# บทที่ 2
# หลักการและทฤษฎี

## 2.1 ข้าวโพดหวาน

ข้าวโพดเป็นธัญพืชที่สำคัญมากพืชหนึ่งของโลก ผลผลิตประมาณครึ่งหนึ่งใช้เป็นอาหารมนุษย์ มีถิ่นกำเนิดแถบบริเวณประเทศตะวันตก และเป็นที่นิยมบริโภคกันแถบประเทศทวีปอเมริกากลาง และใต้ สำหรับประเทศไทย ข้าวโพดเป็นที่รู้จักและนิยมบริโภคในรูปอาหารว่าง และยังมีการปลูกข้าวโพดเพื่อการเลี้ยงสัตว์ จนถึงปัจจุบันข้าวโพดนับเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการเพาะปลูกดังนี้ (ระบบจัดการคุณภาพข้าวโพด, 2550)

### 2.1.1 การเตรียมแปลงปลูก

ไถดินให้ลึกประมาณ 20-30 เซนติเมตร เก็บเศษวัชพืช และตากดินไว้ 7-10 วัน เพื่อกำจัดศัตรูพืชและเพื่อให้ดินร่วนซุย ใส่ปุ๋ยหมักหรือปุ๋ยคอกอัตรา 500-1,000 กิโลกรัมต่อไร่ แล้วไถพรวนอีกครั้งเพื่อปรับระดับดินให้เสมอ หากพบว่าดินมีความเป็นกรดด่างต่ำกว่า 5.5 ให้หว่านปูนขาว อัตรา 100-200 กิโลกรัมต่อไร่ แล้วพรวนกลบ

### 2.1.2 การเตรียมเมล็ดพันธุ์

เลือกพันธุ์ปลูกที่ตรงกับความต้องการของตลาด เมล็ดพันธุ์ที่จะใช้ปลูกต้องมาจากแหล่งพันธุ์ที่เชื่อถือได้ เพื่อให้ได้ฝักข้าวโพดหวานที่มีคุณภาพตรงตามพันธุ์สอดคล้องกับความต้องการของตลาด ก่อนปลูกควรคลุกเมล็ดด้วยสารเมตาแลกซิล 35% ดีเอส อัตรา 7 กรัมต่อเมล็ดพันธุ์ 1 กิโลกรัม เพื่อป้องกันกำจัดโรคราน้ำค้างที่อาจติดมากับเมล็ด

### 2.1.3 การปลูก

หากปลูกในนาหรือสภาพไร่ ปลูกเป็นแถวคู่ ยกร่องสูง 30-40 เซนติเมตร ระยะระหว่างสันร่อง 100-125 เซนติเมตร หยอดเมล็ดข้างร่องทั้งสองข้างแบบสลับฟันปลา ระยะระหว่างหลุม 25-30 เซนติเมตร จำนวน 2-3 เมล็ดต่อหลุม แล้วถอนแยกเมื่อต้นกล้าอายุ 14 วัน ให้เหลือ 2 ต้นต่อหลุม หากปลูกบนร่องสวน ใช้ระยะปลูก 50 x 50 เซนติเมตร จำนวน 3-4 เมล็ดต่อหลุม แล้วถอนแยกเมื่อต้นกล้าอายุ 14 วัน ให้เหลือ 3 ต้นต่อหลุม ใช้เมล็ดพันธุ์ 4.5-6.0 กิโลกรัมต่อไร่ จะทำให้ได้จำนวนต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 18,000-20,000 ต้นต่อไร่ ใช้ปุ๋ยเคมีทางดินสูตร 16-20-0 สำหรับดินร่วนหรือดินร่วนเหนียวปนทราย หรือสูตร 15-15-15 สำหรับดินร่วนปนทราย อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ รองก้นหลุม

**2.1.4 การใส่ปุ๋ย**

เมื่อต้นข้าวโพดอายุ 20 วัน ใส่ปุ๋ยเคมีทางดินสูตร 46-0-0 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ หรือสูตร 21-0-0 อัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ โรยข้างต้นหรือข้างแถว แล้วพรวนดินกลบ

**2.1.5 การให้น้ำ**

ควรให้น้ำทันทีหลังปลูกและหลังให้ปุ๋ยทุกครั้ง โดยให้จนเต็มสันร่อง เพื่อให้เมล็ดข้าวโพดงอกได้ สม่ำเสมอ และเพื่อให้ปุ๋ยละลายได้หมด จากนั้นให้น้ำอย่างสม่ำเสมอ สูงระดับ 3 ใน 4 ส่วนของความลึกร่อง ไม่ปล่อยให้น้ำท่วมขังในแปลงนานเกิน 24 ชั่วโมง อาจจะทำให้ต้นข้าวโพดชะงักการเจริญเติบโต

**2.1.6 การเก็บเกี่ยว**

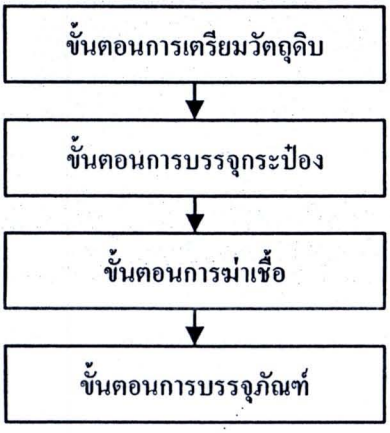
ข้าวโพดหวานเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด ที่จะทำให้ข้าวโพดหวานคุณภาพดี มีหลักพิจารณา คือ 1) เก็บเกี่ยวเมื่อ 18-20 วันหลังออกไหม หรือทดลองบีบบริเวณปลายฝักจะยุบตัวลง จะสามารถเก็บเกี่ยวได้ 2) การเก็บเกี่ยวต้องหักฝักสดให้ถึงบริเวณก้านฝักที่ติดลำต้น และต้องเก็บเกี่ยวทุกวันให้แล้วเสร็จภายใน 5-7 วัน

**2.1.7 การขนส่งผลิตผล**

การขนส่งผลิตผลไปยังแหล่งรวบรวมสินค้า การขนส่งไปยังจุดรวบรวมหรือผู้รับซื้อทันทีหลังการเก็บเกี่ยว หากระยะทางไกลควรใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อไม่น้อยกว่า 15 เซนติเมตร ยาว 3-4 เมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร โดยรอบตลอดความยาวท่อ ทำเป็นปล่องเสียบไว้ตรงกลางกองภาชนะบรรจุ จำนวน 2-3 อัน เพื่อช่วยระบายความร้อนและถ่ายเทอากาศ

**2.2 กระบวนการผลิตอาหารกระป๋อง**

กระบวนการในการถนอมรักษาอาหารให้สามารถมีผลผลิตรับประทานได้ในช่วงนอกฤดูกาล หรือเพื่อจำหน่ายสินค้า กระบวนการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋องจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ในการยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้นานนับปี กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง สามารถสรุปขั้นตอนการผลิตหลักๆ ร่วมกันทั้งหมด 4 ขั้นตอนดังรูป 2.1 โดยในรายละเอียดของขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบจะแตกต่างกันไปสำหรับอาหารกระป๋องแต่ละประเภทแต่ในภาพรวมแล้ว อุตสาหกรรมอาหารกระป๋องทั้งหมดจะมีลำดับขั้นตอนกระบวนการผลิต อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต และลักษณะการใช้พลังงานที่คล้ายคลึงกัน




