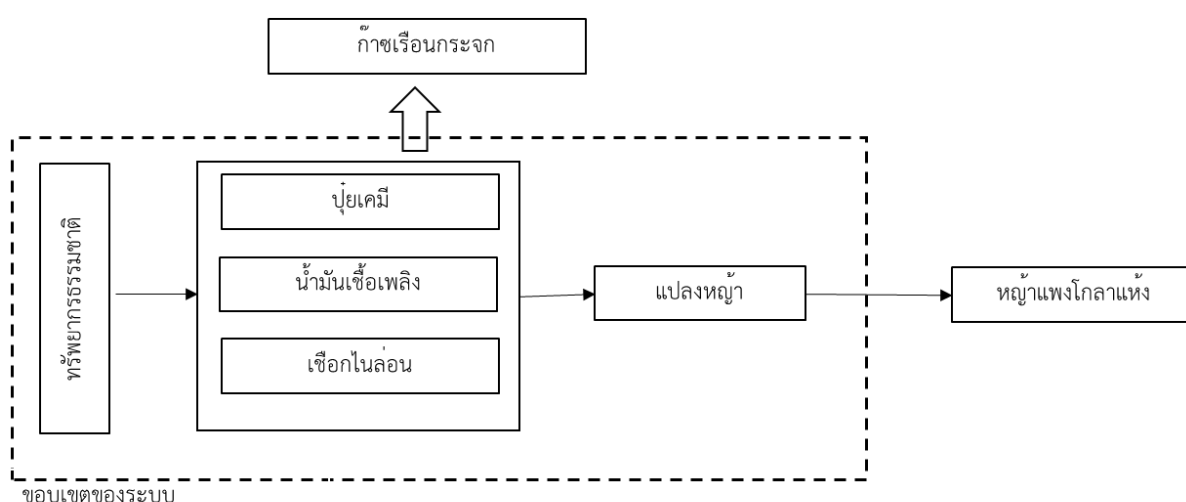
ตัวอย่างการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตน้ำมันโค

การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตน้ำมันโคที่มีการจัดการระบบการผลิตอาหารสัตว์ และมีการจัดการฟาร์มที่แตกต่างกันย่อมแตกต่างกัน และถึงแม้ว่าจะมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของฟาร์มโคนมแต่การจัดการอาหารสัตว์ยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะการผลิตของสัตว์และการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ในบทนี้จะแสดงตัวอย่างวิธีการประเมินค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในขั้นตอนต่าง ๆ ของระบบการผลิตน้ำมันโค ดังนี้ 1) การผลิตหญ้าแพงโกลาแห้ง 2) การผลิตอาหารข้น และ 3) การผลิตน้ำมันโค เพื่อให้เข้าใจในการทำความเข้าใจถึงวิธีการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ จึงทำการลดความซับซ้อนของข้อมูลในระบบการผลิตเหล่านี้ ทำให้ผลการประเมินในบทนี้ไม่ได้ครอบคลุมการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด ดังนั้น จึงไม่แนะนำให้ให้นำตัวอย่างผลการประเมินนี้ไปใช้ในการอ้างอิงใด ๆ

4.1 การผลิตหญ้าแพงโกลาแห้ง

การผลิตหญ้าแพงโกลาแห้งมีการใช้ปัจจัยการผลิตไม่หลากหลายมากนัก ภาพที่ 7 แสดงตัวอย่างการไหลของวัสดุและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตหญ้าแพงโกลาแห้ง หญ้าแพงโกลาสามารถตัดเพื่อทำหญ้าแห้งได้ปีละ 4 รอบ และหลังการตัดทุกครั้งจะมีการใส่ปุ๋ยยูเรียในอัตรา 25 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อไร่ น้ำมันเชื้อเพลิงใช้สำหรับการตัดหญ้า การสะบัดผึ่ง การอัดฟ่อนและการขนหญ้าแห้งเข้าโรงเก็บซึ่งมีอัตราการสิ้นเปลืองเท่ากับ 10 ลิตรต่อไร่ต่อรอบการตัด ส่วนเชื้อเพลิงในรถใช้สำหรับมัดฟ่อนหญ้าในอัตรา 2.4 กิโลกรัมต่อไร่ต่อรอบการตัด



ภาพที่ 7 ตัวอย่างการไหลของวัสดุและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตหญ้าแพงโกลาแห้ง

ตารางที่ 9 แสดงรายการและปริมาณการใช้ปัจจัยการผลิตและผลผลิตหญ้าแพงโกลาแห่งที่ผลิตได้ในพื้นที่ 1 ไร่ ในรอบการผลิต 1 ปี

ตารางที่ 9 ปริมาณปัจจัยการผลิตและผลผลิตหญ้าแพงโกลาแห่งในพื้นที่ 1 ไร่ ในรอบการผลิต 1 ปี

รายการ	หน่วย	ปริมาณ
ปัจจัยการผลิต		
ปุ๋ยยูเรีย	กิโลกรัมไนโตรเจนต่อปี	100
น้ำมันดีเซล	ลิตรต่อปี	40
เชื้อเพลิงสำหรับมัดฟ่อนหญ้า	กิโลกรัมต่อปี	4.8
ผลผลิต		
หญ้าแพงโกลาแห่ง	กิโลกรัมต่อปี	3,200

ปัจจัยการผลิตแต่ละชนิดนั้นนอกจากจะมีภาระก๊าซเรือนกระจกติดมาด้วยแล้ว (ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการการผลิตปัจจัยการผลิต) การใช้ปัจจัยการผลิตเหล่านั้นยังมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกชนิดต่าง ๆ เพิ่มเติม เช่น การใช้ปุ๋ยยูเรียจะเกิดก๊าซไนตรัสออกไซด์และก๊าซแอมโมเนีย รวมถึงสารประกอบไนเตรตที่ถูกชะละลายและไหลบ่าออกจากระบบการผลิต IPCC (2006) แนะนำวิธีการประเมินการสูญเสียไนโตรเจนของปุ๋ยไนโตรเจน ดังนี้

