ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248528

การประเมินก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

วรุฒ รักสกุลกานต์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

b00253321

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248528

การประเมินก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

วรุณ รักสกุลกานต์

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

การประเมินก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

วรุณ รักสกุลกานต์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
ศ.ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

.....กรรมการ
ผศ.ดร.เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล

.....กรรมการ
อ.ดร.ณัฐนี วรยศ

.....กรรมการ
ผศ.ดร.หาญพล พึ่งรัศมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
ผศ.ดร.เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล

14 ตุลาคม 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การประเมินก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

ผู้เขียน นายวรุณ รักสกุลกานต์

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมพลังงาน)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล

บทคัดย่อ

248528

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาบัญชีรายการของส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ และประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศไทยและทั่วโลก อีกทั้งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานของผลิตภัณฑ์หลายชนิดโดยเฉพาะเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิต หน่วยหน้าที่ของการศึกษาคือ ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 1 ชิ้น ขนาด 2.5 นิ้ว อายุการใช้งาน 4 ปี ใช้เป็นอุปกรณ์หลักในคอมพิวเตอร์แบบพกพา ขอบเขตการศึกษาครอบคลุมทั้งหมด 6 ขั้นตอน ได้แก่ การจัดหาวัตถุดิบ การผลิตส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ การประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ การขนส่ง การใช้งาน และการกำจัดของเสีย พิจารณาทั้งหมด 13 ส่วนประกอบกอบสำคัญ ได้แก่ Breather filter, Crash stop, Glass disk substrate, Head stack arm, Head stack flex circuit, Latch, Motor base, Printed Circuit Board Assembly (PCBA), Ramp, Recirculation filter, Suspension, Top cover และ VCM Coil

ผลการศึกษาพบว่าตลอดวัฏจักรชีวิตของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งสิ้น 15.64 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ขั้นตอนการใช้งานก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 70.33 ซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้า รองลงมาเป็นการจัดหาวัตถุดิบการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ การผลิตส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ การขนส่ง และการกำจัดของเสีย ตามลำดับ ในส่วนของการเปรียบเทียบเฉพาะส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟพบว่า PCBA เป็นส่วนประกอบที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด 2.18 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าคิดเป็นร้อยละ 49.77 ของส่วนประกอบทั้งหมด การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของบัญชีรายการพบว่า

248528

ฐานข้อมูลของ Head stack arm มีความไม่แน่นอนของข้อมูลหรือความคลาดเคลื่อนที่มาจากการเก็บรวบรวมข้อมูลมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 11.90 ในส่วนของการวิเคราะห์ความไวเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณก๊าซเรือนกระจกของส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟพบว่า ปริมาณการใช้วัตถุดิบหลักของ PCBA มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตพบว่า อายุการใช้งานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด แนวทางการลดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมจึงควรมุ่งเน้นไปที่การวิจัยและพัฒนาออกแบบให้ระบบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีอัตราการบริโภคพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ การใช้พื้นที่ของแผ่นวงจรพิมพ์ให้น้อยที่สุดหรือการเลือกใช้วัสดุอื่นที่มีผลกระทบน้อยกว่ามาทดแทน เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป

Thesis Title	Life Cycle Greenhouse Gas Assessment of Hard Disk Drive
Author	Mr. Varoon Raksakulkarn
Degree	Master of Engineering (Energy Engineering)
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Sate Sampattagul

Abstract

248528

This study aims to develop a life cycle inventory of hard disk drive (HDD) components and assess the greenhouse gas (GHG) emissions associated with them. HDD is a product used widely around the world, including Thailand. It is mainly used as a basic component for many types of products, especially electrical appliances and electronics.

The functional unit for a Life Cycle Assessment (LCA) conducted in this study is the 2.5-inch HDD used as a main device in laptop computer, which has a life span of 4 years. The system boundary is defined to include the entire life cycle of the product, including pre-manufacturing (raw material extraction), manufacturing, assembly, transportation, use and disposal. A typical HDDs employed in this study comprises of 13 main components: a Breather filter, Crash stop, Glass disk substrate, Head stack arm, Head stack flex circuit, Latch, Motor base, Printed circuit board assembly (PCBA), Ramp; Recirculation filter, Suspension, Top cover and VCM Coil.

