สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

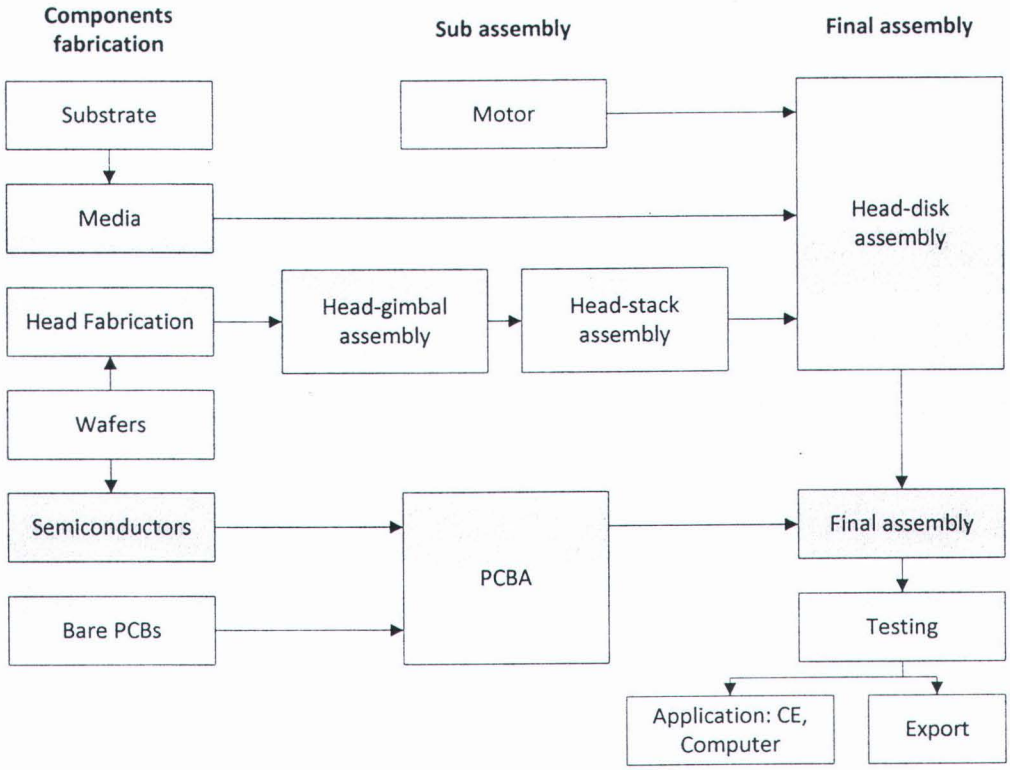
2.1 ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ (Hard Disk Drive: HDD)

2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟหรือจานบันทึกแบบแข็ง เป็นสื่อบันทึกข้อมูลประเภทหนึ่ง (Storage device) ถูกใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของคอมพิวเตอร์ เป็นหน่วยความจำที่มีขนาดใหญ่สำหรับเก็บบันทึกข้อมูลแบบถาวร ได้แก่ ระบบปฏิบัติการ ระบบการใช้งานของซอฟแวร์ โปรแกรมประยุกต์ และข้อมูลต่าง ๆ ที่อยู่ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั้งหมด โดยข้อมูลเหล่านี้จะไม่สูญหายไปเมื่อปิดเครื่องไม่เหมือนกับแรมหรือหน่วยความจำชั่วคราว (Random Access Memory: RAM) ซึ่งจะเก็บข้อมูลได้ชั่วคราวในระหว่างเปิดเครื่องเท่านั้น ในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟสามารถพบได้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ไม่เฉพาะภายในคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องเท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงสินค้าอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ อีกด้วย เช่น เครื่องเล่นเอ็มพีทรี (MP3) เครื่องบันทึกภาพดิจิตอล กล้องถ่ายรูป คอมพิวเตอร์ขนาดพกพา (Personal Digital Assistants: PDA) จนกระทั่งโทรศัพท์มือถือบางรุ่น

2.1.2 อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าการส่งออกสูงมากเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ซึ่งอุตสาหกรรมดังกล่าวเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามภาวะตลาดอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลก และกำลังซื้อจากตลาดส่งออกหลัก นอกจากผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟแล้วในกลุ่มอุตสาหกรรมนี้ยังมีห่วงโซ่อุปทานที่มีขนาดใหญ่ ทั้งในส่วนของอุตสาหกรรมการผลิตส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ และอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์สนับสนุนในการผลิต ในการวิเคราะห์ห่วงโซ่มูลค่าระดับโลกของอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ (รูป 2.1) เริ่มจากการทำความเข้าใจถึงขั้นตอนในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟก่อน กิจกรรมหลักที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมนี้ไม่แตกต่างจากอุตสาหกรรมการผลิตสินค้าประเภทอื่นที่เริ่มต้นจากการคิดค้นวิจัย การออกแบบสินค้า การหาวัตถุดิบ การผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ การประกอบสินค้า การขาย การตลาด และการบริการหลังการขาย การคิดค้นวิจัยและการออกแบบสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่นั้นจะเกิดขึ้นในบริษัทที่เป็นผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟรายใหญ่โดยเป็นงานวิจัยและการออกแบบที่ทำขึ้นเอง งานวิจัยและการออกแบบที่ทำร่วมกับผู้จัดส่งวัตถุดิบที่สำคัญ หรือเป็นงานวิจัยที่ซื้อมาจากบริษัทอื่น



รูป 2.1 ห่วงโซ่มูลค่าของอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

ที่มา: สถาบันฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2553)

การผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟโดยทั่วไปมีกระบวนการที่สำคัญ 2 ขั้นตอน คือ Head Disk Assembly (HDA) และ Printed Circuit Board Assembly (PCBA) ซึ่งส่วนแรกจะเป็นส่วนการประกอบชุดหัวอ่านและเขียน จานเก็บข้อมูล และส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องทางกลไกการทำงาน ในขณะที่ส่วนที่สองจะเป็นการประกอบชิ้นส่วนทางด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ และเชื่อมต่อสัญญาณกับอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น คอมพิวเตอร์ เป็นต้น เมื่อได้ครบทั้งสองส่วนแล้วจึงทำการประกอบเข้าด้วยกันเป็นฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ (Final assembly) ในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟนั้นยังมีกลุ่มวัสดุอื่น ๆ และกลุ่มวัสดุทางอ้อม (Indirect materials) ที่ใช้อยู่ในทุกขั้นตอนของการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟตั้งแต่การผลิตส่วนประกอบย่อยไปจนถึงการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ในกลุ่มของวัสดุอื่น ๆ จะเป็นชิ้นส่วนที่ไม่ได้เป็นส่วนประกอบหลัก เช่น สกรู ชิ้นส่วนโลหะอื่น หรือชิ้นส่วนที่ไม่สามารถบอกได้ว่าถูกใช้เป็นส่วนประกอบในกระบวนการผลิตใดอย่างแน่ชัด ในขณะที่กลุ่มของวัสดุทางอ้อมจะเป็นสิ่งที่ใช้ร่วมในการผลิตแต่ไม่ได้เป็นชิ้นส่วนในการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟโดยตรง เช่น วัสดุที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ได้แก่ แผ่นกรอง ถุงมือ ชุดทำงาน หน้ากาก รองเท้า วัสดุที่เกี่ยวข้องกับการลดประจุไฟฟ้า เช่น แผ่นรองพื้น วัสดุที่ใช้การบรรจุ และบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ รวมถึงระบบอัตโนมัติที่จะช่วยสนับสนุนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 30 ม.ค. 2555
เลขทะเบียน 248528
เลขเรียกหนังสือ

2.1.3 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

การผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น มีกระบวนการที่สำคัญ 2 ส่วน โดยในส่วนของ HDA สามารถแบ่งส่วนประกอบย่อยออกได้เป็น 15 ส่วนประกอบหลัก และส่วนของ PCBA มีเพียงส่วนประกอบเดียวเท่านั้น มีรายละเอียดของแต่ละส่วนประกอบ ดังนี้

2.1.3.1 Breather filter คือ แผ่นกรองอากาศที่ผ่านเข้า-ออกระหว่างภายนอกและภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เพื่อกรองฝุ่นหรืออนุภาคภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟให้มีปริมาณลดลง โดยทั่วไปถูกติดตั้งอยู่กับโครงสร้างหลัก (Base plate) แต่ในบางรุ่นถูกติดตั้งอยู่ตรงฝาปิดด้านบน (Top cover) โดยปกติแผ่นกรองแบบนี้มีส่วนประกอบของถ่านเพื่อช่วยลดปริมาณของก๊าซภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟด้วย