1) การสูญเสียปุ๋ยไนโตรเจนในรูปก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O-N) ในอัตรา 1 เปอร์เซ็นต์ของปุ๋ยไนโตรเจน

2) การสูญเสียปุ๋ยไนโตรเจนในรูปก๊าซแอมโมเนีย (NH_3-N) ในอัตรา 10 เปอร์เซ็นต์ของปุ๋ยไนโตรเจน

3) การสูญเสียปุ๋ยไนโตรเจนในรูปไนเตรต (NO_3-N) ผ่านทางการชะละลายและการไหลบ่าจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณการใส่ปุ๋ย สมบัติของดิน ปริมาณน้ำฝนและระดับของรากพืช เป็นต้น นักวิจัยได้พัฒนาแบบจำลองที่มีความซับซ้อนเพื่อประเมินปริมาณการชะละลายของไนเตรต อย่างไรก็ตาม เพื่อลดความซับซ้อนการประเมินครั้งนี้ใช้สมมติฐานอย่างง่าย คือ การสูญเสียไนเตรต (NO_3-N) กับการชะละลายและการไหลบ่ารวมกันในอัตรา 6.5 เปอร์เซ็นต์ของปุ๋ยไนโตรเจน

4) ก๊าซแอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนตรัสออกไซด์ในอัตรา 1 เปอร์เซ็นต์ของแอมโมเนียไนโตรเจน ในทำนองเดียวกัน ไนเตรต (NO_3-N) จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนตรัสออกไซด์ในอัตรา 0.75 เปอร์เซ็นต์ของไนเตรตไนโตรเจน

หากใช้ค่าแฟกเตอร์ตามคำแนะนำข้างต้นจะสามารถคำนวณการสูญเสียไนโตรเจนของระบบการผลิตหญ้าแพงโกลาแห่ง ดังนี้

1) การสูญเสียในรูปไนตรัสออกไซด์ไนโตรเจน (N_2O-N) = $100 \times 1/100 = 1$ กิโลกรัม N_2O-N หรือเท่ากับ $1 \times 44/28 = 1.57$ กิโลกรัม N_2O

2) การสูญเสียในรูปแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) = $100 \times 10/100 = 10$ กิโลกรัม $\text{NH}_3\text{-N}$ และแอมโมเนียไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นไนตรัสออกไซด์ไนโตรเจนในอัตรา 1 เปอร์เซ็นต์ หรือ เท่ากับ $10 \times 1/100 = 0.10$ กิโลกรัม $\text{N}_2\text{O-N}$ หรือ เท่ากับ $0.10 \times 44/28 = 0.157$ กิโลกรัม N_2O

3) การสูญเสียไนเตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) = $100 \times 6.5/100 = 6.5$ กิโลกรัม $\text{NO}_3\text{-N}$ และไนเตรตไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นไนตรัสออกไซด์ไนโตรเจนในอัตรา 0.75 เปอร์เซ็นต์ หรือ เท่ากับ $6.5 \times 0.75/100 = 0.049$ กิโลกรัม $\text{N}_2\text{O-N}$ หรือ เท่ากับ $0.049 \times 44/28 = 0.077$ กิโลกรัม N_2O

ผลรวมของการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนเท่ากับ $1.57 + 0.157 + 0.077 = 1.804$ กิโลกรัม N_2O

ดังนั้น เมื่อใช้ค่า characterization factor (ตารางที่ 3) เพื่อปรับปริมาณก๊าซไนตรัสออกไซด์ให้เป็นหน่วยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (265) ตามคำแนะนำของ IPCC (2013) (100 ปี) จะเท่ากับ $1.804 \times 265 = 478.06$ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และเมื่อนำค่านี้ไปรวมกับค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการผลิตปุ๋ยไนโตรเจนซึ่งเท่ากับ 3.33 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อกิโลกรัมไนโตรเจน (ตารางที่ 8) (มีค่าเท่ากับ $100 \times 3.33 = 333$ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า) ดังนั้น ผลรวมก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการผลิตและการใช้ปุ๋ยยูเรียเท่ากับ $478.06 + 333 = 811.06$ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