**รูป 2.1** แสดงลำดับขั้นตอนกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง
**ที่มา:** สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2547)

**2.2.1 กระบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง**

รูปแบบการผลิตของอุตสาหกรรมอาหารผลไม้กระป๋องโดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่อาจมีความแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบและรูปแบบของผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีกระบวนการผลิตหลักๆ ดังรูป 2.2 รายละเอียดกระบวนการผลิตผลไม้กระป๋องแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน ดังนี้

**2.2.1.1 การรับวัตถุดิบ/ล้างทำความสะอาด**

วัตถุดิบที่รับเข้ามาโดยทั่วไปจะถูกลำเลียงเพื่อล้างทำความสะอาด อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ล้างจะแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบ เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของวัตถุดิบในการล้างทำความสะอาด อาจใช้กาลำเลียงวัตถุดิบด้วยระบบสายพานลำเลียงผ่านระบบสเปรย์น้ำเพื่อล้างทำความสะอาด และควรจัดให้มีวัตถุดิบเต็มสายพานลำเลียงอยู่เสมอ เพื่อประหยัดเวลา และลดการสูญเสียน้ำล้างทำความสะอาด

**2.2.1.2 การคัดขนาด**

วัตถุดิบที่ล้างทำความสะอาดแล้ว จะถูกลำเลียงด้วยสายพานลำเลียงเพื่อทำการคัดขนาด

**2.2.1.3 การปอกเปลือก/เจาะแกน/คว้านเมล็ด และตัดแต่ง**

ในขั้นตอนปอกเปลือก หรือเจาะแกนจะพบการสูญเสียเนื้อวัตถุดิบติดไปกับเปลือกจากนั้นเนื้อวัตถุดิบที่ได้จะถูกลำเลียงด้วยสายพานไปตัดแต่ง เช่น ตัดเป็นแว่น เป็นต้น

**2.2.1.4 การผลิตน้ำปรุงรส**

น้ำปรุงรสที่ผลิตขึ้นในกระบวนการผลิตผลไม้กระป๋องเป็นน้ำเชื่อมสำหรับปรุงรสให้กับผลไม้ในกระป๋อง โดยผลิตจากส่วนผสมของน้ำตาลและน้ำ เมื่อน้ำปรุงรสผ่านการผลิตจนเสร็จเรียบร้อยจะนำไปบรรจุลงในกระป๋องเพื่อส่งไปยังกระบวนการไล่อากาศและปิดฝาต่อไป

**2.2.1.5 การบรรจุกระป๋อง**

ในการบรรจุกระป๋องพนักงานจะทำการคัดเลือกเนื้อผลไม้ที่ตัดแต่งแล้วและมีขนาดเท่ากันสภาพใกล้เคียงกันบรรจุลงกระป๋อง และส่งไปเติมน้ำปรุงรส

**2.2.1.6 ไล่อากาศ และปิดฝา**

หลังจากเติมน้ำปรุงแล้ว ผลไม้กระป๋องจะถูกส่งไปไล่อากาศภายในกระป๋องก่อนปิดผนึก การไล่อากาศอาจจะใช้ระบบปั๊มสูญญากาศ หรือใช้ระบบการไล่อากาศโดยใช้ไอน้ำก็ได้ โรงงานผลิตอาหารกระป๋องโดยทั่วไปจะใช้ระบบการไล่อากาศด้วยไอน้ำ และอุปกรณ์หลักที่ใช้ก็คือตู้ไล่อากาศ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่ต่ำกว่าอุณหภูมิของไอน้ำที่ใช้ในการไล่อากาศจะอยู่ที่ประมาณ 100°C ถึง 120°C

**2.2.1.7 การฆ่าเชื้อ**

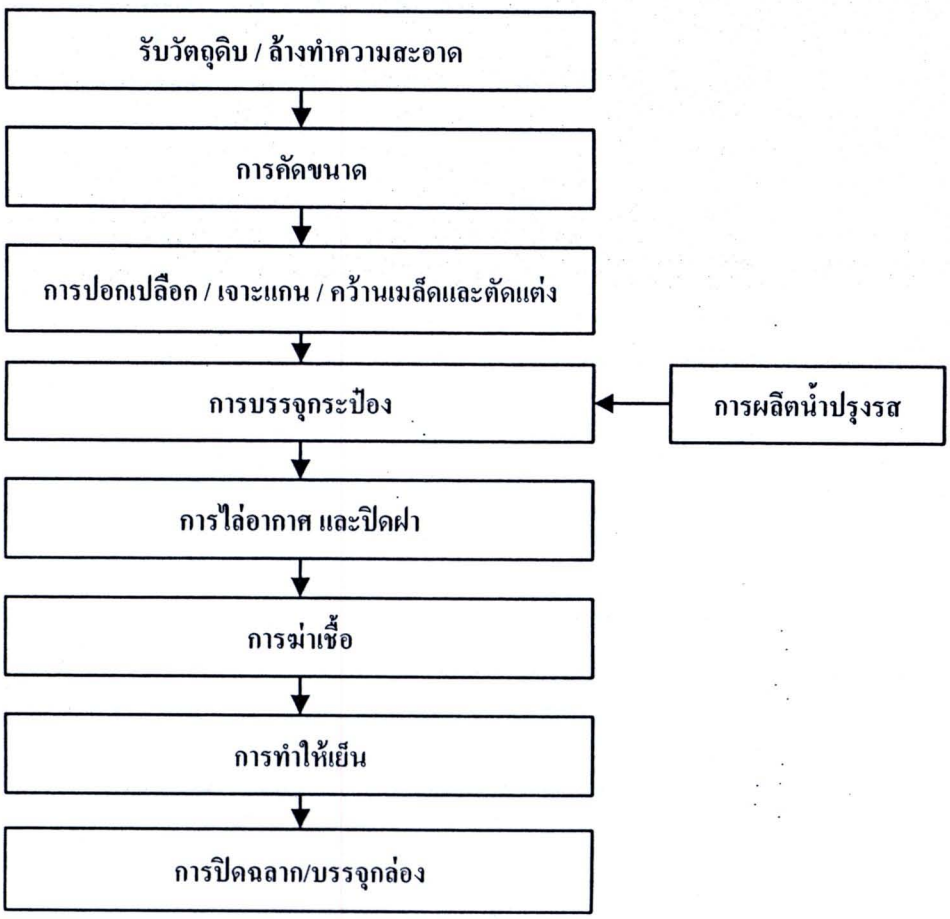
หลังจากปิดผนึกแล้วผลไม้กระป๋องจะผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อเพื่อทำลายจุลินทรีย์ การควบคุมอุณหภูมิ และเวลาเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญในการฆ่าเชื้อ หม้อฆ่าเชื้อส่วนใหญ่จะเป็นชนิดใช้ไอน้ำ และเป็นระบบปิดเนื่องจากมีการใช้ไอน้ำปริมาณมาก และเป็นเวลานานอุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ ประมาณ 90°C ถึง 120°C ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์

**2.2.1.8 การทำให้เย็น**

ภายหลังจากฆ่าเชื้อจนได้ระยะเวลาที่เหมาะสมแล้ว จะต้องลดอุณหภูมิของผลไม้กระป๋องลงโดยเร็ว เพื่อป้องกันความร้อนสะสม ซึ่งอาจทำให้รสชาติและคุณค่าของผลิตภัณฑ์ลดลง โดยทั่วไปจะใช้ระบบน้ำเย็นฉีดเข้าไปในหม้อฆ่าเชื้อ และน้ำดังกล่าวจะถูกหมุนเวียน โดยนำกลับไประบายความร้อนด้วยหอผึ่งน้ำ และนำกลับมาใช้ใหม่