2.1.3.2 Recirculation filter คือ แผ่นกรองอากาศที่ไหลเวียนอยู่ภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เพื่อกรองฝุ่นหรืออนุภาคภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ที่เกิดขึ้นจากการกร่อนของออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นบันทึกข้อมูล (Media) เนื่องจากการเสียดสีของหัวอ่าน-เขียน (Slider) กับแผ่นบันทึกข้อมูล แผ่นกรองแบบนี้ถูกติดตั้งอยู่ภายในโครงสร้างหลัก และอยู่ใกล้กับแผ่นบันทึกข้อมูล พื้นที่สำหรับแผ่นกรองแบบนี้ถูกออกแบบให้มีรูปทรงเป็นลักษณะเส้นทางที่บังคับให้อากาศไหลผ่านแผ่นกรอง

2.1.3.3 Suspension คือ แขนยึดหัวอ่าน-เขียนเข้ากับแขนยึดชุดหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ (Head stack arm) เนื่องจากมีความจำเป็นสำหรับความคล่องตัวในแนวดิ่งและทิศทางที่กำหนด ในขณะที่ยังรักษาความมั่นคงในแนวยาวและตามขวางไว้ โดยปกติทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม

2.1.3.4 Head stack arm คือ แขนยึดชุดหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ มีด้านหนึ่งยึดติดกับ Suspension และอีกด้านหนึ่งติดกับขดลวดแม่เหล็ก (VCM Coil) สำหรับชิ้นส่วนนี้โดยปกติจะถูกประกอบมาพร้อม ๆ กับ VCM Coil

2.1.3.5 Voice Coil Motor (VCM Coil) คือ ขดลวดแม่เหล็กที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กให้เกิดการเคลื่อนที่ของ Head stack arm ตามแนวที่ต้องการได้ โดยปกติจะถูกประกบด้วยแม่เหล็กถาวรแรงสูงจำนวน 2 ชิ้น ที่เรียกว่า "Top VCM และ Bottom VCM"

2.1.3.6 Head stack flex circuit คือ ชุดประกอบวงจรพิมพ์ชนิดอ่อนของหัวอ่าน ที่ใช้กับงานแผ่นวงจรพิมพ์ทั่วไปที่ไม่สามารถติดตั้งได้ อาจเพราะถูกกำจัดด้วยพื้นที่ในการติดตั้งหรือการใช้งานจะต้องมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา เพื่อทำการ

เชื่อมต่อระหว่างชุดหัวอ่านภายในตัวฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟกับแผงวงจรพิมพ์สำเร็จรูปที่ติดตั้งอยู่ภายนอกฮาร์ดดิสก์ โดยปกติทำมาจากพลาสติกแบบพิเศษ

2.1.3.7 Motor base หรือ Spindle motor คือ ชุดมอเตอร์หลักที่หมุนแผ่นบันทึกข้อมูลให้เคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ที่ความเร็วหนึ่ง ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์มีความสม่ำเสมอสูง ในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟหลายรุ่นได้หันมานิยมใช้ Fluid Dynamic motor Bearing (FDB) ในการออกแบบมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ช่วยให้ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์สูงขึ้น ลดการปล่อยเสียงรบกวน และปรับปรุงด้านการสั่นสะเทือนให้ดีขึ้น การที่ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราการส่งผ่านข้อมูลมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามไปด้วย

2.1.3.8 Glass disk substrate หรือ Media คือ แผ่นบันทึกข้อมูลผลิตมาจากแผ่นแก้วที่ต้องทำเป็นพิเศษเคลือบด้วยสารแม่เหล็ก แล้วทำการสร้างแท่งแม่เหล็กบนผิวหน้าโดยวางเรียงเป็นวงกลม เพื่อเก็บบันทึกข้อมูลต่าง ๆ โดยแผ่นบันทึกข้อมูลจะมีขนาด และจำนวนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟแต่ละรุ่นไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับปริมาณความจุที่ต้องการ

2.1.3.9 Ramp คือ อุปกรณ์พักหัวอ่าน-เขียนในขณะที่ไม่มีการทำงาน ซึ่งเป็นวิธีแก้ปัญหาจากเดิมที่หัวอ่านจะถูกพักไว้ในบริเวณพื้นที่พักหัวอ่าน (Landing zone) ซึ่งอยู่ภายในแผ่น Media แต่เนื่องมาจากแผ่นบันทึกแบบใหม่ที่ถูกเคลือบผิวด้วยแก้ว ทำให้มีข้อจำกัดในส่วนของความยากในการทำผิวในบริเวณ Landing zone สำหรับหัวอ่านที่จะเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งนี้ไปยังแผ่นบันทึกจะทำได้หลังจากความเร็วรอบของมอเตอร์มีเพียงพอแล้วเท่านั้น

2.1.3.10 Latch คือ อุปกรณ์ล็อคชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ (Head Stack Assembly: HSA) ให้อยู่กับที่เมื่อถูกเลิกใช้งาน ไว้ภายในบริเวณ Landing zone หรือ Ramp เพื่อป้องกันไม่ให้หัวอ่านเคลื่อนไปยังบริเวณแผ่น Media เพราะอาจทำให้เกิดรอยขีดข่วนได้ ลักษณะการทำงานของมันจะเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งเปิด เมื่อแขนหัวอ่านมีการเคลื่อนที่ และกลับเข้าสู่ตำแหน่งปิดเมื่อไม่มีการทำงานเกิดขึ้น Latch ที่ใช้โดยทั่วไปส่วนมากมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบแม่เหล็กและแบบอากาศล็อค ในแบบแรกเป็นชิ้นงานที่ประกอบด้วยชุดแม่เหล็ก เมื่อมีการเริ่มทำงานตัวขดลวดจะเอาชนะแม่เหล็กเพื่อดึงล็อคออก สำหรับอีกแบบหนึ่งเป็นชิ้นงานแบบ

สปริง ซึ่งใช้หลักการของแรงดันอากาศจากการหมุนของแผ่น Media ในการผลักตัว Latch ออกไป

2.1.3.11 Crash stop คือ อุปกรณ์ป้องกันการชนของหัวอ่าน ทำหน้าที่ควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่ของชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ เพื่อป้องกันหรือยับยั้งไม่ให้ชิ้นส่วนนี้เคลื่อนที่เข้าใกล้กับขอบของแผ่นบันทึกข้อมูล เพราะอาจเกิดการเคลื่อนที่ตกลงจากแผ่น Media ได้ หรือใกล้กับชุดมอเตอร์มากเกินไปเพราะอาจชนกับมอเตอร์ได้ ชิ้นส่วนนี้สามารถแยกออกจากส่วนกลไกอื่น ๆ หรือในบางรุ่นฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ชิ้นส่วนนี้จะถูกประกอบเป็นส่วนหนึ่งของชุดแม่เหล็ก