The results indicate that greenhouse gas emission over the entire life of the HDD is 15.64 kg CO_2-eq. The "use" phase of this device is one of the largest contributors to GHG emissions (70.33%) because consumed fossil fuel-intensive electricity to drive the mechanism of the HDD. Comparing between all 13 components of HDD, PCBA contributes the most to greenhouse gas emissions (2.18 kg CO_2-eq), which represents 49.77 percent of all components.

248528

Further, the uncertainty and sensitivity analyses of life cycle inventory of HDD components were also conducted. It was found that the Head stack arm has the highest uncertainty in terms of the calculation of GHG emissions, at 11.90 percent. The sensitivity analysis, which can be used to identify factors that influence the amount of greenhouse gases from HDD components, showed that the use of PCBA direct materials were the most sensitive to change. Of factors that affect the amount of greenhouse gases over the life cycle, the lifespan of the HDD was sensitive to most changes. Therefore, this study suggests that the possible ways to improve the environmental burden of HDD should focus on research and development of the product with better electricity consumption efficiency. Moreover, the use of minimum printed circuit board areas or other materials that have less environmental impact has a potential to reduce greenhouse gases, manufacture green products and contribute to sustainable development.

สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญตาราง	ฎ
สารบาญภาพ	ด
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ถ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	9
1.4 ขอบเขตการศึกษาวิจัย	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	10
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	11
2.1 ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ (Hard Disk Drive: HDD)	11
2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	11
2.1.2 อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	11
2.1.3 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	13
2.1.4 หลักการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	17
2.2 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)	18
2.2.1 ที่มาของการประเมินวัฏจักรชีวิต	18
2.2.2 ความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิต	18
2.2.3 ขั้นตอนในการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต	19
2.3 ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs)	22
2.3.1 ข้อมูลทั่วไปของก๊าซเรือนกระจก	22

2.3.2 ชนิดของก๊าซเรือนกระจก 22
2.3.3 ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) 22
2.3.4 การคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์ 23
2.4 สมดุลมวลและสมดุลพลังงาน (Mass and Energy balance) 25
2.4.1 สมดุลมวล 25
2.4.2 สมดุลพลังงาน 25
2.5 การปันส่วน (Allocation) 25
2.6 ความไม่แน่นอนของข้อมูล (Data uncertainties) 26
2.6.1 การประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูล 26
2.6.2 การจำลองแบบปัญหาด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) 28
2.7 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis) 34

บทที่ 3 วิธีการศึกษาวิจัย 35
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 35
3.2 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวิจัย 35
3.3 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการประเมินก๊าซเรือนกระจก
ตลอดวัฏจักรชีวิตของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 36
3.3.1 กำหนดวัตถุประสงค์หรือเป้าหมายในการประเมินวัฏจักรชีวิต 36
3.3.2 กำหนดขอบเขตการศึกษา 37
3.4 การทำบัญชีรายการ (Inventory) 39
3.4.1 ขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ 40
3.4.2 ขั้นตอนการผลิตส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 42
3.4.3 ขั้นตอนการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 47
3.4.4 ขั้นตอนการขนส่ง 47
3.4.5 ขั้นตอนการใช้งาน 50
3.4.6 ขั้นตอนการกำจัดของเสีย 51
3.5 ขั้นตอนการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม (Impact assessment) 51
3.6 แนวทางและวิธีการวิเคราะห์ผล 52

บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย 53
4.1 การวิเคราะห์บัญชีรายการ (Life Cycle Inventory Analysis) 53
4.1.1 บัญชีรายการในขั้นตอนการจัดหาวัตถุดิบ 54
4.1.2 บัญชีรายการในขั้นตอนการผลิตส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 61
4.1.3 บัญชีรายการในขั้นตอนการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 74
4.1.4 บัญชีรายการในขั้นตอนการขนส่ง 75
4.1.5 บัญชีรายการในขั้นตอนการใช้งาน 76
4.1.6 บัญชีรายการในขั้นตอนการกำจัดขยะและของเสีย 77
4.2 การประเมินก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 78
4.2.1 การประเมินก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการจัดหาวัตถุดิบ 78
4.2.2 การประเมินก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการผลิตส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 79
4.2.3 การประเมินก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 80
4.2.4 การประเมินก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการขนส่ง 81
4.2.5 การประเมินก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการใช้งาน 82
4.2.6 การประเมินก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการกำจัดขยะและของเสีย 83
4.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณก๊าซเรือนกระจกของส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 86
4.4 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของข้อมูล 88
4.5 การวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณก๊าซเรือนกระจกกับฐานข้อมูลต่างประเทศ 89
4.6 การวิเคราะห์ความไว 90
4.6.1 การวิเคราะห์ความไวของส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 90
4.6.2 การวิเคราะห์ความไวของวัฏจักรชีวิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 91
4.7 แนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 92
4.7.1 PCBA 92
4.7.2 Motor base 93
4.7.3 Glass disk substrate 93
4.8 แนวทางในการลดก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 94

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษาวิจัย 96
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 96
5.1.1 สรุปผลการจัดทำบัญชีรายการตลอดวัฏจักรชีวิตของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 96
5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 96
5.2 สรุปและวิจารณ์ผลการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซเรือนกระจกของส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 97
5.3 สรุปและวิจารณ์ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของข้อมูล 98
5.4 สรุปและวิจารณ์ผลการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซเรือนกระจกกับฐานข้อมูลต่างประเทศ 98
5.5 สรุปและวิจารณ์ผลการวิเคราะห์ความไว 98
5.6 ข้อเสนอแนะงานวิจัย 99

บรรณานุกรม 100

ภาคผนวก 103
ภาคผนวก ก การคำนวณข้อมูลบัญชีรายการและการประเมินก๊าซเรือนกระจก 104
ภาคผนวก ข ข้อมูลการคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ 116
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของข้อมูล 171
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ความไวของข้อมูล 197
ภาคผนวก จ แบบสำรวจเก็บข้อมูลและข้อมูลการคำนวณ 200
ภาคผนวก ฉ บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ 213

ประวัติผู้เขียน 221

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	ส่วนประกอบและวัสดุของ Hard Disk Drive	3
1.2	วัสดุส่วนประกอบและน้ำหนักของ Hard Disk Drive	6
2.1	ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อนของก๊าซเรือนกระจกในช่วงเวลา 100 ปี	23
2.2	เกณฑ์สำหรับค่าความไม่แน่นอนของปัจจัยต่าง ๆ	30
2.3	ค่าปัจจัยความไม่แน่นอนพื้นฐาน	32
3.1	แหล่งที่มาของข้อมูลการใช้วัตถุดิบในการผลิตส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	40
3.2	การปันส่วนของข้อมูลการใช้วัตถุดิบในการผลิตส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	42
3.3	แหล่งที่มาของข้อมูลการขนส่ง	47
3.4	การขนส่งส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมายังโรงงานประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	48
3.5	การขนส่งฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมายังโรงงานประกอบคอมพิวเตอร์แบบพกพา	49
3.6	การขนส่งคอมพิวเตอร์แบบพกพามายังผู้ใช้งาน	50
3.7	การขนส่งขยะจากโรงงานและฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ใช้แล้วมายังแหล่งกำจัด	50
4.1	วัตถุดิบในการผลิต Breather filter	54
4.2	วัตถุดิบในการผลิต Crash stop	54
4.3	วัตถุดิบในการผลิต Glass disk substrate	54
4.4	วัตถุดิบในการผลิต Head stack arm	55
4.5	วัตถุดิบในการผลิต Head stack flex circuit	55
4.6	วัตถุดิบในการผลิต Latch	56
4.7	วัตถุดิบในการผลิต Motor base	56
4.8	วัตถุดิบในการผลิต PCBA	57
4.9	วัตถุดิบในการผลิต Ramp	58
4.10	วัตถุดิบในการผลิต Recirculation filter	58
4.11	วัตถุดิบในการผลิต Suspension	59
4.12	วัตถุดิบในการผลิต Top cover	59
4.13	วัตถุดิบในการผลิต VCM Coil	60