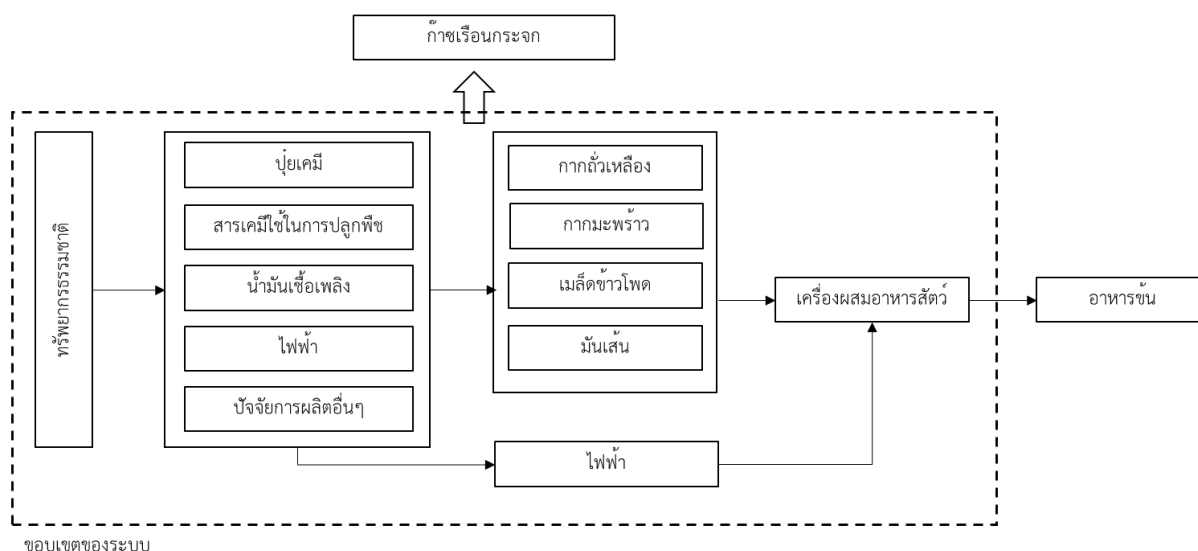
อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลผลิตและการใช้น้ำมันน้ำมันดีเซล (B7) เท่ากับ 2.5337 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลิตร ดังนั้น การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการผลิตหญ้าแพงโกลาแห้ง เท่ากับ $40 \times 2.5337 = 101.348$ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเชือกมัดหญ้าแห้งเท่ากับ 2.04 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อกิโลกรัม ดังนั้น การใช้เชือกมัดฟ่อนหญ้าในการผลิตหญ้าแพงโกลาแห้ง เท่ากับ $4.8 \times 2.04 = 9.792$ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

เมื่อรวมปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากทุกแหล่งจะได้ $811.06 + 101.348 + 9.792 = 922.2$ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ดังนั้น คำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของหญ้าแพงโกลาแห้งได้เท่ากับ $922.2/3,200 = 0.288$ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหญ้าแพงโกลาแห้ง 1 กิโลกรัม

4.2 การผลิตอาหารชั้น

การผลิตอาหารชั้นเริ่มต้นตั้งแต่การได้มาซึ่งทรัพยากรธรรมชาติสำหรับการผลิตปัจจัยการผลิตสำหรับการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์ การนำวัตถุดิบอาหารสัตว์มาผสมกันในสัดส่วนตามสูตรอาหารที่กำหนดจนได้อาหารชั้นสำหรับการเลี้ยงโคนม (ภาพที่ 8)



ภาพที่ 8 ตัวอย่างการไหลของวัสดุและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตอาหารข้นสำหรับโคนม

สำหรับตัวอย่างการประเมินค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการผลิตอาหารข้นครั้งนี้มีการใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์จำนวน 4 ชนิด ได้แก่ กากถั่วเหลือง กากมะพร้าว เมล็ดข้าวโพดและมันเส้น น้ำมันเชื้อเพลิงใช้ในการขนย้ายวัตถุดิบอาหารสัตว์ ส่วนไฟฟ้าใช้ในการเดินเครื่องผสมอาหารสัตว์ ปริมาณการใช้ปัจจัยการผลิตและผลผลิตแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ปริมาณปัจจัยการผลิตและผลผลิตอาหารข้นสำหรับโคนม

รายการ	หน่วย	ปริมาณ
ปัจจัยการผลิต		
กากถั่วเหลือง	กิโลกรัม	10
กากมะพร้าว	กิโลกรัม	20
เมล็ดข้าวโพด	กิโลกรัม	20
มันเส้น	กิโลกรัม	50
ไฟฟ้า	กิโลวัตต์ชั่วโมง	30
น้ำมันเชื้อเพลิง	ลิตร	1
ผลผลิต		
อาหารผสมครบส่วน	กิโลกรัม	100

คำนวณปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผสมอาหารชั้น 100 กิโลกรัม โดยใช้ข้อมูลค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัตถุดิบอาหารสัตว์แต่ละชนิดจากตารางที่ 4 ไฟฟ้าจากตารางที่ 5 และน้ำมันเชื้อเพลิง (B7) จากตารางที่ 6 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกของปัจจัยการผลิตแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 11 และมีรวมผลเท่ากับ 119.87 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ผลิตอาหารชั้นได้ 100 กิโลกรัม ดังนั้น คำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของอาหารชั้นได้เท่ากับ $119.87/100 = 1.20$ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่ออาหารชั้น 1 กิโลกรัม

ตารางที่ 11 การคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของปัจจัยการผลิตสำหรับการผลิตอาหารชั้นสำหรับโคนม

รายการ	ปริมาณ (A)	หน่วย	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (B) (kg CO ₂ e/kg)	A × B
กากถั่วเหลือง	10	กิโลกรัม	3.8400	38.40
กากมะพร้าว	20	กิโลกรัม	1.1200	22.40
เมล็ดข้าวโพด	20	กิโลกรัม	0.6580	13.16
มันเส้น	50	กิโลกรัม	0.7590	37.95
ไฟฟ้า	30	กิโลวัตต์ชั่วโมง	0.1810	5.43
น้ำมันเชื้อเพลิง	1	ลิตร	2.5337	2.53
			รวมทั้งหมด	119.87

4.3 การผลิตนํ้านมโค

การประเมินก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของระบบการผลิตนํ้านมโคเป็นการรวบรวมเอาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากทุกขั้นตอนเริ่มต้นตั้งแต่การนำทรัพยากรธรรมชาติมาใช้ในการผลิตปัจจัยการผลิตต่าง ๆ สำหรับใช้ในการเลี้ยงโคนม เช่น ปุ๋ยเคมี อาหารสัตว์ โรงเรือน เครื่องจักรกลการเกษตร เครื่องมือต่าง ๆ น้ำมันเชื้อเพลิง ไฟฟ้า เวกซ์คันท์ และอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องอีกมากมาย ทั้งนี้เนื่องจากทุกขั้นตอนมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งสิ้น