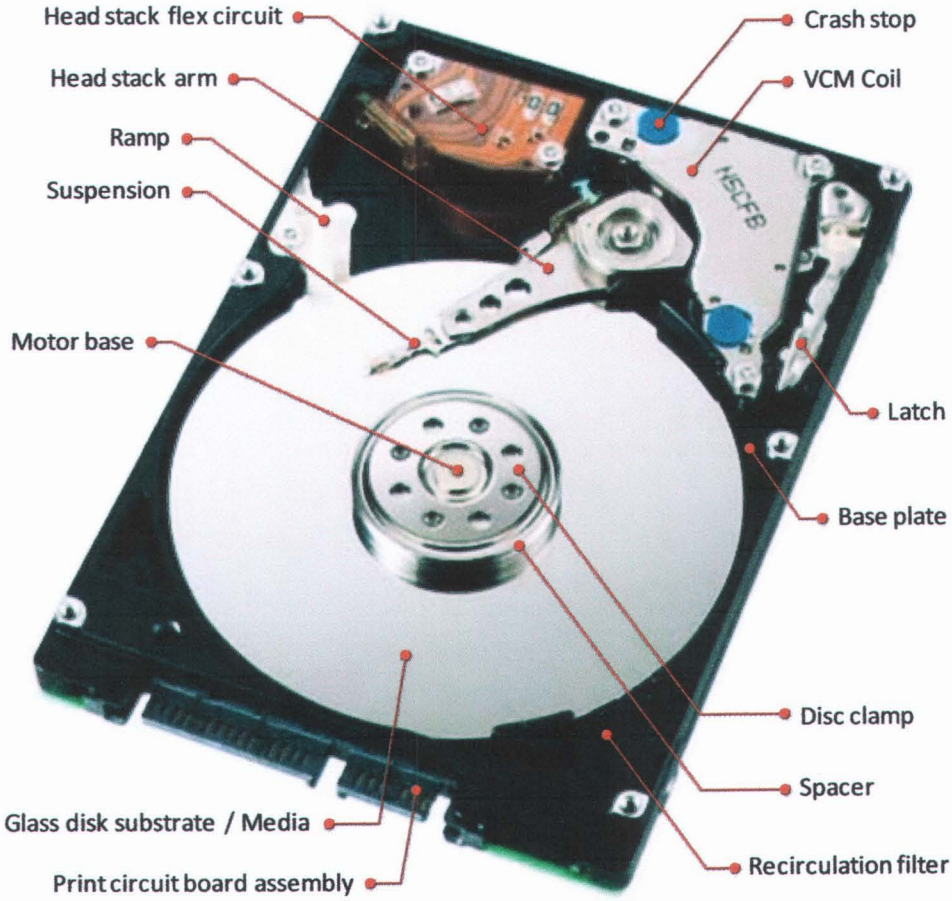
2.1.3.12 Top cover คือ ฝาปิดด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เพื่อป้องกันอนุภาคฝุ่นละอองทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เข้ามาภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ โดยปกติทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกปั๊มขึ้นรูป ฝาปิดด้านบนของฮาร์ดดิสก์จะใช้ประเก็นในการยึดติด ซึ่งประเก็นสามารถยึดติดกับฝาด้านบนโดยใช้กาว หรือบางครั้งสามารถขึ้นรูปที่ฝาด้านบนได้เลย ในบางรุ่นของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟฝาปิดด้านบนยังเป็นที่ติดตั้งของ Breather filter ด้วย

2.1.3.13 Print Circuit Board Assembly (PCBA) คือ แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ และเชื่อมต่อสัญญาณกับอุปกรณ์อื่น ๆ

2.1.3.14 Base plate คือ โครงสร้างหลักของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ผลิตจากการหล่อขึ้นรูปอลูมิเนียม โดยใช้เครื่องจักรที่มีความเที่ยงตรงสูง ซึ่งมีรูปทรงที่ออกแบบมาเพื่อให้มีการไหลเวียนของอากาศบริเวณโดยรอบแผ่น Media มากที่สุด และยังทำให้อากาศส่วนหนึ่งช่วยยกหัวอ่าน-เขียนให้ลอยขึ้นจากแผ่นบันทึกข้อมูลในขณะทำงานด้วย จุดเชื่อมต่อระหว่างแผงวงจรการอ่าน-เขียนข้อมูลที่อยู่ภายใน และ PCBA ที่อยู่ภายนอกส่วนของการประกอบฮาร์ดดิสก์ถูกติดตั้งอยู่ในส่วนโครงสร้างหลักนี้

2.1.3.15 Clamp หรือ Disc clamp คือ อุปกรณ์ยึดติดชุดมอเตอร์กับแผ่น Media เข้าด้วยกัน โดยทั่วไปทำมาจากอลูมิเนียมผ่านการชุบด้วยนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

2.1.3.16 Spacer คือ อุปกรณ์กั้นแผ่น Media แต่ละแผ่นออกจากกัน โดยทั่วไปทำมาจากอลูมิเนียมที่ถูกปั๊มขึ้นรูป จากเครื่องจักรที่มีความเที่ยงตรงสูง ลักษณะของผิวทั้ง 2 ด้านต้องขนานกัน

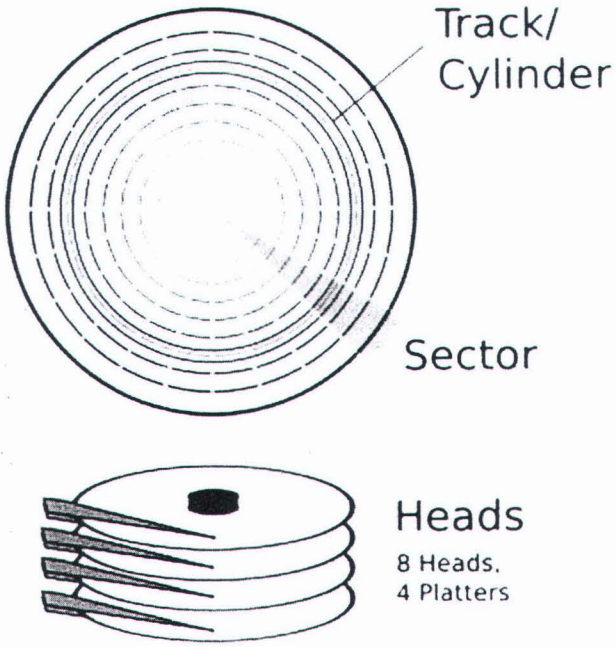


รูป 2.2 ส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

2.1.4 หลักการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

ภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟจะมีแผ่นจานโลหะที่เรียกว่า "Media" ผลิตมาจากแก้วหรือแผ่นอลูมิเนียมเคลือบด้วยสารแม่เหล็ก ในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟต้องมี Media อย่างน้อยหนึ่งแผ่น โดยถูกยึดติดอยู่บนแกนมอเตอร์ซึ่งหมุนด้วยความเร็วสูง เมื่อฮาร์ดดิสก์จะอ่าน-เขียนข้อมูล แขนหัวอ่านที่มีหัวอ่าน-เขียนอยู่ตรงปลายจะเคลื่อนที่เพื่อนำหัวอ่าน-เขียนไปยังบริเวณที่ต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูล สำหรับการเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่านเกิดจากมอเตอร์อีกตัวหนึ่งซึ่งเรียกว่า "Stepping Motor" ซึ่งคอยหมุนเป็นจังหวะเพื่อนำหัวอ่านไปยังแทร็ก (Track) และเซกเตอร์ (Sector) ที่มีข้อมูลที่ต้องการอ่านหรือเขียน ซึ่งต่อมาได้เปลี่ยนจาก Stepping Motor ไปเป็นแบบ VCM Coil ซึ่งทำให้แขนของหัวอ่าน-เขียนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่จะอ่านหรือเขียนข้อมูลได้โดยอาศัยแรงผลักของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้สามารถที่จะอ่าน-เขียนข้อมูลได้รวดเร็วและถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

หลักการบันทึกข้อมูลลงบนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟไม่ได้แตกต่างจากการบันทึกลงบนเทปคาสเซ็ท เพราะทั้งคู่ต้องใช้สารบันทึกคือสารแม่เหล็กเหมือนกัน สารแม่เหล็กนี้สามารถลบหรือเขียนได้ใหม่อยู่ตลอดเวลา โดยเมื่อบันทึกหรือเขียนไปแล้ว มันสามารถจำรูปแบบเดิมได้เป็นเวลาหลายปี สำหรับการเก็บบันทึกข้อมูลลงในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ข้อมูลที่เก็บจะอยู่บน Sector และ Track ดังรูป 2.3 แสดงรูปแบบของ Track มีลักษณะเป็นรูปวงกลม (แถบสีเหลือง) ส่วน Sector เป็นเสี้ยวหนึ่งของวงกลมอยู่ภายใน Track (แถบสีแดง)



รูป 2.3 ลักษณะของ Track และ Sector บนแผ่นบันทึกข้อมูล

ที่มา: วิกิพีเดีย (2553)

2.2 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)