4.14	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Crash stop	61
4.15	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Glass disk substrate	63
4.16	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Head stack flex circuit	65
4.17	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Latch	65
4.18	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Motor base	68
4.19	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต PCBA	68
4.20	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Ramp	70
4.21	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Suspension	71
4.22	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Top cover	73
4.23	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต VCM Coil	73
4.24	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในขั้นตอนการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	75
4.25	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในขั้นตอนการขนส่ง (ขาไป)	75
4.26	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในขั้นตอนการขนส่ง (ขากลับ)	76
4.27	บัญชีรายการสารเข้า-ออกในขั้นตอนการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	77
4.28	ขยะและของเสียจากกระบวนการผลิตและฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่หมดอายุการใช้งาน	77
4.29	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการจัดหาวัตถุดิบ	78
4.30	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการผลิตส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	79
4.31	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	81
4.32	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการขนส่ง (ขาไป)	81
4.33	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการขนส่ง (ขากลับ)	82
4.34	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	83
4.35	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการกำจัดขยะและของเสียจากโรงงาน	83
4.36	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการกำจัดฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่ใช้งานแล้ว	84
4.37	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการกำจัดขยะและของเสีย	85
4.38	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกแยกตามขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	85
4.39	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกแยกตามส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	86
ก1	ข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณมลพิษทางอากาศ	105
ก2	ข้อมูลผลิตภัณฑ์ของโรงงานผลิต VCM Coil	108
ก3	ข้อมูลการคำนวณการสมดุลมวลของส่วนประกอบ VCM Coil	109

ก4	การคำนวณหาปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการจัดหาวัตถุดิบในการผลิต Ramp	110
ก5	การคำนวณหาปริมาณก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิต Ramp	111
ก6	การคำนวณหาปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	111
ก7	การคำนวณหาปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการขนส่ง Ramp	113
ก8	รายละเอียดของขั้นตอนการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	114
ก9	การคำนวณหาปริมาณก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	114
ก10	การคำนวณหาปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากขยะและของเสียในการผลิต Ramp	115
ข1	รายละเอียดทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต Breather filter	117
ข2	รายละเอียดทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต Crash stop	117
ข3	รายละเอียดทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต Glass disk substrate	119
ข4	รายละเอียดทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต Head stack arm	121
ข5	รายละเอียดทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต Head stack flex circuit	121
ข6	รายละเอียดทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต Latch	123
ข7	รายละเอียดทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต Motor base	125
ข8	รายละเอียดทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต PCBA	128
ข9	รายละเอียดทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต Ramp	131
ข10	รายละเอียดทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต Recirculation filter	132
ข11	รายละเอียดทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต Suspension	132
ข12	รายละเอียดทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต Top cover	134
ข13	รายละเอียดทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต VCM Coil	136
ข14	รายละเอียดสารขาเข้าและสารขาออกในกระบวนการผลิต Crash stop	139
ข15	รายละเอียดสารขาเข้าและสารขาออกในกระบวนการผลิต Glass disk substrate	140
ข16	รายละเอียดสารขาเข้าและสารขาออกในกระบวนการผลิต Head stack flex circuit	142
ข17	รายละเอียดสารขาเข้าและสารขาออกในกระบวนการผลิต Latch	143
ข18	รายละเอียดสารขาเข้าและสารขาออกในกระบวนการผลิต Motor base	144
ข19	รายละเอียดสารขาเข้าและสารขาออกในกระบวนการผลิต PCBA	145
ข20	รายละเอียดสารขาเข้าและสารขาออกในกระบวนการผลิต Ramp	146
ข21	รายละเอียดสารขาเข้าและสารขาออกในกระบวนการผลิต Suspension	147
ข22	รายละเอียดสารขาเข้าและสารขาออกในกระบวนการผลิต Top cover	148