การประเมินก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตนํ้านมโคในบทนี้ได้ลดความซับซ้อนของระบบเพื่อให้เข้าใจถึงวิธีการประเมินได้ง่ายขึ้น และดำเนินการประเมินตามหลักการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตนํ้านมโคซึ่งมีรายละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อ 3.1 ดังนี้

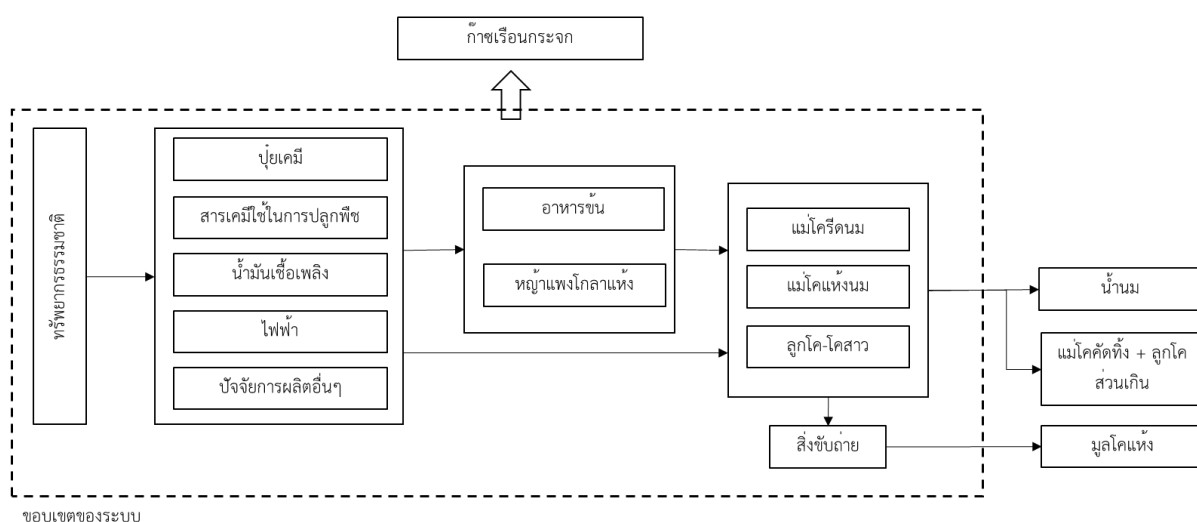
4.3.1 การกำหนดวัตถุประสงค์

การประเมินครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ผลการประเมินข้อมูลในการปรับปรุงประสิทธิภาพทางด้านสิ่งแวดล้อมของฟาร์ม

4.3.2 ขอบเขตของระบบ

การประเมินใช้แนวคิด cradle-to-farm gate หรือ เริ่มต้นตั้งแต่การนำทรัพยากรธรรมชาติมาใช้ผลิตปัจจัยการผลิตสำหรับใช้ในฟาร์มโคนม การเลี้ยงโคนม การจัดการสิ่งขี้ถ่าย จนได้น้ำนมดิบพร้อมจำหน่ายหน้าฟาร์ม (ภาพที่ 9) อย่างไรก็ตาม การประเมินครั้งนี้ไม่รวมการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการก่อสร้างโรงงาน การผลิตเครื่องจักรกลการเกษตร การผลิตเครื่องมือและเวชภัณฑ์ต่าง ๆ และไม่รวมก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้ที่ดินและการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน

ปัจจัยการผลิตที่สำคัญสำหรับใช้ในการทำฟาร์มโคนม ได้แก่ อาหารข้นและหญ้าแพงโกลาแห้งสำหรับใช้เป็นอาหารสัตว์ น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับใช้ขับเคลื่อนเครื่องจักรกลการเกษตร และไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนอุปกรณ์ไฟฟ้า ส่วนผลผลิตที่จำหน่ายออกจากฟาร์ม ได้แก่ น้ำนมดิบ แม่โคคัดทิ้งและลูกโคส่วนเกิน และมูลโคแห้ง



ภาพที่ 9 ตัวอย่างการไหลของวัสดุและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตน้ำนมโค

4.3.3 การกำหนดหน่วยหน้าที่

การประเมินครั้งนี้ใช้ปริมาณน้ำนมมาตรฐาน 1 กิโลกรัม (fat and protein corrected milk, FPCM) เป็นหน่วยหน้าที่ คำนวณปริมาณน้ำนมมาตรฐานตามคำแนะนำของ IDF (2022) ดังนี้ $FPCM (kg) = raw\ milk (kg) \times [0.2534 + (0.1226 \times \% \text{ milk fat}) + (0.0776 \times \% \text{ milk true-protein})]$

4.3.4 การปันส่วนภาระมลพิษระหว่างผลผลิตร่วม

ระบบการผลิตน้ำนมโคมีผลผลิตร่วมจำนวน 3 รายการ ได้แก่ น้ำนมโค แม่โคคัดทิ้งและลูกโคส่วนเกิน และ มูลโคแห้ง ปันส่วนภาระมลพิษระหว่างผลผลิตร่วมโดยใช้มูลค่าทางเศรษฐกิจของผลผลิตร่วม คำนวณโดยใช้ราคาเฉลี่ยย้อนหลัง 3 ปี

4.3.5 การจัดทำบัญชีมลพิษ

ข้อมูลลักษณะทั่วไปของฟาร์ม ปริมาณปัจจัยการผลิต ปริมาณและราคาเฉลี่ยของผลผลิตร่วมแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ข้อมูลฟาร์ม ปัจจัยการผลิตและผลผลิตจากระบบการผลิตน้ำนมโค