2.2.1 ที่มาของการประเมินวัฏจักรชีวิต

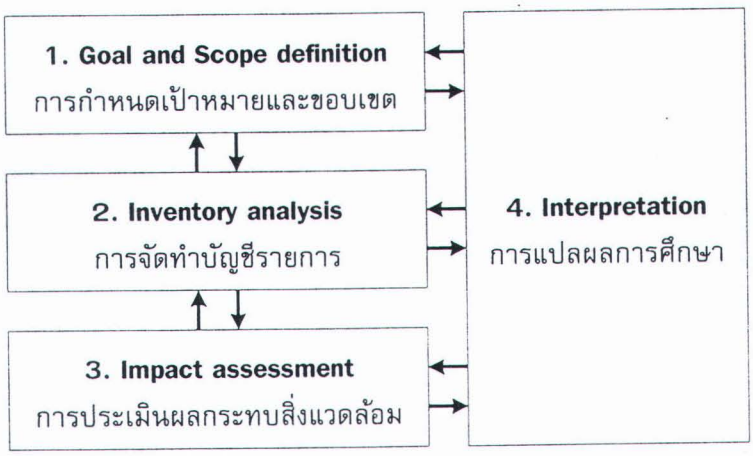
การประเมินวัฏจักรชีวิต เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เพื่อประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิตหรือกิจกรรมอื่น ๆ ครอบคลุมตลอดวงจรชีวิตของมัน LCA ถูกนำมาใช้ทั่วโลกโดยรัฐบาลและองค์กรอุตสาหกรรม เพื่อให้ได้รู้ถึงความเป็นมาผลกระทบซึ่งกันและกันระหว่างกิจกรรมและสิ่งแวดล้อม ได้มีการสนับสนุนการเรียนรู้ การเข้าใจถึงผลิตภัณฑ์และกระบวนการต่าง ๆ ของวัฏจักรชีวิต (Life Cycle) เพื่อที่จะหาหนทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้นและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ตัวอย่างแรกในการทำ LCA ของผลิตภัณฑ์ที่ประสบความสำเร็จคือ การศึกษาเกี่ยวกับบรรจุภัณฑ์ของน้ำดื่มประเภทหนึ่ง และได้มีการประชาสัมพันธ์ให้ทราบอย่างแพร่หลายตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 วิธีการตอนแรกถูกเรียกว่า Resource and Environmental Profile Analyses (REPAs) ได้เน้นที่การศึกษาเรื่อง LCA ทำให้ได้รับความสนใจอีกครั้ง มีการนำมาใช้หลายประเทศในยุโรป มีวิธีการคิดและวิธีการทำที่แตกต่างกันไปจนต้องมีการพัฒนาให้เป็นแบบแผนมาตรฐาน และถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นที่แข็งแกร่งของ LCA (ปฐม จองปิ่นหย่า, 2545)

2.2.2 ความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิต เป็นวิธีการประเมินผลกระทบของผลิตภัณฑ์ในเรื่องการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ผลกระทบต่อระบบนิเวศวิทยาและผลกระทบต่อสุขภาพ ครอบคลุมตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ การผลิต การบริโภค รวมไปถึงการกำจัดขั้นสุดท้ายโดยมีหลักการทั่วไปคือ จัดทำรายการของปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการผลิต/บริการ (Input) และผลลัพธ์ (Output) ทั้งหมดที่ได้รับจากกระบวนการ SETAC (Society of Environment Toxicology And Chemical) ได้ให้นิยามของ LCA ว่า "กระบวนการที่ประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณารวมถึงกระบวนการผลิตและรวมถึงกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวเนื่องในลักษณะของวัตถุดิบและพลังงาน ซึ่งการประเมินนี้จะรวมทั้งวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์อย่างละเอียดไม่ว่ากระบวนการต่าง ๆ ในการผลิต การบรรจุ การคัดแยก การบำรุงรักษา และการนำกลับมาใช้ใหม่ รวมถึงกิจกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด โดยที่ยึดหลักของทางนิเวศวิทยา สุขอนามัย และการนำทรัพยากรสิ้นเปลืองมาใช้เป็นหลัก" อาจกล่าวได้ว่า LCA คือการรวบรวมและประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต โดยเริ่มจากการนำวัตถุดิบมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ การขนส่ง การผลิต การเก็บ การใช้งาน การทิ้ง และการกำจัด หรือการประเมินผลกระทบของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เกิดจนหมดอายุ โดยจะพิจารณาในแง่การใช้ทรัพยากร การใช้พลังงาน สุขภาพอนามัยของมนุษย์ และผลกระทบต่อระบบนิเวศ เป็นต้น

2.2.3 ขั้นตอนในการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิตมีวิธีการดำเนินการหลายวิธี แต่ปัจจุบันวิธีหลัก ๆ เริ่มมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยนิยมใช้วิธีการและขั้นตอนการศึกษาตามกรอบของอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ซึ่งแบ่งขั้นตอนการดำเนินงาน LCA ออกเป็น 4 ขั้นตอน (Graedel, 1998) ดังรูป 2.4 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูป 2.4 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ ตามหลัก ISO 14040

ที่มา: Graedel (1998)

2.2.3.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา (Goal and Scope definition)

การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตในการประเมินวัฏจักรชีวิต ขั้นตอนแรกจะต้องทราบว่าสิ่งที่จะทำการศึกษาคืออะไร และจะทำการศึกษาอย่างไร ซึ่งผลจากการศึกษาจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้มากน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิต สามารถนำไปใช้กับเป้าหมายหลัก ๆ ของการศึกษาวิจัยที่มีความแตกต่างกัน ได้แก่ เพื่อการวิเคราะห์จุดแข็งและจุดอ่อนของผลิตภัณฑ์ เพื่อการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ หรือเพื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตประกอบด้วยประเด็นหลักที่มีความสำคัญ ดังต่อไปนี้

ก. เป้าหมาย ต้องมีการระบุผลของการใช้ และผู้ใช้จำเป็นต้องเข้าใจรายละเอียดต่าง ๆ เป็นอย่างดี อาจกล่าวได้ว่าเป้าหมายเป็นหัวใจของการศึกษารายละเอียดและการสรุปผลรายงาน เพราะเป้าหมายจะทำให้สามารถแยกแยะความสำคัญของส่วนต่าง ๆ ในเนื้อหาได้

สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

ข. ขอบเขต มีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ

- หน่วยการทำงาน (Functional unit) คือ ส่วนที่เป็นพื้นฐานสำหรับสารขาเข้าและสารขาออกจากระบบ มีความสำคัญในการใช้เปรียบเทียบผลของ LCA โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้เปรียบเทียบระหว่างระบบที่ต่างกัน ซึ่งถือว่าเป็นพื้นฐานของ LCA เพราะตัว Functional unit จะเป็นตัวเปรียบเทียบ หรือตัววัดระหว่างผลิตภัณฑ์ หรือหลายผลิตภัณฑ์ที่รวมเป็นผลิตภัณฑ์เดียว มีการให้คำจำกัดความของหน่วยการทำงานที่หลากหลาย โดยหน่วยการทำงานของระบบจะให้ความหมายและการวัดที่กระจ่างชัด ลักษณะ 3 ประการของหน่วยการทำงาน ได้แก่ 1) ประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ 2) ความคงทนของผลิตภัณฑ์ และ 3) คุณสมบัติพื้นฐาน ในการเปรียบเทียบระหว่างระบบสามารถทำได้ด้วยหน่วยการทำงานที่มีลักษณะพื้นฐานเหมือนกัน
- คุณภาพของข้อมูล (Data quality) ที่นำมาใช้ในการประเมิน จะนำมาซึ่งคุณภาพของข้อสรุปที่ได้จากการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยคุณภาพของข้อมูลจะทำให้ทราบรายละเอียดต่าง ๆ ที่สำคัญ และทำให้การประเมินเป็นไปอย่างมีหลักเกณฑ์ ประเด็นที่ควรคำนึงถึงในการกำหนดคุณภาพของข้อมูลตามมาตรฐาน เช่น ช่วงระยะเวลาการศึกษา เทคนิคการศึกษา พื้นที่การศึกษา ความถูกต้องสมบูรณ์ของข้อมูล แหล่งที่มาของข้อมูล และความไม่แน่นอนของข้อมูล เป็นต้น

2.2.3.2 การจัดทำบัญชีรายการ (Life Cycle Inventory)