**2.2.1.9 การปิดฉลากและบรรจุกล่อง**

หลังจากผลไม้กระป๋องมีอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง และถูกทำให้แห้งสนิทแล้ว จะถูกนำมาปิดฉลากและบรรจุกล่องเพื่อเก็บรักษาและขนส่งต่อไป

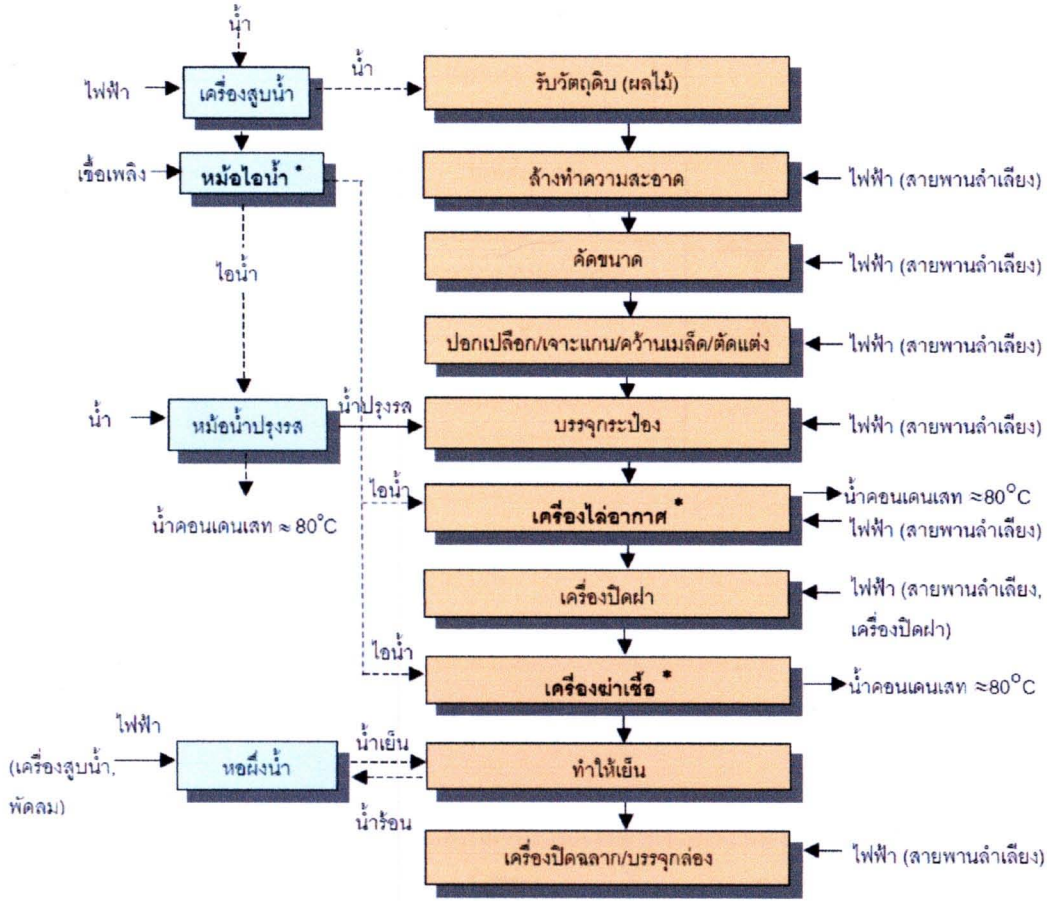



**รูป 2.2** แสดงกระบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง

**ที่มา**: สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2547)

**2.2.2 การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง**

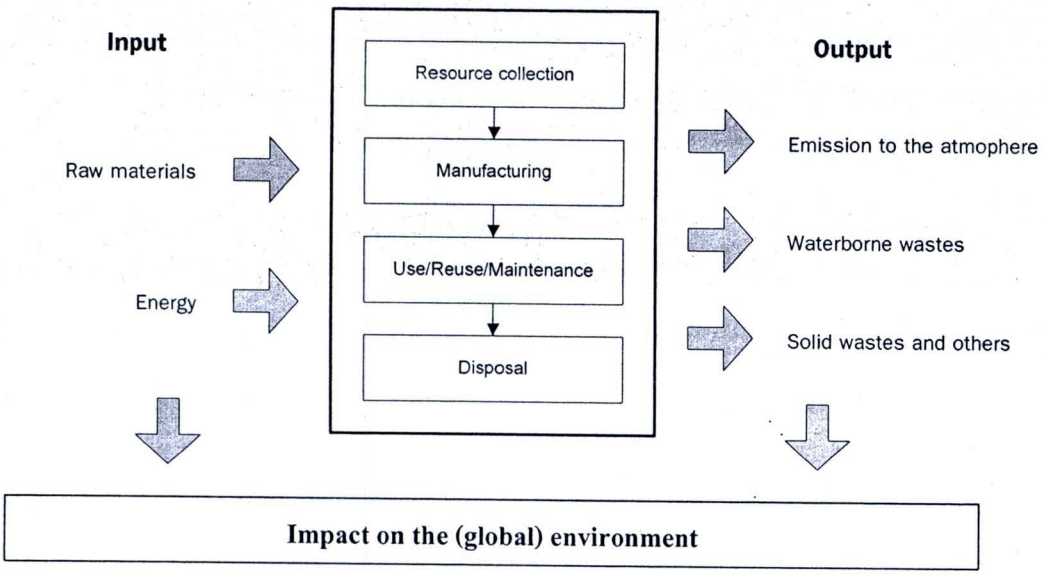
ลักษณะการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมผลิตอาหารกระป๋อง สามารถพิจารณาได้จากขั้นตอนกระบวนการผลิตอุปกรณ์หลักที่ใช้ในกระบวนการผลิต และประเภทของพลังงานที่ต้องการสำหรับอุปกรณ์หลักที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิต ซึ่งในแต่ละกระบวนการผลิตจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ดังรูป 2.3




**รูป 2.3** แสดงการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง
**ที่มา:** สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2547)

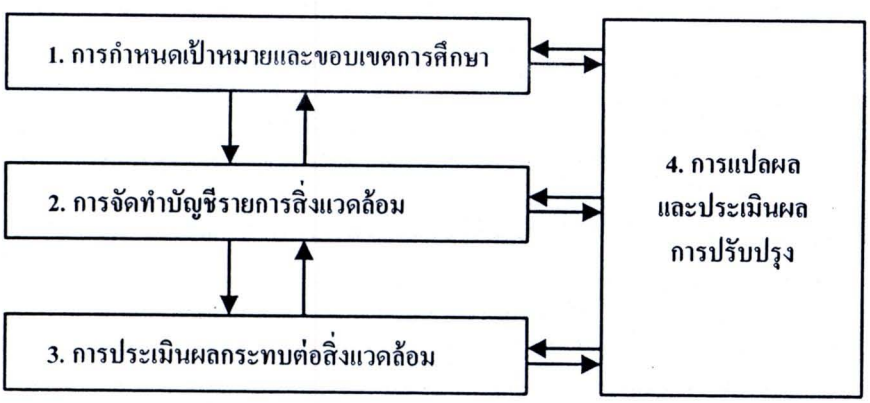
**2.3 การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment: LCA)**

การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ใดๆ เป็นวิธีการรวบรวมและประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิตตั้งแต่เกิดจนตาย (from cradle to grave) เริ่มจากการใช้วัตถุดิบและพลังงานในกระบวนการผลิต การขนส่ง การเก็บรักษา การใช้ การทิ้งและการจัดการของเสียที่เกิดจากกระบวนการ แสดงดังรูป 2.4 โดยระบุถึงปริมาณพลังงานและวัสดุทั้งหมดที่ใช้ รวมทั้งของเสียทั้งหมดที่มีการปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมภายใต้ขอบเขตที่กำหนด นำข้อมูลที่ได้มาพิจารณาหาวิธีปรับปรุงผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด โดยแนวความคิดดังกล่าวนี้จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินทั้งในด้านของปริมาณและรูปแบบการใช้พลังงาน (Life Cycle Energy Analysis) การใช้วัสดุ (Life Cycle Material Analysis) และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Impact Assessment)




**รูป 2.4** การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
**ที่มา:** ธำรงรัตน์ (2550)

วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์มีวิธีการดำเนินการหลายวิธี แต่ปัจจุบันวิธีหลักๆ เริ่มมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยนิยมใช้วิธีการและขั้นตอนการศึกษาตามกรอบของอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ซึ่งแบ่งขั้นตอนการดำเนินงาน LCA ออกเป็น 4 ขั้นตอน (ธำรงรัตน์, 2550) ดังรูป 2.5 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้




**รูป 2.5** ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ ตามหลัก ISO 14040
**ที่มา:** ธำรงรัตน์ (2550)

**2.3.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and Scope)**

ในการประเมินวัฏจักรชีวิตนั้น ขั้นตอนแรกจะต้องทราบว่าสิ่งที่จะทำการศึกษาคืออะไร และจะทำการศึกษาอย่างไร ซึ่งผลจากการศึกษาจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้มากน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับการกำหนดขอบเขต และเป้าหมายของประเมินวัฏจักรชีวิต สามารถนำไปใช้กับเป้าหมายหลักๆ ของการศึกษาวิจัยที่มีความแตกต่างกัน ได้แก่ เพื่อการวิเคราะห์จุดแข็งและจุดอ่อนของผลิตภัณฑ์ เพื่อการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ หรือเพื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตประกอบด้วยประเด็นหลักที่มีความสำคัญ ดังต่อไปนี้

ก) เป้าหมาย ต้องมีการระบุผลของการใช้ และผู้ที่จะนำไปใช้ การกำหนดเป้าหมายจะต้องเข้าใจรายละเอียดต่างๆ เป็นอย่างดี อาจกล่าวได้ว่าเป้าหมายเป็นหัวใจของการศึกษารายละเอียดและการสรุปผล เพราะเป้าหมายจะทำให้สามารถแยกแยะความสำคัญของส่วนต่างๆ ในเนื้อหาได้

ข) ขอบเขต มีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ

• หน่วยการทำงาน (Functional Unit) คือ ส่วนที่เป็นพื้นฐานของการศึกษา LCA เพราะใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ หรือเป็นตัววัดระหว่างผลิตภัณฑ์ มีการให้นิยามของหน่วยการทำงานที่หลากหลาย โดยหน่วยการทำงานของระบบจะให้ความหมายและการวัดที่กระจ่างชัด ซึ่งผลจากการวัดจะใช้เป็นคำตอบต่อไปได้ ลักษณะ 3 ประการของหน่วยการทำงานได้แก่ 1) ประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ 2) ความคงทนของผลิตภัณฑ์ และ 3) คุณสมบัติพื้นฐาน ในการเปรียบเทียบระหว่างระบบสามารถทำได้ด้วยหน่วยการทำงานที่มีลักษณะพื้นฐานเหมือนกัน

• คุณภาพของข้อมูล (Data Quality) ที่นำมาใช้ในการประเมิน จะนำมาซึ่งคุณภาพของข้อสรุปที่ได้จากการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยคุณภาพของข้อมูลจะทำให้ทราบรายละเอียดต่างๆ ที่สำคัญ และทำให้การประเมินเป็นไปอย่างมีหลักเกณฑ์

**2.3.2 การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Inventory)**

เป็นการเก็บรวบรวมและคำนวณข้อมูลที่ได้จากกระบวนการต่างๆ ตามที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา รวมถึงการสร้างผังของระบบผลิตภัณฑ์ การคำนวณหาปริมาณของสารขาเข้าและสารขาออกจากระบบผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาถึงทรัพยากรและพลังงานที่ใช้หรือการปล่อยของเสียออกสู่อากาศ น้ำ และดิน

**2.3.3 การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Impact Assessment)**

เป็นการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตภัณฑ์ จากข้อมูลการใช้ทรัพยากร และการปล่อยของเสีย หรือสารขาเข้าและขาออกที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชี

รายการด้านสิ่งแวดล้อม โดยการประเมินผลกระทบเกี่ยวข้องกับประเด็นหลักๆคือ การนิยามประเภท (Category definition) การจำแนกประเภท (Classification) การกำหนดบทบาท (Characterization) และการให้น้ำหนักแก่แต่ละประเภท (Weighting)

**2.3.4 การแปลผล (Interpretation)**

เป็นการนำผลการศึกษาที่ได้จากขั้นตอนการจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม และการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มาเชื่อมโยงกัน เพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ สรุปผลการศึกษา และจัดเตรียมข้อเสนอแนะที่มาจากผลลัพธ์ของการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยแนวทางในการแปลผลหรือประเมินโอกาสเพื่อการปรับปรุงที่สำคัญ ได้แก่การปรับปรุงในขั้นตอนการผลิตในโรงงาน เช่น การพิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละกระบวนการ และทำการปรับปรุงกระบวนการที่มีการใช้ไฟฟ้าในปริมาณมาก เป็นต้น

## 2.4 การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ (Carbon Footprint of Product: CFP)

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ (Carbon Footprint Assessment of Product: CFP) หมายถึง ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์แต่ละหน่วยตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ โดยใช้หลักการประเมินผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมตลอดช่วงชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง การประกอบชิ้นส่วน การใช้งาน และการจัดการซากหลังใช้งาน โดยคำนวณออกมาในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (kg $CO_2$-eq) พร้อมทั้งมีการแสดงข้อมูลปริมาณคาร์บอนฟุต พริ้นท์ไว้บนสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ

**2.4.1 รูปแบบการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์**

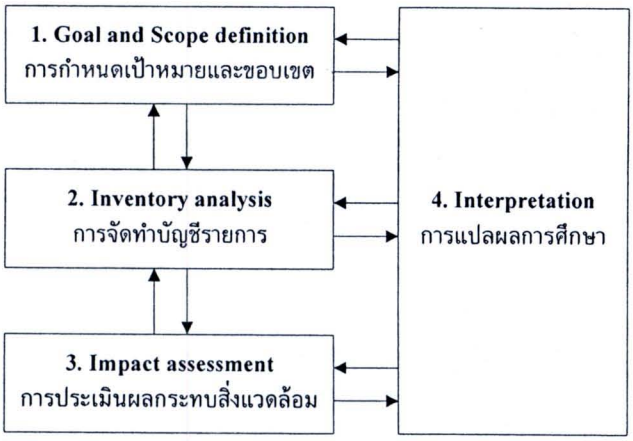
สำหรับรูปแบบการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก สามารถดำเนินการด้วยวิธีการอย่างหนึ่งอย่างใดดังต่อไปนี้