ข23	รายละเอียดสารขาเข้าและสารขาออกในกระบวนการผลิต VCM Coil	149
ข24	ค่าปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการขนส่ง (ขาไป)	151
ข25	ค่าปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการขนส่ง (ขากลับ)	151
ข26	น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของการขนส่ง	152
ข27	รายละเอียดการขนส่งวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต Crash stop	153
ข28	รายละเอียดการขนส่งวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต Head stack arm	154
ข29	รายละเอียดการขนส่งวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต Head stack flex circuit	155
ข30	รายละเอียดการขนส่งวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต Latch	157
ข31	รายละเอียดการขนส่งวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต Motor base	158
ข32	รายละเอียดการขนส่งวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต PCBA	162
ข33	รายละเอียดการขนส่งวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต Ramp	164
ข34	รายละเอียดการขนส่งวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต Suspension	165
ข35	รายละเอียดการขนส่งวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต Top cover	167
ข36	รายละเอียดการขนส่งวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต VCM Coil	169
ค1	ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลของ Breather filter	174
ค2	ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลของ Crash stop	174
ค3	ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลของ Glass disk substrate	176
ค4	ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลของ Head stack arm	178
ค5	ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลของ Head stack flex circuit	178
ค6	ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลของ Latch	180
ค7	ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลของ Motor base	182
ค8	ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลของ PCBA	184
ค9	ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลของ Ramp	187
ค10	ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลของ Recirculation filter	188
ค11	ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลของ Suspension	188
ค12	ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลของ Top cover	190
ค13	ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลของ VCM Coil	192
ค14	ผลการวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนรวมของฐานข้อมูลส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	195
ค15	ผลการวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนรวมของฐานข้อมูลในงานวิจัยนี้และ Ecoinvent	196

ง1	ผลการวิเคราะห์ความไวของส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	198
ง2	ผลการวิเคราะห์ความไวของวัฏจักรชีวิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	199
จ1	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่นของอากาศ	205
จ2	สถิติการส่งออกฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟของประเทศไทย	206
จ3	สถิติการนำเข้าคอมพิวเตอร์แบบพกพาของประเทศไทย	209

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
1.1	แบบจำลองวัฏจักรชีวิตของเครื่องคอมพิวเตอร์	3
1.2	โครงสร้างการประเมินวัฏจักรชีวิตของเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล	4
1.3	ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของเครื่องคอมพิวเตอร์	4
1.4	แผนผังการแยกชิ้นส่วนของ Hard Disk Drive	5
1.5	ค่า EI ของส่วนประกอบ Hard Disk Drive	6
1.6	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดวัฏจักรชีวิตของคอมพิวเตอร์แบบพกพาขนาดเล็ก	7
1.7	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอมพิวเตอร์ (วิธี Eco-Indicator 99)	8
1.8	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการผลิตคอมพิวเตอร์แยกตามส่วนประกอบ (ไม่รวมจอ)	8
2.1	ห่วงโซ่มูลค่าของอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	12
2.2	ส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	16
2.3	ลักษณะของ Track และ Sector บนแผ่นบันทึกข้อมูล	17
2.4	ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ ตามหลัก ISO 14040	19
2.5	แผนภูมิแสดงขั้นตอนทั่วไปที่ใช้ในการคัดเลือกข้อมูล	21
2.6	รูปแบบการแจกแจง (ก) แบบปกติ (ข) แบบล็อกปกติ	27
2.7	ความน่าจะเป็นสะสมในการโยนเหรียญออกด้านหัว	28
3.1	เครื่องชั่งน้ำหนักความแม่นยำสูง	36
3.2	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล	36
3.3	เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้า	36
3.4	ระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก	36
3.5	ขอบเขตของระบบในการศึกษาการประเมินก๊าซเรือนกระจกของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	38
3.6	ตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการศึกษาวิจัย	39
3.7	ช่วงเวลาการเก็บข้อมูลของส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	41
3.8	แผนผังกระบวนการผลิต Crash stop	43
3.9	แผนผังกระบวนการผลิต Glass disk substrate	43
3.10	แผนผังกระบวนการผลิต Head stack flex circuit	43