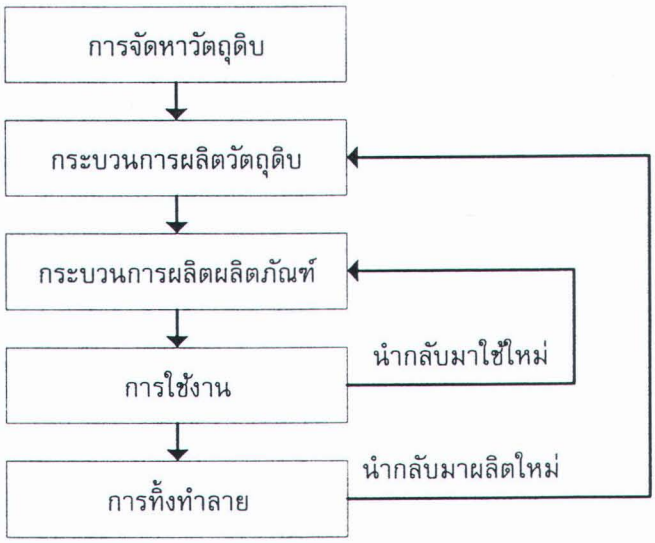
การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม เป็นการเก็บรวบรวมและคำนวณข้อมูลที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ ตามที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา รวมถึงการสร้างผังของระบบผลิตภัณฑ์ การคำนวณหาปริมาณของสารขาเข้าและสารขาออกจากระบบผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาถึงทรัพยากรและพลังงานที่ใช้หรือการปล่อยของเสียออกสู่อากาศ น้ำ และดิน การวิเคราะห์บัญชีรายการและการเก็บรวบรวมข้อมูลสามารถพิจารณาได้อย่างชัดเจนในรูป 2.5 ในแต่ละขั้นตอนที่แตกต่างกันสามารถแยกเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลได้ เช่น ข้อมูลการผลิตวัตถุดิบซึ่งวัตถุดิบหลาย ๆ ชนิด สามารถนำมารวมกันได้ภายหลังที่ขั้นตอนการผลิต เห็นได้ว่าในแต่ละขั้นตอนมักเชื่อมโยงกันด้วยขั้นตอนการขนส่ง การวิเคราะห์สามารถพิจารณาได้ละเอียดมากน้อยขึ้นอยู่กับขอบเขตการศึกษาที่กำหนดไว้

2.2.3.3 การประเมินผลกระทบ (Life Cycle Impact Assessment)

การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เป็นการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตภัณฑ์ จากข้อมูลการใช้ทรัพยากรและการปล่อยของเสีย หรือสารขาเข้าและขาออกที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม โดยการประเมินผลกระทบเกี่ยวข้องกับประเด็นหลัก ๆ คือ การกำหนดประเภท (Category definition) การจำแนกประเภท (Classification) การกำหนดบทบาท (Characterization) และการให้น้ำหนักแก่แต่ละประเภท (Weighting)

2.2.3.4 การแปลผล (Interpretation)

การแปลผลเป็นการนำผลการศึกษาที่ได้จากขั้นตอนการจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม และการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาเชื่อมโยงกัน เพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ สรุปผลการศึกษาและจัดเตรียมข้อเสนอแนะที่มาจากผลลัพธ์ของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการนั้น ๆ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะทำให้ทราบว่าในช่วงใดของวัฏจักรชีวิตที่เกิดผลกระทบมากที่สุด ความรุนแรงของผลกระทบนั้นเป็นเท่าใด และสามารถทำให้ทราบถึงที่มาของผลกระทบนั้นเพื่อที่จะนำไปสู่ผลสรุป และข้อเสนอแนะที่เป็นแนวทางหรือทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการลดผลกระทบที่เกิดขึ้นได้อย่างตรงประเด็น หรือสามารถนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบ เพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่สามารถทดแทนกันได้



รูป 2.5 แผนภูมิแสดงขั้นตอนทั่วไปที่ใช้ในการคัดเลือกข้อมูล

ที่มา: Henrick (1997)

2.3 ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs)

2.3.1 ข้อมูลทั่วไปของก๊าซเรือนกระจก

ก๊าซเรือนกระจก เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นรังสีความร้อน หรือรังสีอินฟาเรดได้ดี ก๊าซเหล่านี้มีความจำเป็นต่อการรักษาอุณหภูมิในบรรยากาศของโลกให้คงที่ ซึ่งหากบรรยากาศโลกไม่มีก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ ดังเช่นดาวเคราะห์ดวงอื่น ๆ ในระบบสุริยะแล้ว จะทำให้อุณหภูมิในตอนกลางวันนั้นร้อนจัด และในตอนกลางคืนนั้นหนาวจัด เนื่องจากก๊าซเหล่านี้ดูดคลื่นรังสีความร้อนไว้ในเวลากลางวัน แล้วทำการแผ่รังสีความร้อนออกมาในเวลากลางคืน ส่งผลให้อุณหภูมิในบรรยากาศโลกไม่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน มีก๊าซจำนวนมากที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นรังสีความร้อน และถูกจัดอยู่ในกลุ่มก๊าซเรือนกระจก ซึ่งมีทั้งก๊าซที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ คือ ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โอโซน มีเทน ไนตรัสออกไซด์ และสารซีเอฟซี เป็นต้น

2.3.2 ชนิดของก๊าซเรือนกระจก

ก๊าซเรือนกระจก หมายถึง ก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อน ก๊าซเรือนกระจกสำคัญที่ถูกควบคุมโดยพิธีสารเกียวโตมีเพียง 6 ชนิด โดยจะต้องเป็นก๊าซที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic greenhouse gas emission) เท่านั้น ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และสารประกอบจำพวกฟลูออไรด์ 3 ชนิด คือ ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrofluorocarbon: HFC) เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (Perfluorocarbon: PFC) และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulfurhexafluoride: SF_6) ทั้งนี้ยังมีก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง คือ สารซีเอฟซี (Chlorofluorocarbon: CFC) ซึ่งใช้เป็นสารทำความเย็นและใช้ในการผลิตโฟม แต่ไม่ถูกกำหนดในพิธีสารเกียวโต เนื่องจากเป็นสารที่ถูกจำกัดการใช้ในพิธีสารมอนทรีออลแล้ว

2.3.3 ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP)

การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจก ส่งผลให้ชั้นบรรยากาศมีความสามารถในการกักเก็บรังสีความร้อนได้มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกนั้น ไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดยังมีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกที่แตกต่างกัน ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนนี้ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนของโมเลกุล และอายุของก๊าซในบรรยากาศ และจะคิดเทียบกับการแผ่รังสีความร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง

ระยะเวลาหนึ่ง เช่น 20, 100 หรือ 500 ปี ค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนประเมินได้จากการวัดหรือคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นจริง และแปลงค่าให้อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยใช้ค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนในรอบ 100 ปี ของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) หรือ GWP_{100} ที่เป็นค่าล่าสุดเป็นเกณฑ์ (IPCC, 2007) โดยค่า GWP ของก๊าซเรือนกระจกต่าง ๆ ในช่วงเวลา 100 ปี แสดงดังตาราง 2.1 ตัวอย่างเช่น ก๊าซมีเทนมีค่า GWP_{100} เท่ากับ 25 หมายความว่าก๊าซมีเทน 1 กิโลกรัมมีศักยภาพในการทำให้โลกร้อนเท่ากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 25 กิโลกรัม ดังนั้นการปล่อยก๊าซมีเทน 1 กิโลกรัม คิดเป็นศักยภาพในการทำให้โลกร้อนเท่ากับ 25 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เป็นต้น

ตาราง 2.1 ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อนของก๊าซเรือนกระจกในช่วงเวลา 100 ปี

ก๊าซเรือนกระจก	ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อน (เท่าของคาร์บอนไดออกไซด์)
1. คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	1
2. มีเทน (CH_4)	25
3. ไนตรัสออกไซด์ (N_2O)	298
4. ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs)	124 – 14,800
5. เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFCs)	7,390 – 12,200
6. ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6)	22,800

ที่มา: IPCC (2007)

2.3.4 การคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์

ในการคำนวณหาค่าการปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์ ควรใช้วิธีการดังนี้

1. ข้อมูลปฐมภูมิและข้อมูลทุติยภูมิต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยการคูณเข้ากับปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor: EF) ของประเภทวัสดุ พลังงานหรือกระบวนการนั้น ๆ และบันทึกในรูปของปริมาณก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยผลิตภัณฑ์

2. แปลงค่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกให้อยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยการนำไปคูณกับค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) ของก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิด การคำนวณแสดงดังสมการ 2.1

$$E_{x,i} = \sum_{i} \left(A_i \times EF_{x,i} \times GWP_x \right) \qquad (2.1)$$

เมื่อ $E_{x,i}$ หมายถึง ปริมาณก๊าซเรือนกระจก x ที่ปล่อยออกมาในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (kg CO_2-eq)

A_i หมายถึง กิจกรรม i ที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก

$EF_{x,i}$ หมายถึง ปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจก x ที่เกิดจากกิจกรรม i

GWP_x หมายถึง ค่าศักยภาพการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซเรือนกระจก x โดยค่านี้จะเทียบกับ CO_2 ซึ่งให้ค่าเท่ากับ 1