1) แบบ Business-to-Consumer (B2C) เป็นการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรของผลิตภัณฑ์ ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การใช้งาน และการกำจัดซากผลิตภัณฑ์

2) แบบ Business-to-Business (B2B) เป็นการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่ขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิตจนถึง ณ หน้าโรงงานพร้อมส่งออก

### 2.4.2 ขั้นตอนการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ จะดำเนินการตามวิธีการการประเมินผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมตลอดช่วงชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) และขั้นตอนการศึกษาตามกรอบของอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 มีทั้งหมด 4 ขั้นตอน คือ




**รูป 2.6** ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

#### 2.4.2.1) การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต

**ก) การกำหนดเป้าหมาย**

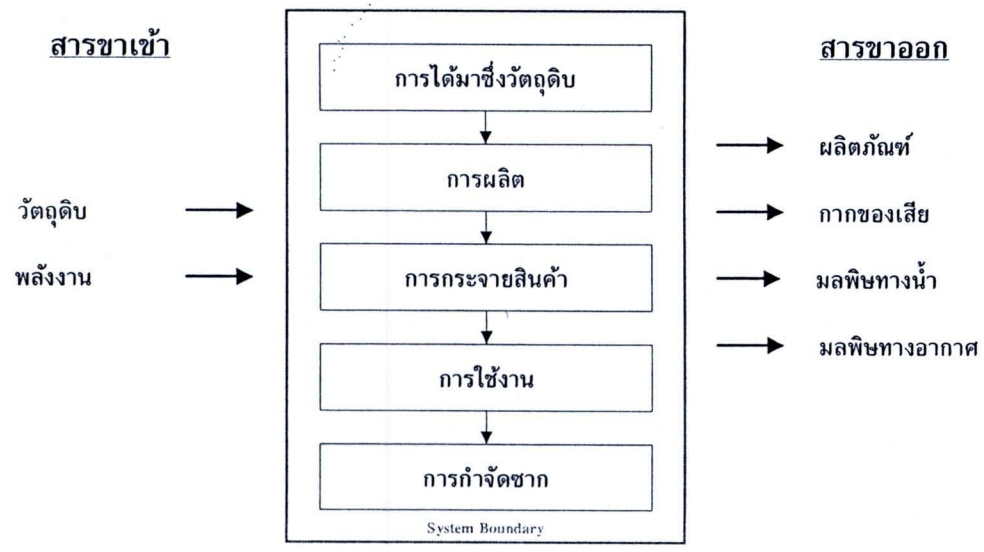
ขั้นตอนแรกในการทำการ ก็คือการกำหนดเป้าหมายหรือการกำหนดวัตถุประสงค์ รวมทั้งพิจารณาถึงเหตุผลในการศึกษา ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะในส่วนของวิธีทำ CFP ขึ้นอยู่กับการกำหนดเป้าหมาย ซึ่งผลการวิเคราะห์อาจผิดพลาดถ้าเป้าหมายไม่ได้ถูกกำหนดไว้อย่างเหมาะสม เป้าหมายจึงต้องระบุผลของการใช้ ผู้ใช้จำเป็นต้องเข้าใจรายละเอียดต่าง ๆ เป็นอย่างดี เป้าหมายเป็นหัวใจของการศึกษารายละเอียดและการสรุปผลรายงาน เพราะจุดมุ่งหมายจะทำให้เราสามารถแยกแยะความสำคัญของส่วนต่าง ๆ ในเนื้อหาได้

**ข) การกำหนดขอบเขต**

การบ่งชี้และกำหนดสิ่งที่ต้องการประเมินและรวบรวมสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อเป้าหมายทั้งนี้อาจมีการเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมได้หลังจากเริ่มทำการศึกษาแล้ว และพบว่าต้องมีการแก้ไขให้เหมาะกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้น

- ขอบเขตของระบบ (System boundary)

หมายถึง ขอบเขตระหว่างผลิตภัณฑ์ และสิ่งแวดล้อม หรือระบบผลิตภัณฑ์อื่น โดยที่ระบบผลิตภัณฑ์ คือ หน่วยที่รวบรวมวัสดุ และพลังงานที่มีการเชื่อมโยงกันเป็นหน่วยงาน (Unit process) ต่าง ๆ ที่ทำหน้าที่อย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง โดยที่สามารถแบ่งกระแสขั้นตอนของทรัพยากรวัตถุดิบหรือพลังงาน จากสิ่งแวดล้อมที่เข้าสู่ระบบก่อนถูกเปลี่ยนแปลงในกระบวนการต่าง ๆ ดังรูป 2.7




**รูป 2.7** ขอบเขตของระบบที่อาจกำหนดตามความต้องการขององค์กรตามความเหมาะสม

- หน้าที่และหน่วยวัดผลงานของระบบ (Function and Functional unit)

ระบบอาจมีหน้าที่หลายอย่าง แต่หน้าที่อย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้นที่อาจถูกเลือกมาเพื่อทำการศึกษาการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นกับเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา ฉะนั้นในการกำหนดขอบเขตของการศึกษาจึงต้องระบุหน้าที่ของระบบที่กำลังทำการศึกษานั้น ๆ ให้ชัดเจนด้วย

- หน่วยวัดผลงานของระบบ (Functional unit)

ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับสิ่งเข้า และสิ่งออกจากระบบ มีความสำคัญในการใช้เปรียบเทียบผลของการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้เปรียบเทียบระหว่างระบบที่ต่างกัน เช่น หน่วยวัดผลงานของการพ่นสีอาจวัดเป็น ตารางเมตร/ชั่วโมง เป็นต้น ซึ่งถือเป็นพื้นฐานของการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ เพราะตัว Functional unit จะเป็นตัวเปรียบเทียบ หรือตัววัดระหว่างผลิตภัณฑ์ หรือหลายผลิตภัณฑ์ที่รวมเป็นผลิตภัณฑ์เดียว

- ข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์ (Product Category Rules: PCRs)

ข้อกำหนดในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์เฉพาะของกลุ่มผลิตภัณฑ์ เพื่อให้สามารถประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของแต่ละผลิตภัณฑ์ได้ถูกต้อง และเป็นไปในทิศทางเดียวกันมากขึ้น ทั้งนี้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มีการกำหนด PCRs ไว้ ก็สามารถนำ PCRs ที่พัฒนาขึ้นตามมาตรฐาน ISO 14025 มาประยุกต์ใช้ร่วมกันได้

**2.4.2.2) การวิเคราะห์บัญชีรายการ**

การเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม จากกระบวนการต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขต และคำนวณเพื่อหาปริมาณสารขาเข้า (Inputs) และสารขาออก (Outputs) ของระบบผลิตภัณฑ์ (Product System) ซึ่งมีช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลให้ใช้ข้อมูล 1 ปีย้อนหลัง หากไม่สามารถเก็บข้อมูล 1 ปี ย้อนหลังได้ต้องมีการระบุเหตุผลให้ชัดเจน โดยที่ข้อมูลบัญชีรายการในขั้นตอนนี้อาศัยจากฐานข้อมูลของบริษัทผู้ผลิตนั้นๆ ซึ่งรายละเอียดในแต่ละขั้นตอน