3.11	แผนผังกระบวนการผลิต Latch	44
3.12	แผนผังกระบวนการผลิต Motor base	44
3.13	แผนผังกระบวนการผลิต PCBA	45
3.14	แผนผังกระบวนการผลิต Ramp	45
3.15	แผนผังกระบวนการผลิต Suspension	46
3.16	แผนผังกระบวนการผลิต Top cover	46
3.17	แผนผังกระบวนการผลิต VCM Coil	46
4.1	รายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Crash stop	62
4.2	รายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Glass disk substrate	63
4.3	รายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Head stack flex circuit	64
4.4	รายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Latch	66
4.5	รายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Motor base	67
4.6	รายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต PCBA	69
4.7	รายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Ramp	70
4.8	รายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Suspension	71
4.9	รายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต Top cover	72
4.10	รายการสารเข้า-ออกในกระบวนการผลิต VCM Coil	74
4.11	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากขั้นตอนการจัดหาวัตถุดิบ	79
4.12	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	80
4.13	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากขั้นตอนการขนส่ง	82
4.14	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกแยกตามขั้นตอนตลอดวัฏจักรชีวิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	86
4.15	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกแยกตามส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	87
4.16	ความไม่แน่นอนของปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	88
4.17	การเปรียบเทียบปริมาณก๊าซเรือนกระจกกับฐานข้อมูลต่างประเทศ	89
4.18	การวิเคราะห์ความไวของการเปลี่ยนแปลงปริมาณวัตถุดิบหลักในการผลิต	90
4.19	การวิเคราะห์ความไวของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรสำคัญของวัฏจักรชีวิต	91
4.20	สัดส่วนปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นของ PCBA	92
4.21	สัดส่วนปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นของ Motor base	93
4.22	สัดส่วนปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นของ Glass disk substrate	94

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
APET	Amorphous Polyethylene Terephthalate
BOD	Biological Oxygen Demand
BOM	Bill of Material
BOPP	Biaxially Oriented Polypropylene
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
CAS No.	Chemical Abstracts Service Registry Number
COD	Chemical Oxygen Demand
DOC	Dissolved Organic Carbon
EF	Emission Factor
EPR	Ethylene Propylene Rubber
EVA	Ethylene Vinyl Acetate
GHG	Greenhouse Gas
GWP	Global Warming Potential
HDA	Head Disk Assembly
HDD	Hard Disk Drive
HDPE	High-density Polyethylene
HSA	Head Stack Assembly
IPA	Isopropyl Alcohol
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LDPE	Low-density Polyethylene
LLDPE	Linear Low-density Polyethylene
MSDS	Material Safety Data Sheets

สัญลักษณ์	ความหมาย
NMVOC	Non-Methane Volatile Organic Compounds
PACL	Poly Aluminium Chloride
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbon
PBT	Polybutylene Terephthalate
PC	Polycarbonate
PCBA	Printed Circuit Board Assembly
PET	Polyethylene Terephthalate
PM10	Particulates matter < 10 microns
PM2.5	Particulates matter < 2.5 microns
PP	Polypropylene
PPS	Polyphenylene Sulfide
PTFE	Polytetrafluoroethylene
PU	Polyurethane
PVC	Polyvinylchloride
SS	Suspended Solid
TDS	Total Dissolved Solids
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen
TOC	Total Organic Carbon
TSM	Total Suspended Matter
TSP	Total Suspended Particulate
TSS	Total Suspended Solids
VOCs	Volatile Organic Compounds