3. ผลกระทบของการเก็บกักก๊าซของผลิตภัณฑ์ที่คำนวณได้ ต้องแสดงในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าและลบด้วยค่าที่ได้จากการคำนวณในข้อ 2
4. ผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดต้องอยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วย
5. ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัตถุดิบหรือสารขาออกบางรายการได้ ควรประมาณค่าโดยใช้การวิเคราะห์แบบ High-level แล้ว เมื่อพบว่ารายการดังกล่าวมีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าร้อยละ 5 เมื่อเทียบกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่ปล่อยออกจากผลิตภัณฑ์ จะสามารถตัดออก (Cut off) รายการดังกล่าวได้ และเมื่อตัดออกแล้วให้ทำการเพิ่มสัดส่วน (Scale up) ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากวัตถุดิบและสารขาออกรวมทุกรายการโดยใช้ฐานเท่ากับร้อยละ 100

2.4 สมดุลมวลและสมดุลพลังงาน (Mass and Energy balance)

การจัดทำบัญชีรายการและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์มีการเก็บข้อมูลของสารขาเข้าและขาออกจำนวนมาก เพื่อให้เกิดความถูกต้องและครบถ้วนของข้อมูล จึงจำเป็นต้องมีการทำการตรวจสอบโดยใช้วิธีการสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน มีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 สมดุลมวล เป็นหลักการพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์มวลสาร (Law of conservation of mass) ว่ามวลไม่สูญหายหรือถูกทำลายไป ซึ่งคือการพิจารณาว่ามีมวลสารขาเข้าและขาออกอย่างละเท่าไร และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของมวลสารภายในระบบเป็นอย่างไร แสดงดังสมการ 2.2

มวลสารเข้าระบบ = มวลสารที่ออกจากระบบ + มวลสารที่สะสมในระบบ (2.2)

2.4.2 สมดุลพลังงาน เป็นหลักการพื้นฐานของกฎการคงตัวของพลังงาน ว่าพลังงานเป็นสิ่งที่ไม่สามารถสร้างขึ้นมาได้ และไม่สามารถที่จะทำให้สูญหายไปได้ ดังนั้นพลังงานรวมทั้งหมดของวัตถุก้อนใดก้อนหนึ่งไม่ว่าอยู่ตำแหน่งใด ๆ ย่อมมีค่าเท่ากันทุก ๆ ตำแหน่ง ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังสมการ 2.3

พลังงานที่เข้าสู่ระบบ = พลังงานที่ออกจากระบบ + พลังงานที่สะสมในระบบ (2.3)

2.5 การปันส่วน (Allocation)

การปันส่วนเป็นการแบ่งส่วนปริมาณสารขาเข้า และ/หรือสารขาออกของกระบวนการหรือระบบของผลิตภัณฑ์ที่ศึกษาไปยังผลิตภัณฑ์เป้าหมายและผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบของผลิตภัณฑ์ โดยการปันส่วนจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์หลายชนิดในช่วงเวลาเดียวกัน และมีการใช้ระบบสาธารณูปโภคร่วมกันระหว่างผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ลักษณะของการปันส่วนมีอยู่หลายประเภท แต่ที่นิยมใช้ เช่น การพิจารณาตามสัดส่วนของมวล ปริมาตร พลังงาน และมูลค่าตามเศรษฐกิจ (ราคาขายหรือต้นทุนสุทธิ) และการพิจารณาตามจำนวนของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป เป็นต้น การเลือกใช้ประเภทของการปันส่วนควรประมาณให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงของข้อมูลและตั้งอยู่บนพื้นฐานของความสัมพันธ์และลักษณะของสารขาเข้าและสารขาออก การคำนวณสัดส่วนของการปันส่วนให้แต่ละผลิตภัณฑ์แสดงดังสมการ 2.4

$$R_i = \frac{A_i P_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i P_i} \qquad (2.4)$$

เมื่อ R_i หมายถึง สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ i

A_i หมายถึง ค่าการปันส่วนตามประเภทที่พิจารณาของผลิตภัณฑ์ เช่น น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ มูลค่าของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

P_i หมายถึง ปริมาณหรือจำนวนของผลิตภัณฑ์

n หมายถึง จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

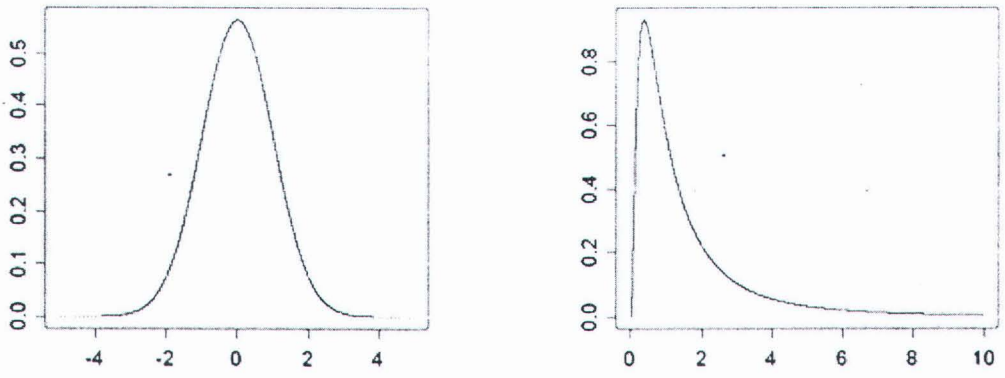
2.6 ความไม่แน่นอนของข้อมูล (Data uncertainties)

การประเมินความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากการจัดทำบัญชีรายการก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์ ถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงระดับคุณภาพของข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ ความไม่แน่นอนของปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกบ่อยครั้งที่ไม่สามารถหาได้จากข้อมูลที่มีอยู่ เนื่องจากมีเพียงแหล่งข้อมูลเดียวที่ให้เฉพาะค่าเฉลี่ย โดยปราศจากข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าความไม่แน่นอน ขั้นตอนที่เป็นมาตรฐานอย่างเรียบง่ายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้วัดค่าความไม่แน่นอนสำหรับกรณีเหล่านี้ โดยการรวมการประเมินเชิงคุณภาพของตัวชี้วัดคุณภาพของข้อมูลไว้ภายในตารางแสดงเกณฑ์ค่าความไม่แน่นอนของปัจจัยต่าง ๆ (Pedigree matrix) ซึ่งถูกเริ่มพัฒนามาจากงานวิจัยของ Weidema (1996)

2.6.1 การประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูล

การวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนในงานวิจัยนี้อาศัยรูปแบบเดียวกับฐานข้อมูล Ecoinvent ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่มีความละเอียด และเป็นฐานข้อมูลที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้อธิบายว่าค่าที่วัดได้จากกลุ่มตัวอย่างมักจะปรากฏเป็นรูปแบบของการแจกแจงแบบปกติ (Normal) หรือแบบล็อกปกติ (Lognormal) ดังรูป 2.6 ฐานข้อมูลนี้ปกติทำการสมมติฐานข้อมูลที่ได้เป็นการแจกแจงแบบ Lognormal เนื่องจากการแจกแจงแบบนี้สามารถแสดงคุณลักษณะโดยใช้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคุณสมบัติทั่วไปของการกระจาย Lognormal เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเรขาคณิตยกกำลังสองที่ครอบคลุมช่วงความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่านี้สามารถคำนวณได้จากการประเมินผ่าน 6 ปัจจัยหลักรวมกับอีก 1 ปัจจัยพื้นฐาน ได้แก่ ความเชื่อถือได้ (Reliability) ความสมบูรณ์ (Completeness) ความสัมพันธ์ทางเวลา (Temporal correlation) ความสัมพันธ์ทางภูมิศาสตร์ (Geographic

correlation) ความสัมพันธ์ทางเทคโนโลยี (Further technological correlation) ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง (Sample size) ซึ่งในแต่ละปัจจัยถูกแบ่งออกเป็น 5 ระดับ โดยค่าปัจจัยของความไม่แน่นอนเหล่านี้ผ่านการตัดสินใจโดยผู้เชี่ยวชาญ แสดงดังตาราง 2.2 สำหรับค่าปัจจัยพื้นฐานใช้สำหรับประเภทของสารขาเข้าและสารขาออกที่พิจารณา ซึ่งค่าเหล่านี้ผ่านการตัดสินใจโดยผู้เชี่ยวชาญเช่นเดียวกัน แสดงดังตาราง 2.3



(ก) (ข)