รายการ	หน่วย	จำนวน
ลักษณะทั่วไป		
จำนวนแม่โค	ตัว	34
จำนวนโคสาว	ตัว	22
จำนวนลูกโค	ตัว	14
ผลผลิตน้ำนม	กิโลกรัมต่อปี	204,900
ไขมันนม	%	4.32
โปรตีนนม (โปรตีนแท้)	%	3.44 (3.43)
ของแข็งทั้งหมด	%	13.26
ปัจจัยการผลิต		
อาหารข้น	กิโลกรัมต่อปี	86,404
กากถั่วเหลือง	กิโลกรัมต่อปี	6,000
มันเส้น	กิโลกรัมต่อปี	2,800
หญ้าแพงโกลาแห้ง	กิโลกรัมต่อปี	95,204
น้ำมันเชื้อเพลิง	ลิตรต่อปี	10,000
ไฟฟ้า	กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี	10,363
ผลผลิต		
น้ำนมมาตรฐาน (FPCM)	กิโลกรัมต่อปี	214,981 (ราคา 21 บาท/กิโลกรัม)
แม่โคคัดทิ้ง + ลูกโคส่วนเกิน	กิโลกรัมต่อปี	3,200 (ราคา 80 บาท/กิโลกรัม)
มูลโคแห้ง	กิโลกรัมต่อปี	120,000 (ราคา 2 บาท/กิโลกรัม)

การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของฟาร์มโคนมมาจาก 2 ขั้นตอน คือ 1) ขั้นตอนก่อนฟาร์ม หรือ ภาวะก๊าซเรือนกระจกที่ติดมากับวัสดุต่าง ๆ (เช่น อาหารสัตว์ น้ำมันเชื้อเพลิงและไฟฟ้า เป็นต้น) และ 2) ขั้นตอนภายในฟาร์ม (เช่น การใช้ปัจจัยการผลิต การหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมน การจัดการสิ่งขี้ถ่าย เป็นต้น) สำหรับข้อมูลปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในขั้นก่อนฟาร์มได้จากฐานข้อมูล ecoinvent v 3.4 และการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและไฟฟ้าคำนวณโดยใช้แฟคเตอร์จากตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ สำหรับการประเมินปริมาณก๊าซมีเทนจากกระเพาะรูเมน และการปลดปล่อย

ก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการสิ่งขี้ถ่ายดำเนินการตามคำแนะนำของ IPCC (2006) และ Chobtang (2016) ดังนี้

คำนวณการปลดปล่อยก๊าซมีเทน ดังนี้

- ก๊าซมีเทนจากการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมน ดังนี้ CH_4 (กิโลกรัม) = $0.065 \times \text{GEI} / 55.56$ โดยที่ GEI หมายถึง ปริมาณพลังงานจากอาหารทั้งหมดที่โคกิน (ปริมาณ GEI โดยใช้ผลวิเคราะห์ค่าพลังงานรวมของอาหารหน่วยเป็นเมกะจูล MJ)

- ก๊าซมีเทนจากการจัดการสิ่งขี้ถ่าย ดังนี้ CH_4 (กิโลกรัม) = $0.00098198 \times \text{FDM}$ โดยที่ FDM หมายถึง ปริมาณมูลสัตว์แห้งแห้งทั้งหมด (กิโลกรัม) ซึ่งประเมินโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของอาหารสัตว์ของ NRC (2001)

คำนวณการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์

- ก๊าซไนตรัสออกไซด์จากปัสสาวะ ดังนี้ $\text{N}_2\text{O-N}$ (กิโลกรัม) = $0.0116 \times \text{UN}$ โดยที่ UN หมายถึง ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ขับออกทางปัสสาวะ (กิโลกรัม)

- ก๊าซไนตรัสออกไซด์จากมูล ดังนี้ $\text{N}_2\text{O-N}$ (กิโลกรัม) = $0.0023 \times \text{FN}$ โดยที่ FN หมายถึง ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในมูล (กิโลกรัม)

- ก๊าซแอมโมเนียจากสิ่งขี้ถ่ายทั้งหมด ดังนี้ $\text{NH}_3\text{-N}$ (กิโลกรัม) = $0.1 \times \text{TEN}$ โดยที่ TEN หมายถึง ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในสิ่งขี้ถ่าย (ปัสสาวะ + มูล) (กิโลกรัม)

ประเมินปริมาณมูลโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของอาหารสัตว์ ดังนี้ ปริมาณมูล (กิโลกรัม) = ปริมาณอาหารที่กินทั้งหมด (กิโลกรัม) $\times$ (100 – เปอร์เซ็นต์การย่อยได้ของวัตถุดิบแห้งของอาหาร)

ประเมินปริมาณไนโตรเจนในสิ่งขี้ถ่ายโดยใช้การสมดุลไนโตรเจนดังนี้ ปริมาณไนโตรเจนที่กิน (กิโลกรัม) = ปริมาณไนโตรเจนในน้ำนม (กิโลกรัม) + ปริมาณไนโตรเจนในการเพิ่มน้ำหนักตัว (กิโลกรัม) + ปริมาณไนโตรเจนในมูล (กิโลกรัม) + ปริมาณไนโตรเจนในปัสสาวะ (กิโลกรัม) โดยที่

- ปริมาณไนโตรเจนที่กิน (NI) = ปริมาณอาหารที่กิน $\times$ เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในอาหาร (ใช้ผลวิเคราะห์อาหารสัตว์)

- ปริมาณไนโตรเจนในน้ำนม (MN) = ปริมาณน้ำนม $\times$ เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในน้ำนม (ใช้ผลวิเคราะห์น้ำนม)

- ปริมาณไนโตรเจนในการเพิ่มน้ำหนักตัว (GN) = น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น $\times$ เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในการเพิ่มน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม คำนวณโดยใช้ข้อมูลความต้องการโปรตีนเพื่อการเจริญเติบโตของ Castro et al. (2020)