- **การได้มาซึ่งวัตถุดิบ**

เริ่มศึกษาตั้งแต่การสกัดวัตถุดิบออกจากธรรมชาติ จนได้เป็นวัตถุดิบ และพลังงานในกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษา ซึ่งจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลประเภทและปริมาณของวัตถุดิบ สารเคมี และพลังงาน

- **การผลิต**

เป็นขั้นตอนตั้งแต่การนำวัตถุดิบมาผลิต หรือประกอบในโรงงาน จะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลประเภท และปริมาณของวัตถุดิบ สารเคมี และพลังงานในกระบวนการผลิตและระบบสนับสนุนการผลิตทั้งหมด รวมทั้งของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตทั้งหมด

- **การกระจายสินค้า**

ขั้นตอนนี้จะเริ่มตั้งแต่การขนส่งสินค้าจากหน้าโรงงานไปยังจุดจำหน่าย ซึ่งจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่งการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ สำหรับกรณีที่ไม่ทราบปริมาณเชื้อเพลิงให้ใช้ข้อมูลประเภทยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง ขนาดบรรทุก สัดส่วนการบรรทุก ระยะทางของการขนส่งเพื่อจัดจำหน่ายสินค้า

- **การใช้งาน**

เป็นขั้นตอนการบริโภค จะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลพลังงานที่ใช้การในบริโภคทั้งหมด โดยสามารถกำหนดสมมุติฐานการบริโภคตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตได้

- **การกำจัดซาก**

เป็นขั้นตอนการจัดการของเสีย ที่เกิดขึ้นจากการบริโภค โดยสามารถกำหนดสมมุติฐานให้ของเสียที่เกิดหลังจาการบริโภค คือ ภาชนะบรรจุเท่านั้น

และสำหรับข้อมูลการขนส่งในแต่ขั้นตอน จะต้องเก็บข้อมูลบัญชีรายการการขนส่งวัตถุดิบและพลังงาน ทั้งขาไป และขากลับ โดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ 1) ทราบข้อมูลปริมาณการใช้เชื้อเพลิง 2) กรณีที่ไม่ทราบปริมาณเชื้อเพลิงให้ใช้ข้อมูลประเภทยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง ขนาดบรรทุก สัดส่วนการบรรทุก ระยะทางของการขนส่งเพื่อจัดจำหน่ายสินค้า

**2.4.2 3) การประเมินผลกระทบ**

การประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์แต่ละหน่วยตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ จากข้อมูลการใช้วัตถุดิบ สารเคมี และพลังงาน และการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ จะถูกนำไปคำนวณเพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการ โดยคำนวณออกมาในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เพื่อเป็นการเตรียมข้อมูลไว้ใช้ในการแปลผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตภัณฑ์ต่อไป

**2.4.2.4) การแปลผล**

เป็นการแปลผลจากขั้นตอนของการประเมินผลกระทบ ทำให้ทราบปริมาณคาร์บอนฟุต พริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด และทราบถึงแนวทางในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ โดยสามารถชี้ชัดลงไปได้อย่างชัดเจนถึงกระบวนการที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด และควรมีการเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุง ณ จุดนั้น ๆ เพื่อทำให้สิ่งแวดล้อมดีขึ้น สำหรับการแสดงปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์บนผลิตภัณฑ์ควรแสดงด้วยตัวเลข 3 ตัว (Three significant number) เช่น 3.15 กิโลกรัม 152 กรัม เป็นต้น ในกรณีที่มีตัวเลขทศนิยม การปัดเศษตัวเลขดังกล่าวต้องเป็นไปตามมาตรฐานเลขที่ มอก. 929-2533

**2.4.3 การคำนวณปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์**

เป็นการคำนวณหาค่าการปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์ ควรใช้วิธีการดังนี้

1) ข้อมูลปฐมภูมิและข้อมูลทุติยภูมิต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละกิจกรรม i คือ การใช้วัตถุดิบ สารเคมี และเชื้อเพลิง ในหน่วย : กิโลกรัม, ลิตร, ลูกบาศก์เมตร และกิโลวัตต์ชั่วโมง

2) แปลงค่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกให้อยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วย ผลิตภัณฑ์ โดยการนำไปคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission factor) ของก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิด

3) ผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดต้องอยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ และรวมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ของทุกกระบวนการ ก็จะได้ออกมาเป็นค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ แสดงวิธีการคำนวณดังสมการ (2.1)

$$CFP = \sum(A_i \times EF_i) \tag{2.1}$$

เมื่อ

CFP คือ ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ หรือ ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์)

$A_i$ คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในแต่ละกิจกรรม i (หน่วยต่อหน่วยผลิตภัณฑ์)

$EF_i$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission factor) ในแต่ละกิจกรรม i (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วย)

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ (Carbon Footprint of Product) หมายถึง ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์แต่ละหน่วยตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ โดยใช้หลักการประเมินผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมตลอดช่วงชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง การประกอบชิ้นส่วน การใช้งาน และการจัดการซากหลังใช้งาน โดยคำนวณออกมาในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า พร้อมทั้งมีการแสดงข้อมูลปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ไว้บนสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ

## 2.5 การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์อย่างง่าย (Streamlined LCA)

การประยุกต์ใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตอย่างเต็มรูปแบบ (Full Scale LCA) ในระดับอุตสาหกรรมปัจจุบัน ยังคงไม่ใช่วิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้กับอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก (ปริญญ์, 2549) ซึ่งปัญหาที่พบ ได้แก่

ก. การประเมินวัฏจักรชีวิตอย่างเต็มรูปแบบจะใช้เวลามาก ทำให้ข้อมูลที่ได้มาล่าช้าไม่เป็นปัจจุบัน

ข. การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์อย่างเต็มรูปแบบจะต้องใช้ข้อมูลมากและมีความละเอียดสูง ดังนั้นในการเก็บข้อมูลจึงจำเป็นต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง และแรงงานที่มีความรู้เฉพาะทางในการเก็บข้อมูล

ค. การประเมินวัฏจักรชีวิตอย่างเต็มรูปแบบผลลัพธ์ที่ได้ยากในการแปลผล และการนำไปวิเคราะห์ออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์จะต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางซึ่งค่อนข้างที่จะหายากในโรงงานอุตสาหกรรม

ง. การศึกษาวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์อย่างเต็มรูปแบบนั้น ข้อมูลบางส่วนที่จำเป็นต้องใช้ในการประเมินเป็นข้อมูลที่หายากหรือไม่สามารถเปิดเผยได้ ทำให้บางครั้งการนำผลมาวิเคราะห์ไม่คุ้มกับการลงทุนเพราะระเบียบวิธีการที่มีอยู่ไม่ได้ออกแบบเพื่อรับรองข้อมูลการตัดสินใจที่ไม่สมบูรณ์เพียงพอ โดยเฉพาะข้อมูลที่มีลักษณะเชิงคุณภาพ