รูป 2.6 รูปแบบการแจกแจง (ก) แบบปกติ (ข) แบบล็อกปกติ

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเรขาคณิตยกกำลังสองที่ครอบคลุมช่วงความเชื่อมั่น 95% (SD_{g95}) สามารถคำนวณดังสมการ 2.5

$$SD_{g95} = \sigma_g^2 = \exp\sqrt{[\ln(U1)]^2+[\ln(U2)]^2+[\ln(U3)]^2+[\ln(U4)]^2+[\ln(U5)]^2+[\ln(U6)]^2+[\ln(Ub)]^2} \quad (2.5)$$

โดยที่ U1 หมายถึง ปัจจัยความไม่แน่นอนของความเชื่อถือได้

U2 หมายถึง ปัจจัยความไม่แน่นอนของความสมบูรณ์

U3 หมายถึง ปัจจัยความไม่แน่นอนของความสัมพันธ์ทางเวลา

U4 หมายถึง ปัจจัยความไม่แน่นอนของความสัมพันธ์ทางภูมิศาสตร์

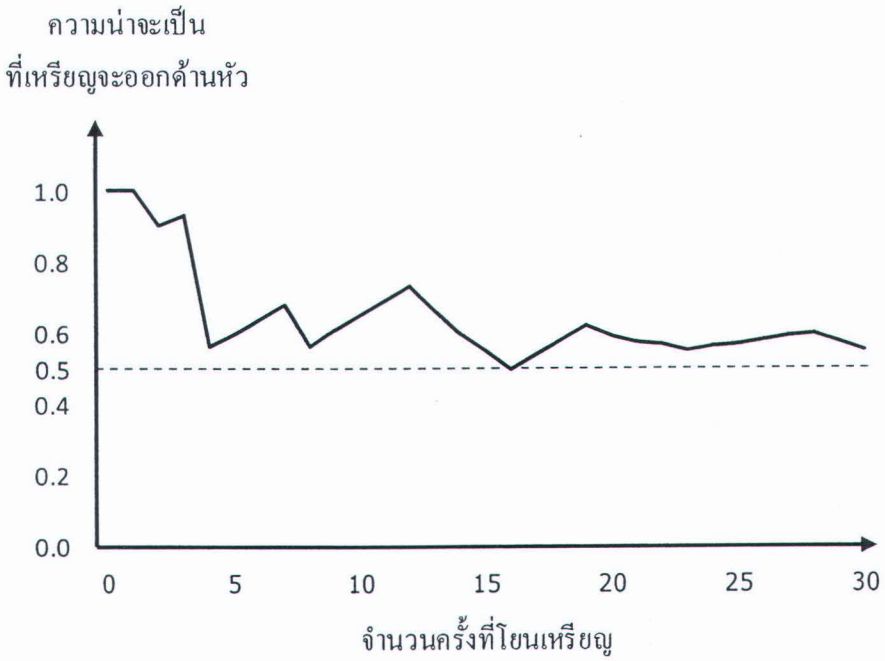
U5 หมายถึง ปัจจัยความไม่แน่นอนของความสัมพันธ์ทางเทคโนโลยี

U6 หมายถึง ปัจจัยความไม่แน่นอนของขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

Ub หมายถึง ปัจจัยความไม่แน่นอนพื้นฐาน

2.6.2 การจำลองแบบปัญหาด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation)

การประเมินความเชื่อถือได้โดยวิธีจำลองเหตุการณ์มอนติคาร์โล เป็นวิธีที่นิยมใช้แก้ปัญหาลักษณะความไม่แน่นอนของค่าเชิงปริมาณในการหาผลลัพธ์การคำนวณที่ได้จากแบบจำลองให้มีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากระบบงานจริง วิธีจำลองเหตุการณ์มอนติคาร์โลจะช่วยกำหนดค่าเชิงปริมาณที่ใส่เข้าไปในแบบจำลองให้มีลักษณะไม่แน่นอนเหมือนข้อมูลจริง เช่น การคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของผลการโยนเหรียญ 1 อัน จะมีความเป็นไปได้ที่เหรียญจะออกด้านใดด้านหนึ่งเท่ากัน คือ 0.5 แต่หากใช้วิธีทดลองโยนเหรียญจริงด้วยสภาพแวดล้อมเช่นเดิมสม่ำเสมอทุกครั้ง แล้วเก็บค่าไปจำนวนมากพอ ผลที่ได้รับค่าความไม่แน่นอนจะมีค่าใกล้เคียงกับ 0.5 เช่นเดียวกับการใช้วิธีคำนวณดังตัวอย่างกราฟในรูป 2.7



รูป 2.7 ความน่าจะเป็นสะสมในการโยนเหรียญออกด้านหัว

ที่มา: พัฒนพงศ์ สุวรรณธวัช (2546)

เทคนิคมอนติคาร์โล คือ วิธีการสร้างข้อมูลโดยใช้ตัวเลขแบบสุ่มและความน่าจะเป็นสะสม ซึ่งตัวเลขแบบสุ่มอาจได้มาจากตารางตัวเลขแบบสุ่ม (Random number table) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ลูกเต๋า วงล้อรูเล็ต เป็นต้น ซึ่งสามารถสร้างตัวเลขที่มีลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็นได้สม่ำเสมอ ส่วนค่าความน่าจะเป็นสะสมคือความน่าจะเป็นสะสมของข้อมูลที่ต้องการซึ่งอาจได้มาจากข้อมูลการทดลอง จากตัวเลขทั้งสองคือตัวเลขแบบสุ่มและความน่าจะเป็นสะสมจะนำมาสร้างข้อมูลที่ต้องการ

การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของฐานข้อมูลโดยใช้โปรแกรม SimaPro มีขั้นตอน ดังนี้

1. คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเรขาคณิตยกกำลังสองตามสมการ 2.5
2. ทำการเลือกรูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบ Lognormal พร้อมกรอกค่าที่คำนวณได้ในข้อ 1
3. วิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการคำนวณผลแบบมอนติคาร์โล โดยเลือกเมนู Uncertainty analysis หรือสัญลักษณ์
4. เลือกวิธีการประเมินกลุ่มผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม
5. กำหนดจำนวนรอบของการจำลองผล

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่า ค่าผิดพลาดมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (Standard error of mean) หรือค่าสัมประสิทธิ์ของการผันแปร (Coefficient of Variation; CV) หากมีค่าต่ำ แสดงว่าผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือสูง ค่า Standard error of mean ควรมีค่าต่ำกว่า 0.01 จึงสามารถยอมรับได้ สำหรับจำนวนรอบของการจำลองผลปกติอยู่ในช่วง 50-100 รอบ แต่ถ้าต้องการค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำลงควรเลือกจำนวนรอบอย่างน้อย 1,000 รอบ

ตาราง 2.2 เกณฑ์สำหรับค่าความไม่แน่นอนของปัจจัยต่าง ๆ

คะแนน	1	2	3	4	5
U1 ความเชื่อถือได้	ข้อมูลถูกตรวจสอบบนพื้นฐานของการวัด	ข้อมูลถูกตรวจสอบบนสมมติฐานบางส่วน หรือข้อมูลไม่ถูกตรวจสอบบนพื้นฐานของการวัด	ข้อมูลไม่ถูกตรวจสอบตามการประมาณที่ผ่านการรับรองบางส่วน	การประมาณที่ผ่านการรับรอง (เช่น โดยผู้เชี่ยวชาญในอุตสาหกรรม) ข้อมูลที่ได้มาจากข้อมูลทางทฤษฎี (ปริมาณสัมพันธ์ เอนทาลปี ฯลฯ)	ไม่ผ่านการรับรอง
	1.00	1.05	1.10	1.20	1.50
U2 ความสมบูรณ์	ตัวแทนข้อมูลจากทุกสถานที่ที่เกี่ยวข้องตามการพิจารณาการตลาดในช่วงเวลาเพียงพอที่เท่ากับความผันผวนปกติ	ตัวแทนข้อมูลจากสถานที่ที่เกี่ยวข้องมากกว่าร้อยละ 50 ตามการพิจารณาการตลาดในช่วงเวลาเพียงพอที่เท่ากับความผันผวนปกติ	ตัวแทนข้อมูลจากบางสถานที่เท่านั้นที่เกี่ยวข้องน้อยกว่าร้อยละ 50 ตามการพิจารณาการตลาด หรือมากกว่าร้อยละ 50 ของสถานที่แต่มาจากช่วงเวลาสั้นกว่า	ตัวแทนข้อมูลจากสถานที่ที่เกี่ยวข้องเพียงแห่งเดียวตามการพิจารณาการตลาด หรือบางสถานที่แต่มาจากช่วงเวลาสั้นกว่า	ไม่ทราบตัวแทนของข้อมูลหรือข้อมูลจากสถานที่จำนวนน้อยและจากช่วงเวลาสั้นกว่า
	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20
U3 ความสัมพันธ์ทางเวลา	น้อยกว่า 3 ปี ของความแตกต่างกับปีที่ศึกษา	น้อยกว่า 6 ปี ของความแตกต่างกับปีที่ศึกษา	น้อยกว่า 10 ปี ของความแตกต่างกับปีที่ศึกษา	น้อยกว่า 15 ปี ของความแตกต่างกับปีที่ศึกษา	ไม่ทราบอายุของข้อมูลหรือมากกว่า 15 ปี ของความแตกต่างกับปีที่ศึกษา
	1.00	1.03	1.10	1.20	1.50