- ปริมาณไนโตรเจนในมูล (FN) = ปริมาณมูล $\times$ เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในมูล ประเมินปริมาณมูลโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของอาหารสัตว์ของ NRC (2001)

- ปริมาณไนโตรเจนในปัสสาวะ (UN) = NI – (MN + GN + FN)

4.3.6 การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์

ประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์โดยใช้ค่า characterization factor ตามคำแนะนำของ IPCC (2013) (100 ปี) ดังนี้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ = 1 ก๊าซมีเทนจากฟอสซิล = 28 ก๊าซมีเทนจากชีวภาพ = 27.75 และ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ = 265

4.3.7 ผลการประเมินและการแปลผล

ผลการประเมินค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์แยกตามขั้นตอนระบบการผลิตน้ำนมแสดงในตารางที่ 13 การผลิตอาหารสัตว์เป็นแหล่งการปลดปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่สำคัญ (55.96 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด) อาหารชั้น กากถั่วเหลืองและมันเส้นแรมคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของอาหารสัตว์ทั้งหมดถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนหญ้าแพงโกลาแห้งมีส่วนแรม 20 เปอร์เซ็นต์

ก๊าซมีเทนจากการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนคิดเป็น 30.33 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด ส่วนการใช้พลังงานในฟาร์มคิดเป็น 9.40 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด โดยส่วนใหญ่มาจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง (93 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงานในฟาร์ม) ส่วนการจัดการสิ่งขี้ถ่ายมีส่วนแรมเพียง 4.31 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด

เมื่อปันส่วนก๊าซเรือนกระจกให้กับแม่โคนมคัดทิ้งและลูกโคส่วนเกิน (5.11 เปอร์เซ็นต์) และมูลโคแห้งที่จำหน่าย (4.79 เปอร์เซ็นต์) จะเหลือปันส่วนให้กับน้ำนม 90.10 เปอร์เซ็นต์ และคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ได้เท่ากับ 1.21 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อผลผลิตน้ำนมมาตรฐาน 1 กิโลกรัม

การผลิตอาหารสัตว์นับเป็นจุดวิกฤติของระบบการผลิตน้ำนม ดังนั้น ในการปรับปรุงประสิทธิภาพทางด้านสิ่งแวดล้อมฟาร์มโคนมควรให้ความสำคัญกับการใช้อาหารชั้นและกากถั่วเหลืองซึ่งมีภาระเรือนกระจกสูงโดยการเลือกวัตถุดิบอาหารสัตว์ชนิดอื่นที่สามารถทำหน้าที่เดียวกันได้แต่มีภาระเรือนกระจกต่ำกว่าก็จะสามารถช่วยลดค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของน้ำนมได้ ในทำนองเดียวกัน การใช้สารเคมีเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนอาจมีความจำเป็นสำหรับระบบการผลิตน้ำนมโคน เนื่องจากก๊าซมีเทนจากระบบการหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมนเป็นจุดวิกฤติทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของน้ำนม การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงก็เป็นอีกจุดวิกฤติทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ ดังนั้น การเลือกใช้แหล่งพลังงานทางเลือกอื่น ๆ เช่น พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ จะช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบการผลิตน้ำนมโคได้

ตารางที่ 13 แหล่งและค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบการผลิตน้ำนมโค

รายการ	คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (kg CO ₂ e)	คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (kg CO ₂ e/ 1 kg FPCM)
อาหารสัตว์	161,982	0.68
- อาหารข้น	103,686	0.43
- กากถั่วเหลือง	23,040	0.10
- มันเส้น	2,125	0.01
- หย้าแพงโกลาแห้ง	33,131	0.14
พลังงาน	27,215	0.11
- การใช้น้ำมันเชื้อเพลิง	25,337	0.11
- การใช้ไฟฟ้า	1,878	0.01
การหมักย่อยอาหารในกระเพาะรูเมน	87,789	0.37
การจัดการสิ่งขี้ถ่าย	83.68	0.05
- ก๊าซมีเทนจากการจัดการสิ่งขี้ถ่าย	1,457	0.006
- ก๊าซไนตรัสออกไซด์จากปัสสาวะ	8,799	0.037
- ก๊าซไนตรัสออกไซด์จากมูล	1,027	0.004
- ก๊าซแอมโมเนียจากสิ่งขี้ถ่าย	1,205	0.005
รวมทั้งหมด	315,649	1.21

เอกสารอ้างอิง

- กรมปศุสัตว์. 2566. สถิติปศุสัตว์. ศูนย์สารสนเทศ กรมปศุสัตว์. แหล่งที่มา: www.dld.go.th. เข้าถึงเมื่อ 20 ธันวาคม 2566.
- คณะกรรมการความต้องการโภชนาโคมนในประเทศไทย. 2563. ความต้องการโภชนาของโคมนในประเทศไทย. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น. 260 หน้า.
- งานวิจัยนโยบายองค์กร. 2564. การศึกษาวิถีชีวิตของการใช้พลังงานไปสู่ภาคขนส่งและการคำนวณเปรียบเทียบรอยเท้าคาร์บอนในการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เชื้อเพลิงยานยนต์ไฟฟ้าและเชื้อเพลิงชีวภาพ. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). 64 หน้า.
- จีระศักดิ์ ขอบแตง วรธนา อ่างทอง ญุฑนาถ โคตรพรหม สุมน โพธิจันทร์ และ จำไพโร นามสีลี. 2555. ผลของคุณภาพหญ้าแพงโกล่าต่อปริมาณการกินได้ การย่อยได้และการผลิตก๊าซมีเทนในโคเนื้อ. เกษตร 40: 166 – 169.
- ชวนิศนดากร วรธรรม, ม.ร.ว. 2534. การเลี้ยงโคนม. พิมพ์ครั้งที่ 4. โรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช กรุงเทพฯ. 365 หน้า.
- สุริพร ขอนพิกุล ณภัทร จักรวัฒนา และ จิตติ มังคละศิริ. 2561. การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยและแนวทางการลดเพื่อการผลิตอย่างยั่งยืน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 26: 1176 – 1196.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2566. สถิติการนำเข้าส่งออกสินค้าเกษตรโคนม. แหล่งที่มา: www.oae.go.th. เข้าถึงเมื่อ 15 ธันวาคม 2566.
- Åby, B.A., Randby, Å.T., Bonesmo, H. and Aass, L. 2019. Impact of grass silage quality on greenhouse gas emissions from dairy and beef production. Grass Forage Sci. 74: 525 – 534.
- Adom, F., Workman, C., Thoma, G. and Shonnard, D. 2013. Carbon footprint analysis of dairy feed from a mill in Michigan, USA. International Dairy J. 31: S21 – S28.
- Aguilar-Pérez, C.F., Arango, J., Arceo-Castillo, J.I., Castela-Ortega, O.A., Chirinda, N., Flores-Santiago, E.J., Galindo-Maldonado, F.A., Jiménez-Ocampo, R., Ku-Vera, J.C., Molina-Botero, I.C., Montoya-Flores, M.D., Piñeiro-Vázquez, A.T., Ramírez-Avilés, L., Solorio-Sánchez, F.J. and Valencia-Salazar, S.S. 2020. Review: Strategies for enteric methane mitigation in cattle fed tropical forages. Animal. 14: s453 – s463.
- Castro, M.M.D., Albino, R.L., Rodrigues, J.P.P., Sguizzato, A.L.L., Santos, M.M.F., Rotta, P.P., Caton, J.S., Moraes, L.E.F.D., Silva, F.F. and Marcondes, M.I. 2020. Energy and protein requirements of Holstein × Gyr crossbred heifers. Animal 14: 1857 – 1866.

- Chobtang, J. 2016. Appraisal of the Environmental Sustainability of Milk Production Systems in New Zealand. PhD Dissertation. Massey University. Palmerston North. New Zealand. 312 pp.
- Chobtang, J., McLaren S.J., Ledgard, S.F. and Donaghy, D.J. 2017. Environmental trade-offs associated with intensification methods in a pasture-based dairy system using prospective attributional life cycle assessment. *J. Cleaner Prod.* 143: 1302 – 1312.
- Dijkstra, J., Bannink, A., France, J., Kebreab, E. and van Gastelen, S., 2018. Short communication: Antimethanogenic effects of 3-nitrooxypropanol depend on supplementation dose, dietary fiber content, and cattle type. *J. Dairy Sci.* 101: 9041 – 9047.
- FAO. 2023. FAOSTAT. Source: www.faostat.org. Accessed 15 December 2023.
- Feng, X. and Kebreab, E. 2020. Net reductions in greenhouse gas emissions from feed additive use in California dairy cattle. *Plos One.* 15: e0234289.
- Feng, X.Y., Dijkstra, J., Bannink, A., van Gastelen, S., France, J. and Kebreab, E. 2020. Antimethanogenic effects of nitrate supplementation in cattle: A meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 103: 11375 – 11385.
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. and Tempio, G. 2013. Tackling Climate Change Through Livestock: A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities. Rome: FAO.
- Gerber, P., Vellinga, T., Opio, C. and Steinfeld, H. 2011. Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. *Livest. Sci.* 139: 100 – 108.
- Grossi, G., Goglio, P., Vitali, A. and Williams, A.G. 2019. Livestock and climate change: impact of livestock on climate and mitigation strategies, *Anim. Front.* 9: 69 – 76.
- Guo, C., Zhengwei, X., Bin, W., Tao, R., Yunfan, W., Jialong, Z., Jianwei, L. and Xiaokun, L. 2016. Effects of slow/controlled release urea on annual CH₄ and N₂O emissions in paddy field. *Chinese J. Applied Ecol.* 27: 1489 – 1495.
- Guyader, J., Little, S., Kröbel, R., Benchaar, C. and Beauchemin, K.A. 2017. Comparison of greenhouse gas emissions from corn- and barley-based dairy production systems in Eastern Canada. *Agric. Syst.* 152: 38 – 46.

- Hegarty, R.S., Cortez Passetti, R.A., Dittmer, K.M., Wang, Y., Shelton, S., Emmet-Booth, J., Wollenberg, E., McAllister, T., Leahy, S., Beauchemin, K. and Gurwick, N. 2021. An Evaluation of Emerging Feed Additives to Reduce Methane Emissions from Livestock. Edition 1. A Report Coordinated by Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS) and the New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre (NZAGRC) initiative of the Global Research Alliance (GRA). Source: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/116489>. Accessed 15 December 2023.
- Herrero, M., Henderson, B., Havlík, P., Thornton, P.K., Conant, R.D., Smith, P., Wiersenius, S., Hristov, A.N., Gerber, P., Gill, M., Butterbach-Bahl, K., Valin, H., Garnett, T. and Stehfest, E. 2016. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nat. Clim Change*. 6: 452 – 461.
- Hristov, A.N., Oh, J., Firkins, J.L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Makkar, H.P.S., Adesogan, A.T., Yang, W., Lee, C., Gerber, P.J., Henderson, B. and Tricarico, J.M. 2013. Special Topic - Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *J. Anim. Sci.* 91: 5045 – 5069.
- IDF. 2022. The IDF Global Carbon Footprint Standard for the Dairy Sector. In: Bulletin of The IDF No. 520/2022. International Dairy Federation (ed.), Brussels. 109 pp.
- ILCD. 2011. ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context. UR 24571 EN. Luxemburg. Publications Office of the European Union. 143 pp.
- IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4, Agriculture. Forestry, and Other Land Use. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change. Source: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>. Accessed 10 December 2023.
- IPCC. 2013. Climate Change. The Physical Science Basis. Working Group 1 contribution to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Source: <http://www.climatechange2013.org>. Accessed 15 December 2023.
- IPCC. 2019. Climate Change and Land. Chapter 5: Food Security. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change. Source: <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-5/>. Accessed 10 December 2023.
- Jayasundara, S., Appuhamy, J.A.D.R.N., Kebreab, E. and Wagner-Riddle, C. 2016. Methane and nitrous oxide emissions from Canadian dairy farms and mitigation options: An updated review. *Canadian J. Anim. Sci.* 96: 306 – 331.

- Liu C., Wang K. and Zheng X. 2013. Effects of nitrification inhibitors DCD and DMPP on nitrous oxide emission crop yield and nitrogen uptake in a wheat–maize cropping system. *Biogeosciences*. 10: 2427 – 2437.
- Maigaard, M., Weisbjerg, M.R., Johansen, M., Walker, N., Ohlsson, C. and Lund, P. 2024. Effects of dietary fat, nitrate, and 3-nitrooxypropanol and their combinations on methane emission, feed intake, and milk production in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 107: 220 – 241.
- Meisinger, J.J. and Jokela, W.E. 2000. Ammonia Volatilization from Dairy and Poultry Manure. *Managing Nutrients and Pathogens from Animal Agriculture*. Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service, Ithaca, NY, USA. 21 pp.
- Mohammed, N., Ajisaka, N., Lila, Z.A., Hara, K., Mikuni, K., Hara, K., Kanda, S. and Itabashi, H. 2004. Effect of Japanese horseradish oil on methane production and ruminal fermentation in vitro and in steers. *J. Anim. Sci.* 82: 1839 – 1846.
- Nguyen, V.-H., Stuart, A.M., Nguyen, T.-M.-P., Pham, T.-M.-H., Nguyen, N.-P.-T., Pame, A.R.P., Sander, B.O., Gummert, M. and Singleton, G.R. 2022. An assessment of irrigated rice cultivation with different crop establishment practices in Vietnam. *Sci. Reports* 12: 401.
- NRC. 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 7th Revised Edition. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Rawluk, C.D.L., Grant, C.A. and Racz, G.J. 2001. Ammonia volatilization from soils fertilized with urea and varying rates of urease inhibitor NBPT. *Canadian J. Soil Sci.* 81: 239 – 246.
- Rezaei Ahvanooei, M.R., Norouzian, M.A., Piray, A.H., Vahmani, P., and Ghaffari, M.H. 2024. Effects of monensin supplementation on rumen fermentation, methane emissions, nitrogen balance, and metabolic responses of dairy cows: A systematic review and dose-response meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 107: 607 – 624.
- Riedesel, L., Laidig, F., Hadasch, S., Rentel, D., Hackauf, B., Piepho, H.P. and Feike, T. 2022. Breeding progress reduces carbon footprints of wheat and rye. *J. Cleaner Prod.* 377: 134326.
- Rotz, A. C. 2004. Management to reduce nitrogen losses in animal production. *J. Anim. Sci.* 82: E119 – E137.
- Rotz, A. C. 2018. Review: Modeling greenhouse gas emissions from dairy farms. *J. Dairy Sci.* 101: 6675 – 6690.

- Schilde, M., von Soosten, D., Hüther, L., Meyer, U., Zeyner, A. and Dänicke, S. 2021. Effects of 3-nitrooxypropanol and varying concentrate feed proportions in the ration on methane emission, rumen fermentation and performance of periparturient dairy cows. *Arch. Anim. Nutr.* 75: 79 – 104.
- Seradj, A.R., Abecia, L., Crespo, J., Villalba, D., Fondevila, M. and Balcells, J. 2014. The effect of Bioflavex® and its pure flavonoid components on in vitro fermentation parameters and methane production in rumen fluid from steers given high concentrate diets. *Anim. Feed Sci. Technol.* 197: 85 – 91.
- Stefenoni, H.A., Räisänen, S.E., Cueva, S.F., Wasson, D.E., Lage, C.F.A., Melgar, A., Fetter, M.E., Smith, P., Hennessy, M., Vecchiarelli, B., Bender, J., Pitta, D., Cantrell, C.L., Yarish, C. and Hristov, A.N. 2021. Effects of the macroalga *Asparagopsis taxiformis* and oregano leaves on methane emission, rumen fermentation, and lactational performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 104: 4157 – 4173.
- UN. 2017. World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP/248. 66 pp.
- Valencia Salazar, S.S., Piñeiro Vázquez, A.T., Molina Botero, I.C., Lazos Balbuena, F.J., Uuh Narváez, J.J., Segura Campos, M.R., Ramírez Avilés, L., Solorio Sánchez, F.J. and Ku Vera, J.C. 2018. Potential of *Samanea saman* pod meal for enteric methane mitigation in crossbred heifers fed low-quality tropical grass. *Agric. Forest Meteorol.* 258: 108 – 116.
- van Gastelen, S., Dijkstra, J. and Bannink, A. 2019. Are dietary strategies to mitigate enteric methane emission equally effective across dairy cattle, beef cattle, and sheep? *J. Dairy Sci.* 102: 6109 – 6130.
- Xu, Y., Li-hua, J., Zhe, S., Jing, S., Jian-lin, W., Mei, W., Guo-sheng, L. and Zhao-hui, L. 2015. Effects of corn straw returning and nitrogen fertilizer application methods on N₂O emission from wheat growing season. *J. Agric. Res. Environ.* 32: 552 – 558.