ในปัจจุบันมีนักวิจัยจำนวนมาก พยายามพัฒนาแนวทางในการแก้ปัญหาจากการประเมินวัฏจักรชีวิตอย่างเต็มรูปแบบ (Full Scale LCA) โดยคิดค้นแนวทางในการประเมินวัฏจักรชีวิตอย่างง่าย (Streamlined LCA) ซึ่งหากมองตามระดับของความเข้มงวดในการประเมินวัฏจักรชีวิต แล้วจะพบว่าการดำเนินการดังกล่าว จะเป็นการลดระดับความเข้มงวดในการประเมินประเมินวัฏจักรชีวิตอย่างเต็มรูปแบบ (Full Scale LCA) แต่ยังคงรักษาแนวคิดหลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิตไว้อย่างครบถ้วน ซึ่งประกอบด้วย 2 แนวคิดหลักได้แก่

ก. การที่ดำเนินการบนพื้นฐานของโครงร่างการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA Framework)

ข. การดำเนินการตามแนวคิดของการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life-Cycle Concepts)

**ตาราง 2.1** การแบ่งระดับความเข้มงวดของการประเมินวัฏจักรชีวิต

| | | |
|---|---|---|
| Streamlined LCA | ระดับที่ 1 | Matrix LCA (Qualitative or Semi Qualitative) |
| | ระดับที่ 2 | A Screening LCA (Quantitative Using Readily Available Data or Semi-Qualitative) |
| Full Scale LCA | ระดับที่ 3 | A Full Scale LCA (Quantitative and Including New Data Inventory) |

**ที่มา:** Wenzel (1998)

### 2.5.1 การประเมินวัฏจักรชีวิตอย่างง่าย ด้วยวิธี ERPA

การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์อย่างง่าย (Streamlined LCA) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้การประเมินวัฏชีวิตระดับที่ 2 (Screening LCA )โดยมีวิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมและมีความน่าเชื่อถือ คือ Environmentally Responsible Product Assessment Matrix ที่เรียกว่า ERPA Method ในรูปแบบตารางเมตริกขนาด 5x5 มีการให้ลำดับคะแนนจากทีมผู้เชี่ยวชาญ (Expert Team) โดยวิธีนี้จะแบ่งการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Stage) ออกเป็น 5 ช่วง โดยในแนวแกน Y คือ ขั้นตอนการเตรียม ขั้นตอนการผลิต ขั้นตอนการขนส่ง ขั้นตอนการใช้งาน และขั้นตอนการทิ้งทำลาย และแบ่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมออกเป็น 5 ส่วนในแนวแกน X ได้แก่ ด้านวัตถุดิบ ด้านพลังงาน ด้านกากของเสีย ด้านมลพิษทางน้ำ และด้านมลพิษทางอากาศ แสดงในตาราง 2.2 โดยประเด็นหลักที่ทำการพิจารณาในแต่ละช่วงวงจรชีวิต มีรายละเอียดดังนี้

**ตาราง 2.2** ตัวอย่างเมตริกการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์

| วัฏจักรชีวิต | ประเภทผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | วัตถุดิบ | พลังงาน | กากของเสีย | มลพิษทางน้ำ | มลพิษทางอากาศ |
| ขั้นตอนการเตรียม | $M_{11}$ (m,t,d,p,e) | $M_{12}$ (m,t,d,p,e) | $M_{13}$ (m,t,d,p,e) | $M_{14}$ (m,t,d,p,e) | $M_{15}$ (m,t,d,p,e) |
| ขั้นตอนการผลิต | $M_{21}$ (m,t,d,p,e) | $M_{22}$ (m,t,d,p,e) | $M_{23}$ (m,t,d,p,e) | $M_{24}$ (m,t,d,p,e) | $M_{25}$ (m,t,d,p,e) |
| ขั้นตอนการขนส่ง | $M_{31}$ (m,t,d,p,e) | $M_{32}$ (m,t,d,p,e) | $M_{33}$ (m,t,d,p,e) | $M_{34}$ (m,t,d,p,e) | $M_{35}$ (m,t,d,p,e) |
| ขั้นตอนการใช้งาน | $M_{41}$ (m,t,d,p,e) | $M_{42}$ (m,t,d,p,e) | $M_{43}$ (m,t,d,p,e) | $M_{44}$ (m,t,d,p,e) | $M_{45}$ (m,t,d,p,e) |
| ขั้นตอนการทิ้งทำลาย | $M_{51}$ (m,t,d,p,e) | $M_{52}$ (m,t,d,p,e) | $M_{53}$ (m,t,d,p,e) | $M_{45}$ (m,t,d,p,e) | $M_{55}$ (m,t,d,p,e) |

* ตัวเลขที่ห้อยหลังตัวแปร คือ ตำแหน่งในเมตริกซ์ (i,j) แถวที่ i หลักที่ j

**ที่มา:** อภิชาติ (2546)

**ขั้นตอนการเตรียม** จะพิจารณาในส่วนของการเตรียมการก่อนทำการผลิต โดยถือว่าช่วงนี้เป็นช่วงที่มีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นช่วงที่มีค่าใช้จ่ายน้อยในการดำเนินการ แต่ผลการตัดสินใจจะกระทบการออกแบบผลิตภัณฑ์สูงมาก

**ขั้นตอนการผลิต** ประเด็นหลักๆ ที่พิจารณาในช่วงการผลิตคือ การใช้พลังงานและเศษวัสดุทั้งทางตรงและทางอ้อมที่เกิดจากการผลิต

**ขั้นตอนการขนส่ง** ส่วนที่ทำการพิจารณาคือ การขนส่งผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่วนนี้จะเกี่ยวข้องกับประเด็นทางด้านสิ่งแวดล้อมสองประเด็น คือ ด้านการขนส่งสินค้าที่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานและการทำให้เกิดมลพิษ

**ขั้นตอนการใช้งาน** ประเด็นสำคัญที่เน้นพิจารณา คือ การใช้พลังงานและอุปกรณ์สิ้นเปลืองต่างๆ ในช่วงการใช้ผลิตภัณฑ์ โดยจะมองย้อนกลับไปถึงต้นตอ ของแหล่งที่มาของพลังงาน ไม่ว่าจะเป็นพลังงานไฟฟ้า เชื้อเพลิง รวมไปถึงซากอุปกรณ์สิ้นเปลืองที่มีการเปลี่ยนถ่ายในช่วงนี้ด้วย

**ขั้นตอนการทิ้งทำลาย** ช่วงสุดท้ายในการพิจารณา คือ ช่วงการทิ้งทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่ โดยจะพิจารณาทางด้านสถานที่ วิธีการในการจัดการ การขนถ่าย พลังงานที่ใช้ ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น

**2.5.2 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้วยวิธี ERPA**

1) การกำหนดช่วงจักรชีวิตและประเภทผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม เมื่อทำการกำหนดช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์แล้ว จากนั้นในแต่ละช่วงชีวิตผู้วิจัยจะต้องทำการกำหนดประเภทผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อความสะดวกในการระบุข้อมูล และเพื่อใช้ในการประเมินผลกระทบ ซึ่งรูปแบบการกำหนดช่วงจักรชีวิตและประเภทผลกระทบดังกล่าวได้แสดงได้ดังตาราง 2.2

2) การกำหนดตัวแปรด้านสิ่งแวดล้อม จากตาราง 2.2 จะเห็นว่ามีตัวแปรอยู่ 6 ตัวแปร โดยตัวแปรแต่ละตัวมีความหมายและที่มีมาดังต่อไปนี้