คะแนน	1	2	3	4	5
U4 ความสัมพันธ์ทางภูมิศาสตร์	ข้อมูลจากพื้นที่ภายใต้การศึกษา	ข้อมูลเฉลี่ยจากพื้นที่ขนาดใหญ่กว่าที่มีพื้นที่ภายใต้การศึกษารวมอยู่	ข้อมูลจากพื้นที่ขนาดเล็กกว่าพื้นที่ภายใต้การศึกษาหรือจากพื้นที่ที่คล้ายกัน		ข้อมูลจากพื้นที่ที่ไม่รู้จักหรือแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (เช่น อเมริกาเหนือแทนของตะวันออกกลาง)
	1.00	1.01	1.02		1.10
U5 ความสัมพันธ์ทางเทคโนโลยี	ข้อมูลจากผู้ประกอบการ กระบวนการ และวัสดุภายใต้การศึกษา (การใช้เทคโนโลยีเหมือนกัน)		ข้อมูลจากกระบวนการหรือวัสดุที่เกี่ยวข้องแต่เทคโนโลยีเดียวกัน หรือข้อมูลจากกระบวนการและวัสดุภายใต้การศึกษาแต่มาจากเทคโนโลยีแตกต่างกัน	ข้อมูลจากกระบวนการหรือวัสดุที่เกี่ยวข้องแต่เทคโนโลยีแตกต่างกัน หรือข้อมูลจากกระบวนการในระดับห้องปฏิบัติการและเทคโนโลยีเดียวกัน	ข้อมูลจากกระบวนการหรือวัสดุที่เกี่ยวข้อง แต่อยู่ในระดับห้องปฏิบัติการของเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน
	1.00		1.20	1.50	2.00
U6 ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง	มากกว่า 100 หรือมีการวัดอย่างต่อเนื่อง	มากกว่า 20	มากกว่า 10 หรือผลรวมข้อมูลจากรายงานด้านสิ่งแวดล้อม	มากกว่าหรือเท่ากับ 3	น้อยกว่า 3 หรือไม่ทราบกลุ่มตัวอย่าง
	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20

ที่มา: PRé Consultants (2010)

ตาราง 2.3 ค่าปัจจัยความไม่แน่นอนพื้นฐาน

กลุ่มสารขาเข้า-ขาออก	Ub
ความต้องการของ:	
1. พลังงานความร้อน	1.05
2. พลังงานไฟฟ้า	1.05
3. สินค้ากึ่งสำเร็จรูป	1.05
4. วัสดุทำงาน	1.05
5. บริการขนส่ง	2.00
6. บริการบำบัดน้ำเสีย	1.05
7. โครงสร้างพื้นฐาน	3.00
ทรัพยากร:	
8. การจัดหาพลังงานพื้นฐาน	1.05
9. โลหะและเกลือ	1.05
10. การใช้ประโยชน์ที่ดิน (การประกอบอาชีพ)	1.50
11. การใช้ประโยชน์ที่ดิน (การแปรสภาพ)	2.00
ความร้อนเหลือทิ้ง:	
12. ปล่อยออกสู่อากาศ น้ำ และดิน	1.05
มลพิษปล่อยออกสู่น้ำ:	
13. BOD, COD, DOC, TOC	1.50

กลุ่มสารขาเข้า-ขาออก	Ub
มลพิษปล่อยออกสู่อากาศ:	
21. CO_2	1.05
22. SO_2	1.05
23. การสันดาป: NO_X, NMVOC, CH_4, N_2O และ NH_3	1.50
24. การสันดาป: CO	5.00
25. การสันดาป: สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (TSM)	1.50
26. การสันดาป: ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM10)	2.00
27. การสันดาป: ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5)	3.00
28. การสันดาป: สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (PAH)	3.00
29. การสันดาป: โลหะหนัก	5.00
30. การปล่อยจากกระบวนการ: VOCs	2.00
31. การปล่อยจากกระบวนการ: CO_2	1.05
32. การปล่อยจากกระบวนการ: TSM	1.50
33. การปล่อยจากกระบวนการ: ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM10)	2.00
34. การปล่อยจากกระบวนการ: ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5)	3.00
35. จากการเกษตร: CH_4, NH_3	1.20
36. จากการเกษตร: N_2O, NO_X	1.40

กลุ่มสารขาเข้า-ขาออก	Ub
14. สารประกอบอนินทรีย์ (NH_4, PO_4, NO_3, Cl, Na ฯลฯ)	1.50
15. สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (PAH)	3.00
16. โลหะหนัก	5.00
17. จากการเกษตร: NO_3, PO_4	1.50
18. จากการเกษตร: โลหะหนัก	1.80
19. จากการเกษตร: สารกำจัดศัตรูพืช	1.50
20. สารกัมมันตรังสี	3.00

กลุ่มสารขาเข้า-ขาออก	Ub
37. สารกัมมันตรังสี (เช่น เรดอน-222)	3.00
38. การปล่อยจากกระบวนการ: สารอนินทรีย์อื่น ๆ	1.50
มลพิษปล่อยออกสู่ดิน:	
39. น้ำมันและไฮโดรคาร์บอนรวม	1.50
40. สารกำจัดศัตรูพืช	1.20
41. โลหะหนัก	1.50
42. สารกัมมันตรังสี	3.00

ที่มา: PRé Consultants (2010)

2.7 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis)

การวิเคราะห์ความไว คือ การศึกษาความไวของปัจจัยต่าง ๆ ของโครงการที่มีต่อปัจจัยหลัก มีประโยชน์ช่วยให้นักวิจัยสามารถกำหนดได้ว่าข้อมูลใดเป็นข้อมูลที่สำคัญที่สุด และข้อมูลใดมีความแม่นยำที่สุด โดยทั่วไปจะไม่สามารถกำหนดการประเมินเชิงปริมาณสำหรับค่าตัวแปรซึ่งอยู่ในสมการเป้าหมายได้ทุกค่า การใช้สมมติฐานจึงจำเป็นอย่างยิ่งในการช่วยให้เกิดรูปแบบปัญหาเพื่อการตัดสินใจ ซึ่งมีประโยชน์และเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ อาจจัดทำโดยการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ขึ้น และตั้งโจทย์ตามสมมติฐานที่มีความเป็นไปได้ จากนั้นให้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยให้แตกต่างกันไปในแต่ละสถานการณ์อย่างเป็นระบบ โดยอาจใช้การจำลอง เช่น Monte Carlo simulations มาช่วยวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยในแบบจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้น ตัวอย่างของการตั้งสมมติฐาน วิธีการ หรือข้อมูล ที่อาจมีผลต่อการวิเคราะห์ความไว ได้แก่ กฎการปันส่วน เกณฑ์ในการตัดสินใจละทิ้งข้อมูล (Cut-off) การกำหนดขอบเขตและระบบผลิตภัณฑ์ การตั้งสมมติฐานและการตัดสินข้อมูล การทำ Classification การทำ Characterization การเทียบหน่วย การให้น้ำหนักความสำคัญ และคุณภาพของข้อมูล เป็นต้น

ขั้นตอนต่อไปนี้เป็นขั้นตอนที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ความไว

1. พิจารณาว่าตัวแปรใดที่น่าสนใจและมีผลต่อการตัดสินใจ
2. เลือกขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรเหล่านั้น
3. เลือกวิธีการวัด
4. คำนวณหาผลลัพธ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงของแต่ละตัวแปร
5. แปรความจากการวิเคราะห์ความไว โดยวิธีเขียนกราฟระหว่างตัวแปรกับค่าที่วัดได้