$M_{ij}$ คือ ตัวแปรค่าคงที่ด้านสิ่งแวดล้อมได้จากการคำนวณค่าการประเมินผลกระทบ ดังสมการ (2.2)

$$M_{ij} = m_{ij}\left(\frac{t_{ij} + d_{ij} + p_{ij} + e_{ij}}{16}\right) \qquad (2.2)$$

เมื่อ

$m_{ij}$ คือ ค่าการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในแต่ละประเภทผลกระทบที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงจักรชีวิต

$t_{ij}$ คือ ตัวแปรด้านเวลาการเกิดผลกระทบหรือระยะเวลาที่ใช้ในการแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้น

$d_{ij}$ คือ ขนาดพื้นที่ที่เกิดผลกระทบ

$p_{ij}$ คือ ระดับของความเสียหาย หรือระดับความอันตรายของสารที่ใช้

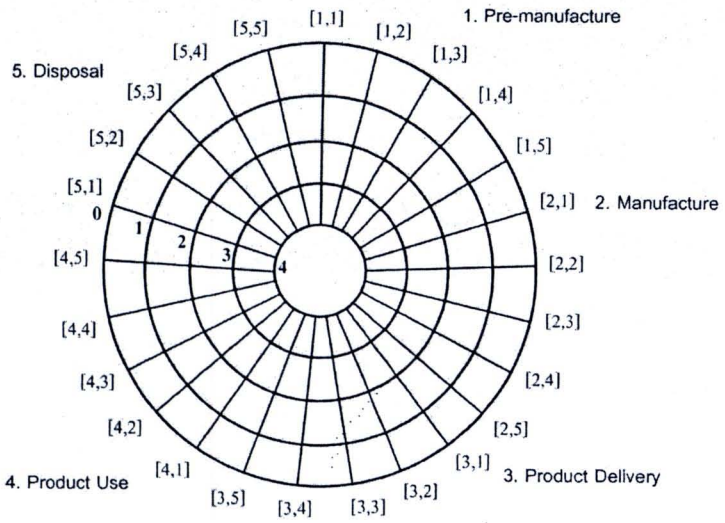
$e_{ij}$ คือ ระดับความเสี่ยงที่จะเกิดผลกระทบหรืออันตรายจากการใช้สาร

การได้มาซึ่งค่าตัวแปร $m_{ij}$, $t_{ij}$ , $d_{ij}$ , $p_{ij}$ และ $e_{ij}$ จะได้จากการการประเมิน และให้คะแนน โดยใช้หลักการของ Weighting Method หรือจากทีมผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งกำหนดค่าการประเมินออกเป็น 5 ระดับ ตั้งแต่ระดับคะแนน 0 ถึง 4 โดยที่ 0 เป็นค่าการประเมินเชิงลบ และ 4 เป็นค่าการประเมินเชิงบวก

3) การคำนวณผลการประเมิน จะนำผลการประเมินไปแทนค่าในสมการ (2.2) เพื่อทำการคำนวณหาค่าคงที่ด้านสิ่งแวดล้อม ($M_{ij}$) โดยผลรวมทั้งหมดของ $M_{ij}$ คือ ค่าความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Responsibility: $R_{ERP}$) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.3)

$$R_{ERP} = \sum_i \sum_j M_{ij} \qquad (2.3)$$

4) การแสดงผล จากนั้นนำค่า $M_{ij}$ ไปแสดงผลด้วยวิธี Target Plot ดังรูป 2.8 ซึ่งจะทำให้ทราบว่าขั้นตอนใดก่อให้เกิดผลกระทบประเภทใดสูงสุด เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการประเมินผลกระทบ จะทำให้ทราบว่าในช่วงใดของวัฏจักรชีวิตที่เกิดผลกระทบมากที่สุด มีความรุนแรงของผลกระทบอยู่ในระดับใด และสามารถทำให้ทราบถึงที่มาของผลกระทบนั้นเพื่อที่จะนำไปสู่ผลสรุปและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้




**รูป 2.8** Target Plot ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการประเมิน

**ที่มา:** Graedel (1998)

## 2.6 สมดุลมวลและสมดุลพลังงาน

การจัดทำบัญชีรายการและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์มีการเก็บข้อมูลของสารขาเข้าและขาออกจำนวนมาก เพื่อให้เกิดความถูกต้องและครบถ้วนของข้อมูล จึงจำเป็นต้องมีการทำการตรวจสอบโดยใช้วิธีการสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน มีรายละเอียดดังนี้

### 2.6.1 สมดุลมวล (Mass balance)

เป็นหลักการพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์มวลสาร (Law of conservation of mass) ว่ามวลไม่สูญหายหรือถูกทำลายไป ซึ่งคือการพิจารณาว่ามีมวลสารขาเข้าและขาออกอย่างละเท่าไร และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของมวลสารภายในระบบเป็นอย่างไร แสดงดังสมการ (2.4)

มวลสารเข้าระบบ = มวลสารที่ออกจากระบบ + มวลสารที่สะสมในระบบ (2.4)

### 2.6.2 สมดุลพลังงาน (Energy balance)

เป็นหลักการพื้นฐานของกฎการคงตัวของพลังงาน ว่าพลังงานเป็นสิ่งที่ไม่สามารถสร้างขึ้นมาได้ และไม่สามารถที่จะทำให้สูญหายไปได้ ดังนั้นพลังงานรวมทั้งหมดของวัตถุก้อนใดก้อนหนึ่งไม่ว่าอยู่ตำแหน่งใด ๆ ย่อมมีค่าเท่ากันทุก ๆ ตำแหน่ง ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังสมการ (2.5)

พลังงานที่เข้าสู่ระบบ = พลังงานที่ออกจากระบบ + พลังงานที่สะสมในระบบ (2.5)

**2.7 การปันส่วน (Allocation)**

การปันส่วนเป็นการแบ่งส่วนปริมาณสารขาเข้า และ/หรือสารขาออกของกระบวนการหรือระบบของผลิตภัณฑ์ที่ศึกษาไปยังผลิตภัณฑ์เป้าหมายและผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบของผลิตภัณฑ์ โดยการปันส่วนจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์หลายชนิดในช่วงเวลาเดียวกัน และมีการใช้ระบบสาธารณูปโภคร่วมกันระหว่างผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ลักษณะของการปันส่วนมีอยู่หลายประเภท แต่ที่นิยมใช้ เช่น การพิจารณาตามสัดส่วนของมวล ปริมาตร พลังงาน และมูลค่าตามเศรษฐกิจ (ราคาขายหรือต้นทุนสุทธิ) และการพิจารณาตามจำนวนของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป เป็นต้น การเลือกใช้ประเภทของการปันส่วนควรประมาณให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงของข้อมูลและตั้งอยู่บนพื้นฐานของความสัมพันธ์และลักษณะของสารขาเข้าและสารขาออก การคำนวณสัดส่วนของการปันส่วนให้แต่ละผลิตภัณฑ์แสดงดังสมการ (2.6)

$$\text{Proportion of Product i} = \frac{A_i P_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i P_i} \qquad (2.6)$$

เมื่อ

| | | |
|---|---|---|
| Proportion of Product i | คือ | สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ i |
| $A_i$ | คือ | น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ หรือ มูลค่าของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น |
| $P_i$ | คือ | ปริมาณหรือจำนวนของผลิตภัณฑ์ |
| n | | จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด |